Habemorum maiorum ducestiam re me cre cia stiam perem maio ide condie cam si consula re dici pro unte in sus res hica tua denatum nium terum, pes id consulvirte, nonditea cotilium moratia

Università degli Studi "G. d'Annunzo" Cheti - Pescara

University of Study "G. d'Annunzio" Chieti - Pescara

Scuola Superiore G. d'Annunzio

Dottorato di Ricerca in Culture del Progetto Creatività, Patrimonio, Ambiente
PhD Course in Design Cultures Creativity, Heritage, Environment

Coordinatore
Coordinator
Prof. Maurizio Unali

Collegio dei Docenti
Teaching staff Proff.
Massimo Angrilli

Federico Bilò

Sebastiano Carbonara

Stefano D'Avino

Giuseppe Di Bucchianico

Filomena Adele Fiadino

Raffaele Giannantonio

Michele Lepore

Antonio Marano

Lorenzo Pignatti

Donatella Radogna

Lucia Serafini

Claudio Varagnoli

CANDIDATA **ELENA DI GIUSEPPE**

XXXVIII CICLO

DATA **28/07/2026**

TUTOR **PROF. ANTONIO BASTI**

CO-TUTOR **PROF. MASSIMO ANGRILLI**

CO-TUTOR **PROF. FILIPPO ANGELUCCI**

TESI DI DOTTORATO

COMUNITÀ ENERGETICHE RINNOVABILI E TERRITORI FRAGILI

COMPATIBILITÀ AMBIENTALE E PAESAGGISTICA DEI PROCESSI DI TRANSIZIONE SOSTENIBILE

VOLUME I



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI "G.D'ANNUNZIO" CHIETI PESCARA

DOTTORATO **CULTURE DEL PROGETTO: CREATIVITÀ, PATRIMONIO, AMBIENTE**

A te, che sei stato fondamento senza mai essere limite,
radice che mi ha dato forza senza trattenermi,
orizzonte che mi ha insegnato a guardare lontano.

A te, che hai camminato al mio fianco tra sfide e conquiste,
trasformando ogni traguardo in una storia da costruire insieme.

Perché l'energia più preziosa
nasce dai legami che scegliamo di custodire.

Desidero rivolgere il mio più sincero ringraziamento al mio tutor, Prof. Antonio Basti, per avermi accompagnata durante il percorso dottorale con competenza, disponibilità e costante attenzione. La sua guida scientifica, il confronto continuo e la capacità di stimolare nuove domande e prospettive hanno rappresentato un riferimento fondamentale per lo sviluppo di questa ricerca e per la mia crescita come ricercatrice.

Ringrazio il Prof. Basti non solo per il contributo scientifico offerto a questo lavoro, ma anche per il metodo trasmesso, per la fiducia accordatami e per aver sempre creduto nelle mie capacità, sostenendomi nel percorso di crescita scientifica e personale. Il rigore, la passione e l'attenzione verso il dialogo hanno costituito per me un esempio prezioso, che porterò con me nel mio futuro percorso professionale.

Un ringraziamento particolare va al mio cotutor, Prof. Massimo Angrilli, per il supporto scientifico, la disponibilità al confronto e il contributo fornito nell'ambito degli studi sul paesaggio. Le sue osservazioni e i suoi suggerimenti hanno contribuito ad arricchire questa ricerca, offrendo importanti occasioni di approfondimento e riflessione.

Desidero inoltre ringraziare il Prof. Filippo Angelucci per il contributo apportato allo sviluppo delle tematiche relative al paesaggio energetico e per gli stimoli offerti, che hanno contribuito ad ampliare le prospettive di questo lavoro.

Infine, rivolgo il mio ringraziamento più profondo alla mia famiglia, presenza costante e punto di riferimento lungo questo percorso. Grazie per la pazienza, il sostegno e la fiducia con cui avete accompagnato ogni fase di questi anni. Questo traguardo porta con sé anche il vostro affetto e tutto ciò che mi avete insegnato.
Un ringraziamento speciale va a te, Umberto, per aver attraversato con me questi anni, condividendone la complessità e la bellezza. Per la forza silenziosa con cui hai accompagnato ogni passo, lasciandomi libera di crescere e scegliendo ogni giorno di esserci. Questo traguardo porta con sé anche una parte di te.

A tutte le persone che, in modi diversi, hanno contribuito alla realizzazione di questo percorso va la mia più sincera gratitudine.

ABSTRACT

La transizione energetica rappresenta una delle principali sfide della pianificazione territoriale contemporanea, imponendo la necessità di conciliare gli obiettivi di decarbonizzazione, sicurezza energetica e incremento della produzione da Fonti Energetiche Rinnovabili (FER) con la tutela del paesaggio, dell'ambiente e dei territori caratterizzati da maggiore vulnerabilità. In tale scenario, le CER costituiscono strumenti innovativi per promuovere modelli energetici basati sulla generazione distribuita, sulla condivisione dell'energia e sulla produzione di valore territoriale. Tuttavia, la loro diffusione evidenzia criticità legate alla frammentazione dei processi decisionali, alla limitata integrazione tra pianificazione energetica, urbanistica, ambientale e paesaggistica, alla disomogeneità dei procedimenti autorizzativi.

La ricerca analizza il rapporto tra CER, territori fragili e compatibilità ambientale e paesaggistica, con l'obiettivo di definire un framework metodologico integrato capace di supportare la pianificazione, progettazione e gestione delle CER attraverso l'integrazione tra conoscenza territoriale, innovazione digitale, governance multilivello e partecipazione degli attori locali. L'ipotesi alla base dello studio è che la qualità della transizione energetica non dipenda esclusivamente dall'incremento della capacità installata di FER, ma dalla capacità di costruire processi decisionali coerenti, e territorialmente contestualizzati, nei quali la produzione energetica sia interpretata come parte integrante di un progetto complessivo di sviluppo sostenibile.

La ricerca adotta un approccio transdisciplinare e multi-scala energia–ambiente–paesaggio, integrando analisi normativa, revisione della letteratura scientifica internazionale, studio comparato di esperienze europee ed extraeuropee, analisi critica dei sistemi autorizzativi e il paradigma metodologico del *Researching By Design*. Il progetto viene assunto come strumento scientifico di conoscenza e trasformazione del territorio, capace di integrare dati, scenari energetici, valutazioni ambientali e processi partecipativi attraverso modelli di *Living Lab* e programmi di *Capacity Building*.

Lo studio comparativo dei modelli adottati in Austria, Italia, Francia e Spagna, integrato da un'analisi di confronto con le esperienze di governance energetica sviluppate nel Regno Unito, evidenzia come i sistemi maggiormente efficaci nella promozione delle CER siano caratterizzati non esclusivamente da un quadro normativo favorevole, ma dalla capacità di integrare politiche energetiche, pianificazione

territoriale, governance multilivello, processi partecipativi e infrastrutture digitali. Il caso italiano, pur mostrando una significativa evoluzione normativa e una progressiva accelerazione dei processi autorizzativi per gli impianti FER, presenta ancora criticità dovute alla frammentazione istituzionale, alla difficoltà di coordinamento tra strumenti energetici, urbanistici, ambientali e paesaggistici.

L'analisi dei principali regimi autorizzativi delle FER (Attività Libera, Procedura Abilitativa Semplificata, Autorizzazione Unica) evidenzia un modello prevalentemente orientato alla semplificazione procedurale, nel quale risulta necessario rafforzare la qualità progettuale, la valutazione degli impatti cumulativi e la coerenza territoriale degli interventi. Parallelamente, la ricerca approfondisce il rapporto tra disciplina FER, digitalizzazione dei processi decisionali e principi introdotti dal Codice dei Contratti Pubblici (D.Lgs. 36/2023), evidenziando il disallineamento tra gli obiettivi di interoperabilità, qualità progettuale e gestione informativa previsti dal quadro normativo e le modalità operative applicate nella realizzazione delle infrastrutture energetiche.

La ricerca individua quattro principali categorie di criticità che condizionano l'efficacia della transizione energetica territoriale: *gap* tecnologici, legati alla limitata diffusione di infrastrutture digitali interoperabili basate su *Geographic Information System* (GIS), *Building Information Modeling* (BIM), *Common Data Environment* (CDE) e *Digital Twin*; *gap* normativi, derivanti dalla discontinuità tra discipline energetiche, ambientali, paesaggistiche e urbanistiche; *gap* istituzionali, connessi alla frammentazione amministrativa e alla difficoltà di integrazione tra sistemi informativi pubblici; *gap* sociali, relativi alla partecipazione delle comunità, alla diffusione delle competenze e alla necessità di consolidare processi di collaborazione tra cittadini, istituzioni e *stakeholder*.

A partire da tali evidenze viene proposto un framework metodologico integrato basato sui principi del *Project Cycle Management* (PCM), del ciclo di miglioramento continuo *Plan–Do–Check–Act* (PDCA), della governance multilivello e degli approcci partecipativi. Il framework è articolato in sei moduli funzionali (M1–M6), sviluppati secondo una sequenza metodologica progressiva: M1 – Analisi territoriale e costruzione del quadro conoscitivo tramite integrazione di dati GIS, energetici e territoriali; M2 – Integrazione territoriale e definizione degli scenari attraverso l'analisi di vincoli, opportunità e configurazioni multi-scala; M3 – Integrazione paesaggistica e valutazione percettiva

mediante strumenti digitali per l'analisi degli impatti visivi e culturali; M4 – Valutazione ambientale e multicriteriale degli scenari progettuali; M5 – Governance multilivello e supporto ai processi decisionali, autorizzativi e partecipativi; M6 – Applicazione progettuale integrata e implementazione operativa nei contesti locali, con verifica della conformità normativa e procedurale. Un elemento qualificante del framework riguarda il passaggio dalla definizione degli scenari energetici alla loro traduzione negli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica. Attraverso l'integrazione tra analisi spaziale, valutazione multicriteriale e strumenti normativi-operativi, la ricerca introduce un processo capace di trasformare gli scenari FER e CER in criteri localizzativi, indirizzi progettuali e condizioni di compatibilità applicabili alla scala territoriale. In tale prospettiva, le Norme Tecniche di Attuazione (NTA) assumono il ruolo di dispositivo regolativo di connessione tra conoscenza territoriale, obiettivi energetici e qualità della trasformazione, consentendo di orientare la localizzazione degli interventi attraverso requisiti di sostenibilità, tutela paesaggistica e coerenza con le caratteristiche dei contesti locali.

Il modello integra un'infrastruttura digitale interoperabile GIS–BIM–CDE–*Digital Twin* finalizzata alla costruzione di ambienti informativi condivisi, alla simulazione degli scenari progettuali, alla valutazione multicriteriale e al monitoraggio dei risultati attraverso sistemi di indicatori e *Key Performance Indicators* (KPI). Tale infrastruttura costituisce un sistema decisionale a supporto della governance energetica territoriale, favorendo una maggiore trasparenza, tracciabilità e capacità adattiva dei processi decisionali. In particolare, l'integrazione tra GIS, *Digital Twin* e strumenti normativi consente di costruire una zonizzazione energetica multi-scala, nella quale le caratteristiche fisiche, ambientali, paesaggistiche e insediative del territorio vengono correlate agli scenari di sviluppo energetico, definendo livelli differenziati di opportunità, compatibilità e prescrizione. Tale approccio consente di superare una logica esclusivamente autorizzativa e di introdurre una pianificazione preventiva della transizione energetica, nella quale la qualità del progetto viene valutata già nelle fasi iniziali del processo decisionale.

La ricerca definisce inoltre un sistema di criteri e requisiti per la valutazione della qualità delle trasformazioni energetiche territoriali, comprendente compatibilità territoriale, integrità paesaggistica e culturale, autosufficienza e resilienza energetica, verificabilità dei risultati e adattabilità del modello. Attraverso tale impostazione, il

framework supera una visione esclusivamente impiantistica della transizione energetica, proponendo un approccio sistemico nel quale energia, ambiente, paesaggio e sviluppo territoriale vengono interpretati come componenti interdipendenti.

L'originalità scientifica della ricerca risiede nella definizione di un modello metodologico capace di ricomporre la frammentazione che caratterizza gli attuali processi di pianificazione delle FER, integrando dimensioni tecnologiche, ambientali, istituzionali e sociali all'interno di un unico sistema operativo. Il framework è concepito come modello aperto, replicabile e trasferibile, destinato a essere validato attraverso future applicazioni pilota e casi studio sperimentali in differenti contesti territoriali e amministrativi.

Un elemento qualificante riguarda la valorizzazione dei risultati attraverso il trasferimento tecnologico. Il framework costituisce infatti la base metodologica per la definizione dello *spin-off* universitario *Laboratory for Sustainable Energy Transition* (LSET), concepito come struttura di connessione tra università, enti pubblici, imprese e comunità locali. Lo *spin-off* rappresenta un dispositivo di terza missione finalizzato alla trasformazione della conoscenza scientifica in strumenti applicativi attraverso ricerca industriale, sviluppo di piattaforme digitali, supporto alla pianificazione energetica territoriale, formazione e *Capacity Building*.

Nel complesso, la tesi propone una lettura delle CER come dispositivi territoriali complessi nei quali convergono dimensioni energetiche, ambientali, paesaggistiche, sociali, istituzionali e tecnologiche. La ricerca sostiene che una transizione energetica sostenibile richieda non soltanto nuove infrastrutture energetiche, ma nuovi modelli di conoscenza, progettazione e governance capaci di integrare innovazione digitale, qualità del progetto, partecipazione e tutela dei territori fragili.

SOMMARIO

ABSTRACT

SOMMARIO

17 **INTRODUZIONE**

1 | PRIMA PARTE

30 **STATO DELL'ARTE**

31 1.1 CER E FONTI ENERGETICHE RINNOVABILI: STATO DELL'ARTE COMPARATO

36 1.2 COMUNITÀ ENERGETICHE RINNOVABILI (CER): SCENARI IN TRANSIZIONE E INNOVAZIONE

42 1.3 STRUMENTI, CLASSIFICAZIONI E INIZIATIVE CER/FER

46 1.4 QUADRO EUROPEO DELLA GOVERNANCE ENERGETICA E CRITERI PER LA COMPARAZIONE INTERNAZIONALE

57 1.5 MODELLI EXTRA-EUROPEI

82 1.6 COMUNITÀ ENERGETICHE RINNOVABILI (CER)

105 1.7 VERSO UN'INTEGRAZIONE NORMATIVA AMBIENTE–ENERGIA

138 1.8 STRUMENTI DIGITALI PER LA PIANIFICAZIONE INTEGRATA

143 1.9 PROCESSI PARTECIPATIVI E LIVING LAB

2 | SECONDA PARTE

149 **ANALISI CRITICA**

150 2.1 INTRODUZIONE E METODOLOGIA DELL'ANALISI CRITICA

151 2.2 DIMENSIONI CRITICHE DI INTERPRETAZIONE DELLE COMUNITÀ ENERGETICHE RINNOVABILI

153 2.3 PREMESSA AI RISULTATI DELLO STUDIO COMPARATO DELLE COMUNITÀ ENERGETICHE RINNOVABILI NEI CONTESTI NAZIONALI ANALIZZATI

156 2.4 INTRODUZIONE METODOLOGICA ALL'ANALISI DEI CASI STUDIO

191 2.5 ANALISI COMPARATIVA DEI BISOGNI TERRITORIALI E DELLE CRITICITÀ PER L'ATTUAZIONE DELLE COMUNITÀ ENERGETICHE RINNOVABILI

197 2.6 GOVERNANCE MULTILIVELLO DELLE FER: REGIMI AUTORIZZATIVI, RETE ELETTRICA E STRUMENTI DIGITALI DI SUPPORTO

202 2.7 GAP TECNOLOGICI, NORMATIVI E SOCIALI NELLA PIANIFICAZIONE DELLE FER E DELLE CER
205 2.8 PROCEDURE AUTORIZZATIVE FER E LIMITI DEL MODELLO DECISIONALE ATTUALE
209 2.9 GAP NORMATIVI: DISALLINEAMENTO TRA QUADRO REGOLATORIO E INTEGRAZIONE TERRITORIALE DELLE FER
212 2.10 GAP SOCIALI
215 2.11 OPPORTUNITÀ DI INTEGRAZIONE TRA ENERGIA, AMBIENTE, PAESAGGIO E GOVERNANCE
220 2.12 MODELLI DI GOVERNANCE E PARTENARIATO PUBBLICO-PRIVATO PER LA TRANSIZIONE ENERGETICA TERRITORIALE
226 2.13 INFRASTRUTTURA DIGITALE E PIATTAFORME COLLABORATIVE PER LA GOVERNANCE INTEGRATA DELLA TRANSIZIONE ENERGETICA
231 2.14 OPPORTUNITÀ DI REPLICABILITÀ E SCALABILITÀ DEL FRAMEWORK PROPOSTO
234 2.15 CASE STUDY: EVIDENZE APPLICATIVE E VALIDAZIONE DEL FRAMEWORK
236 2.16 CAPACITY BUILDING TERRITORIALE COME MODELLO OPERATIVO DEL FRAMEWORK
240 2.17 STRUMENTI DI SUPPORTO
244 2.18 CONCLUSIONI

3 | TERZA PARTE

249 IPOTESI E OBIETTIVI DELLA RICERCA

250 3.1 INTRODUZIONE
250 3.2 IPOTESI DI RICERCA E CONTINUITÀ CON LO STATO DELL'ARTE
250 3.3 APPROCCIO TRANSDISCIPLINARE A MULTI-SCALA ENERGIA–AMBIENTE–PAESAGGIO
251 3.4 PARADIGMA METODOLOGICO: RESEARCHING BY DESIGN
252 3.5 CAPACITY BUILDING TERRITORIALE
253 3.6 CONCLUSIONI
253 3.7 OBIETTIVI DELLA RICERCA
256 3.8 OBIETTIVI SPECIFICI
261 3.9 RISULTATI ATTESI
265 3.10 INDICATORI DI SUCCESSO E MONITORAGGIO

4 | QUARTA PARTE

270 METODOLOGIA DELLA RICERCA

271 4.1 INTRODUZIONE GENERALE

274 4.2 APPROCCIO TRANSDISCIPLINARE E MULTI-SCALA ENERGIA–AMBIENTE–PAESAGGIO

281 4.3 CAPACITY BUILDING E RAFFORZAMENTO DELLE COMPETENZE TERRITORIALI

285 4.4 RBD (RESEARCHING BY DESIGN) & UDL (UNIVERSAL DESIGN FOR LEARNING) COME METODI DI INDAGINE SCIENTIFICA

288 4.5 QUADRO LOGICO DELLA RICERCA

292 4.6 FRAMEWORK METODOLOGICO INTEGRATO PER LA TRANSIZIONE ENERGETICA TERRITORIALE

297 4.7 CICLO PDCA MULTILIVELLO E FASI OPERATIVE DELLA RICERCA

302 4.8 SISTEMA DI INDICATORI E VALUTAZIONE DEI RISULTATI

304 4.9 MEZZI, COSTI E CONDIZIONI COME ASSUNZIONI METODOLOGICHE

309 4.10 FRAMEWORK METODOLOGICO INTEGRATO PER LA TRANSIZIONE ENERGETICA

312 4.11 MODULI OPERATIVI DEL MODELLO MULTILIVELLO

319 4.12 LOGICA DI INTEGRAZIONE E CICLO PDCA MULTILIVELLO

322 4.13 FASI OPERATIVE DEL MODELLO E SEQUENZA DI IMPLEMENTAZIONE

332 4.14 REPLICABILITÀ E TRASFERIBILITÀ DEL MODELLO

333 4.15 MONITORAGGIO, VALUTAZIONE E ADATTAMENTO

335 4.16 CONCLUSIONE METODOLOGICA

5 | QUINTA PARTE

337 STRUMENTI OPERATIVI

338 5.1 PREMESSA

351 5.2 FRAMEWORK METODOLOGICO INTEGRATO PER LA TRANSIZIONE ENERGETICA: DEFINIZIONE EPISTEMOLOGICA E SISTEMICA

355 5.3 APPROCCIO INTEGRATO CDE E DIGITAL TWIN PER LA GOVERNANCE MULTILIVELLO

362 5.4 APPLICAZIONE OPERATIVA DEL FRAMEWORK METODOLOGICO INTEGRATO

381 5.5 STRUMENTO DI ZONIZZAZIONE ENERGETICA MULTI-SCALA
391 5.6 STRUMENTO NORMATIVO-OPERATIVO
415 5.7 STRUMENTI DI GOVERNANCE MULTILIVELLO E REPLICABILITÀ
418 5.8 CONCLUSIONI

6 | SESTA PARTE
420 CRITERI, ESIGENZE E REQUISITI
421 6.1 IMPIANTO TEORICO E TRASFORMAZIONE METODOLOGICA
423 6.2 CRITERIO DI COMPATIBILITÀ TERRITORIALE
428 6.3 CRITERIO DI INTEGRITÀ PAESAGGISTICA E CULTURALE
445 6.4 CRITERIO DI AUTOSUFFICIENZA E RESILIENZA ENERGETICA
448 6.5 CRITERIO DI VERIFICABILITÀ, MONITORAGGIO E ADATTIVITÀ
452 6.6 SISTEMA DECISIONALE COMPUTAZIONALE E FORMALIZZAZIONE DEI KPI
455 6.7 INTEGRAZIONE TRASVERSALE DEI LIVELLI INFORMATIVI
456 6.8 INTEGRAZIONE OPERATIVA NEI MODULI M1–M6

7 | SETTIMA PARTE
460 STRATEGIA: DALLA RICERCA ALL'APPLICAZIONE
461 7.1 CONTESTO METODOLOGICO: DAI MODULI M1–M6 ALLA SPERIMENTAZIONE OPERATIVA
464 7.2 OPERATIONAL ACTIVATION OF THE FRAMEWORK
467 7.3 STRATEGIA DI IMPLEMENTAZIONE MULTI-SCALA DEL SISTEMA ENERGETICO-TERRITORIALE
470 7.4 EXPERIMENTAL APPLICATION AND SCENARIO SIMULATION
473 7.5 LIVELLO DI VALIDAZIONE SCIENTIFICA E VALUTAZIONE DELLA ROBUSTEZZA MULTICRITERIALE
475 7.6 ANALISI DEI RISULTATI DELLA SIMULAZIONE E DEI VINCOLI DI IMPLEMENTAZIONE
477 7.7 BUSINESS MODEL – SPIN-OFF LSET (LABORATORY FOR SUSTAINABLE ENERGY TRANSITION)
483 7.8 CONCLUSIONI DEL CAPITOLO

8 | OTTAVA PARTE
485 CONCLUSIONI DELLA RICERCA
486 8.1 PREMESSA

486 8.2 RISULTATI ATTESI
488 8.3 ORIGINALITÀ SCIENTIFICA E AVANZAMENTO DELLA CONOSCENZA
491 8.4 LIMITI DELLA RICERCA
493 8.5 RISCHI DI IMPLEMENTAZIONE E STRATEGIE DI MITIGAZIONE
496 8.6 REPLICABILITÀ, TRASFERIBILITÀ E LINEE GUIDA PER STUDI FUTURI
498 8.7 CONTRIBUTO DELLA RICERCA E PROSPETTIVE OPERATIVE
500 8.8 CONCLUSIONI GENERALI

503 BIBLIOGRAFIA
535 SITOGRAFIA
539 GLOSSARIO
545 INDICE DELLE FIGURE

INTRODUZIONE

La transizione ecologica dei sistemi di produzione e approvvigionamento energetico, unitamente all'evoluzione verso forme di autosufficienza energetica delle città e dei territori, rappresenta uno degli ambiti di ricerca e progetto più rilevanti nel panorama contemporaneo, configurandosi come una delle principali sfide per la riconversione sostenibile delle comunità antropiche. In tale contesto, il presente contributo indaga il tema delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) quale strumento di attuazione delle strategie di transizione energetica locale, con particolare riferimento ai territori fragili, contesti caratterizzati da condizioni di marginalità infrastrutturale ma, al contempo, da un elevato valore paesaggistico, architettonico e storico-culturale. Tali territori, configurabili come sistemi complessi e "sensibili", impongono una riflessione critica sulle modalità di integrazione delle politiche energetiche all'interno dei processi di trasformazione, richiedendo un bilanciamento tra esigenze di produzione energetica, tutela ambientale e conservazione dei caratteri identitari. In questo senso, le politiche di riconversione green e di autosufficienza energetica non possono prescindere da un approccio valutativo capace di verificare la compatibilità degli interventi rispetto agli obiettivi di qualità urbana e territoriale. Dallo studio emerge come le CER possano assumere un ruolo strategico nei processi di rigenerazione urbana e paesaggistica, a condizione di essere interpretate non esclusivamente come dispositivi energetici, ma come strumenti integrati di progetto, capaci di attivare dinamiche di valorizzazione territoriale e rilancio socio-economico. In questa prospettiva, la ricerca assume come ipotesi di fondo la necessità di superare approcci settoriali, proponendo un modello interpretativo e operativo fondato su una visione olistica e multidisciplinare, in grado di integrare dimensioni energetiche, ambientali, tecnologiche e progettuali. L'introduzione alla ricerca nell'ampia diffusione e il potenziale evolutivo delle CER lasciano intravedere la possibilità che tali contesti saranno oggetto, nel prossimo futuro, di significativi interventi trasformativi, legati da un lato alla realizzazione di impianti per la produzione di energia da fonti rinnovabili, dall'altro alla ristrutturazione e riqualificazione di porzioni più o meno estese del patrimonio ambientale e urbano. Si pone pertanto l'esigenza di affrontare tali trasformazioni, inevitabili nel perseguimento degli obiettivi di sostenibilità energetica in un'ottica carbon neutral, attraverso l'adozione di metodologie e strumenti di programmazione e progettazione capaci di coordinare le

diverse istanze all'interno di un programma integrato di trasformazione e rigenerazione. Tale programma si configura come strumento fondamentale per garantire la valorizzazione dei territori fragili, senza rinunciare alla conservazione dei loro caratteri paesaggistici e urbani – si pensi, ad esempio, ai centri storici minori – risultando altresì essenziale per sostenere, oltre all'autoproduzione energetica, anche il rilancio socio-economico e turistico. In questo processo, la figura dell'architetto torna ad assumere un ruolo centrale quale soggetto deputato alla costruzione sinergica del quadro esigenziale del territorio, configurandosi come key action nel coordinamento delle diverse istanze e nella loro ricomposizione all'interno di una visione condivisa[1]*. In tal senso, la ricerca si colloca nell'intersezione tra progetto architettonico, pianificazione energetica e governance territoriale, proponendo un approccio integrato ai processi di trasformazione. Le nuove politiche di trasformazione del processo energetico evolutivo, nel corso degli ultimi decenni, la comunità internazionale ha definito una roadmap volta a contenere l'aumento della temperatura globale entro 1,5 °C, a fronte di una crescita economica globale stimata mediamente intorno al 2,6% annuo fino al 2050*[2]*. Il Gruppo Intergovernativo di Esperti sul Cambiamento Climatico (IPCC)*[3] *ha contribuito alla definizione della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC), formalizzata nel 1992, configurandosi come uno dei principali strumenti multilaterali per il contrasto ai cambiamenti climatici. Tale percorso si è articolato successivamente attraverso il Protocollo di Kyoto e l'Accordo di Parigi, che hanno definito impegni concreti in termini di mitigazione e adattamento. L'Accordo di Parigi (2016), in particolare, introduce il sistema dei Nationally Determined Contributions (NDCs), ossia impegni quinquennali assunti dagli Stati per la riduzione delle emissioni di CO_2. L'attuazione di tali impegni si traduce in una pluralità di traiettorie di innovazione tecnologica e trasformazione dei sistemi insediativi, incidendo profondamente sui processi edilizi e territoriali. In questo quadro, le CER si configurano come sistemi territoriali complessi, il cui sviluppo richiede un approccio multidisciplinare capace di*

[1] https://www.cleanenergyministerial.org/15-years-of-the-clean-energy-ministerial/
[2] Progettazione del contesto e dello scenario – World Energy Outlook 2023 – Analisi - IEA
[3] Istituito nel 1988 dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale e dal Programma delle Nazioni Unite per l'Ambiente.

integrare: *riqualificazione energetica del patrimonio edilizio*; *strategie di retrofitting*; *recupero insediativo*; *compatibilità paesaggistica e ambientale.*

Le CER assumono pertanto il ruolo di dispositivi attivi nella riconversione del patrimonio costruito, ponendosi all'intersezione tra innovazione tecnologica, sostenibilità ambientale e progetto architettonico. La trasformazione dei territori in chiave energetica implica una ridefinizione delle culture del costruire, della gestione e della manutenzione dei sistemi edilizi, orientata al raggiungimento dell'autonomia energetica, al miglioramento del benessere degli utenti e alla valorizzazione del patrimonio architettonico e ambientale, secondo logiche di efficienza, qualità e sostenibilità. Gli obiettivi della ricerca nel modello proposto si struttura secondo una logica ciclica ispirata ai framework PCM (Project Cycle Management) e PDCA (Plan–Do–Check–Act), garantendo un processo iterativo di pianificazione, attuazione, monitoraggio e miglioramento continuo. La ricerca si articola in tre livelli di obiettivi, corrispondenti alle diverse fasi del percorso metodologico.

Obiettivi generali *– prima fase programmatica di step analitico/conoscitivo:*

- *individuazione delle linee evolutive del processo di costituzione delle CER, negli interventi ascendenti e/o discendenti sul territorio regionale e subregionale, approfondendo la scala di recupero e di riqualificazione sostenibile*;
- *individuazione di esempi di innovazione e trasformazione del patrimonio ambientale e paesaggistico e interventi di integrazione del patrimonio edilizio, quali risorse e produttività, strutturati in linee guida sia a scala urbana che territoriale*;
- *nuove politiche di intervento e strumentazioni nel dibattito sulla compatibilità degli interventi, la conservazione e riqualificazione architettonico/ambientale*;
- *strategie di efficienza energetico/ambientali, su normative vigenti e certificazioni di qualità, di riconversioni in tipologie edilizie del patrimonio immobiliare esistente, relazionato al contesto*;
- *indicatori e/o misure di valutazione di parametri qualitativi e quantitativi*;
- *approccio a nuove configurazioni finalizzate al benessere dell'utente nell'ottica costi/benefici e risparmio energetico*;

- *definizione di metodologie e articolazione delle fasi di ricerca*;
- *definizione di strumenti e criteri con casi studio e best practices a scala nazionale, internazionale e/o mondiale.*

Obiettivi intermedi *– seconda fase programmatica di step cognitivo/interpretativo:*

- *approfondimento e integrazione di software come il Building Information Modeling* (BIM) *insieme a Sistemi Informativi Geografici* (GIS) *e piattaforme di conoscenze specifiche con indicatori di sostenibilità ed efficienza energetica*;
- *selezione di progetti –* ***best practices*** *– di recupero e di riqualificazione di sistemi urbani e edilizi con l'integrazione e adozione di tecnologie rinnovabili (analisi di casi studio internazionali e/o mondiali a confronto con interventi e progetti pilota) con approfondimenti e verifica di* ***sistemi di certificazione*** *adottati*;
- *Elaborazione di criteri di progettazione urbana e territoriale, nell'innovazione disciplinare e sperimentazione di nuove forme di progettazione ambientale dei processi di transizione energetica sostenibile, con temi legati prevalentemente all'efficienza energetica ed alla sostenibilità ambientale dei sistemi urbani e edilizi.*
- *individuazione di un sistema di indicatori come verifica esigenziale di eco sostenibilità e di risparmio ed efficientamento energetico mediante tecnologie rinnovabili innovative e opportuni approfondimento di sistemi costruttivi che attenzionino l'integrazione architettonica del sistema edilizio (sub-sistemi, nodi tecnologici e costruttivi, integrazione materiali e componenti ecocompatibili, tecnologie costruttive, impianti tecnologici, ecc.)*;
- *identificazione di una procedura con il supporto di sistemi di certificazione* (Protocollo ITACA) *e valutazione intermedia e finale, specifiche di prestazione* (LEED, *ecc.*);
- *valutazioni e verifiche con definizione di risultati intermedi*;
- *individuazione ed elaborazione.*

Obiettivi finali *– terza fase programmatica di step elaborativo/divulgativo:*

- *individuazione di un metodo analitico, a supporto scientifico informatico, attraverso un modello operativo finalizzato all'approccio nel nuovo processo progettuale, con strategie finalizzate al recupero e alla riqualificazione energetico-ambientale*

di un contesto territoriale in via di sviluppo e/o stato di degrado ed inefficiente, mediante un sistema criteriale di base scientifica della progettazione ambientale, efficiente ed ecosostenibile, a ***low-impact*** *e con certificazione di qualità;*

- *modello di involucro architettonico efficiente contestualizzato ad elevati livelli prestazionali di tipologia edilizia (pubblica, privata, terziaria), compatibile con l'ambiente ed il paesaggio, e con il miglioramento energetico/gestionale, quale componente di valore aggiunto;*
- *individuazione di fattibilità tecno/costruttiva nell'adozione di tecnologie innovative distinte dall'efficiente tempistica degli interventi con relativa riduzione dei costi di gestione, nell'ottica di tutela, conservazione e valorizzazione del patrimonio esistente;*
- *formulazione di procedure tecniche confrontate con il repertorio di specifiche tecniche di prestazione di normative e protocolli vigenti;*
- *individuazione di sistemi di incentivazione in politiche economiche (PNRR) e di gestione sul costruito ed ex novo, negli step di management edilizio, proiettato al risparmio in termini di costi e di energia nelle strategie di miglioramento dell'efficienza degli usi finali dell'energia e a emissione zero;*
- *redazione e diffusione di linee guida integrate prestazionali per università, enti pubblici e progettisti, al fine di promuovere l'ecocompatibilità dell'intervento di riqualificazione e di recupero dell'esistente ed il contesto rapportandolo al procedimento del nuovo Codice degli appalti il quale regola le procedure di selezione e assegnazione dei contratti pubblici;*
- *elaborazione di uno strumento basato sul progetto, che possa supportare amministrazioni locali, operatori economici e cittadini a formulare un esaustivo quadro esigenziale su cui basare le scelte di intervento, prefigurandone le implicazioni edilizie, urbanistiche e paesaggistiche;*
- *incrementare il dibattito architettonico nazionale sulle CER e nel nuovo processo progettuale sulla conservazione dei paesaggi, la riqualificazione e recupero del preesistente e del bene edilizio e allinearlo, con punti forza, alle direttive europee.*

L'obiettivo ultimo consiste nella costruzione di un modello replicabile, capace di guidare processi di trasformazione sostenibile nei territori fragili.

Il modello si confronta con il quadro normativo vigente, con particolare riferimento al Codice dei contratti pubblici, interpretato non solo come vincolo procedurale, ma come leva operativa per l'attuazione delle strategie di transizione energetica attraverso strumenti quali CAM, partenariati e procedure integrate. La ricerca integra inoltre una dimensione di capacity building, finalizzata al rafforzamento delle competenze delle amministrazioni locali e degli stakeholder coinvolti nei processi di attuazione delle CER.

L'articolazione di fasi di svolgimento ricerca-schema:

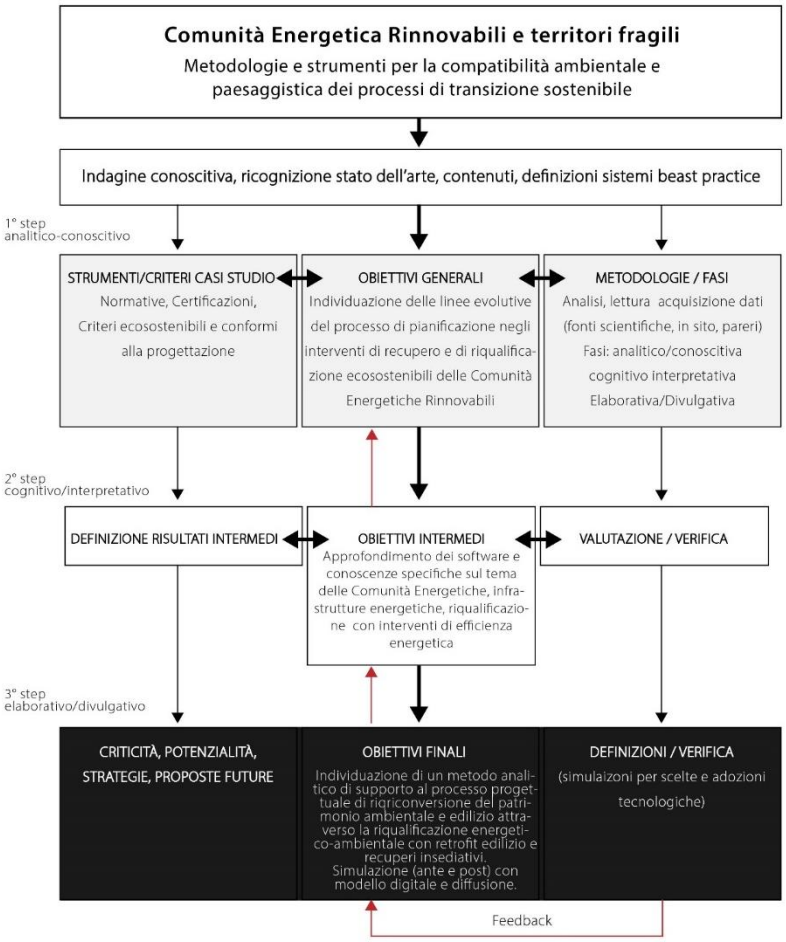


Figura 1. Articolazione delle fasi di svolgimento ricerca-schema

Sintesi:

- *Ricerca di nuovi modelli procedurali costituenti una progettazione sostenibile consapevole di innovativi sistemi di normative vigenti, certificazione e qualità nell'approccio del costruire sostenibile ed elevata efficienza energetica;*

- *Qualità architettonica/insediativa e innovazione tecnologica attraverso le avanzate metodologie di riqualificazione energetico/ambientale e di recupero sull'esistente, quali sfide possibili per le nuove procedure tecno/costruttive a basso impatto ambientale, verso i "zero-energy buildings";*
- *Indagini conoscitive di strategie gestionali mediante software (BIM & GIS), quali strumenti per la trasformazione e coordinazione architettonica/tipologica del territorio e valorizzazione del patrimonio edilizio esistente, in relazione ad esigenziali/prestazionali involucri edilizi con destinazione ad uso e di alta tecnologia.*
- *Approccio alla redazione di linee guida di un processo in cui la figura dell'architetto torna ad assumere il ruolo di soggetto deputato alla costruzione sinergica del quadro esigenziale di ogni territorio con approccio site specific. L'apporto scientifico/progettuale nelle strategie di recupero insediativo e di riqualificazione nell'ottica della certificazione di qualità energetico/ambientale, quale verifica di qualità dell'intero processo edilizio;*
- *Individuazione di nuovi modelli organizzativi con un focus sull'applicazione all' uso di fonti energetiche alternative, rinnovabili e biocombustibili, attenzionando anche i servizi ancillari (IoT & Ai) attraverso la partecipazione e coinvolgimento interdisciplinare (progettisti, committenti, economisti, produttori, costruttori, utenti, operatori/esperti, ecc);*
- *Ipotesi di definire un modello operativo procedurale e informatizzato, di supporto nell'approccio del processo progettuale a monte di una pianificazione preliminare alla progettazione.*

La sintesi evidenzia il passaggio da un approccio descrittivo a uno operativo, orientato alla costruzione di strumenti applicativi.

Le linee programmatiche, metodologia e step di ricerca, si fondano su un approccio di "Research by Design", in cui il progetto non è inteso come mera applicazione, ma come strumento conoscitivo e dispositivo critico per la costruzione e verifica del modello procedurale proposto. La metodologia si configura come un sistema integrato di analisi documentaria, indagine sul campo e sperimentazione progettuale, finalizzato alla costruzione di un modello operativo validabile.

Linee programmatiche

- *Raccolta strumentale di normative, pareri, ricerche di settore con analisi, studio, comparazione per l'individuazione di criteri e diverse metodologie di intervento nello sviluppo di CER in contesti finalizzati alla riqualificazione con recupero insediativo;*
- *Ricerca, conoscenza e studio delle innovazioni tecnologiche da diverse fonti d'informazione, e relative applicazioni in architettura del paesaggio, finalizzate all'approvvigionamento energetico mediante Fonti energetiche rinnovabili, al risparmio energetico e/o all'efficientamento per lo sviluppo sostenibile con ricerche di specifiche prestazioni e sistemi di certificazione energetica e valutazione;*
- *Ricerche in sito con sopralluoghi e/o da diverse fonti d'informazione di microaree territoriali e involucri architettonici di differenti destinazioni d'uso, e casi studio a confronto che denunciano gli approcci dei modelli operativi e prototipi edilizi per l'efficienza energetica in una nuova cultura del costruire ed esigenziali modelli di vita sociale nel contesto di CER;*
- *Elaborazione e individuazione, da analisi comparata in casi studio, delle applicazioni di nuovi criteri procedurali, innovative metodologie, procedure e scelte morfo/tipo/tecnologiche in involucri architettonici efficienti relazionati alle connotazioni ambientali e contestuali e a strategie di interventi di riqualificazione e di recupero insediativo. Mediante anche sistemi di certificazione e verifiche di qualità;*
- *Linee guida procedurali e divulgazione della ricerca.*

La metodologia si basa su:

- *Tipologie:*

Documentarie generali tematiche con studio e acquisizione dati (normative-energia, riqualificazione, edilizia, libri di testo, riviste specializzate di settore scientifico-tecnologia, architettura, recupero, riqualificazione, urbanistica, ecc.; giornali, sistemi di certificazione, link e siti web tematici, databased on-line, ecc.);

Analitiche settoriali, con ricognizione dello stato dell'arte, nelle riqualificazioni e recupero, in particolare con approfondimenti a scala territoriale ed urbana, contestuale ed ambientale e relative certificazioni di qualità di tipo energetico/ambientali e confronto sul dibattito internazionale, con elaborazioni scritto/grafiche.

- Acquisizioni:

1. Fonti scientifiche, enti di ricerca, organi di controllo ambientale, amministrazioni pubbliche, siti web, pareri e consultazioni con esperti energy manager, docenti universitari di settore scientifico, architetti/ingegneri e operatori coinvolti in nuovi processi edilizi sul costruito, con trasformazioni sul sistema esigenziale e prestazionale di involucri efficienti, esperti di certificazione di qualità-chapter, ecc.;
2. In situ, sopralluoghi con rilevazione di caratteristiche ecologiche, relativi parametri contestuali socio/storico/culturali e tipologici di interventi, in generale, di riqualificazione e recupero, con verifiche e approfondimenti di particolari lavori delle best practices d'esame;
3. Partecipative a conferenze, tavoli di studio e dibattiti tematici inerenti alla nuova cultura del costruire con l'attuazione e proposte di nuovi modelli organizzativi e operativi secondo principi di sostenibilità, recupero e riqualificazione, problematiche connesse alle nuove forme energetiche di espansione urbana e valorizzazione del patrimonio costruito. Le attività programmatiche di ricerca si distinguono in tre step rappresentativi nello schema metodologico delle fasi della ricerca.



Figura 2. Elaborazione dello schema sulla metodologia del progetto di ricerca e le fasi.

La fase conoscitiva:

1. *Identificazione e definizione delle macroaree*

Introduzione alla ricerca nell'ambito "Cultura tecnologica del progetto" basando la ricerca contestualizzata alla costituzione di CER mediante il tema del processo progettuale per sull'identificazione dell'involucro architettonico ad elevata efficienza energetica, il recupero e la riqualificazione, osservando il suo rapporto e studio con l'architettura del Paesaggio[4].

2. Stato dell'arte sul tema della ricerca

Ricostruzione e individuazione delle teorie e dei principali risultati di ricerche riguardante il tema studiato, subordinato alla raccolta di informazioni e fonti pertinenti; Fonti ricerca e analisi: del quadro normativo, ricerche bibliografiche e sitografiche, consultazione di articoli scientifici, libri, documenti, report, tesi di dottorato o altri materiali rilevanti su tematiche di settore); Seguire e partecipare a Webinar, a Convegni e Seminari su tematiche di settore permetteranno di organizzazione e sintetizzare le informazioni in modo da ottenere una panoramica completa e accurata dell'argomento; Elaborazione di schede di analisi normative e di beast-practices, atti di convegno, bibliografia e sitorgrafia ragionata.

Individuare le categorie chiave del dibattito sul tema di ricerca ed identificare eventuali campi di indagine non ancora esplorati;

La fase cognitivo/interpretativa pone le riflessioni e analisi critica delle informazioni raccolte nella fase precedente.

3. Riflessione e analisi critica

3.1 Definizione Problema e domande di Ricerca

L'esplorazione delle connessioni tra i diversi aspetti dell'argomento, individuando l'innovazione tecnologica e qualità architettonico/insediativa, attraverso le più avanzate metodologie di riqualificazione energetico/ambientale e di recupero sull'esistente, quali sfide possibili per le nuove procedure tecno/costruttive a basso impatto ambientale.

Riflessione e analisi critica delle informazioni raccolte da fonti e selezione di "best practice" a scala internazionale e/o mondiale, con lo

[4] MIUR, 2015. Declaratoria dei settori concorsuali, allegato B, Macro settore 08, p. 30.

scopo di indagare il tema delle CER mediante interpretazione e comprensione dei concetti di attuazione sul territorio.

4. Ipotesi della ricerca e obiettivi

4.1 Obiettivi:

L'identificazione dello strumento guida di attuazione delle strategie di transizione energetica locale che pone particolari esigenze di valutazione, validazione e controllo dei risultati attesi.

4.2 Ipotesi:

Definire un modello procedurale operativo innovativo, di supporto informatico, nell'approccio del processo progettuale sulla base di ricerche in sito con sopralluoghi e/o analisi da diverse fonti d'informazione ed interpretazioni effettuate su metodologie di intervento in contesti finalizzati alla riqualificazione/efficientamento con recupero insediativo.

La fase elaborativa:

5. Metodologia della ricerca applicativa

Simulazione del processo progettuale di recupero e di riqualificazione energetico/ambientale di un contesto territoriale in via di sviluppo e/o degradato ed inefficiente, su un modello edilizio innovativo.

Determinare il metodo di analisi attraverso le adozioni e scelte tecnologiche ecosostenibili e l'applicazione di normative verificando la fattibilità tecno/funzionale in un riassetto spaziale e di controllo ecosostenibile; Verifica della funzionalità dei luoghi e del contesto in cui si integra il nuovo intervento di recupero individuando le criticità emergenti, potenzialità, strategie e proposte future; Eventuale elaborazione progettuale.

6. Formulazione degli strumenti

Elaborazione e individuazione, da analisi comparata in casi studio, delle applicazioni di nuovi criteri, innovative metodologie, procedure e scelte morfo/tipo/tecnologiche in involucri architettonici efficienti relazionati alle connotazioni ambientali e contestuali e a strategie di interventi di riqualificazione e di recupero insediativo; Un "Cronoprogramma" con punti di controllo dei sistemi di certificazione e verifiche di qualità mediante valutazioni di fattibilità e la costruzione di griglie interpretative denunciano l'innovazione di modelli operativi e prototipi edilizi per l'efficienza energetica in una nuova cultura del costruire ed esigenziali modelli di vita sociale.

1 | PRIMA PARTE
STATO DELL'ARTE

1.1 CER E FONTI ENERGETICHE RINNOVABILI: STATO DELL'ARTE COMPARATO

1.1.1 QUADRO GENERALE DELLA TRANSIZIONE ENERGETICA

La transizione energetica rappresenta uno dei principali driver delle politiche di sostenibilità a livello globale, con un crescente orientamento verso l'adozione delle Fonti Energetiche Rinnovabili (FER) come risposta alle sfide climatiche, ambientali ed economiche. In ambito europeo, tale transizione è sostenuta da strategie integrate che mirano alla decarbonizzazione dei sistemi energetici, alla riduzione della dipendenza dalle fonti fossili e alla promozione di modelli energetici distribuiti e resilienti (European Commission, 2020; IEA, 2022). Tuttavia, la diffusione delle FER presenta caratteristiche eterogenee, influenzate da fattori tecnologici, normativi, geografici e socio-economici, rendendo necessario un approccio comparativo e sistemico.

1.1.2 QUADRO INTERNAZIONALE E GOVERNANCE CLIMATICA

Il processo di governance climatica globale si consolida a partire dalla Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC, 1992), entrata in vigore nel 1994.

L'UNFCCC costituisce un accordo multilaterale di carattere programmatico volto a stabilizzare le concentrazioni di gas serra nell'atmosfera e ha introdotto la Conferenza delle Parti (COP) come principale sede negoziale internazionale.

Le COP, a partire dalla Conferenza di Berlino (COP1, 1995), rappresentano il principale strumento di coordinamento globale per la definizione di impegni condivisi in materia climatica, attraverso meccanismi di monitoraggio, revisione e negoziazione delle politiche di riduzione delle emissioni. In questo percorso si inserisce il Protocollo di Kyoto[5] (1997), primo accordo vincolante con obiettivi quantitativi di riduzione delle emissioni, e successivamente l'Accordo di Parigi (2015), che rafforza l'impianto multilaterale introducendo i Nationally Determined Contributions (NDCs), ossia impegni nazionali

[5] Protocollo Di Kyoto Allegato Alla Convenzione Quadro Delle Nazioni Unite Sui Cambiamenti Climatici. Allegato b: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/cop3/l07a01.pdf#page=24

periodici di riduzione delle emissioni di CO_2 (Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea, 2021).

1.1.2.1 Quadro normativo europeo: architettura delle politiche energia–clima

La Commissione Europea struttura la propria azione attraverso tre pilastri normativi fondamentali:

- Direttiva sulla Prestazione Energetica degli Edifici (EPBD - Energy Performance of Buildings Directive);
- Direttiva sulle Energie Rinnovabili (RED - Renewable Energy Directive);
- Direttiva sull'Efficienza Energetica (EED - Energy Efficiency Directive).

Queste tre direttrici costituiscono l'architettura della politica energetica europea e operano in modo integrato tra produzione, consumo ed efficienza.

1.1.2.2 Quadro evolutivo della regolazione energetica degli edifici nell'Unione Europea e sua trasposizione nazionale

L'evoluzione della normativa europea in materia di prestazione energetica degli edifici rappresenta uno dei casi più significativi di progressiva integrazione tra politiche climatiche, energetiche e di pianificazione territoriale. A partire dalla Direttiva 2002/91/CE (EPBD), il legislatore europeo ha avviato un processo di strutturazione giuridica del settore edilizio, tradizionalmente frammentato e regolato prevalentemente a livello nazionale, introducendo un paradigma comune fondato sulla misurazione, certificazione e miglioramento continuo delle prestazioni energetiche del patrimonio costruito.

In tale contesto, la prima EPBD ha svolto una funzione fondativa, introducendo tre pilastri regolatori: la certificazione energetica degli edifici, la definizione di requisiti minimi di prestazione energetica per nuove costruzioni e ristrutturazioni importanti, nonché l'obbligo di ispezione periodica degli impianti termici. L'impatto di tale direttiva nei contesti nazionali è stato significativo in quanto ha imposto l'introduzione di strumenti tecnici e amministrativi precedentemente assenti o scarsamente coordinati.

Nel caso italiano, la trasposizione è avvenuta principalmente attraverso il D.Lgs. 192/2005, successivamente modificato dal D.Lgs. 311/2006, che ha costituito l'ossatura del sistema nazionale di regolazione energetica degli edifici. Tale impianto è stato ulteriormente consolidato attraverso il DPR 74/2013 e i decreti attuativi del 26 giugno

2015, che hanno reso operativo il sistema dell'Attestato di Prestazione Energetica (APE) e definito i requisiti minimi prestazionali. Ne deriva un modello multilivello in cui la normativa europea agisce come cornice vincolante, mentre la regolazione tecnica è demandata alla normazione nazionale e regionale.

1.1.2.3 Dalla prestazione energetica alla neutralità climatica: la rifusione EPBD e il paradigma nZEB

La Direttiva 2010/31/UE segna un punto di svolta concettuale, introducendo il paradigma degli edifici a energia quasi zero (nZEB). Tale innovazione normativa non rappresenta un mero aggiornamento tecnico, bensì una trasformazione strutturale dell'obiettivo regolatorio: dal miglioramento relativo della prestazione energetica si passa alla progressiva decarbonizzazione del settore edilizio.

L'obbligo secondo cui tutti i nuovi edifici debbano essere nZEB a partire dal 2020 (2018 per gli edifici pubblici) introduce un vincolo temporale che ha imposto agli Stati membri un ripensamento profondo delle politiche edilizie, energetiche e industriali. In Italia, tale transizione è stata recepita attraverso il D.L. 63/2013 convertito nella L. 90/2013, che ha introdotto formalmente la categoria nZEB nell'ordinamento nazionale, mentre il DM 26/06/2015 ha definito i criteri tecnici di attuazione.

Particolarmente rilevante è l'effetto sistemico di tale transizione: l'introduzione degli nZEB ha infatti determinato un progressivo accoppiamento tra normativa edilizia e politica energetica, rafforzando il ruolo delle energie rinnovabili integrate in situ e modificando le logiche progettuali del settore delle costruzioni.

1.1.2.4 Integrazione normativa e governance multilivello: EPBD 2018 e Regolamento 2018/1999

La Direttiva (UE) 2018/844 rappresenta un ulteriore consolidamento del quadro EPBD, introducendo elementi di integrazione tra efficienza energetica, mobilità elettrica e strategie di ristrutturazione a lungo termine. L'aspetto più rilevante risiede tuttavia nell'esplicita connessione tra settore edilizio e obiettivi di decarbonizzazione al 2050, che sancisce la definitiva inclusione dell'edilizia nelle politiche climatiche di lungo periodo.

In Italia, il recepimento è avvenuto principalmente attraverso il D.Lgs. 48/2020, che ha aggiornato il D.Lgs. 192/2005, introducendo obblighi relativi alla predisposizione delle infrastrutture di ricarica negli edifici

e rafforzando la pianificazione della riqualificazione energetica del patrimonio immobiliare.

Parallelamente, il Regolamento (UE) 2018/1999 ha introdotto una dimensione di governance integrata attraverso i PNIEC, segnando il passaggio da un approccio normativo settoriale a un modello di pianificazione strategica multi-obiettivo. In tale prospettiva, il PNIEC italiano assume un ruolo centrale quale strumento di coordinamento tra politiche energetiche, climatiche e industriali. La Direttiva sulla Prestazione Energetica degli Edifici (EPBD)[6] ha l'obiettivo di migliorare la prestazione energetica degli edifici nuovi ed esistenti. Ogni edificio nuovo o ristrutturato deve rispettare standard minimi di prestazione energetica, con un obiettivo di edifici a zero emissioni entro il 2030. Rafforzare l'uso degli Certificati di Prestazione Energetica (EPC) per garantire la trasparenza e l'informazione sugli standard energetici degli edifici, promuovendo l'adozione di interventi di miglioramento. Implementare un piano di finanziamenti e sgravi fiscali per incentivare e incoraggiare la Ristrutturazione degli edifici esistenti, con priorità alle tecnologie di isolamento e sistemi di riscaldamento e raffreddamento efficienti. Promuovere l'uso di tecnologie *smart* per la gestione dell'energia all'interno degli edifici, come i sistemi di domotica e le reti intelligenti.

1.1.2.5 Il paradigma delle energie rinnovabili e la trasformazione dei modelli energetici

La direttiva 2009/28/CE (RED I) costituisce il primo quadro vincolante in materia di energie rinnovabili, introducendo obiettivi quantitativi obbligatori. Tuttavia, è con la RED II (2018/2001/UE) che si assiste a una trasformazione qualitativa del paradigma regolatorio, che passa da una logica di promozione delle fonti rinnovabili a una logica di integrazione di mercato e partecipazione diffusa.

Il recepimento italiano attraverso il D.Lgs. 199/2021 ha rappresentato un passaggio cruciale, in quanto ha introdotto in modo strutturale le CER, configurando per la prima volta un modello giuridico di produzione e consumo collettivo di energia. Tale innovazione incide profondamente sulla struttura tradizionale del sistema elettrico,

[6] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52021PC0802

introducendo forme di generazione distribuita e modelli di governance energetica territoriale.

La successiva Direttiva RED III (2023/2413/UE), ancora in fase di recepimento, rafforza ulteriormente tale traiettoria, accelerando la transizione verso tecnologie emergenti quali l'idrogeno rinnovabile e semplificando le procedure autorizzative. Ne deriva un quadro in cui la decentralizzazione energetica diventa elemento strutturale della politica europea.

1.1.2.6 Efficienza energetica come principio ordinatore: evoluzione dell'EED

La Direttiva 2012/27/UE introduce il principio dell'efficienza energetica come "prima risorsa", sancendo un cambiamento epistemologico nella gerarchia delle politiche energetiche. L'efficienza non è più una misura complementare, ma un principio guida della pianificazione energetica. In Italia, il D.Lgs. 102/2014 ha dato attuazione a tale impostazione, introducendo audit energetici obbligatori, sistemi di gestione dell'energia e programmi di riqualificazione del patrimonio pubblico. Tuttavia, la successiva revisione con la Direttiva (UE) 2023/1791[7] (Nuova EED)[8] evidenzia un ulteriore irrigidimento del quadro normativo, introducendo obiettivi vincolanti di riduzione dei consumi e rafforzando il ruolo delle pubbliche amministrazioni.

Tale evoluzione pone il tema della capacità amministrativa come variabile critica: l'efficacia delle politiche di efficienza energetica dipende infatti non solo dalla qualità normativa, ma dalla capacità di implementazione a livello locale e istituzionale (IRENA, 2020; JRC Joint Research Centre, 2020)[9].

---

[7] Direttiva (UE) 2023/… del Parlamento europeo e del Consiglio, del 13 settembre 2023, sull'efficienza energetica e che modifica il regolamento (UE) 2023/955 (rifusione) (europa.eu)

[8] Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, (2023). L 231/1 DIRETTIVA (UE) 2023/1791 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 13 settembre 2023 sull'efficienza energetica e che modifica il regolamento (UE) 2023/955 (rifusione) (Testo rilevante ai fini del SEE).

[9] International Renewable Energy Agency (IRENA), (2020). *Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables*. Available at: https://www.irena.org/publications/2019/Feb/Innovation-landscape-for-a-renewable-powered-future; JRC Joint Research Centre, (2020). Science for Policy Report *Energy Communities: an overview of energy and social innovation*. European Commission, Joint Research Centre. Available at: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC119433

1.1.2.7 Integrazione sistemica e criticità di implementazione

L'insieme delle direttive analizzate converge verso un unico paradigma regolatorio: la costruzione di un sistema integrato energia–clima–territorio finalizzato alla neutralità climatica al 2050. Tale obiettivo è rafforzato dal Green Deal europeo e dalla European Climate Law (Reg. 2021/1119), che trasformano la neutralità climatica in vincolo giuridico. Tuttavia, l'analisi dell'implementazione nazionale evidenzia una persistente discontinuità tra livello normativo e livello attuativo. In particolare, emergono tre criticità strutturali:

1. **Frammentazione istituzionale multilivello**, tra Stato, Regioni e autorità regolatorie
2. **Complessità amministrativa delle procedure autorizzative**, soprattutto per FER e CER
3. **Disallineamento tra obiettivi europei e capacità tecniche locali**

Ne deriva una tensione costante tra ambizione normativa e fattibilità operativa, che costituisce uno dei principali nodi teorici della transizione energetica europea.

L'evoluzione del quadro EPBD–RED–EED evidenzia un progressivo passaggio da una regolazione settoriale a una governance integrata della transizione energetica. Tale processo, pur coerente a livello europeo, incontra ancora limiti significativi nella sua traduzione nazionale, dove la complessità istituzionale e amministrativa riduce la piena efficacia degli strumenti normativi.

In questa prospettiva, la transizione energetica non può essere interpretata unicamente come processo tecnologico o normativo, bensì come fenomeno istituzionale complesso, in cui la capacità di governance diventa variabile determinante per il raggiungimento degli obiettivi di neutralità climatica.

1.2 COMUNITÀ ENERGETICHE RINNOVABILI (CER): SCENARI IN TRANSIZIONE E INNOVAZIONE

L'implementazione delle FER su scala locale rappresenta oggi una leva strategica fondamentale non solo per il raggiungimento degli obiettivi ambientali definiti dal PNIEC 2030, ma anche per la promozione di modelli di sviluppo territoriale sostenibile e inclusivo. In questo quadro, le CER si configurano come strumenti innovativi di aggregazione tra cittadini, imprese e amministrazioni locali, favorendo la produzione distribuita di energia, l'autoconsumo collettivo e la

partecipazione attiva dei territori alla transizione energetica (IRENA, 2022; GSE, 2023).

Tuttavia, la diffusione delle FER non può essere interpretata esclusivamente come un processo tecnologico, ma richiede un approccio integrato capace di coniugare pianificazione urbanistica, vincoli normativi e caratteristiche socio-ambientali dei territori. Tale prospettiva implica il superamento di logiche settoriali, promuovendo modalità di progettazione capaci di mettere in relazione competenze differenti, dimensioni ambientali, sociali e spaziali, secondo una visione sistemica della trasformazione territoriale (Di Bucchianico et al., 2020) [10]. In particolare, le Norme Tecniche di Attuazione (NTA) dei piani urbanistici rappresentano uno strumento fondamentale per orientare la localizzazione degli impianti energetici, definendo criteri di uso del suolo e articolando il territorio in zone omogenee con differenti livelli di tutela e trasformabilità. La classificazione delle zone omogenee (A–F) consente di modulare gli interventi FER in funzione della sensibilità paesaggistica, della densità urbana e delle opportunità di trasformazione territoriale, costituendo un riferimento essenziale per una pianificazione energetica coerente con il contesto locale (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2021).

1.2.1 CLASSIFICAZIONE DELLE ZONE OMOGENEE E IMPLICAZIONI PER LE FER

L'analisi delle zone omogenee permette di distinguere differenti condizioni di idoneità e vincolo per l'implementazione delle FER:

- Zona A – Centri storici: aree ad elevato valore storico e paesaggistico, nelle quali l'inserimento delle FER deve avvenire in forma integrata e non invasiva, privilegiando superfici già antropizzate come coperture e superfici secondarie;
- Zona B – Tessuti consolidati: ambiti urbani parzialmente saturi, idonei a interventi diffusi di piccola e media scala, compatibili con il tessuto edilizio esistente;
- Zona C – Zone di espansione: aree destinate a nuovi insediamenti, particolarmente adatte all'integrazione preventiva di sistemi CER e autoconsumo collettivo;

[10] Di Bucchianico, G., Fagnoni, R., Pietroni, L., Piscitelli, D., & Riccini, R. (2020). 100 anni dal Bauhaus Le prospettive della ricerca di design.

- Zona D – Aree industriali: contesti a bassa sensibilità paesaggistica, idonei all'installazione di impianti di media e grande scala;
- Zona E – Aree agricole: territori a prevalente vocazione produttiva, nei quali le FER devono integrarsi con le attività agricole attraverso soluzioni come l'agrivoltaico;
- Zona F – Aree per servizi pubblici: spazi destinati a infrastrutture collettive, nei quali le FER possono assumere un ruolo funzionale e dimostrativo.

1.2.1.1 Approccio scalare alla progettazione delle FER

La pianificazione delle FER può essere efficacemente articolata secondo un approccio scalare, che mette in relazione tipologia di intervento, caratteristiche territoriali e disponibilità spaziale, in coerenza con il principio di multifunzionalità del territorio (FAO, 2019). In questa prospettiva, le aree a elevata qualità paesaggistica richiedono interventi puntuali e integrati, mentre le aree produttive e agricole consentono la realizzazione di impianti estensivi. Tale articolazione consente di costruire un sistema energetico adattivo, capace di coniugare efficienza, sostenibilità e compatibilità territoriale.

L'integrazione tra NTA e zonizzazione urbanistica consente quindi non solo di individuare le aree idonee e non idonee, ma anche di definire strategie differenziate di inserimento delle CER, adattando le tecnologie energetiche alle specificità locali.

1.2.1.1 Microscala (Zona A) – interventi integrati nei centri storici

Le aree classificate come Zona A, corrispondenti ai centri storici e agli insediamenti di maggiore valore storico-culturale e paesaggistico, richiedono un approccio progettuale di microscala fondato su interventi puntuali, reversibili e altamente integrati nel contesto edilizio esistente. In tali ambiti, la progettazione degli interventi energetici deve confrontarsi con la complessità del patrimonio costruito, in cui aspetti materici, percettivi e culturali concorrono alla definizione dell'identità dei luoghi (Quici, F.; 2023)[11].

Le Norme Tecniche di Attuazione (NTA) impongono infatti specifici criteri di tutela del patrimonio edilizio e del paesaggio urbano, limitando le possibilità di trasformazione fisica del tessuto storico e

[11] Quici, F. (2023). Architettura e cultura visuale (pp. 1-240). Libria.

richiedendo soluzioni compatibili con i caratteri architettonici e ambientali esistenti.

In questo scenario, l'inserimento delle FER non può assumere una forma invasiva, ma deve essere orientato verso soluzioni di integrazione architettonica avanzata. Le principali opportunità si concentrano sull'utilizzo di superfici già antropizzate, in particolare coperture, tetti inclinati e porzioni non visibili del costruito, riducendo al minimo l'impatto percettivo.

L'approccio progettuale si fonda quindi su una logica di "integrazione invisibile" o "discreta", in cui le tecnologie energetiche vengono assorbite dal linguaggio architettonico esistente. In questo quadro, il fotovoltaico integrato in copertura, i sistemi BIPV (Building Integrated Photovoltaics), le soluzioni su superfici verticali secondarie e i sistemi di accumulo domestico rappresentano le principali tecnologie applicabili.

Accanto a queste soluzioni, emerge un approccio di tipo progettuale e culturale che interpreta le FER non solo come dispositivi tecnici, ma come elementi di qualità del progetto architettonico e urbano. In tale prospettiva, anche riferimenti concettuali come la *land art* e l'arte ambientale possono contribuire a ridefinire il ruolo delle infrastrutture energetiche, trasformandole in componenti narrative del paesaggio urbano.

Le micro-installazioni energetiche, se progettate con attenzione al contesto, possono quindi contribuire non solo all'autonomia energetica locale, ma anche alla valorizzazione dell'identità storica dei luoghi, favorendo una relazione equilibrata tra innovazione tecnologica e conservazione del patrimonio culturale (Bertoldi et al., 2010; Regione Campania, 2024)[12].

1.2.1.2 Mesoscala (Zona B) – tessuti urbani consolidati e completamenti

Le Zone B, corrispondenti ai tessuti urbani consolidati e alle aree di completamento, rappresentano una scala intermedia di intervento (mesoscala), caratterizzata da una maggiore disponibilità di superfici e da una densità edilizia sufficientemente articolata da consentire l'inserimento diffuso delle fonti energetiche rinnovabili.

---

[12] Bertoldi, P., BORNAS, C. D., Monni, S., & PIERS, D. (2010). Linee guida-Come sviluppare un Piano di Azione per l'Energia Sostenibile-PAES (Guidebook-How to Develop a Sustainable Energy Action Plan-SEAP).

In questi contesti, le FER possono essere integrate in modo più sistematico attraverso interventi su coperture piane e inclinate, facciate, pensiline e infrastrutture pubbliche. Edifici residenziali, scolastici, industriali e servizi collettivi diventano superfici attive per la produzione energetica distribuita.

La sfida principale non riguarda più la sola compatibilità paesaggistica, ma la qualità complessiva dell'integrazione urbana. Le installazioni devono essere progettate come parte integrante del paesaggio costruito, evitando soluzioni frammentarie o percepite come elementi estranei al contesto.

In questa prospettiva, il concetto di *land art* e di progettazione paesaggistica assume un ruolo interpretativo rilevante, poiché consente di leggere le infrastrutture energetiche come componenti del sistema urbano complessivo, capaci di generare nuovi spazi di relazione sociale e nuovi dispositivi di servizio collettivo (Jamshed, et al., 2020)[13]. L'integrazione delle FER in Zone B può inoltre contribuire alla rigenerazione urbana, soprattutto quando associata a interventi di riqualificazione energetica degli edifici e alla creazione di spazi pubblici multifunzionali, in cui produzione energetica, mobilità dolce e verde urbano si combinano in un unico sistema integrato (IRENA, 2022; ISPRA, 2023).

1.2.1.3 Ecoscala (Zona C) – aree di espansione e nuove costruzioni

Le Zone C, destinate all'espansione urbana e alla realizzazione di nuovi insediamenti, rappresentano una scala ecologica e preventiva di pianificazione (ecoscala), nella quale le FER possono essere integrate fin dalla fase di progettazione urbanistica. In questi contesti, le FER non costituiscono un elemento aggiunto, ma una componente strutturale del progetto urbano. La pianificazione consente infatti di progettare sistemi energetici integrati con il disegno del paesaggio, riducendo i costi di adattamento successivo e aumentando l'efficienza complessiva del sistema. Le opportunità includono l'integrazione di impianti fotovoltaici diffusi, piccoli sistemi eolici e soprattutto soluzioni agrivoltaiche su aree agricole marginali o periurbane. In tali configurazioni, la produzione energetica si combina con la

[13] Jamshed, A., Birkmann, J., Feldmeyer, D., & Rana, I. A. (2020). A conceptual framework to understand the dynamics of rural–urban linkages for rural flood vulnerability. *Sustainability*, *12*(7), 2894.

conservazione della biodiversità e con la multifunzionalità del suolo. In questo scenario assumono particolare rilevanza le infrastrutture verdi, come corridoi ecologici, fasce vegetate e sistemi di drenaggio sostenibile, che permettono di integrare energia e ambiente in un unico sistema territoriale resiliente (LIFE Elia Project, 2021; ECOROADS, 2020).

1.2.1.4 Macroscale (Zona D) – aree industriali e produttive

Le Zone D, destinate agli insediamenti industriali e produttivi, rappresentano una scala di intervento di tipo macroscopico, nella quale le FER possono essere implementate su superfici estese e con minori vincoli di natura paesaggistica rispetto ai contesti urbani residenziali. In questi ambiti, la disponibilità di ampie coperture industriali, aree dismesse, piattaforme logistiche e spazi infrastrutturali consente la realizzazione di impianti fotovoltaici di media e grande scala, integrati con sistemi di accumulo e con tecnologie di gestione intelligente della domanda energetica. Le NTA, pur mantenendo requisiti di compatibilità ambientale, permettono una maggiore libertà progettuale rispetto ai contesti storici o residenziali.

La progettazione in queste aree non si limita alla mera installazione di impianti energetici, ma deve essere intesa come costruzione di "paesaggi energetici produttivi", in cui la dimensione infrastrutturale viene reinterpretata attraverso criteri di qualità spaziale e riduzione dell'impatto visivo. In questo senso, l'introduzione di barriere vegetali, corridoi ecologici e dispositivi di mitigazione paesaggistica consente di migliorare l'integrazione tra impianti e territorio.

Parallelamente, le infrastrutture energetiche possono assumere anche un valore urbano e sociale, soprattutto quando integrate con spazi pubblici funzionali, pensiline fotovoltaiche, aree di sosta energeticamente attrezzate o installazioni ibride. In tali casi, la tecnologia energetica diventa anche elemento di riconfigurazione dello spazio contemporaneo, contribuendo alla costruzione di nuovi paesaggi della produzione.

L'integrazione di soluzioni agrivoltaiche nelle aree periurbane o di transizione rafforza ulteriormente questa logica, consentendo la coesistenza tra produzione energetica e funzioni agricole o ecologiche, con effetti positivi in termini di sostenibilità ambientale e microclimatica (TERNA, 2023; RED II, 2018/2001/UE).

1.2.1.5 Cronoscala (Zone E/F) – aree agricole e servizi pubblici

Le Zone E e F, rispettivamente destinate alle attività agricole e alle attrezzature e servizi pubblici, costituiscono la scala più ampia e strutturale di intervento, nella quale le fonti energetiche rinnovabili possono essere sviluppate su vasta estensione territoriale e con elevata continuità spaziale e temporale.

In queste aree, la disponibilità di superfici orizzontali ampie e relativamente meno vincolate consente l'installazione di impianti fotovoltaici estensivi, parchi eolici di media scala e sistemi energetici ibridi, tra cui soluzioni agrivoltaiche avanzate che integrano produzione energetica e attività agricole.

Il principio guida in questo contesto è la multifunzionalità del territorio, che permette di combinare produzione energetica, attività agricole, servizi ecosistemici e funzioni paesaggistiche. L'obiettivo non è la semplice occupazione del suolo, ma la sua riconfigurazione come sistema produttivo integrato.

In questa prospettiva, gli impianti energetici possono essere progettati come paesaggi infrastrutturali complessi, nei quali la presenza di elementi naturali e antropici viene equilibrata attraverso dispositivi di mitigazione visiva, fasce boscate, corridoi ecologici e percorsi fruitivi. In alcuni casi, tali aree possono includere anche elementi di *land art* o installazioni ambientali, capaci di rafforzare la dimensione culturale e percettiva del paesaggio energetico.

Questo approccio consente di trasformare grandi impianti energetici in sistemi territoriali multifunzionali, in grado di produrre energia, preservare la biodiversità e offrire nuove opportunità di fruizione sociale e didattica del territorio (PNIEC, 2020; Regione Emilia-Romagna, 2022).

1.3 STRUMENTI, CLASSIFICAZIONI E INIZIATIVE CER/FER

1.3.1 CLASSIFICAZIONE DELLE INIZIATIVE CER/FER

Nel contesto della transizione energetica europea, le CER e le FER si inseriscono in un quadro articolato di politiche, strumenti e piattaforme di supporto che mirano a favorire la decarbonizzazione, la partecipazione locale e l'integrazione tra energia e pianificazione territoriale. In tale prospettiva, assumono particolare rilevanza le attività di monitoraggio e analisi sviluppate da istituzioni e osservatori

internazionali, che consentono di sistematizzare l'evoluzione delle pratiche energetiche innovative.

Tra i principali riferimenti si annoverano la Renewables Networking Platform (https://www.renewables-networking.eu) e il Joint Research Centre – Smart Electricity Systems (https://ses.jrc.ec.europa.eu/), che forniscono dati e analisi sulle trasformazioni dei sistemi elettrici europei. A livello nazionale, un ruolo significativo è svolto da RSE S.p.A. (https://www.rse-web.it/intro-risultati/), che sviluppa studi applicati in linea con gli obiettivi della politica energetica italiana ed europea. Ulteriori contributi provengono da piattaforme e reti come LUMI (https://luminetwork.it), che documentano le prime esperienze di CER in Italia, e da Legambiente (https://www.comunirinnovabili.it/), attraverso la mappatura delle Comunità Energetiche Rinnovabili e Solidali (CERS).

1.3.1.1 Patto dei Sindaci e PAESC

Il Patto dei Sindaci (Covenant of Mayors), avviato nel 2008 dalla Commissione Europea, rappresenta uno dei principali strumenti di governance multilivello per il coinvolgimento delle autorità locali nella transizione energetica. L'iniziativa nasce con l'obiettivo di contribuire al raggiungimento degli obiettivi europei di riduzione delle emissioni di gas serra, promuovendo l'adozione del Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile (PAES), con un target iniziale di riduzione delle emissioni del 20% entro il 2020.

Il processo di elaborazione del PAES si articola in tre fasi principali: pianificazione strategica e impegno politico, costruzione dell'Inventario di Base delle Emissioni (IBE) e definizione delle misure di mitigazione nei diversi settori energetici. A partire dal 2015, l'iniziativa evolve nel Patto dei Sindaci per il Clima e l'Energia, integrando alle politiche di mitigazione anche quelle di adattamento ai cambiamenti climatici, con un obiettivo di riduzione delle emissioni del 40% entro il 2030.

In questo contesto viene introdotto il Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima (PAESC), che rappresenta uno strumento integrato di pianificazione energetico-climatica. Il PAESC include, oltre all'inventario delle emissioni, la Valutazione dei Rischi e della Vulnerabilità (RVA), consentendo di individuare le criticità territoriali e definire azioni di mitigazione e adattamento con tempi e responsabilità definiti. L'attuazione dei PAESC coinvolge una rete articolata di attori: la Commissione Europea (CE), le autorità locali, il JRC e soggetti tecnici

e consulenziali. Gli interventi riguardano prevalentemente edifici pubblici e privati, trasporti urbani e infrastrutture, ma possono includere anche la produzione locale di energia da fonti rinnovabili e strumenti di pianificazione territoriale innovativa (Reckien, D; et al, 2018)[14].

In Italia, il Codice dei Contratti Pubblici (D.Lgs. 36/2023) rafforza la capacità operativa dei PAESC, integrando principi di sostenibilità nei processi di appalto e promuovendo strumenti come partenariati per l'innovazione, dialogo competitivo e appalti integrati. Tale quadro favorisce la realizzazione di interventi sperimentali quali microreti energetiche, edifici nZEB e CER, coerenti con gli obiettivi di transizione energetica.

1.3.1.2 Strumenti europei per la transizione energetica locale

A supporto della transizione energetica locale, l'UE ha sviluppato una serie di piattaforme e iniziative finalizzate alla diffusione di conoscenze, strumenti tecnici e modelli di implementazione.

Il *Clean Energy for EU Islands Secretariat* sostiene la transizione energetica delle oltre 2.200 isole europee attraverso la modellazione di scenari energetici basati su fonti rinnovabili, l'analisi delle risorse disponibili e la riduzione della dipendenza dai combustibili fossili. L'approccio si basa su strumenti di mappatura delle risorse, analisi dei consumi e simulazioni energetiche finalizzate all'autosufficienza energetica.

L'*Energy Poverty Advisory Hub* (EPAH) (https://energy-poverty.ec.europa.eu/) costituisce invece il principale centro europeo di riferimento per il contrasto alla povertà energetica. Attraverso attività di analisi e monitoraggio, l'iniziativa supporta le autorità locali nell'identificazione dei fattori di vulnerabilità e nella definizione di politiche di intervento, quali riqualificazione energetica degli edifici e promozione di tecnologie rinnovabili.

Il *Rural Energy Community Advisory Hub* sostiene lo sviluppo delle comunità energetiche rurali, promuovendo la diffusione di modelli di autoconsumo e autosufficienza energetica nelle aree periferiche. L'iniziativa include attività di mappatura delle CER rurali, supporto

[14] Reckien, D., Salvia, M., Heidrich, O., Church, J. M., Pietrapertosa, F., De Gregorio-Hurtado, S., ... & Dawson, R. (2018). How are cities planning to respond to climate change? Assessment of local climate plans from 885 cities in the EU-28. *Journal of cleaner production*, *191*, 207-219

tecnico e analisi di fattibilità economico-ambientale, con l'obiettivo di favorire la decarbonizzazione dei territori rurali e la partecipazione attiva delle comunità locali.

Lo *Smart Cities Marketplace* (https://smart-cities-marketplace.ec.europa.eu/) rappresenta una piattaforma europea finalizzata alla connessione tra città e investitori per lo sviluppo di progetti urbani sostenibili e finanziabili. Il suo ruolo principale è quello di facilitare la trasformazione delle città attraverso strumenti di supporto tecnico, modelli di simulazione energetica e meccanismi di matchmaking tra domanda e offerta di finanziamenti.

1.3.1.3 Integrazione italiana e pratiche locali

In Italia, l'attuazione delle politiche energetiche locali si sviluppa attraverso esperienze differenziate di pianificazione e monitoraggio, tra cui i PAES e i PAESC adottati da numerosi comuni. Esempi significativi includono i casi di *Abano Terme* e *Albignasego*, nei quali la strategia energetica integra interventi di efficienza, mobilità sostenibile e partecipazione degli *stakeholder*, supportati da sistemi di monitoraggio e strumenti digitali.

A livello operativo, strumenti come catasti energetici[15], inventari delle emissioni e piattaforme digitali di gestione consentono il controllo e la valutazione delle politiche energetiche locali (ARPAE, 2021; ARPAE, 2023). Tali approcci evidenziano la progressiva integrazione tra pianificazione urbanistica, politiche energetiche e strumenti di governance multilivello.

1.3.1.4 Classificazione delle Fonti Energetiche Rinnovabili (FER)

Le FER possono essere classificate in base alla loro origine e ai processi di conversione energetica, comprendendo principalmente energia solare, eolica, idroelettrica, geotermica e biomasse (IRENA, 2023). Ciascuna fonte presenta caratteristiche specifiche in termini di disponibilità, continuità e impatto ambientale.

Dal punto di vista sistemico, le FER si distinguono inoltre per il grado di programmabilità. Le fonti idroelettriche e geotermiche garantiscono una maggiore stabilità e continuità di produzione, mentre le fonti solari ed eoliche sono caratterizzate da variabilità e dipendenza dalle

[15] Comune di Furnari (ME), finalizzato alla raccolta di dati dettagliati su edifici e impianti per programmare e verificare interventi di efficienza energetica.

condizioni meteorologiche. Questa distinzione assume un ruolo centrale nella progettazione dei sistemi energetici, in quanto incide direttamente sulla necessità di integrare sistemi di accumulo, reti intelligenti (smart grids) e strumenti di gestione della domanda energetica (IEA, 2022).
In questo quadro, l'integrazione delle FER con le CER rappresenta un elemento strategico per la gestione distribuita dell'energia e per la resilienza dei sistemi locali, contribuendo al superamento dei modelli centralizzati di produzione energetica.

1.4 QUADRO EUROPEO DELLA GOVERNANCE ENERGETICA E CRITERI PER LA COMPARAZIONE INTERNAZIONALE

1.4.1 ANALISI COMPARATA DEL RECEPIMENTO NORMATIVO E DELLA MATURITÀ DELLE COMUNITÀ ENERGETICHE RINNOVABILI IN EUROPA

La transizione energetica rappresenta uno dei principali processi di trasformazione dei sistemi territoriali contemporanei, configurandosi come un fenomeno complesso che coinvolge simultaneamente dimensioni ambientali, tecnologiche, economiche, istituzionali e sociali. In ambito europeo, tale processo si è progressivamente consolidato attraverso un quadro normativo orientato alla decarbonizzazione, alla diffusione delle fonti energetiche rinnovabili (FER) e alla promozione di nuovi modelli di governance fondati sulla partecipazione degli attori territoriali.
In questa prospettiva, il concetto di governance multilivello assume un ruolo centrale nell'interpretazione delle dinamiche di transizione energetica. Le riflessioni di Elinor Ostrom e Harini Nagendra sulla governance policentrica dei sistemi socio-ecologici offrono un riferimento teorico particolarmente significativo per comprendere la crescente complessità dei processi decisionali legati alla gestione delle risorse energetiche. Secondo tale impostazione, i problemi ambientali e climatici si sviluppano su scale spaziali differenti e richiedono forme di coordinamento tra livelli istituzionali molteplici, evitando che le politiche siano elaborate esclusivamente secondo logiche centralizzate

o, al contrario, esclusivamente locali (Nagendra, H & Ostrom, E; 2012)[16]. Applicata al settore energetico, questa prospettiva evidenzia come l'efficacia delle politiche di decarbonizzazione dipenda dalla capacità di integrare le strategie sovranazionali con le specificità territoriali, favorendo forme di cooperazione tra istituzioni pubbliche, amministrazioni locali, operatori energetici, imprese e cittadini. Le Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) costituiscono una delle principali espressioni operative di tale paradigma, poiché introducono modelli di produzione e consumo energetico basati sulla collaborazione tra soggetti diversi e sulla valorizzazione delle risorse disponibili a scala locale.

Il quadro europeo di riferimento si è progressivamente consolidato attraverso il Green Deal europeo, il pacchetto Fit for 55, il Regolamento sulla Governance dell'Unione dell'Energia e le Direttive (UE) 2018/2001 (RED II) e 2019/944 (Internal Electricity Market Directive – IEMD), che hanno introdotto il riconoscimento giuridico delle Renewable Energy Communities (REC) e delle Citizen Energy Communities (CEC). Tali provvedimenti non si limitano a promuovere la produzione di energia da fonti rinnovabili, ma definiscono un nuovo modello di organizzazione del sistema energetico europeo, attribuendo un ruolo attivo ai cittadini e alle comunità locali nella produzione, gestione e condivisione dell'energia. L'adozione delle direttive europee ha tuttavia evidenziato una significativa eterogeneità tra gli Stati membri. Pur condividendo gli stessi obiettivi di neutralità climatica e di incremento della quota di energia rinnovabile, i diversi ordinamenti nazionali hanno sviluppato modalità di recepimento differenti, influenzate dalle caratteristiche dei rispettivi sistemi istituzionali, dalla struttura dei mercati energetici, dalle disponibilità infrastrutturali e dalle differenti tradizioni amministrative.

Ne deriva un panorama europeo caratterizzato da differenti livelli di maturità normativa, organizzativa e operativa delle comunità energetiche. Alcuni Paesi hanno costruito quadri regolatori completi, accompagnati da strumenti di incentivazione economica, procedure amministrative semplificate e modelli di governance consolidati; altri

[16] Nagendra, H., & Ostrom, E. (2012). Polycentric governance of multifunctional forested landscapes. International Journal of the Commons, 6(2).

presentano invece sistemi ancora in fase di sviluppo, nei quali il recepimento delle direttive europee non si è ancora tradotto in un'effettiva diffusione delle comunità energetiche sul territorio.

L'eterogeneità osservata non riguarda esclusivamente il livello di recepimento legislativo, ma coinvolge anche la capacità dei diversi sistemi nazionali di costruire condizioni favorevoli alla partecipazione dei cittadini, allo sviluppo della produzione distribuita e all'integrazione delle fonti rinnovabili nei processi di pianificazione territoriale. In tale prospettiva, il concetto di *enabling framework*, promosso dalla Commissione Europea, assume particolare rilevanza, poiché identifica l'insieme delle condizioni normative, amministrative, finanziarie e organizzative necessarie per consentire lo sviluppo delle comunità energetiche.

Numerosi strumenti di monitoraggio consentono oggi di valutare l'evoluzione di tali processi. Tra questi assumono particolare importanza il REC & CEC *Transposition Tracker*, sviluppato da *REScoop.eu*[17], le banche dati RES LEGAL Europe, le analisi del Joint Research Centre (JRC) della Commissione Europea e i rapporti periodici sullo *State of the Energy Union*, che consentono di confrontare il grado di implementazione delle direttive europee nei diversi Stati membri e di monitorarne l'evoluzione nel tempo.

Le più recenti analisi evidenziano come il processo di implementazione delle comunità energetiche stia registrando una crescita costante in tutta Europa. Secondo il 10th State of the *Energy Union Report*, nel 2026 risultano attive oltre 8.000 comunità energetiche, confermando il progressivo consolidamento di tali configurazioni quale componente strutturale della transizione energetica europea. Tale crescita risulta tuttavia distribuita in maniera disomogenea, evidenziando differenze significative sia nella diffusione territoriale sia nei modelli organizzativi adottati.

L'analisi comparata del recepimento normativo evidenzia quindi come il grado di maturità delle comunità energetiche non possa essere valutato esclusivamente sulla base dell'esistenza di una disciplina legislativa dedicata. Esso dipende piuttosto dalla capacità dei singoli sistemi nazionali di integrare governance, pianificazione territoriale,

---

17 Link: https://www.rescoop.eu/policy/transposition-tracker/rec-cec-definitions)

innovazione tecnologica, strumenti economici e partecipazione sociale all'interno di un quadro coerente di politiche pubbliche.
In questa prospettiva, la presente ricerca assume il recepimento delle direttive europee come punto di partenza per un'analisi comparativa più ampia, orientata a comprendere in che modo i differenti contesti nazionali abbiano interpretato e tradotto il modello europeo delle comunità energetiche. L'obiettivo non è soltanto confrontare gli aspetti normativi, ma individuare le differenti traiettorie di sviluppo attraverso cui le Comunità Energetiche Rinnovabili si sono integrate nei sistemi territoriali, nei processi di pianificazione e nelle politiche di transizione energetica.
Per tale ragione, il presente capitolo si limita a delineare il quadro generale di riferimento e il livello di maturità dei sistemi europei, mentre l'analisi approfondita dei modelli nazionali – con particolare riferimento a *Italia*, *Francia*, *Spagna*, *Austria* e *Regno Unito* – sarà sviluppata nel Capitolo II, dove verranno esaminati i casi studio selezionati al fine di evidenziare le differenti relazioni tra governance, territorio, qualità paesaggistica e modelli di transizione energetica sostenibile (IRENA, 2023; Palerm Salazar, J. M., 2022)[18].

1.4.2 CLASSIFICAZIONE DEI MODELLI NAZIONALI E LIVELLI DI IMPLEMENTAZIONE DELLE CER

L'eterogeneità che caratterizza il recepimento delle direttive europee sulle CER rende necessario adottare un approccio comparativo capace di interpretare i differenti livelli di sviluppo raggiunti nei vari contesti nazionali. La diffusione delle CER non segue infatti un percorso uniforme, ma riflette la diversa capacità degli Stati membri di tradurre il quadro normativo europeo in strumenti operativi, modelli organizzativi e politiche territoriali efficaci. In questa prospettiva, i diversi sistemi nazionali sono stati classificati secondo un criterio di maturità normativa e operativa, inteso non come graduatoria di merito, bensì come strumento interpretativo utile a comprendere le differenti traiettorie evolutive delle comunità energetiche nei Paesi europei.
La classificazione è costruita considerando tre dimensioni principali:

[18] Palerm Salazar, J. M. (2022). The jungle nature of the paesaggio svuotato. A proposito di Berlino, "natura urbana" architettura, arte e vuoto come materia del progetto. Il caso del Natur Park Shöneberger Südgländе.

- il livello di recepimento delle Direttive (UE) 2018/2001 (RED II) e 2019/944 (IEMD);
- la presenza di strumenti nazionali di sostegno economico, amministrativo e regolatorio;
- il grado di consolidamento dei modelli organizzativi e gestionali delle comunità energetiche.

Sulla base di tali criteri è stato definito un sistema articolato in quattro livelli di maturità:

- Livello A – Paesi pionieri, caratterizzati da un rapido recepimento della normativa europea e dalla presenza di modelli operativi consolidati;
- Livello B – Paesi avanzati, nei quali il quadro normativo risulta sostanzialmente definito e la diffusione delle CER è in progressiva espansione;
- Livello C – Paesi intermedi, contraddistinti da un recepimento recente o ancora in fase di consolidamento, con un numero limitato di esperienze operative;
- Livello D – Paesi in ritardo, nei quali persistono lacune normative, regolatorie o organizzative che limitano l'effettiva diffusione delle comunità energetiche.

La classificazione, riportata nella Tabella A.1 dell'Appendice 1, costituisce una griglia interpretativa finalizzata a mettere in relazione il quadro normativo, la governance, gli strumenti di supporto e il grado di sviluppo delle CER, evidenziando come la maturità dei diversi modelli nazionali dipenda dall'interazione tra fattori legislativi, istituzionali, territoriali e tecnologici.

Essa rappresenta inoltre il riferimento metodologico per la successiva selezione dei casi studio sviluppata nel Capitolo 2. La scelta dei Paesi oggetto dell'analisi comparativa – Italia, Francia, Spagna, Austria e Regno Unito – non risponde a criteri di rappresentatività statistica, bensì alla volontà di analizzare differenti modelli di sviluppo delle comunità energetiche e della pianificazione energetica territoriale. I quattro Paesi appartenenti all'Unione Europea consentono di confrontare differenti modalità di recepimento delle direttive europee e diversi livelli di maturità delle CER, mentre il Regno Unito, pur operando al di fuori del quadro normativo comunitario, costituisce un caso comparativo di particolare interesse per l'evoluzione dei modelli di community energy, della pianificazione energetica locale e della governance multilivello.

L'obiettivo della classificazione non è quindi individuare modelli migliori in senso assoluto, ma fornire il quadro metodologico attraverso cui interpretare le differenti modalità con cui i sistemi energetici territoriali si stanno evolvendo verso forme sempre più integrate di produzione distribuita, partecipazione comunitaria e pianificazione della transizione energetica.

1.4.3 CRITERI INTERPRETATIVI PER L'ANALISI COMPARATIVA DELLE ESPERIENZE CER EUROPEE

La matrice analitica sviluppata per la caratterizzazione dei casi studio è finalizzata alla sistematizzazione e al confronto delle esperienze di Comunità Energetiche Rinnovabili individuate nei diversi contesti nazionali. L'obiettivo non è attribuire un valore gerarchico ai modelli analizzati, ma individuare configurazioni ricorrenti, condizioni abilitanti e fattori critici che influenzano la capacità delle CER di integrarsi nei sistemi territoriali.

La struttura di analisi integra cinque dimensioni principali: territoriale, tecnologica, organizzativa, economico-finanziaria e strategica. Tale articolazione consente di superare una lettura esclusivamente infrastrutturale delle comunità energetiche, interpretandole come sistemi socio-tecnici complessi nei quali la produzione energetica interagisce con configurazioni spaziali, modelli di governance, capacità organizzative e processi di sviluppo locale. I criteri individuati derivano dall'analisi dello stato dell'arte e sono stati selezionati sulla base della loro capacità di descrivere gli elementi maggiormente ricorrenti nella letteratura scientifica e nelle esperienze operative internazionali. La matrice viene utilizzata come strumento comparativo per classificare le caratteristiche dei casi studio selezionati e individuare relazioni tra configurazione energetica, contesto territoriale e modello organizzativo. Per uniformare la raccolta delle informazioni provenienti da fonti eterogenee, alcuni indicatori qualitativi sono stati tradotti attraverso una codifica dicotomica di tipo binario:

- valore 1: presenza o applicabilità del criterio analizzato nel caso studio;
- valore 0: assenza o mancata evidenza del criterio nelle fonti disponibili.

Tale codifica non rappresenta un indice di performance né una valutazione della qualità del modello analizzato, ma costituisce uno strumento descrittivo finalizzato a rendere confrontabili esperienze

caratterizzate da differenti condizioni normative, territoriali e organizzative.

La matrice è pertanto utilizzata per supportare una lettura comparativa multidimensionale dei casi studio, individuando non soltanto le caratteristiche tecniche degli interventi, ma anche le relazioni tra infrastrutture energetiche, territorio, governance e potenziale di replicazione.

1.4.3.1 Identificazione generale del caso studio

La prima sezione della matrice riguarda l'identificazione generale del caso studio e definisce le informazioni necessarie alla classificazione univoca dell'iniziativa analizzata. Ogni caso viene associato a un codice identificativo (ID), utilizzato per la gestione comparativa della banca dati e per consentire un confronto sistematico tra differenti esperienze.

La denominazione del caso studio corrisponde al nome ufficiale del progetto, della comunità energetica, dell'iniziativa o dell'intervento oggetto di analisi. La localizzazione regionale (Regione) permette invece di inquadrare il progetto rispetto al contesto amministrativo di riferimento, evidenziando eventuali differenze normative, climatiche e territoriali che possono influenzarne lo sviluppo.

Il Comune (Municipality) rappresenta un ulteriore livello di dettaglio territoriale e assume particolare rilevanza nell'analisi del ruolo della governance locale, considerando il contributo delle amministrazioni pubbliche nella promozione, coordinamento o facilitazione delle iniziative energetiche. Infine, l'anno di costituzione identifica il momento di avvio formale del progetto o della costituzione del soggetto promotore, fornendo un'indicazione temporale utile per valutare l'evoluzione e la maturità dell'iniziativa.

1.4.3.2 Implementation phase – Stato di attuazione

Questa categoria identifica il livello di maturità raggiunto dal progetto e consente di distinguere tra iniziative già operative e modelli ancora in fase di sviluppo.

La classificazione Done comprende i progetti completati e funzionanti, nei quali le infrastrutture energetiche risultano installate e il modello gestionale è già attivo. Questa categoria permette di analizzare esperienze consolidate, valutandone gli effetti concreti in termini energetici, organizzativi e territoriali.

La categoria Designed comprende invece progetti ancora in fase progettuale o pianificatoria. Pur non essendo ancora realizzati, tali casi

risultano rilevanti poiché consentono di individuare strategie emergenti, scenari futuri e potenziali traiettorie evolutive della transizione energetica locale.

1.4.3.3 Relationship with the territory – Relazione con il territorio

Questa dimensione analizza il rapporto tra l'intervento energetico e il contesto spaziale nel quale viene inserito, considerando sia la relazione con il patrimonio costruito sia l'integrazione nel paesaggio.

L'Architectural integration valuta il livello di integrazione dell'impianto con gli edifici esistenti, gli elementi architettonici e il patrimonio costruito. Tale criterio comprende, ad esempio, installazioni fotovoltaiche collocate su coperture, facciate o strutture integrate nell'edificio, analizzando il grado di compatibilità tra produzione energetica e qualità architettonica.

La *Landscape integration* riguarda invece il rapporto tra infrastruttura energetica e paesaggio, considerando gli aspetti relativi alla mitigazione degli impatti visivi, alla compatibilità ambientale e all'inserimento territoriale dell'intervento. Questa dimensione permette quindi di valutare come le infrastrutture energetiche contribuiscano alla trasformazione dello spazio senza compromettere i caratteri identitari del territorio (Angrilli, et al. 2011; Angrilli, 2018).

1.4.3.4 Scope of intervention – Ambito di intervento

La classificazione dell'ambito di intervento identifica la scala fisica e funzionale alla quale si sviluppa il progetto energetico, distinguendo tra dimensione edilizia, urbana e territoriale.

La categoria *Building* comprende gli interventi localizzati prevalentemente sul singolo edificio, come impianti fotovoltaici installati su coperture o sistemi di autoconsumo condominiale. In questo caso la produzione energetica è principalmente associata ai consumi di uno specifico edificio o complesso edilizio.

La categoria *Urban* comprende invece interventi che coinvolgono sistemi urbani più complessi, come quartieri, gruppi di edifici o infrastrutture pubbliche. In questi casi l'integrazione energetica avviene a livello di comunità urbana, attraverso la condivisione della produzione e dei consumi tra più soggetti.

La categoria *Territorial* identifica infine iniziative sviluppate a scala sovracomunale o territoriale, caratterizzate da una maggiore complessità gestionale e spaziale. Questi modelli coinvolgono generalmente più soggetti, infrastrutture distribuite e sistemi energetici estesi.

1.4.3.5 Energy source – Fonte energetica

Questa sezione identifica le tecnologie energetiche rinnovabili utilizzate nel progetto e permette di classificare i diversi sistemi di produzione.

La categoria *Photovoltaic* comprende gli interventi basati sulla conversione dell'energia solare in energia elettrica attraverso pannelli fotovoltaici. La categoria Solar thermal riguarda invece la produzione di energia termica mediante tecnologie solari dedicate alla generazione di calore.

La categoria *Hydroelectric* identifica gli impianti che producono energia elettrica attraverso lo sfruttamento della risorsa idrica, mentre Wind power comprende i sistemi basati sulla produzione energetica mediante fonte eolica.

La categoria Biomassa include gli interventi che utilizzano materiale organico di origine biologica per finalità energetiche, mentre Biogas riguarda i sistemi basati sulla produzione energetica attraverso processi di digestione anaerobica di matrici organiche.

1.4.3.6 Development model – Modello di sviluppo

Questa dimensione analizza la struttura organizzativa e gestionale alla base del modello energetico, individuando il ruolo degli attori promotori e le modalità di partecipazione.

Il *Collective Self-consumption Model* identifica i modelli fondati sulla condivisione dell'energia prodotta tra utenti appartenenti allo stesso edificio o a uno specifico ambito locale, con particolare riferimento ai sistemi di autoconsumo collettivo.

Il *Cooperative Citizen-led Model* comprende invece iniziative promosse direttamente dai cittadini attraverso cooperative energetiche o forme di proprietà collettiva, nelle quali la partecipazione degli utenti rappresenta un elemento centrale della governance.

Il *Municipality-led Model* riguarda i progetti promossi e coordinati dalle amministrazioni locali, che assumono un ruolo attivo nella pianificazione, gestione o facilitazione dell'iniziativa.

Infine, l'*Hybrid Developer-led Model* identifica modelli misti caratterizzati dalla collaborazione tra soggetti privati, pubblici e comunitari, nei quali competenze differenti concorrono alla realizzazione del progetto.

1.4.3.7 Localizzazione territoriale

La classificazione territoriale utilizza categorie urbanistiche per identificare il contesto insediativo nel quale viene sviluppata l'iniziativa energetica.

La Zona A – *Historic Town / Rural Village* comprende centri storici, borghi rurali e nuclei consolidati caratterizzati da valore storico e identitario. La Zona B – *Consolidated Residential Area* riguarda tessuti residenziali consolidati, mentre la Zona C – *Expanding Residential Area* identifica aree interessate da processi di espansione urbana.

La Zona D – *Industrial/Production Facilities* comprende aree produttive, industriali e artigianali, mentre la Zona E – Agricultural Use riguarda territori agricoli e rurali. La Zona F – Public Facilities and Infrastructure include aree destinate a servizi pubblici, scuole, strutture sanitarie e infrastrutture collettive. Infine, la Zona G – Tourist Facilities identifica contesti caratterizzati dalla presenza di strutture turistico-ricettive.

1.4.3.8 Caratteristiche tecniche dell'intervento

Questa sezione raccoglie le principali caratteristiche tecniche dell'impianto e consente di descrivere quantitativamente la configurazione energetica.

La voce Locazione identifica l'indirizzo o la posizione geografica dell'intervento, mentre la Potenza [kW] indica la capacità nominale installata della tecnologia energetica utilizzata.

L'Accumulatore [kW] descrive la capacità del sistema di accumulo elettrico eventualmente associato all'impianto, evidenziando il ruolo delle tecnologie di stoccaggio nella gestione della produzione rinnovabile.

La voce relativa allo Smaltimento dei rifiuti organici [kW] riguarda invece la capacità energetica associata alla valorizzazione delle matrici organiche nei sistemi basati su biomassa o biogas.

1.4.3.9 Attori coinvolti

La categoria relativa agli attori coinvolti analizza la struttura della governance e il livello di partecipazione dei diversi soggetti che contribuiscono alla realizzazione e gestione del progetto.

La categoria *Citizens / Households* comprende la partecipazione diretta di cittadini o nuclei familiari, mentre Local Authorities identifica il coinvolgimento di Comuni, Unioni di Comuni o altri enti territoriali.

La categoria SMEs / Private Companies riguarda la presenza di imprese private, operatori energetici o soggetti economici coinvolti

nello sviluppo dell'iniziativa. *Civil Society Organizations* comprende invece associazioni, organizzazioni non governative o realtà territoriali della società civile.

Infine, la categoria *Public Institutions* include scuole, università, ospedali e altri enti pubblici che partecipano alla configurazione energetica o gestionale del progetto.

1.4.3.10 Aspetti economici e fonti di finanziamento

Questa sezione analizza la struttura economica del progetto, individuando le principali modalità attraverso cui vengono sostenuti gli investimenti e la gestione dell'iniziativa.

La categoria *Citizen Equity* identifica gli investimenti diretti effettuati dai cittadini partecipanti, mentre Local Authorities comprende i finanziamenti provenienti da amministrazioni comunali o territoriali.

La voce Regional Funding riguarda contributi derivanti da programmi regionali, mentre *National Funding* include incentivi e finanziamenti nazionali. EU Funding comprende invece risorse provenienti da programmi europei, come fondi comunitari o strumenti di finanziamento dedicati alla transizione energetica.

La categoria *Bank Loans* identifica il ricorso al credito bancario, mentre *Private Investors* riguarda investimenti effettuati da soggetti privati. Infine, *Energy Revenues* comprende i ricavi derivanti dalla vendita o dalla valorizzazione dell'energia prodotta.

1.4.3.11 Aspetti strategici

L'ultima dimensione della matrice valuta il potenziale evolutivo del modello analizzato, considerando la possibilità di applicazione in altri contesti.

La Replicabilità riguarda la capacità del modello di essere riprodotto in territori caratterizzati da condizioni analoghe, mentre la Scalabilità valuta la possibilità di aumentare la dimensione dell'intervento, il numero degli utenti coinvolti o la capacità energetica mantenendo efficacia gestionale.

La Transferibilità analizza invece la possibilità di adattare il modello a contesti differenti dal punto di vista normativo, geografico o socio-economico.

La sezione Nota raccoglie commenti interpretativi relativi a condizioni abilitanti, criticità riscontrate o elementi distintivi del caso studio, mentre la voce Fonte / *Link* registra i riferimenti bibliografici, documentali o digitali utilizzati per la raccolta delle informazioni.

La matrice analitica elaborata costituisce lo strumento metodologico attraverso il quale vengono organizzate e confrontate le informazioni relative ai casi studio selezionati. Essa integra dimensioni territoriali, tecnologiche, organizzative ed economico-finanziarie, superando una lettura esclusivamente infrastrutturale delle CER e interpretandole come sistemi socio-tecnici complessi.

Gli indicatori individuati consentono di classificare i casi analizzati secondo criteri omogenei, rendendo confrontabili esperienze caratterizzate da differenti condizioni normative, territoriali e istituzionali. La codifica adottata assume pertanto una funzione descrittiva e interpretativa e non costituisce un indice prestazionale o una valutazione gerarchica dei modelli analizzati.

La matrice rappresenta quindi il riferimento operativo per le successive fasi della ricerca: dalla selezione dei contesti nazionali comparabili (Cfr. Cap. 2, § 2.3), alla schedatura dei casi studio (Cfr. Cap. 2, § 2.4), fino all'elaborazione comparativa dei risultati attraverso strumenti di visualizzazione e analisi incrociata (Cfr. Cap. 2, § 2.5).

1.5 MODELLI EXTRA-EUROPEI

1.5.1 MODELLI EXTRA-EUROPEI

Negli ultimi anni, le CER e i modelli di produzione distribuita da fonti rinnovabili hanno conosciuto una significativa espansione su scala globale, favorita da politiche internazionali di decarbonizzazione, tra cui il *Green Deal* europeo e le principali strategie climatiche multilaterali. Tale evoluzione si inserisce in un quadro più ampio di transizione energetica che non riguarda soltanto la dimensione tecnologica, ma anche quella sociale, paesaggistica e culturale, in cui la progettazione degli impianti energetici assume un ruolo sempre più integrato rispetto al territorio (Cuocolo, Giampellegrini & Granato, 2023; Di Salvatore, 2023)[19].

La letteratura recente evidenzia come la transizione energetica richieda un equilibrio tra produzione energetica, tutela del paesaggio e partecipazione delle comunità locali, configurando nuovi modelli di

[19] Cuocolo, L., Giampellegrini, P. P., & Granato, O. (2023). Le comunità energetiche rinnovabili: Modelli, regole, profili applicativi. EGEA spa; Di Salvatore, E. (2023). Il futuro delle comunità energetiche. Milano.

governance territoriale. In questo contesto, emergono approcci progettuali che integrano energia e dimensione estetico-culturale del paesaggio, talvolta attraverso pratiche riconducibili alla land art e alla progettazione paesaggistica applicata alle infrastrutture energetiche.

In ambito europeo, diverse esperienze hanno mostrato la possibilità di integrare la produzione da fonti rinnovabili con la qualità del paesaggio e l'accettabilità sociale degli impianti. In Italia, iniziative come la Puglia Solar Initiative, così come i progetti sviluppati in *Austria* (Energieautarkie) e in *Francia* (regione dell'Ardèche), evidenziano modelli in cui impianti fotovoltaici ed eolici sono stati inseriti in contesti rurali e periurbani con particolare attenzione all'impatto visivo e paesaggistico (Gerli & Tricarico, 2024)[20]. Analogamente, in *Germania* e nei *Paesi Bassi*, casi come *Reußenköge* e *Bocholtz* dimostrano la possibilità di combinare produzione energetica rinnovabile e valorizzazione del paesaggio attraverso interventi integrati che includono elementi di progettazione territoriale e, in alcuni casi, espressioni artistiche applicate alle infrastrutture energetiche (Brunoro, Bizzarri & Boldrin, 2024)[21].

Nel contesto statunitense, lo sviluppo delle comunità energetiche urbane ha assunto forme particolarmente avanzate, soprattutto attraverso *microgrid* e sistemi di generazione distribuita. Esperienze come il *Los Angeles Eco-Village* e la *Brooklyn Microgrid* evidenziano l'integrazione tra innovazione tecnologica, rigenerazione urbana e pratiche di sostenibilità sociale, supportate da eventi e programmi formativi come i RE+ *Texas Workshops* (2026) e il *Solar in Your Community Workshop* (2023), che favoriscono la diffusione di modelli energetici comunitari (Zanvettor, Casini & Vicino, 2024; Barja-Martinez et al., 2025)[22].

In Asia, il caso cinese rappresenta uno degli esempi più rilevanti di implementazione su larga scala delle energie rinnovabili integrate con la pianificazione territoriale. Progetti come il *Qinghai Solar Park*, lo *Zhejiang Solar Park*, il *Tianjin Green Energy Hub* e iniziative analoghe

---

[20] Gerli, F., & Tricarico, L. (2024). Energie di Comunità: Le Comunità Energetiche Rinnovabili per un Futuro Sostenibile. *Milano: Fondazione Giangiacomo Feltrinelli*.

[21] Brunoro, S., Bizzarri, G., & Boldrin, E. (2024). Exploring the potential of energy communities in the Italian territory. *Frontiers in Built Environment*, *10*, 1365115.

[22] Zanvettor, G. G., Casini, M., & Vicino, A. (2024). On Optimal Management of Energy Storage Systems in Renewable Energy Communities. *arXiv preprint arXiv:2403.13707*;

mostrano come la produzione energetica possa essere combinata con usi agricoli e assetti territoriali multifunzionali, contribuendo alla riduzione degli impatti ambientali e alla diffusione di pratiche di sensibilizzazione energetica (Gruber & Wogrin, 2025; Bianchini, Casini & Gholami, 2025).

In *Oceania*, l'*Australia* rappresenta un ulteriore laboratorio di sperimentazione, con iniziative come *Byron Bay*, *Sundown Solar Community* e *Maitland Solar*, in cui la produzione solare è stata integrata con la valorizzazione del paesaggio naturale e con pratiche di educazione ambientale e partecipazione comunitaria (Hoops & Grignani, 2024).

Nel contesto africano e sudamericano, le esperienze sono spesso legate a programmi di elettrificazione sostenibile e sviluppo locale. Progetti come la *Rwanda Solar Village*, il *Kenya Green Energy Community*, il *Patagonia Solar Project* in *Argentina* e il *Parco Solare del Deserto di Atacama* in *Cile* evidenziano la capacità delle energie rinnovabili di contribuire allo sviluppo territoriale anche in contesti rurali e climaticamente estremi, riducendo la dipendenza dai combustibili fossili e promuovendo modelli energetici decentralizzati (IRENA, 2023).

Nel complesso, tali esperienze evidenziano come la dimensione estetica, paesaggistica e sociale della progettazione energetica stia assumendo un ruolo crescente nei processi di accettazione e integrazione territoriale delle infrastrutture rinnovabili. Tuttavia, permangono criticità significative legate alla governance, alla scalabilità dei modelli e alla loro replicabilità in contesti istituzionali e socio-economici differenti.

A livello globale, il *Renewable Energy Statistics 2024* evidenzia un persistente squilibrio territoriale nella diffusione delle energie rinnovabili. Sebbene la capacità installata continui a crescere a ritmi record, la distribuzione degli investimenti risulta fortemente concentrata nelle economie avanzate, mentre le regioni in via di sviluppo – in particolare Africa e alcune aree dell'Asia – mostrano un

ritardo significativo dovuto a limitazioni infrastrutturali, finanziarie e istituzionali (IRENA, 2024)[23].

Questo divario rappresenta una delle principali criticità della transizione energetica globale, poiché le aree meno sviluppate, pur essendo spesso caratterizzate da elevato potenziale rinnovabile, continuano a dipendere in larga misura da fonti fossili. Il rapporto sottolinea pertanto la necessità di rafforzare i meccanismi internazionali di finanziamento e cooperazione tecnologica, al fine di garantire una transizione energetica più equa e inclusiva.

Un ulteriore contributo interpretativo è offerto dal *Rapporto della Società Geografica Italiana su Energia e Territorio*, che propone una lettura sistemica del rapporto tra energia, paesaggio e territorio. Il volume si configura come un compendio interdisciplinare che integra approcci geografici, economici e ambientali, articolandosi in tre sezioni principali (si veda Figura A1.3 in Appendice 1):

- Scenari e politiche, dedicata all'evoluzione dei sistemi energetici e alle dinamiche della transizione verso le fonti rinnovabili a scala globale ed europea;
- Sistemi energetici e sistemi territoriali in Italia, focalizzata sulle interrelazioni tra energia, paesaggio e trasformazioni territoriali;
- Scenari per l'Italia: le questioni aperte, che affronta temi ancora oggetto di dibattito, tra cui politiche energetiche, infrastrutture, mercato e sostenibilità.

Nel complesso, il rapporto evidenzia come la transizione energetica rappresenti non solo un processo tecnologico, ma anche una trasformazione profonda dei modelli di sviluppo territoriale, in cui energia, ambiente e paesaggio risultano sempre più interdipendenti.

1.5.2 INTEGRAZIONE DELLE RETI ENERGETICHE SUL TERRITORIO: STRUMENTI, GOVERNANCE E CRITICITÀ

L'integrazione delle FER nei sistemi territoriali italiani configura un processo strutturale complesso, caratterizzato da una forte interdipendenza tra dimensione infrastrutturale, regolatoria e

[23] IRENA (2024), Renewable energy statistics 2024, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/IRENA_Renewable_Energy_Statistics_2024.pdf

pianificatoria (Marinelli, G., et al. 2016)[24]. Tale processo non si esaurisce nella sola localizzazione degli impianti, ma implica una riconfigurazione sistemica delle relazioni tra reti energetiche, assetti territoriali e livelli di governance multilivello.

In questo quadro, la definizione delle aree idonee rappresenta uno snodo regolatorio centrale, disciplinato dall'art. 20 del D.Lgs. 199/2021 e dal D.M. 21 giugno 2024, che attribuiscono alle Regioni un ruolo determinante nella selezione e qualificazione dello spazio energetico. Ne deriva un modello di pianificazione fortemente territorializzato, nel quale la produzione normativa regionale diventa un fattore discriminante per la localizzazione degli investimenti FER.

1.5.2.1 Regolazione regionale e frammentazione del quadro pianificatorio

L'analisi delle politiche regionali evidenzia una marcata eterogeneità nell'attuazione del quadro normativo nazionale. Alcune Regioni hanno già adottato strumenti organici di regolazione delle aree idonee, mentre altre si trovano in fasi intermedie o preliminari, determinando un sistema non uniforme sia in termini di criteri applicativi sia di output autorizzativi. Un quadro sinottico dell'evoluzione normativa regionale in materia di individuazione delle aree idonee è riportato nella Tabella A.1 2 (Appendice 1). In particolare:

- Regioni come Abruzzo e Sardegna hanno introdotto discipline strutturate sulle aree idonee/non idonee;
- altre, come Marche, hanno privilegiato approcci basati sul riuso di aree compromesse;
- Regioni quali Toscana, Puglia, Veneto e Piemonte risultano ancora in fase di consolidamento normativo;
- la Lombardia adotta un modello di indirizzo strategico basato su linee guida e obiettivi quantitativi.

Questa eterogeneità riflette non solo differenze morfologiche e ambientali, ma anche divergenze di natura politico-istituzionale, con effetti diretti sulla capacità di governance della transizione energetica. Le evidenze riportate da Legambiente (2024) confermano una significativa disomogeneità nell'adozione degli strumenti attuativi

[24] Marinelli, G., & Bedini, M. A. (2016). The Mid-adriatic Metropolitan Area in Marche Region. An Integrated Territorial Project that Includes Inland Areas and Cities in a Metropolitan Context to Relaunch Local Competitive Systems. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, *223*, 386-393.

entro le scadenze normative, con impatti diretti sulla coerenza rispetto agli obiettivi di burden sharing nazionale.

Tale frammentazione normativa si traduce in una differente distribuzione territoriale dello sviluppo delle fonti rinnovabili, evidenziando una relazione complessa tra disponibilità della risorsa, caratteristiche territoriali e condizioni autorizzative. In particolare, la distribuzione della potenza fotovoltaica installata in Italia restituisce un quadro spazialmente disomogeneo, analizzabile attraverso diverse scale territoriali: regionale, provinciale e pro capite. Come riportato nelle Figure A.1 4, A.1 5, A.1 6, A.1 7 (Appendice 1) la localizzazione degli impianti fotovoltaici evidenzia una maggiore concentrazione nelle regioni meridionali e insulari, dove le condizioni di irraggiamento solare risultano generalmente più favorevoli, ma anche una significativa variabilità interna determinata da fattori quali disponibilità di suolo, caratteristiche morfologiche, struttura insediativa e differenti modalità di gestione dei procedimenti autorizzativi.

A scala regionale emergono valori più elevati in territori caratterizzati da una maggiore disponibilità della risorsa solare e dalla presenza di impianti di media e grande taglia. L'analisi provinciale consente tuttavia di evidenziare ulteriori differenziazioni interne, mostrando come la distribuzione degli impianti non sia uniforme neppure all'interno delle singole regioni, ma dipenda da specifiche condizioni locali e dai diversi livelli di pianificazione energetica.

Il dato pro capite introduce inoltre una chiave interpretativa complementare, evidenziando territori nei quali la penetrazione del fotovoltaico risulta particolarmente significativa rispetto alla popolazione residente. Tale indicatore, se analizzato congiuntamente alla potenza complessiva installata, consente di evitare letture semplificate e di comprendere meglio le dinamiche territoriali della transizione energetica.

L'analisi incrociata della potenza fotovoltaica installata e della distribuzione pro capite conferma quindi come lo sviluppo delle energie rinnovabili in Italia non dipenda esclusivamente dal potenziale fisico della risorsa, ma dall'interazione tra fattori ambientali, economici, infrastrutturali e regolatori. Le differenze territoriali osservate evidenziano pertanto il ruolo centrale della pianificazione regionale e dei sistemi autorizzativi nel determinare modalità, tempi e localizzazione degli interventi FER.

In tale prospettiva, l'analisi delle richieste di concessione per impianti eolici e fotovoltaici conferma una distribuzione territoriale fortemente disomogenea, riconducibile non solo alla disponibilità della risorsa, ma anche alla diversa capacità amministrativa e normativa dei territori. Tali dinamiche si inseriscono nel processo di attuazione del TUR e nel raggiungimento degli obiettivi definiti dal Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima, evidenziando la necessità di un maggiore coordinamento tra pianificazione locale e indirizzi strategici nazionali. La regolazione tecnica della rete costituisce quindi il livello infrastrutturale attraverso cui la transizione energetica territoriale può essere effettivamente resa operativa. La diffusione delle FER, infatti, non dipende esclusivamente dalla disponibilità della risorsa, ma dalla capacità del sistema elettrico di integrare flussi distribuiti, variabili e territorialmente disomogenei.

1.5.2.2 Integrazione tra pianificazione territoriale e regolazione tecnica di rete

La dimensione territoriale si interfaccia direttamente con la regolazione tecnica della connessione alla rete elettrica, disciplinata da ARERA attraverso un insieme di strumenti normativi che definiscono condizioni di accesso, gestione e integrazione dei flussi energetici. La connessione degli impianti FER è regolata attraverso strumenti fondamentali quali il Testo Unico della Produzione (TUP), il Testo Integrato delle Connessioni Attive (TICA) e il Testo Integrato dei Sistemi Semplici di Produzione e Consumo (TISSPC). Tali strumenti definiscono il quadro tecnico-economico per l'allaccio alla rete e per la gestione dei flussi energetici distribuiti. Il principio dell'obbligo di connessione di terzi (Delibera ARG/elt 125/10) garantisce l'accesso non discriminatorio alla rete, mentre l'evoluzione verso le smart grid (Delibera ARERA 300/2017/R/eel) risponde alla crescente penetrazione di generazione non programmabile. In tale contesto assumono rilievo i Sistemi Semplici di Produzione e Consumo (SSPC), che rappresentano un elemento chiave per l'autoconsumo e la generazione distribuita, in particolare all'interno di CER.

1.5.2.3 Valutazione ambientale e razionalizzazione procedurale

Il sistema di Valutazione di Impatto Ambientale (VIA), disciplinato dal D.Lgs. 152/2006 e successive modifiche (D.Lgs. 104/2017), costituisce il principale strumento di controllo preventivo sugli impatti delle infrastrutture energetiche.

Le recenti riforme normative (DL 77/2021 e DPCM 2021) hanno introdotto soglie differenziate:

- fotovoltaico ≥ 10 MW (VIA statale);
- eolico onshore ≥ 30 MW;
- screening per impianti > 1 MW;
- soglie regionali più restrittive per piccoli impianti.

Il sistema PAUR ha introdotto una razionalizzazione procedurale integrata, mentre il GSE monitora oltre 3.700 procedimenti autorizzativi.

L'evoluzione recente evidenzia una crescente pressione istruttoria, non accompagnata da un adeguato incremento della capacità amministrativa, generando colli di bottiglia sistemici.

1.5.2.4 Dinamiche autorizzative e sistemi di connessione

Il ciclo autorizzativo delle FER si articola attraverso:

- VIA statale,
- Autorizzazione Unica (AU),
- PAS comunali,
- concessioni idroelettriche,
- procedure di connessione alla rete.

Il sistema evidenzia una crescita significativa delle istanze, accompagnata tuttavia da un disallineamento strutturale tra domanda autorizzativa e capacità amministrativa, con conseguente rallentamento nei tempi di rilascio. Si osserva inoltre una crescente dualità tra:

- modelli distribuiti (CER, autoconsumo diffuso),
- modelli centralizzati (impianti utility-scale).

Questa coesistenza genera tensioni sistemiche legate alla pianificazione infrastrutturale e all'accettabilità sociale degli impianti.

1.5.2.5 Dinamiche territoriali e lettura delle Autorizzazioni Uniche

L'analisi del sistema AU evidenzia una forte concentrazione territoriale e tecnologica delle autorizzazioni, con prevalenza del fotovoltaico nelle Regioni meridionali (Sicilia, Puglia, Lazio) e dell'eolico nel Mezzogiorno.

Il modello emergente è caratterizzato da una crescente scala dimensionale degli impianti, coerente con gli obiettivi del PNIEC, ma critico sotto il profilo della compatibilità paesaggistica e dell'accettabilità sociale.

Il sistema mostra inoltre criticità strutturali:

- frammentazione normativa regionale;

- eterogeneità dei tempi autorizzativi;
- carenze di interoperabilità dei dati;
- dipendenza da strumenti informativi non integrati (es. BUR);
- necessità di sistemi informativi unificati (SUER).

1.5.2.6 Piccole concessioni idroelettriche e resilienza locale

Le concessioni idroelettriche ≤ 3.000 kW evidenziano una distribuzione concentrata nelle aree alpine (Lombardia, Piemonte, Trentino-Alto Adige, Veneto), ma anche una diffusione residuale nelle aree appenniniche. Esse rappresentano:

- risorse programmabili a scala locale,
- elementi potenzialmente integrabili nelle CER,
- componenti di resilienza del sistema elettrico.

1.5.2.7 Evoluzione delle istanze VIA (2022–2024)

Le rappresentazioni grafiche riportate in Appendice A costituiscono un supporto interpretativo essenziale, in quanto consentono di integrare l'analisi quantitativa con una lettura qualitativa delle dinamiche autorizzative, rafforzando l'approccio *evidence-based* della ricerca. In particolare, il confronto tra l'andamento delle istanze di Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) presentate e la distribuzione delle autorizzazioni rilasciate per tecnologia permette di cogliere l'evoluzione del sistema autorizzativo nazionale, evidenziando i principali trend di crescita, la progressiva specializzazione tecnologica e gli effetti delle recenti misure di semplificazione amministrativa.

Come illustrato nella Figura A.1 9, il numero delle istanze VIA ha registrato una crescita particolarmente significativa nel triennio 2022–2024, in linea con l'accelerazione impressa dagli obiettivi del Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) e del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR). Le richieste sono infatti passate da 8 istanze nel 2022, corrispondenti a 389 MW, a 39 istanze nel 2023 (2.315 MW), fino a raggiungere 127 istanze nel 2024, per una potenza complessiva pari a 7.433 MW.

La Figura A.1 10 evidenzia, invece, la distribuzione delle istanze VIA con esito positivo per tecnologia, dalla quale emerge una netta predominanza dell'agrivoltaico, responsabile di circa il 66% della potenza autorizzata, seguito dal fotovoltaico (24%), dall'eolico onshore (9%) e dall'eolico offshore (2%). Tale configurazione conferma il progressivo consolidamento dell'agrivoltaico quale paradigma emergente della transizione energetica, capace di integrare

produzione di energia rinnovabile e continuità delle attività agricole attraverso modelli di uso multifunzionale del suolo (Dupraz et al., 2011). L'evoluzione osservata testimonia non solo un incremento quantitativo delle procedure autorizzative, ma anche una trasformazione qualitativa delle strategie di sviluppo delle fonti rinnovabili. La crescente incidenza degli impianti agrivoltaici riflette infatti l'evoluzione del quadro normativo e il progressivo orientamento verso sistemi energetici territoriali maggiormente integrati, caratterizzati dalla complementarità tra produzione energetica, tutela del paesaggio, attività agricole e sviluppo delle smart grid. Nel complesso, le evidenze riportate nelle Figure A.1 9 e A.1 10 confermano come il rafforzamento delle procedure autorizzative costituisca uno degli elementi chiave per il conseguimento degli obiettivi nazionali di decarbonizzazione e per l'accelerazione della transizione energetica.

1.5.2.8 Dinamiche del fotovoltaico e squilibri territoriali

Il sistema fotovoltaico italiano ha raggiunto una capacità installata di circa 25 GW, con oltre il 60% della potenza riconducibile a configurazioni di generazione distribuita. Come evidenziato nella Figura A.1 4 (Appendice 1), il confronto tra la distribuzione della capacità fotovoltaica installata e la mappatura del potenziale di irraggiamento solare nazionale consente di evidenziare significative eterogeneità territoriali, riconducibili sia alle differenti condizioni geografiche sia ai diversi livelli di sviluppo infrastrutturale e autorizzativo. Dall'analisi emergono alcune criticità strutturali come il forte squilibrio territoriale tra Nord e Sud; la frammentazione della distribuzione degli impianti; ed il disallineamento tra il potenziale della risorsa solare e la capacità effettivamente installata. Il dato pro capite, se considerato isolatamente, risulta pertanto poco rappresentativo e richiede una lettura integrata che tenga conto della capacità installata complessiva, della disponibilità della risorsa solare, della domanda energetica e delle caratteristiche territoriali dei diversi contesti regionali (si veda Figura A.1 4 in Appendice 1).

1.5.2.9 Saldo elettrico estero e inefficienze sistemiche

L'incremento dell'export elettrico (da 3 a 19 TWh) riflette una combinazione di surplus produttivo non completamente assorbito, rigidità infrastrutturali della rete e disomogeneità territoriale della domanda. Il saldo estero assume pertanto una valenza sistemica, configurandosi come indicatore indiretto delle inefficienze strutturali del sistema energetico nazionale (si veda Tabella A.1 4 in Appendice 1).

Tale configurazione evidenzia una fragilità strutturale del sistema: territori caratterizzati da condizioni climatiche favorevoli e da un elevato potenziale energetico non riescono a tradurre tali vantaggi in una diffusione omogenea e su larga scala degli impianti da fonti rinnovabili. Le principali criticità sono riconducibili alla debolezza delle infrastrutture di rete, alla complessità dei procedimenti autorizzativi, alla frammentazione delle competenze amministrative e alla presenza di vincoli ambientali e paesaggistici che rallentano l'attuazione degli interventi. In questa prospettiva, anche gli elevati valori di potenza installata pro capite, osservabili in alcune aree del Paese, non costituiscono necessariamente un indicatore di maggiore maturità del sistema energetico, bensì evidenziano squilibri territoriali e una limitata integrazione tra pianificazione energetica, sviluppo infrastrutturale e governo del territorio (si veda Figura A1.7 in Appendice 1). L'analisi conferma pertanto che la diffusione delle fonti rinnovabili non può essere interpretata esclusivamente in termini quantitativi, ma deve essere letta come un processo di trasformazione territoriale complesso e multilivello.

La principale criticità del sistema italiano non risiede nella disponibilità della risorsa energetica, bensì nella frammentazione della governance e nella disomogeneità degli strumenti di pianificazione e attuazione. Ne deriva la necessità di un'evoluzione verso un modello integrato, fondato sull'allineamento tra pianificazione energetica, infrastrutture di rete e governance territoriale multilivello. In tale prospettiva, il superamento di una logica prevalentemente autorizzativa a favore di un approccio programmatorio e strategico rappresenta una condizione imprescindibile per garantire la coerenza tra sviluppo delle fonti rinnovabili, sicurezza del sistema elettrico e conseguimento degli obiettivi di decarbonizzazione.

1.5.3 LETTURA PER CLUSTER REGIONALI

1.5.3.1 Distribuzione territoriale delle richieste autorizzative FER e classificazione dei cluster regionali

L'analisi della distribuzione territoriale delle richieste di concessione per impianti alimentati da fonti energetiche rinnovabili evidenzia una significativa eterogeneità regionale, non riconducibile esclusivamente alla disponibilità della risorsa energetica o alle condizioni climatiche favorevoli. I dati elaborati attraverso la piattaforma di monitoraggio PNIEC del Gestore dei Servizi Energetici (GSE) mostrano come la

localizzazione delle iniziative progettuali per impianti eolici e fotovoltaici derivi dall'interazione tra molteplici fattori: potenziale energetico disponibile, caratteristiche morfologiche e insediative del territorio, presenza di vincoli ambientali e paesaggistici, capacità amministrativa degli enti locali e configurazione dei sistemi autorizzativi regionali.

La distribuzione delle istanze restituisce una geografia energetica caratterizzata da marcate differenze territoriali. Alcune Regioni, grazie alla combinazione tra elevate condizioni di irraggiamento solare, disponibilità di superfici idonee e attrattività per gli investimenti, costituiscono principali poli di sviluppo delle FER; altre presentano invece una minore intensità progettuale, determinata da maggiori vincoli territoriali, modelli energetici consolidati o differenti condizioni insediative.

Le figure richiamate nel presente capitolo sono riportate integralmente nell'Appendice 1, alla quale si rimanda per la consultazione della documentazione cartografica e dei dataset utilizzati nell'analisi (Figure A.1 5, A.1 6, A.1 7, Appendice 1). La rappresentazione spaziale delle richieste autorizzative consente di individuare le relazioni tra localizzazione degli impianti, pressione progettuale, capacità di pianificazione e caratteristiche territoriali. L'analisi integrata della distribuzione della potenza fotovoltaica installata (Figure A.1 5) evidenzia come lo sviluppo delle FER non segua una dinamica uniforme sul territorio nazionale. La concentrazione degli impianti risulta infatti condizionata non solo dal potenziale fisico della risorsa, ma anche dalla capacità dei territori di governare i processi localizzativi attraverso strumenti normativi, pianificatori e amministrativi (Figura A.1 6).

Il confronto tra potenza complessiva installata e valori pro capite introduce inoltre un elemento interpretativo rilevante. Valori elevati di capacità fotovoltaica per abitante non corrispondono necessariamente a una diffusione capillare della tecnologia, potendo derivare dalla combinazione tra bassa densità demografica, presenza di installazioni puntuali e limitata capacità installata complessiva. Il dato pro capite deve pertanto essere interpretato all'interno di un quadro territoriale più ampio, considerando anche popolazione residente, domanda energetica e caratteristiche insediative (Figura A.1 7).

Sulla base delle dinamiche osservate, il territorio nazionale può essere ricondotto a tre principali configurazioni territoriali:

- **Regioni ad alta pressione autorizzativa**, caratterizzate da un'elevata concentrazione di istanze per impianti eolici e fotovoltaici, forte attrattività degli investimenti e crescente complessità nella gestione degli effetti cumulativi sul territorio;
- **Regioni a regolazione restrittiva o consolidata**, nelle quali strumenti pianificatori strutturati, elevati livelli di tutela ambientale e paesaggistica o specifici modelli energetici locali determinano una maggiore selettività nella localizzazione degli impianti;
- **Regioni in transizione normativa**, caratterizzate da un quadro regolatorio ancora in evoluzione, nel quale l'individuazione delle aree idonee e la definizione dei criteri localizzativi risultano in fase di consolidamento.

All'interno del primo cluster, la Puglia rappresenta il caso più significativo per intensità progettuale. La combinazione tra condizioni favorevoli di irraggiamento solare, disponibilità di superfici agricole e consolidata presenza di impianti FER ha determinato una rilevante concentrazione di iniziative. Tale configurazione ha reso necessario un progressivo rafforzamento degli strumenti di regolazione territoriale, finalizzati a governare gli effetti cumulativi degli interventi sul paesaggio e sull'uso del suolo.

Dinamiche analoghe, seppur con intensità differenti, interessano Sicilia, Campania e Basilicata, dove l'elevato potenziale rinnovabile si confronta con differenti livelli di coordinamento istituzionale e con la necessità di integrare maggiormente pianificazione energetica e governo del territorio.

L'analisi dei dati della piattaforma PNIEC Monitoraggio[25] del GSE (Figura A.1 11, Appendice 1) evidenzia inoltre una significativa crescita della potenza fotovoltaica annualmente installata in Italia, accompagnata da una trasformazione dei meccanismi di sviluppo del settore. La diffusione del fotovoltaico non risulta più legata esclusivamente ai sistemi incentivanti tradizionali, ma coinvolge progressivamente configurazioni di mercato, autoconsumo individuale e collettivo e modelli di condivisione energetica.

---

[25] Sito on-line: https://www.pniecmonitoraggio.it/

Tale evoluzione rappresenta una trasformazione rilevante del sistema energetico nazionale, favorendo modelli di produzione maggiormente distribuiti e territorialmente diffusi. Tuttavia, l'incremento della capacità installata non determina automaticamente una distribuzione equilibrata degli impianti, poiché permane una forte dipendenza dalle condizioni territoriali, dalla disponibilità di superfici, dalla capacità delle reti e dalla struttura dei sistemi autorizzativi regionali.

Nel complesso, la classificazione per cluster regionali evidenzia come la transizione energetica italiana proceda attraverso traiettorie territorialmente differenziate, determinate dall'interazione tra risorsa energetica, regolazione pubblica e capacità amministrativa. La crescita delle FER deve pertanto essere accompagnata da modelli integrati di pianificazione capaci di coordinare sviluppo energetico, infrastrutture di rete, tutela ambientale e trasformazioni territoriali.

1.5.3.2 Regioni ad alta pressione autorizzativa

Rientrano in questo cluster Puglia, Sicilia, Campania e Basilicata, accomunate da un'elevata intensità progettuale, da una crescente pressione sulle procedure autorizzative e dalla necessità di rafforzare gli strumenti di pianificazione territoriale. Le dinamiche regionali relative al volume delle richieste di concessione sono riportate nelle figure dedicate in Appendice A.1 (Figura A.1-12 per la Puglia, Figura A.1 13 per la Basilicata, Figura A.1 14 per la Sicilia e Figura A.1 15 per la Campania).

La Puglia rappresenta il caso paradigmatico di elevata pressione autorizzativa. Come evidenziato nella Figura A.1-12 – Richieste di concessione per Regione (Puglia), la regione presenta una concentrazione particolarmente elevata di istanze, determinata dalla combinazione tra favorevoli condizioni anemologiche e di irraggiamento solare, ampia disponibilità di superfici e una storica apertura allo sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili. Tale dinamica ha prodotto:

- progressiva saturazione delle aree potenzialmente idonee;
- incremento della conflittualità paesaggistica, in particolare nelle aree agricole di pregio, lungo le fasce costiere e nei contesti caratterizzati da elevata sensibilità visiva;
- successiva introduzione di vincoli normativi finalizzati a contenere gli impatti cumulativi.

L'evoluzione regolatoria recente, con il Disegno di Legge regionale n. 222/2024 relativo all'individuazione delle aree idonee e non idonee

all'installazione di impianti da fonti rinnovabili, introduce un rafforzamento del quadro vincolistico attraverso:

- limitazioni all'installazione di impianti fotovoltaici a terra in alcune aree agricole, salvo specifiche condizioni connesse alle CER;
- previsione di fasce di rispetto per gli impianti eolici di maggiore dimensione;
- maggiore tutela delle aree caratterizzate da interesse paesaggistico e panoramico.

Il modello pugliese evidenzia quindi una tensione strutturale tra elevata attrattività per gli investimenti FER e capacità di governo territoriale, con il rischio di accumulo di richieste non pienamente coerenti con una strategia integrata di sviluppo sostenibile.

Anche Sicilia e Campania rientrano nel cluster delle regioni ad alta pressione autorizzativa, sebbene con dinamiche meno strutturate rispetto alla Puglia. Le rispettive curve di crescita delle richieste di concessione sono riportate nella Figura A.1-14 – Richieste di concessione per Regione (Sicilia) e nella Figura A.1-15 – Richieste di concessione per Regione (Campania). Entrambe le regioni sono caratterizzate da:

- incremento significativo delle richieste per nuovi impianti FER;
- pressione crescente su aree agricole, rurali e ambiti paesaggisticamente sensibili;
- strumenti di pianificazione spesso non pienamente adeguati a governare la rapidità della crescita progettuale.

In Sicilia, l'elevato potenziale solare ed eolico ha favorito una forte attrattività per nuovi investimenti, determinando tuttavia fenomeni di concentrazione progettuale in territori caratterizzati da elevata sensibilità ambientale e paesaggistica. La principale criticità riguarda il bilanciamento tra valorizzazione della risorsa energetica e tutela del patrimonio territoriale. La Campania presenta dinamiche analoghe, con una maggiore complessità derivante dalla densità insediativa, dalla frammentazione amministrativa e dalla presenza di numerosi ambiti sottoposti a tutela. Le principali criticità riguardano il coordinamento tra livello regionale e locale e la gestione dei conflitti nei procedimenti autorizzativi.

Nel complesso, Sicilia e Campania evidenziano una situazione di forte crescita della domanda, accompagnata da una governance ancora in fase di consolidamento, rendendo necessaria una maggiore

integrazione tra pianificazione energetica, strumenti urbanistici e tutela paesaggistica.

La Basilicata presenta caratteristiche riconducibili allo stesso cluster, con una particolare vocazione allo sviluppo eolico. Come mostrato nella Figura A.1 13 – Richieste di concessione per Regione (Basilicata), il territorio regionale ha attratto un numero crescente di istanze, favorito dalla disponibilità della risorsa e dalle condizioni territoriali. Le principali criticità riguardano:

- rischio di sviluppo opportunistico prevalentemente guidato dalla disponibilità della risorsa;
- possibile concentrazione degli impianti in aree rurali con limitata capacità di assorbimento;
- debole integrazione tra nuovi progetti energetici e strategie territoriali di lungo periodo.

La sfida principale per la Basilicata consiste quindi nel trasformare l'elevato potenziale rinnovabile in uno sviluppo pianificato e coerente, evitando una crescita esclusivamente determinata dalle opportunità autorizzative.

1.5.3.3 Regioni a regolazione restrittiva o consolidata

Alcune regioni adottano un approccio più prudenziale o limitativo allo sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili, caratterizzato da una maggiore attenzione alla tutela territoriale, paesaggistica e agricola. Rientrano in questo cluster Abruzzo, Sardegna, Lazio e Liguria, accomunate da un quadro regolatorio maggiormente strutturato, ma con differenti livelli di restrizione allo sviluppo degli impianti FER.

Le dinamiche relative alle richieste di concessione nelle regioni appartenenti a questo cluster sono riportate nelle figure dell'Appendice A.1: Figura A.1 16 per l'Abruzzo, Figura A.1 17 per la Sardegna, Figura A.1 18 per il Lazio e Figura A.1 19 per la Liguria.

L'Abruzzo rappresenta un esempio di pianificazione strutturata e prudenziale. Come evidenziato nella Figura A.1-16 – Richieste di concessione per Regione (Abruzzo), la regione presenta una dinamica autorizzativa caratterizzata da una maggiore selettività rispetto alle regioni ad alta pressione, coerente con un modello orientato alla tutela delle componenti agricole, ambientali e paesaggistiche. Con l'approvazione della Legge regionale 45/2024, la Regione ha definito un quadro organico per l'individuazione delle aree idonee e non idonee all'installazione di impianti FER. Gli elementi caratterizzanti riguardano:

- una classificazione dettagliata del territorio regionale;
- limitazioni significative per il fotovoltaico a terra in ambito agricolo;
- valorizzazione di modelli di autoconsumo e CER.

Le principali caratteristiche della disciplina riguardano:

- definizione delle aree idonee, comprendenti siti già utilizzati per impianti FER, cave dismesse, aree industriali e infrastrutturali e alcune aree agricole compatibili;
- individuazione delle aree non idonee, comprendenti parchi naturali, aree protette, zone agricole di pregio (quali vigneti, frutteti, tartufaie e oliveti ad alta densità) e l'intera area del Fucino;
- tutela agricola e paesaggistica, attraverso vincoli specifici per gli impianti fotovoltaici a terra;
- semplificazione dei procedimenti autorizzativi, in coerenza con la normativa nazionale ed europea;
- promozione dell'autoconsumo e delle CER, attraverso una maggiore regolamentazione degli impianti destinati alla condivisione locale dell'energia;
- monitoraggio periodico degli effetti della normativa sul territorio.

L'interpretazione complessiva evidenzia un approccio ordinato e pianificatorio, orientato alla qualità dello sviluppo più che alla massimizzazione della nuova capacità installata. Tuttavia, l'elevata frammentazione delle aree idonee e le limitazioni applicate ai territori agricoli e protetti possono ridurre la possibilità di realizzazione di impianti utility-scale, con possibili effetti sul raggiungimento degli obiettivi energetici regionali e nazionali.

La Sardegna rappresenta il caso più emblematico di approccio normativo restrittivo. Come riportato nella Figura A.1 17 – Richieste di concessione per Regione (Sardegna), il volume delle richieste deve essere interpretato alla luce di un quadro regolatorio caratterizzato da una forte attenzione alla tutela territoriale e da una progressiva delimitazione delle aree disponibili allo sviluppo.

La Regione ha introdotto una disciplina organica per individuare aree idonee e non idonee agli impianti FER, attraverso un impianto normativo che prevede:

- estese limitazioni territoriali per gli impianti di grande scala;
- introduzione di strumenti di garanzia per i proponenti;

- orientamento prioritario verso impianti di autoconsumo e CER.

Il modello sardo evidenzia una forte tensione tra autonomia regionale, tutela paesaggistica e necessità di contribuire agli obiettivi energetici nazionali. Le principali criticità riguardano:

- possibile disallineamento rispetto agli obiettivi del PNIEC;
- riduzione delle opportunità per impianti industriali di grande scala;
- conflitti istituzionali tra livello regionale e nazionale;
- rischio di concentrare lo sviluppo esclusivamente su piccoli impianti, insufficienti da soli a garantire i target di capacità installata.

La Sardegna costituisce quindi un esempio di pianificazione fortemente difensiva, nella quale la protezione del territorio assume un ruolo prioritario rispetto alla velocità di sviluppo delle FER.

Il Lazio e la Liguria presentano un modello intermedio, caratterizzato da una forte incidenza dei vincoli paesaggistici e ambientali e da una disciplina territoriale complessa.

Per il Lazio, le dinamiche delle richieste di concessione sono riportate nella Figura A.1-18 – Richieste di concessione per Regione (Lazio). La regione dispone di strumenti urbanistici e procedure amministrative articolate, ma non ha ancora definito un quadro completamente consolidato sulle aree idonee FER. La principale caratteristica del modello laziale riguarda la prevalenza dei vincoli paesaggistici e ambientali, con particolare attenzione:

- ai beni culturali e storici;
- alle aree costiere;
- ai contesti rurali di pregio.

La frammentazione normativa tra strumenti urbanistici, paesaggistici e territoriali determina una maggiore complessità autorizzativa, generando possibili rallentamenti e incertezze per gli operatori. La Liguria presenta un quadro analogo, come evidenziato nella Figura A.1-19 – Richieste di concessione per Regione (Liguria), con una particolare accentuazione dei vincoli derivanti dalla conformazione territoriale e dalla presenza di numerosi ambiti sottoposti a tutela. Le principali criticità riguardano:

- limitata disponibilità di superfici idonee per grandi impianti fotovoltaici;
- difficoltà nello sviluppo dell'eolico su larga scala;
- frammentazione degli strumenti locali di pianificazione;

- elevata incidenza dei vincoli paesaggistici lungo coste e aree di pregio.

Nel complesso, Lazio e Liguria rappresentano regioni nelle quali la tutela del paesaggio costituisce il principale elemento regolatore dello sviluppo FER. Tale approccio consente una maggiore salvaguardia territoriale, ma richiede strumenti di integrazione tra energia e paesaggio per evitare che la disciplina vincolistica si traduca in un ostacolo strutturale al raggiungimento degli obiettivi nazionali.

1.5.3.4 Regioni in transizione normativa

Rientrano in questo gruppo le regioni caratterizzate da un quadro regolatorio incompleto, in fase di definizione o in progressivo consolidamento. Si tratta di territori nei quali la governance delle fonti energetiche rinnovabili non è ancora pienamente stabilizzata, oscillando tra approcci programmatori avanzati e impostazioni maggiormente prudenziali.

Le dinamiche relative alle richieste di concessione nelle regioni appartenenti a questo cluster sono riportate nelle figure dell'Appendice A.1: Figura A.1 20 per la Lombardia, Figura A.1 21 per la Calabria, Figura A.1 22 per il Piemonte, Figura A.1 23 per le Marche, Figura A.1 24 per il Molise, Figura A.1 25 per l'Umbria, Figura A.1 26 per l'Emilia-Romagna e Figura A.1 27 per la Toscana.

La Lombardia rappresenta un caso avanzato di governance energetica regionale, caratterizzato da un progressivo passaggio da una logica autorizzativa a una logica programmatoria. Come evidenziato nella Figura A.1 20 – Richieste di concessione per Regione (Lombardia), la regione presenta una significativa capacità installata e un modello di pianificazione orientato alla gestione ordinata della crescita delle FER. Il modello lombardo si fonda su:

- definizione di target quantitativi al 2030;
- ripartizione provinciale degli obiettivi attraverso un sistema di burden sharing;
- integrazione tra pianificazione energetica e territoriale.

L'impostazione consente di ridurre l'incertezza localizzativa e la conflittualità autorizzativa, favorendo una distribuzione maggiormente equilibrata degli impianti. Permangono tuttavia possibili criticità legate alla sovrapposizione tra aree idonee e non idonee e alla necessità di mantenere un coordinamento costante con gli obiettivi nazionali.

Calabria e Piemonte presentano una fase normativa preliminare, caratterizzata da strumenti ancora in evoluzione e da una disciplina non completamente definita.

La Calabria, come riportato nella Figura A.1 21 – Richieste di concessione per Regione (Calabria), evidenzia un quadro regolatorio ancora in fase di costruzione, nel quale prevalgono indirizzi preliminari orientati alla tutela territoriale.

Gli elementi caratterizzanti riguardano:

assenza di una disciplina completa sulle aree idonee e non idonee;

riferimento prevalente agli strumenti nazionali vigenti;

necessità di conciliare sviluppo FER e tutela del patrimonio paesaggistico e culturale.

Le principali criticità derivano dal rischio di una regolazione eccessivamente restrittiva, con possibile riduzione delle opportunità per impianti di media e grande scala e aumento della conflittualità nei territori maggiormente interessati.

Il Piemonte, rappresentato nella Figura A.1 22 – Richieste di concessione per Regione (Piemonte), si colloca in una condizione analoga, caratterizzata da linee di indirizzo preliminari ma dall'assenza di una disciplina regionale definitiva sulle aree idonee.

Gli aspetti principali riguardano:

- approccio prudenziale alla localizzazione degli impianti;
- prevalenza dei criteri di tutela territoriale;
- elevata incertezza autorizzativa per gli operatori.

La mancanza di strumenti quantitativi e localizzativi definitivi rischia di rallentare gli investimenti e di determinare una frammentazione delle decisioni autorizzative.

Le Marche, il Molise e l'Umbria condividono una condizione di transizione normativa caratterizzata dall'assenza di un quadro operativo consolidato.

Le dinamiche delle richieste sono riportate rispettivamente nella Figura A.1 23 – Richieste di concessione per Regione (Marche), nella Figura A.1 24 – Richieste di concessione per Regione (Molise) e nella Figura A.1-25 – Richieste di concessione per Regione (Umbria). Gli elementi comuni riguardano:

- assenza di una disciplina regionale completa sulle aree idonee;
- dipendenza da strumenti strategici quali PEAR e PRIEC;
- ritardo nell'attuazione operativa del D.Lgs. 199/2021.

Ne deriva una capacità programmatoria ancora limitata, con possibili effetti negativi sulla certezza autorizzativa e sul raggiungimento degli obiettivi PNIEC.

Emilia-Romagna e Toscana rappresentano casi di transizione avanzata, caratterizzati da strumenti normativi più strutturati e da un maggiore coordinamento tra pianificazione energetica, territoriale e ambientale. Come illustrato nella Figura A.1 26 – Richieste di concessione per Regione (Emilia-Romagna), la regione ha sviluppato un modello orientato alla definizione preventiva delle condizioni localizzative degli impianti FER. L'approccio regionale si basa su:

- individuazione di aree idonee premianti, quali ex cave, aree industriali dismesse e superfici degradate;
- esclusione delle aree agricole di pregio e degli ambiti maggiormente sensibili;
- monitoraggio degli impatti cumulativi.

Il modello emiliano-romagnolo mira quindi a garantire una crescita programmata delle FER, riducendo conflitti territoriali e aumentando la certezza per gli operatori.

La Toscana, come riportato nella Figura A.1 27 – Richieste di concessione per Regione (Toscana), si colloca in una fase intermedia avanzata, caratterizzata da un processo normativo orientato alla definizione di un sistema articolato di aree idonee, ordinarie e non idonee. Gli elementi distintivi sono:

- distinzione tra differenti livelli di compatibilità territoriale;
- coinvolgimento dei Comuni nei processi decisionali;
- ricerca di equilibrio tra tutela paesaggistica e sviluppo delle FER.

La Toscana rappresenta quindi un modello di governance partecipata, nel quale la pianificazione energetica viene integrata con le specificità territoriali e con la necessità di garantire il raggiungimento degli obiettivi nazionali.

1.5.3.5 Regioni a bassa pressione o specializzazione

Rientrano in questo gruppo le regioni caratterizzate da una limitata pressione autorizzativa per impianti eolici e fotovoltaici a terra, determinata principalmente da una differente configurazione territoriale, dalla disponibilità della risorsa energetica prevalente e da un modello di sviluppo energetico già consolidato.

Il Trentino-Alto Adige rappresenta un caso di specializzazione energetica più che di pressione autorizzativa per le fonti energetiche rinnovabili. Come evidenziato nella Figura A.1 28 – Richieste di concessione per Regione (Trentino-Alto Adige), la regione presenta una limitata presenza di richieste relative a impianti eolici e fotovoltaici a terra, in relazione a un modello energetico fortemente caratterizzato dalla prevalenza dell'idroelettrico.

La strategia energetica regionale si basa su una pianificazione consolidata attraverso il Piano Energetico Ambientale Regionale (PEAR), che definisce indirizzi e obiettivi per lo sviluppo delle diverse fonti rinnovabili, coerentemente con le caratteristiche geomorfologiche del territorio. Il modello regionale evidenzia:

- forte specializzazione nella produzione idroelettrica;
- limitata pressione autorizzativa per eolico e fotovoltaico a terra;
- elevata coerenza tra disponibilità della risorsa naturale e tecnologia energetica adottata.

La conformazione alpina del territorio, caratterizzata da una significativa disponibilità di risorsa idrica e da condizioni meno favorevoli rispetto ad altre regioni italiane per lo sviluppo estensivo di impianti fotovoltaici ed eolici, determina una scelta tecnologica differente rispetto ai territori del Mezzogiorno.

Diversamente da regioni come Puglia, Sicilia o Sardegna, dove la disponibilità di vento e irraggiamento solare ha generato elevate pressioni autorizzative e conflitti territoriali, il Trentino-Alto Adige mostra un modello nel quale lo sviluppo energetico segue prevalentemente la vocazione naturale del territorio. Tale impostazione presenta alcuni elementi positivi:

- riduzione dei conflitti paesaggistici;
- minore frammentazione localizzativa degli impianti;
- maggiore integrazione tra risorsa disponibile e infrastrutture energetiche.

Tuttavia, la forte specializzazione tecnologica rappresenta anche un elemento di possibile criticità, poiché una limitata diversificazione del mix rinnovabile potrebbe ridurre il contributo regionale allo sviluppo nazionale di alcune tecnologie, in particolare fotovoltaico ed eolico.

1.5.3.6 Considerazioni sistemiche

Il quadro complessivo evidenzia un sistema energetico regionale fortemente frammentato, nel quale la distribuzione delle richieste di

concessione non dipende esclusivamente dalla disponibilità della risorsa, ma anche dalla qualità della pianificazione territoriale e dalla struttura della regolazione regionale.
Dall'analisi emergono tre dinamiche principali:
concentrazione territoriale delle istanze nelle regioni caratterizzate da maggiore disponibilità di vento e irraggiamento;
polarizzazione tra modelli regolatori maggiormente permissivi e approcci fortemente restrittivi;
crescente necessità di coordinamento tra governance regionale e obiettivi energetici nazionali.
La principale criticità del sistema italiano non risiede quindi nella disponibilità del potenziale rinnovabile, ma nella capacità di trasformarlo in progettualità coerenti, integrate e sostenibili.
In tale prospettiva, le CER rappresentano uno strumento potenzialmente strategico per riequilibrare la distribuzione territoriale della produzione energetica; integrare produzione e consumo su scala locale; e aumentare l'accettabilità sociale degli impianti.
Il loro contributo risulta tuttavia ancora limitato rispetto al potenziale disponibile, evidenziando la necessità di un rafforzamento sia degli strumenti normativi sia della capacità progettuale locale.
Il sistema italiano delle FER si configura pertanto come un modello in transizione, caratterizzato da profonde differenze regionali e da un equilibrio ancora instabile tra sviluppo energetico, tutela territoriale e capacità programmatoria.
Il passaggio da una logica prevalentemente autorizzativa a una logica programmatoria rappresenta la condizione necessaria per garantire una maggiore coerenza tra disponibilità delle risorse, pianificazione territoriale e raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione.

1.5.4 INTEGRAZIONE DELLE RETI E CRITICITÀ: VERSO UNA VISIONE SISTEMICA TRA ENERGIA E AMBIENTE

La transizione energetica italiana richiede una progressiva evoluzione della pianificazione delle infrastrutture elettriche, nella quale Terna S.p.A., in qualità di gestore della rete di trasmissione nazionale, assume un ruolo strategico. Attraverso strumenti quali il Piano di *Sviluppo Decennale*, il *Piano Strategico* e la *Valutazione Ambientale Strategica* (VAS), vengono definiti gli indirizzi di sviluppo della rete, le priorità di investimento e le modalità di integrazione della crescente quota di energia prodotta da fonti rinnovabili (Terna, 2024).

La pianificazione della rete non costituisce esclusivamente un processo tecnico-infrastrutturale, ma rappresenta un dispositivo di governo territoriale che interessa sistemi ambientali, paesaggistici e insediativi. I nuovi elettrodotti e le opere di connessione attraversano frequentemente aree protette, siti della Rete Natura 2000, corridoi ecologici e territori agricoli di elevato valore, rendendo necessario un approccio integrato capace di coniugare sicurezza energetica, tutela della biodiversità e qualità del paesaggio.

In tale prospettiva, l'integrazione tra corridoi energetici e corridoi ecologici assume un ruolo centrale nella pianificazione delle infrastrutture lineari. L'obiettivo non è soltanto la mitigazione degli impatti ambientali, ma la progettazione di infrastrutture multifunzionali in grado di contribuire alla continuità ecologica attraverso fasce boscate, habitat per gli impollinatori, sistemi di rinaturalizzazione e infrastrutture verdi compatibili con gli interventi energetici (ISPRA, 2021; LIFE ELIA, 2023). Tale impostazione consente di ridurre la frammentazione ecologica, limitare il consumo di suolo e migliorare la resilienza complessiva dei sistemi territoriali.

Il quadro normativo europeo e nazionale sostiene questa evoluzione metodologica. La Direttiva 2001/42/CE sulla Valutazione Ambientale Strategica introduce l'obbligo di valutare preventivamente gli effetti ambientali dei piani e delle alternative progettuali; la Direttiva Habitat 92/43/CEE tutela i siti Natura 2000 interessati dalle infrastrutture; mentre le linee guida ISPRA e il Quadro Strategico Nazionale 2021–2027 promuovono la realizzazione di infrastrutture verdi e blu capaci di integrare obiettivi energetici, ambientali e territoriali (MiTE, 2021).

Esperienze sviluppate a livello europeo confermano la fattibilità di tale approccio. Il progetto LIFE ELIA, realizzato in Belgio e Francia, sperimenta la riqualificazione ecologica dei corridoi elettrici in ambito forestale, mentre il Piano Energia 2030 della Regione Emilia-Romagna integra la pianificazione delle reti elettriche con la Rete Ecologica Regionale. Analogamente, il progetto ECOROADS analizza le relazioni tra infrastrutture lineari e connettività ecologica, proponendo metodologie replicabili per la pianificazione integrata su scala territoriale (ECOROADS, 2022).

L'attuazione di tale modello richiede una governance multilivello fondata sul coordinamento tra Terna, Regioni, ARPA, Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, enti locali e soggetti gestori del territorio. Tra gli strumenti operativi assumono particolare rilievo

lo sviluppo di banche dati GIS interoperabili, l'elaborazione di linee guida progettuali condivise e procedure di VAS capaci di valutare esplicitamente la continuità ecologica e gli effetti cumulativi lungo i principali corridoi infrastrutturali.

Nonostante i progressi registrati, permane una significativa lacuna conoscitiva riguardo all'integrazione sistematica tra pianificazione della rete elettrica nazionale e progettazione della rete ecologica. La letteratura scientifica propone prevalentemente casi studio o sperimentazioni locali, mentre risultano ancora limitati gli approcci capaci di ricondurre tali esperienze a un quadro organico di governance territoriale. In questa prospettiva, il presente lavoro interpreta la pianificazione energetica come componente di un sistema territoriale integrato, nel quale infrastrutture, capitale naturale e pianificazione paesaggistica costituiscono elementi reciprocamente interdipendenti.

Parallelamente, uno degli aspetti più rilevanti della transizione energetica riguarda la capacità delle reti di accogliere quote crescenti di generazione distribuita da fonti rinnovabili. La natura non programmabile di molte FER rende infatti necessario l'impiego di smart grid, sistemi di accumulo elettrochimico, piattaforme digitali e strumenti avanzati di gestione dei flussi energetici (IEA, 2022; Terna, 2022). Le principali criticità riguardano la variabilità della produzione, il potenziamento delle reti di trasmissione e distribuzione, la gestione della flessibilità e il coordinamento tra pianificazione energetica e pianificazione territoriale. In questo contesto, digitalizzazione, interoperabilità dei dati e innovazione tecnologica rappresentano fattori abilitanti indispensabili per garantire resilienza, efficienza e sicurezza del sistema elettrico nazionale.

1.5.4.1 Impatti territoriali e paesaggistici

La diffusione delle FER determina trasformazioni significative dei sistemi territoriali e paesaggistici, rendendo necessario un approccio progettuale che integri obiettivi energetici, tutela ambientale e qualità del paesaggio. Gli impianti eolici e fotovoltaici, in particolare quelli di grande scala, possono generare conflitti con le comunità locali e con i valori identitari dei territori, evidenziando la necessità di strumenti di pianificazione capaci di bilanciare esigenze energetiche,

conservazione del patrimonio naturale e sviluppo socioeconomico (Pasqualetti, 2011)[26].

In tale prospettiva, la progettazione delle infrastrutture energetiche non può limitarsi alla sola individuazione delle aree idonee, ma deve inserirsi in un quadro di pianificazione territoriale integrata, orientato alla qualità paesaggistica, alla riduzione degli impatti cumulativi e alla valorizzazione delle specificità locali. L'adozione di criteri progettuali condivisi, unitamente a processi partecipativi e strumenti di governance multilivello, può contribuire a incrementare l'accettabilità sociale degli interventi e a promuovere modelli di sviluppo energetico maggiormente coerenti con gli obiettivi della transizione ecologica.

1.6 COMUNITÀ ENERGETICHE RINNOVABILI (CER)

Dal punto di vista della ricerca, le CER costituiscono un campo di analisi privilegiato per approfondire le relazioni tra energia, territorio, ambiente e società. La loro crescente diffusione evidenzia infatti come la transizione energetica non possa essere interpretata esclusivamente come un processo di innovazione tecnologica, ma richieda un approccio sistemico capace di integrare differenti scale territoriali, molteplici attori e competenze interdisciplinari. Le CER si configurano pertanto come sistemi socio-tecnico-territoriali complessi, nei quali convergono aspetti energetici, urbanistici, ambientali, economici, giuridici e sociali. La progettazione, l'implementazione e la gestione di tali configurazioni richiedono infatti il contributo coordinato di discipline differenti: dall'ingegneria energetica, responsabile della progettazione dei sistemi di produzione, accumulo e distribuzione dell'energia, alla pianificazione territoriale e all'urbanistica, chiamate a governarne l'integrazione spaziale; dall'architettura, che affronta le problematiche di inserimento degli impianti nel patrimonio edilizio e nel paesaggio, fino al diritto, all'economia, alle scienze sociali e alla governance multilivello, che definiscono gli assetti istituzionali, organizzativi e partecipativi delle comunità energetiche.

Parallelamente, l'evoluzione delle tecnologie digitali amplia ulteriormente tale prospettiva interdisciplinare. Strumenti quali sistemi GIS, modelli BIM, *Digital Twin* territoriali, piattaforme di

[26] Pasqualetti, M. J. (2011). Opposing wind energy landscapes: a search for common cause. *Annals of the Association of American Geographers*, *101*(4), 907-917.

simulazione energetica, algoritmi di intelligenza artificiale e sistemi di supporto alle decisioni consentono oggi di integrare dati energetici, ambientali e territoriali, favorendo la costruzione di scenari previsionali e di modelli di pianificazione sempre più orientati alla sostenibilità. A questi contributi si affiancano quelli delle scienze ambientali, della geografia energetica, della psicologia ambientale, dell'antropologia e degli studi sulla giustizia energetica, che permettono di interpretare le relazioni tra comportamento degli utenti, qualità del paesaggio, accettabilità sociale e sviluppo locale.

La natura interdisciplinare delle CER rappresenta pertanto uno dei principali presupposti teorici della presente ricerca. Essa giustifica l'adozione di un approccio integrato capace di mettere in relazione pianificazione territoriale, sistemi energetici, governance, qualità paesaggistica e strumenti digitali, superando una lettura settoriale della transizione energetica.

Il presente lavoro interpreta quindi le CER non come semplici configurazioni tecnologiche finalizzate alla produzione distribuita di energia, bensì come dispositivi territoriali attraverso i quali costruire nuovi modelli di sviluppo sostenibile fondati sull'integrazione tra energia, ambiente, paesaggio e comunità locali. In questa prospettiva, l'analisi delle CER assume una valenza non soltanto energetica, ma anche progettuale, territoriale e strategica, orientata a individuare modelli capaci di coniugare decarbonizzazione, qualità del paesaggio, partecipazione e rigenerazione territoriale. La complessità delle Comunità Energetiche Rinnovabili rende necessario un approccio interdisciplinare che integri competenze energetiche, territoriali, ambientali, economiche, giuridiche e sociali. La sistematizzazione dei principali ambiti disciplinari e dei relativi contributi metodologici è riportata in Appendice 1 (Tabella A.1 5).

1.6.1 MODELLI ORGANIZZATIVI E GIURIDICI DELLE COMUNITÀ ENERGETICHE RINNOVABILI

Le CER rappresentano un’evoluzione significativa dei modelli di produzione e gestione dell’energia, introducendo una configurazione decentralizzata e partecipativa fondata sulla condivisione locale dell’energia prodotta da fonti rinnovabili. A differenza dei tradizionali sistemi energetici caratterizzati da una struttura prevalentemente verticale e centralizzata, le CER si configurano come sistemi socio-tecnici distribuiti, nei quali produzione, consumo, governance e

benefici economici vengono ricondotti a una dimensione territoriale condivisa.

Dal punto di vista concettuale, una CER può essere definita come un soggetto giuridico autonomo costituito sulla base della partecipazione aperta e volontaria di cittadini, piccole e medie imprese, enti locali e altri soggetti pubblici o privati, finalizzato alla produzione, condivisione e utilizzo collettivo dell'energia rinnovabile. L'obiettivo primario non è la massimizzazione del profitto economico, bensì la generazione di benefici ambientali, economici e sociali a favore della comunità di riferimento.

Questa caratteristica distingue le CER dai tradizionali operatori energetici, configurandole come strumenti di innovazione istituzionale e territoriale. La dimensione energetica viene infatti integrata con aspetti di coesione sociale, partecipazione civica e valorizzazione delle risorse locali, trasformando il territorio da semplice spazio di localizzazione degli impianti a soggetto attivo della transizione energetica.

1.6.1.1 Natura giuridica e principi organizzativi

La normativa europea ha introdotto il concetto di Comunità Energetica attraverso un approccio basato sulla partecipazione democratica, sulla governance inclusiva e sulla prossimità territoriale. La Direttiva (UE) 2018/2001 (RED II), recepita nell'ordinamento italiano attraverso il D.Lgs. 199/2021, definisce le CER come entità giuridiche autonome caratterizzate da tre principi fondamentali:

- partecipazione aperta e volontaria;
- controllo effettivo esercitato dai membri situati nelle vicinanze degli impianti di produzione;
- finalità prevalente di produzione di benefici ambientali, economici o sociali per i membri e per il territorio.

Il successivo aggiornamento normativo introdotto dalla Direttiva (UE) 2023/2413 (RED III) rafforza ulteriormente il ruolo delle comunità energetiche nel processo di decarbonizzazione europea, riconoscendo loro una funzione strategica nell'incremento della produzione distribuita, nell'integrazione delle fonti rinnovabili e nella democratizzazione dell'accesso all'energia.

Nel contesto italiano, il quadro regolatorio è stato definito principalmente dal D.Lgs. 199/2021, che ha recepito la Direttiva RED II, e successivamente completato dal Decreto del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica n. 414/2023, il quale disciplina le modalità

di incentivazione delle configurazioni di autoconsumo diffuso e delle CER. Il modello italiano prevede che la comunità sia costituita attraverso un soggetto giuridico autonomo dotato di propri strumenti statutari e organizzativi, nei quali devono essere specificati:

- criteri di adesione e partecipazione;
- modalità di gestione e distribuzione dei benefici;
- principi decisionali interni;
- condizioni di recesso e ingresso di nuovi membri;
- finalità ambientali e sociali perseguite.

La struttura organizzativa deve inoltre garantire che il controllo della comunità rimanga nelle mani dei partecipanti, evitando configurazioni esclusivamente orientate alla valorizzazione economica dell'investimento energetico.

1.6.1.2 Forme organizzative delle CER

Il quadro normativo non impone una specifica forma giuridica, lasciando alle comunità la possibilità di adottare configurazioni differenti in relazione alle caratteristiche territoriali, agli obiettivi perseguiti e alla composizione dei partecipanti.

Tra le principali forme organizzative possono essere individuate:

- **Associazione**

La forma associativa rappresenta uno dei modelli più diffusi nelle prime esperienze di costituzione delle CER, grazie alla semplicità organizzativa e alla possibilità di favorire un'ampia partecipazione civica. Tale modello risulta particolarmente adeguato nei contesti caratterizzati da una forte componente comunitaria, come piccoli comuni, quartieri urbani o comunità locali consolidate.

Il limite principale riguarda la minore capacità operativa nella gestione di investimenti complessi e nella strutturazione di rapporti economici articolati con soggetti esterni.

- **Cooperativa**

Il modello cooperativo appare particolarmente coerente con la natura partecipativa delle CER, poiché integra principi di mutualità, corresponsabilità e distribuzione condivisa dei benefici. La cooperativa consente una gestione più strutturata degli impianti e può facilitare l'accesso a finanziamenti e strumenti economici, configurandosi come modello particolarmente adatto per comunità energetiche di scala medio-grande.

- **Consorzio**

La forma consortile permette di aggregare soggetti differenti – imprese, enti pubblici e privati cittadini – mantenendo una struttura flessibile orientata alla gestione coordinata delle risorse energetiche. Tale configurazione risulta interessante nei territori caratterizzati dalla presenza di distretti produttivi o reti territoriali consolidate.

- **Fondazione**

La fondazione può rappresentare una soluzione efficace nei casi in cui la CER persegua finalità prevalentemente sociali, ambientali o di interesse collettivo. Il modello risulta particolarmente coerente con iniziative promosse da enti pubblici, organizzazioni territoriali o soggetti filantropici finalizzate alla riduzione della vulnerabilità energetica.

- **Partenariato pubblico-privato (PPP)**

Il partenariato pubblico-privato costituisce una configurazione strategica soprattutto nei piccoli comuni e nei territori fragili, nei quali la Pubblica Amministrazione può svolgere un ruolo abilitante attraverso la messa a disposizione di superfici, edifici pubblici e capacità amministrativa.

Tale modello consente di integrare risorse pubbliche e private, favorendo investimenti energetici territorialmente coordinati e coerenti con strategie più ampie di rigenerazione urbana e sviluppo locale.

1.6.1.3 CER come strumento di governance territoriale

L'elemento distintivo delle CER non risiede esclusivamente nella produzione di energia rinnovabile, ma nella capacità di costruire nuove forme di governance energetica multilivello. Esse rappresentano infatti dispositivi territoriali attraverso cui integrare pianificazione energetica, innovazione tecnologica e partecipazione sociale.

La configurazione giuridica assume quindi una funzione strategica: non costituisce soltanto un requisito amministrativo per accedere agli incentivi, ma definisce il modello attraverso cui vengono organizzati i rapporti tra cittadini, imprese, amministrazioni pubbliche e territorio.

In questa prospettiva, le CER possono essere interpretate come infrastrutture sociali della transizione energetica, capaci di trasformare la produzione rinnovabile da elemento esclusivamente tecnico-industriale a processo collettivo di trasformazione territoriale.

La loro efficacia dipende pertanto dalla capacità di integrare tre dimensioni fondamentali:

- **dimensione energetica**, relativa alla produzione, gestione e condivisione dell'energia;
- **dimensione istituzionale**, relativa ai modelli decisionali e alla governance;
- **dimensione territoriale**, relativa alla generazione di benefici locali e alla compatibilità con i caratteri ambientali e paesaggistici.

Le CER si configurano quindi come strumenti di transizione energetica non solo tecnologica, ma anche istituzionale e territoriale, ponendo le basi per un modello energetico maggiormente distribuito, partecipativo e coerente con gli obiettivi europei di neutralità climatica.

1.6.2 FONDAMENTI TEORICI E PARADIGMA DELLA RICERCA

L'analisi delle CER richiede un approccio teorico capace di superare una lettura esclusivamente tecnico-infrastrutturale del fenomeno energetico, interpretandolo come processo complesso nel quale interagiscono dimensioni tecnologiche, territoriali, ambientali e sociali. Le CER costituiscono infatti sistemi nei quali la produzione e la condivisione dell'energia rinnovabile si intrecciano con forme innovative di organizzazione collettiva, nuovi modelli di governance e trasformazioni delle relazioni tra comunità e territorio.

In questa prospettiva, la ricerca assume un paradigma interdisciplinare fondato sull'integrazione di tre dimensioni conoscitive complementari: quella ontologica, relativa alla natura dell'oggetto di studio; quella epistemologica, riguardante i metodi attraverso cui costruire conoscenza; e quella assiologica, riferita ai valori e ai principi che orientano le scelte progettuali e valutative.

Tale impostazione consente di interpretare le CER non come semplici configurazioni energetiche finalizzate all'incremento della produzione da fonti rinnovabili, ma come dispositivi territoriali capaci di generare nuove relazioni tra infrastrutture energetiche, comunità locali e sistemi ambientali.

1.6.2.1 Dimensione ontologica: le CER come sistemi socio-tecnici complessi

Dal punto di vista ontologico, le CER possono essere interpretate come sistemi socio-tecnici complessi nei quali elementi materiali e immateriali interagiscono in modo dinamico. La componente tecnologica comprende gli impianti da fonti rinnovabili, le reti

elettriche, i sistemi di accumulo e le piattaforme digitali di gestione energetica; la componente sociale comprende invece gli attori coinvolti, le modalità di partecipazione, le forme organizzative e i processi decisionali.

Questa natura ibrida rende le CER oggetti di ricerca che non possono essere analizzati attraverso una prospettiva esclusivamente energetica. La loro efficacia dipende infatti dalla capacità di integrare produzione energetica, caratteristiche territoriali, condizioni ambientali e capacità organizzative della comunità coinvolta.

La transizione energetica introduce quindi una trasformazione del rapporto tra energia e territorio. Nei modelli tradizionali, il territorio assumeva prevalentemente il ruolo di supporto fisico per la localizzazione delle infrastrutture energetiche; nei modelli distribuiti basati sulle CER, il territorio diviene invece un elemento attivo del processo, poiché risorse locali, caratteristiche insediative e capitale sociale concorrono alla definizione del sistema energetico.

In questa prospettiva, la relazione energia-territorio assume una natura bidirezionale: da un lato il territorio condiziona le possibilità di sviluppo delle infrastrutture rinnovabili attraverso vincoli ambientali, paesaggistici e urbanistici; dall'altro la diffusione delle FER e delle CER produce trasformazioni spaziali, economiche e sociali che modificano il funzionamento dei sistemi locali.

Particolare rilevanza assume il rapporto con il paesaggio. L'inserimento di impianti energetici rinnovabili non rappresenta infatti un fenomeno esclusivamente tecnico, ma una trasformazione del paesaggio contemporaneo, nella quale devono essere bilanciati obiettivi di decarbonizzazione, tutela ecologica e qualità percettiva dei luoghi.

Le CER introducono in questo ambito un elemento innovativo: la possibilità di associare la produzione energetica a processi partecipativi e territorialmente condivisi, favorendo una maggiore integrazione tra infrastrutture energetiche e contesti locali. La sostenibilità viene quindi interpretata come equilibrio dinamico tra produzione di energia rinnovabile, conservazione degli ecosistemi e valorizzazione delle identità territoriali.

1.6.2.2 Dimensione epistemologica: costruzione interdisciplinare della conoscenza

La complessità delle CER richiede un approccio epistemologico basato sull'integrazione di differenti discipline e metodologie. La costruzione della conoscenza non può limitarsi alla valutazione delle prestazioni

energetiche degli impianti, ma deve includere le relazioni tra aspetti tecnici, ambientali, economici e sociali.

Da questo punto di vista, la ricerca sulle CER necessita di una combinazione tra approcci quantitativi e qualitativi. Gli approcci quantitativi consentono di analizzare:

- potenzialità energetiche territoriali;
- capacità produttiva degli impianti;
- profili di consumo;
- bilanci energetici;
- riduzione delle emissioni climalteranti;
- configurazioni ottimali della rete.

In tale ambito assumono particolare importanza gli strumenti informativi territoriali (GIS), attraverso i quali è possibile integrare dati energetici, ambientali e urbanistici, individuando relazioni spaziali tra risorse disponibili, infrastrutture esistenti e caratteristiche del territorio.

Gli approcci qualitativi risultano invece fondamentali per comprendere le dimensioni sociali e istituzionali delle CER, quali:

- percezione degli interventi energetici da parte delle comunità;
- livelli di partecipazione;
- capacità organizzativa degli attori locali;
- conflitti territoriali;
- forme di cooperazione tra soggetti pubblici e privati.

La conoscenza prodotta nell'ambito delle CER assume quindi una natura condivisa e partecipativa, secondo un modello di co-produzione nel quale gli abitanti, gli enti locali, le imprese e gli attori istituzionali contribuiscono alla definizione delle strategie energetiche territoriali.

Tale prospettiva richiama il concetto di "modo 2" della produzione della conoscenza, caratterizzato dalla costruzione interdisciplinare e contestualizzata dei saperi, nella quale la ricerca scientifica interagisce direttamente con i problemi concreti della società (Nowotny et al., 2001)[27].

[27] Gibbons, M., & Nowotny, H. (2001). The potential of transdisciplinarity. In Transdisciplinarity: Joint problem solving among science, technology, and society: An effective way for managing complexity (pp. 67-80). Basel: Birkhäuser Basel.

1.6.2.3 Dimensione assiologica: sostenibilità, giustizia energetica e responsabilità territoriale

La dimensione assiologica riguarda il sistema di valori che orienta l'interpretazione e la progettazione delle CER. La transizione energetica non costituisce infatti un processo esclusivamente tecnologico, ma implica scelte relative alla distribuzione dei benefici, alla tutela delle risorse ambientali e alla qualità dello sviluppo territoriale.

Il primo valore di riferimento è rappresentato dalla sostenibilità ambientale, intesa come capacità di incrementare la produzione energetica rinnovabile senza determinare perdita irreversibile di biodiversità, consumo eccessivo di suolo o compromissione dei caratteri paesaggistici.

In tale prospettiva, la localizzazione degli impianti e la configurazione delle CER devono essere valutate attraverso criteri di compatibilità ecologica e territoriale, integrando strumenti di valutazione ambientale e analisi paesaggistiche.

Un secondo principio riguarda la giustizia energetica, ovvero la necessità di garantire un accesso equo ai benefici della transizione energetica. Le CER possono contribuire alla riduzione delle disuguaglianze energetiche attraverso modelli inclusivi nei quali anche soggetti privi di capacità economica o di disponibilità di superfici proprie possano partecipare alla produzione e alla condivisione dell'energia rinnovabile.

La dimensione sociale assume pertanto un ruolo centrale: la CER non è solamente un sistema di produzione distribuita, ma un modello cooperativo fondato sulla partecipazione e sulla condivisione dei vantaggi generati.

Infine, la responsabilità intergenerazionale costituisce un ulteriore principio guida, poiché le scelte energetiche contemporanee determinano effetti ambientali, economici e territoriali di lungo periodo. Le CER possono quindi essere interpretate come strumenti attraverso cui tradurre gli obiettivi globali di decarbonizzazione in pratiche locali coerenti con le specificità dei territori.

1.6.2.4 Research by Design e approccio interdisciplinare

La metodologia adottata nel presente lavoro si colloca all'interno del paradigma della *Research by Design*, interpretando il progetto non esclusivamente come fase applicativa, ma come strumento di ricerca e produzione della conoscenza.

Tale approccio assume che la progettazione possa costituire un dispositivo analitico capace di mettere in relazione dati quantitativi, caratteristiche territoriali e scenari trasformativi, consentendo di individuare configurazioni energetiche coerenti con le specificità dei luoghi.

Nel campo delle CER, la *Research by Design* permette di superare una visione standardizzata della transizione energetica, promuovendo invece soluzioni sito-specifiche nelle quali produzione energetica, qualità ambientale e struttura territoriale vengono analizzate in modo integrato.

L'approccio metodologico si colloca quindi all'intersezione tra tecnologia dell'architettura, pianificazione territoriale, ingegneria ambientale e progettazione paesaggistica, sviluppando una lettura sistemica delle relazioni tra infrastrutture energetiche e contesti locali.

In particolare, l'utilizzo combinato di strumenti analitici, rappresentazioni spaziali e strategie progettuali consente di definire modelli interpretativi nei quali le CER vengono valutate non solo per la loro capacità produttiva, ma anche per il contributo alla rigenerazione territoriale, alla qualità del paesaggio e alla costruzione di nuove forme di governance energetica.

La ricerca assume pertanto le CER come dispositivi complessi di trasformazione territoriale, nei quali innovazione tecnologica, partecipazione sociale e sostenibilità ambientale convergono verso un modello energetico maggiormente distribuito, resiliente e integrato con le caratteristiche dei luoghi.

1.6.3 MODELLI DI AUTOCONSUMO E CONFIGURAZIONI ENERGETICHE

L'evoluzione dei sistemi energetici distribuiti ha determinato un progressivo superamento del modello tradizionale basato sulla produzione centralizzata e sulla trasmissione unidirezionale dell'energia verso configurazioni caratterizzate da prossimità tra produzione e consumo, partecipazione degli utenti e gestione intelligente dei flussi energetici. In questo scenario, i modelli di autoconsumo rappresentano uno degli strumenti principali attraverso cui le FER vengono integrate nei sistemi locali, favorendo una maggiore efficienza della rete elettrica e una partecipazione attiva degli utenti finali.

L'autoconsumo assume quindi una valenza non esclusivamente energetica, ma anche territoriale e organizzativa, poiché consente di associare la produzione da fonti rinnovabili alle dinamiche di consumo locali, riducendo le perdite di rete, incrementando la resilienza dei sistemi energetici e favorendo nuovi modelli di cooperazione tra cittadini, imprese ed enti pubblici.

Nel quadro normativo europeo e nazionale, il concetto di autoconsumo è stato progressivamente ampliato, passando da una configurazione prevalentemente individuale, basata sulla coincidenza fisica tra produzione e consumo, a sistemi collettivi caratterizzati dalla condivisione dell'energia attraverso la rete pubblica. Tale evoluzione costituisce il presupposto tecnico e organizzativo delle CER.

1.6.3.1 Autoconsumo fisico

L'autoconsumo fisico rappresenta la configurazione tradizionale nella quale l'energia elettrica prodotta da un impianto alimentato da fonti rinnovabili viene consumata direttamente presso il medesimo sito di produzione.

In questa configurazione, tipicamente associata agli impianti fotovoltaici installati su edifici residenziali, produttivi o pubblici, il beneficio principale deriva dalla riduzione del prelievo di energia dalla rete elettrica, determinando una diminuzione dei costi energetici per il soggetto produttore-consumatore.

Il valore dell'autoconsumo fisico è legato alla capacità di sincronizzare la produzione energetica con i profili di consumo dell'utenza. Tuttavia, la variabilità della produzione da fonti rinnovabili, in particolare solare ed eolica, determina spesso una mancata coincidenza temporale tra generazione e domanda. Tale criticità può essere affrontata attraverso sistemi di accumulo, gestione intelligente dei carichi e strumenti digitali di monitoraggio.

Dal punto di vista sistemico, l'autoconsumo fisico contribuisce alla riduzione della pressione sulla rete elettrica, limitando i flussi energetici nelle ore di maggiore produzione e favorendo un uso più efficiente delle infrastrutture esistenti.

1.6.3.2 Autoconsumo virtuale

L'autoconsumo virtuale introduce un modello maggiormente flessibile, nel quale la produzione e il consumo dell'energia non devono necessariamente avvenire nello stesso punto fisico, ma possono essere collegati attraverso la rete pubblica.

In tale configurazione, l'energia prodotta dagli impianti rinnovabili viene immessa nella rete elettrica e successivamente associata ai consumi dei membri appartenenti alla medesima configurazione energetica. La condivisione avviene quindi sulla base di un criterio energetico e amministrativo, senza richiedere una connessione fisica diretta tra impianto e utilizzatore finale.

Questo modello rappresenta un elemento innovativo della transizione energetica poiché consente anche a soggetti privi della possibilità tecnica o economica di installare un impianto proprio di partecipare alla produzione e all'utilizzo collettivo di energia rinnovabile.

L'autoconsumo virtuale costituisce pertanto il principio tecnico alla base delle configurazioni collettive previste dalla normativa italiana, tra cui gruppi di autoconsumatori e CER.

1.6.3.3 Configurazioni energetiche per la condivisione dell'energia

Il quadro normativo nazionale individua differenti configurazioni attraverso cui è possibile organizzare la produzione, l'autoconsumo e la condivisione dell'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili. Tali configurazioni si distinguono per livello di partecipazione, struttura organizzativa, modalità di connessione alla rete elettrica e grado di complessità gestionale.

La disciplina è stata organicamente definita dall'Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente (ARERA) mediante il Testo Integrato dell'Autoconsumo Diffuso (TIAD), adottato in attuazione del D.Lgs. 199/2021 e in recepimento della Direttiva (UE) 2018/2001 (RED II) e della Direttiva (UE) 2019/944 sul mercato interno dell'energia elettrica.

Il TIAD rappresenta oggi il principale riferimento regolatorio nazionale per l'autoconsumo diffuso, individuando sette differenti configurazioni giuridico-tecniche che possono essere ricondotte a tre dimensioni fondamentali:

- soggettività giuridica, che identifica il soggetto responsabile dell'impianto o della configurazione energetica;
- modalità di connessione, che distingue le configurazioni realizzate mediante rete pubblica, linea diretta o nell'ambito della medesima cabina primaria;
- perimetro territoriale della condivisione, che varia dal singolo edificio fino alla scala comunale o sovracomunale.

Questa classificazione consente di recepire nel contesto nazionale le differenti forme di autoconsumo previste dalla normativa europea,

offrendo un quadro regolatorio omogeneo per configurazioni caratterizzate da differenti livelli di complessità tecnica, organizzativa e territoriale.

Sebbene il TIAD disciplini un ampio ventaglio di configurazioni, l'evoluzione del mercato evidenzia una progressiva concentrazione delle iniziative su due modelli prevalenti: i gruppi di autoconsumatori e le CER. Le altre configurazioni – quali l'autoconsumatore individuale a distanza, il cliente attivo a distanza o le comunità energetiche dei cittadini – risultano, allo stato attuale, scarsamente diffuse.

Questa polarizzazione non deriva da una gerarchia normativa, bensì dalla convergenza di fattori economici, tecnici e territoriali. Dal punto di vista economico, il sistema di incentivazione introdotto dal D.M. 7 dicembre 2023 rende maggiormente sostenibili gli investimenti nelle CER e nei gruppi di autoconsumatori. Sotto il profilo tecnico, le configurazioni a distanza richiedono procedure più complesse per la misurazione dell'energia condivisa, la verifica del perimetro della cabina primaria e il bilanciamento tra produzione e consumo. Dal punto di vista territoriale, le CER risultano maggiormente integrabili con gli strumenti di pianificazione energetica comunale e sovracomunale, favorendo forme di governance multilivello, mentre le configurazioni individuali mantengono una dimensione prevalentemente impiantistica.

Ne consegue che il pluralismo introdotto dal TIAD si traduce, nella pratica applicativa, in una convergenza verso le configurazioni maggiormente capaci di coniugare sostenibilità economica, semplicità gestionale e integrazione territoriale. Per una visione d'insieme delle configurazioni previste dal Testo Integrato dell'Autoconsumo Diffuso (TIAD) si rinvia alla Tabella A.1 6 dell'Appendice A.1, nella quale viene proposta una comparazione tecnico-giuridica e territoriale delle diverse configurazioni, evidenziandone la scala territoriale, il livello di integrazione con la pianificazione e la relativa diffusione applicativa.

- Autoconsumatori individuali

L'autoconsumatore individuale rappresenta la configurazione più semplice prevista dal TIAD. In tale modello un singolo soggetto produce energia elettrica da fonte rinnovabile destinandola prevalentemente al proprio fabbisogno energetico.

Questa configurazione trova ampia diffusione nel settore residenziale, produttivo e pubblico attraverso impianti fotovoltaici installati sulle coperture degli edifici o su aree pertinenziali. L'efficacia del sistema

dipende principalmente dal corretto dimensionamento dell'impianto rispetto al profilo di consumo dell'utenza, al fine di massimizzare l'autoconsumo istantaneo e ridurre i prelievi dalla rete.

- Autoconsumatori individuali a distanza

L'autoconsumatore individuale a distanza consente a un medesimo soggetto di utilizzare energia prodotta in un sito differente rispetto al punto di consumo, purché siano rispettati i requisiti tecnici e regolatori stabiliti dal TIAD.

Questa configurazione amplia le possibilità di diffusione delle fonti rinnovabili nei casi in cui l'edificio servito non disponga di superfici idonee all'installazione degli impianti, permettendo una maggiore valorizzazione del patrimonio immobiliare disponibile. La sua applicazione risulta tuttavia più complessa sotto il profilo gestionale e regolatorio, richiedendo procedure di contabilizzazione e verifica più articolate.

- Gruppi di autoconsumatori

I gruppi di autoconsumatori costituiscono una configurazione collettiva nella quale più utenti condividono l'energia prodotta da uno o più impianti alimentati da fonti rinnovabili.

Il modello trova particolare applicazione negli edifici condominiali, nei complessi residenziali e nei poli produttivi caratterizzati dalla presenza di più utenze localizzate nello stesso edificio o complesso edilizio.

L'elemento innovativo consiste nel superamento della logica individuale dell'autoconsumo a favore di una gestione condivisa dell'energia, capace di incrementare il tasso di utilizzo locale della produzione rinnovabile e di distribuire i benefici economici tra tutti i partecipanti.

- Comunità Energetiche Rinnovabili

Le CER rappresentano la configurazione più evoluta prevista dal TIAD, poiché integrano dimensioni energetiche, organizzative, sociali e territoriali. La CER consente a cittadini, imprese, enti locali, amministrazioni pubbliche e altri soggetti di associarsi mediante un autonomo soggetto giuridico per produrre, condividere e consumare energia elettrica proveniente da fonti rinnovabili.

Dal punto di vista tecnico, gli impianti di produzione e i punti di prelievo devono rispettare i requisiti di connessione previsti dalla disciplina vigente, con particolare riferimento all'appartenenza alla medesima cabina primaria, elemento che garantisce il radicamento territoriale della configurazione.

Rispetto alle altre forme di autoconsumo, la CER supera la semplice finalità di riduzione della bolletta energetica introducendo un modello di governance cooperativa nel quale il valore economico generato dall'energia condivisa viene redistribuito tra i membri e reinvestito nello sviluppo della comunità locale.

Grazie alla capacità di integrare produzione, consumo, partecipazione dei cittadini e pianificazione territoriale, le CER costituiscono oggi la configurazione maggiormente coerente con gli obiettivi della transizione energetica delineati dalla normativa europea e nazionale, rappresentando il principale strumento per promuovere modelli di sviluppo energetico decentrati, partecipativi e sostenibili.

1.6.3.4 Incentivi e meccanismi di valorizzazione dell'energia condivisa

Lo sviluppo delle configurazioni di autoconsumo diffuso è sostenuto da un sistema di incentivi finalizzato a rendere economicamente sostenibili gli investimenti e a favorire la diffusione delle fonti rinnovabili distribuite.

Il GSE svolge un ruolo centrale nella gestione delle richieste di accesso al servizio di autoconsumo diffuso e nella verifica dei requisiti tecnici delle configurazioni.

Il meccanismo incentivante previsto dal Decreto Ministeriale 414/2023 riconosce un contributo economico proporzionato all'energia condivisa virtualmente all'interno della configurazione energetica. Gli incentivi perseguono una duplice finalità:

- sostenere economicamente la realizzazione di nuovi impianti da fonti rinnovabili;
- promuovere modelli energetici partecipativi orientati alla riduzione dei consumi da fonti fossili e alla valorizzazione delle risorse locali.

A tali strumenti sopra discussi (Tabella A.1 3 e Tabella A.1 4), si aggiungono i contributi previsti dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) per lo sviluppo delle CER nei piccoli comuni e nei territori caratterizzati da maggiore vulnerabilità socio-economica. I modelli di autoconsumo rappresentano un elemento fondamentale nel processo di trasformazione dei sistemi energetici contemporanei, poiché consentono di integrare produzione distribuita, digitalizzazione delle reti e partecipazione degli utenti.

L'evoluzione dall'autoconsumo individuale alle CER evidenzia il passaggio da una concezione dell'energia come semplice servizio

infrastrutturale a una visione nella quale essa diviene componente strategica dello sviluppo territoriale.
In questa prospettiva, le CER non costituiscono esclusivamente una configurazione tecnica per la condivisione dell'energia, ma un modello organizzativo capace di generare nuove forme di cooperazione locale, contribuendo alla costruzione di sistemi energetici più resilienti, inclusivi e coerenti con gli obiettivi della transizione ecologica.

1.6.4 IL RUOLO DELLE COMUNITÀ ENERGETICHE RINNOVABILI NELLO SVILUPPO TERRITORIALE

Le CER rappresentano un'evoluzione significativa del paradigma energetico contemporaneo, poiché introducono una relazione diretta tra produzione energetica, organizzazione sociale e configurazione territoriale. La loro funzione supera la dimensione strettamente infrastrutturale della generazione da fonti rinnovabili, configurandosi come uno strumento di pianificazione e sviluppo locale capace di integrare obiettivi energetici, ambientali, economici e sociali.
In tale prospettiva, la CER può essere interpretata come un dispositivo territoriale attraverso cui le comunità locali assumono un ruolo attivo nei processi della transizione energetica, trasformandosi da semplici consumatori di energia in soggetti partecipi della produzione, gestione e valorizzazione delle risorse energetiche disponibili.
Questo cambiamento introduce una nuova relazione tra energia e territorio: la produzione rinnovabile non viene più concepita esclusivamente come intervento infrastrutturale localizzato, ma come processo integrato nel quale le caratteristiche ambientali, sociali ed economiche dei luoghi diventano elementi determinanti per la definizione dei modelli energetici.
Le CER assumono quindi una funzione strategica soprattutto nei territori caratterizzati da vulnerabilità economiche, marginalità geografica o fragilità demografica, dove la transizione energetica può rappresentare un'opportunità di rigenerazione e riequilibrio territoriale.

1.6.4.1 Benefici ambientali

Uno dei principali contributi delle CER riguarda la possibilità di accelerare la diffusione delle fonti energetiche rinnovabili attraverso modelli distribuiti e territorialmente integrati.
La produzione locale di energia da fonti rinnovabili consente di ridurre la dipendenza dai combustibili fossili e di contribuire alla diminuzione

delle emissioni climalteranti associate al sistema energetico. In particolare, l'autoconsumo collettivo permette di valorizzare superfici già antropizzate, quali coperture edilizie, edifici pubblici, aree industriali dismesse o infrastrutture esistenti, riducendo la pressione verso nuove trasformazioni territoriali.

La localizzazione degli impianti all'interno di configurazioni energetiche condivise favorisce inoltre una maggiore coerenza tra produzione energetica e caratteristiche del territorio, contribuendo al superamento di una logica esclusivamente quantitativa dello sviluppo delle FER.

In questo senso, le CER possono rappresentare un modello alternativo rispetto alla realizzazione di grandi impianti centralizzati, spesso associati a problematiche di consumo di suolo, conflitti paesaggistici e difficoltà di accettazione sociale.

La dimensione ambientale delle CER non riguarda quindi esclusivamente la riduzione delle emissioni, ma anche la capacità di promuovere una gestione più equilibrata delle risorse territoriali, attraverso un rapporto maggiormente integrato tra infrastrutture energetiche, paesaggio e sistemi ecologici.

1.6.4.2 Benefici economici

Dal punto di vista economico, le CER introducono nuove forme di valorizzazione delle risorse locali, generando ricadute positive sia per i singoli partecipanti sia per il sistema territoriale nel suo complesso. Il primo livello di beneficio riguarda la riduzione dei costi energetici attraverso una maggiore quota di energia prodotta e consumata localmente. La possibilità di condividere energia rinnovabile consente infatti di diminuire la dipendenza dagli acquisti energetici tradizionali, aumentando la resilienza economica degli utenti coinvolti. Un secondo livello riguarda la capacità delle CER di attivare investimenti locali. La realizzazione degli impianti, la gestione delle configurazioni energetiche e lo sviluppo di servizi associati possono generare nuove opportunità economiche per imprese, professionisti e operatori del settore energetico. Le CER possono inoltre favorire la nascita di economie territoriali basate sulla cooperazione tra soggetti diversi: cittadini, amministrazioni pubbliche, imprese e operatori tecnologici. Questo modello consente di trattenere una quota maggiore del valore economico prodotto dall'energia all'interno delle comunità locali, contrastando processi di estrazione economica tipici dei sistemi energetici centralizzati.

In particolare, nei piccoli comuni e nelle aree interne, le CER possono diventare strumenti di attrazione degli investimenti e di valorizzazione del patrimonio immobiliare pubblico e privato, contribuendo alla costruzione di nuove strategie di sviluppo locale.

1.6.4.3 Benefici sociali e costruzione del capitale territoriale

Oltre agli aspetti ambientali ed economici, il valore innovativo delle CER risiede nella loro dimensione sociale e partecipativa. La CER introduce un modello di governance energetica basato sulla collaborazione tra diversi attori territoriali, favorendo processi di partecipazione e costruzione condivisa delle decisioni. L'energia diventa quindi un elemento capace di rafforzare il capitale sociale, creando nuove forme di cooperazione tra cittadini, istituzioni e soggetti economici.

Questo aspetto assume particolare rilevanza nei territori caratterizzati da frammentazione sociale o marginalità geografica, dove la costruzione di reti collaborative può rappresentare un fattore di rafforzamento della coesione comunitaria.

La partecipazione alla CER consente inoltre di modificare il rapporto tra cittadini e sistema energetico, favorendo una maggiore consapevolezza dei consumi e promuovendo comportamenti orientati all'efficienza energetica.

In questa prospettiva, la transizione energetica assume una dimensione culturale: non riguarda soltanto la sostituzione delle fonti fossili con fonti rinnovabili, ma implica una trasformazione delle modalità con cui le comunità percepiscono, utilizzano e governano l'energia.

1.6.4.4 Contrasto alla povertà energetica

Uno degli aspetti più rilevanti delle CER riguarda il potenziale contributo al contrasto della povertà energetica, fenomeno che interessa una quota crescente della popolazione europea e italiana.

La possibilità di partecipare a configurazioni energetiche collettive consente infatti di ampliare l'accesso ai benefici della produzione rinnovabile anche a soggetti che non dispongono delle condizioni economiche o fisiche necessarie per installare autonomamente un impianto.

Le CER possono quindi rappresentare strumenti di inclusione energetica, permettendo la partecipazione di famiglie vulnerabili, utenti in condizioni economiche fragili e soggetti appartenenti a contesti territoriali svantaggiati.

In particolare, il coinvolgimento delle amministrazioni pubbliche e degli enti del terzo settore può favorire modelli nei quali una parte dei benefici economici generati dalla produzione energetica viene destinata a finalità sociali, contribuendo alla riduzione delle disuguaglianze nell'accesso all'energia.
La dimensione sociale delle CER risulta quindi strettamente connessa al principio di giustizia energetica, inteso come equa distribuzione dei costi e dei benefici della transizione.

1.6.4.5 Rigenerazione territoriale e valorizzazione delle aree fragili

Le CER possono assumere un ruolo strategico nei processi di rigenerazione territoriale, soprattutto nelle aree interne, nei piccoli comuni e nei contesti caratterizzati da fenomeni di spopolamento.
In tali territori, la disponibilità di superfici inutilizzate, edifici pubblici sottoutilizzati e patrimonio edilizio esistente rappresenta una risorsa potenziale per lo sviluppo di nuovi modelli energetici locali. La CER può contribuire alla riattivazione di questi patrimoni attraverso interventi integrati che associano produzione energetica, riqualificazione edilizia e valorizzazione delle risorse territoriali. In questo senso, l'energia diventa un elemento di connessione tra politiche diverse: ambiente, sviluppo economico, pianificazione urbana e coesione territoriale.
Il valore rigenerativo delle CER non risiede quindi esclusivamente nella produzione di energia rinnovabile, ma nella capacità di attivare processi territoriali complessi, generando nuove relazioni tra abitanti, infrastrutture e risorse locali.

1.6.4.6 Considerazioni conclusive

Le CER rappresentano un modello innovativo nel quale la transizione energetica viene reinterpretata come processo territoriale e sociale, oltre che tecnologico.
Il loro contributo principale consiste nella capacità di integrare produzione energetica, partecipazione comunitaria e valorizzazione delle risorse locali, superando una concezione esclusivamente infrastrutturale della decarbonizzazione.
Attraverso la combinazione di benefici ambientali, economici e sociali, le CER possono diventare strumenti di sviluppo territoriale capaci di rafforzare la resilienza dei sistemi locali, ridurre le disuguaglianze energetiche e promuovere nuove forme di governance condivisa.
In questa prospettiva, il successo delle CER dipenderà non solo dalla capacità tecnologica di produrre energia da fonti rinnovabili, ma soprattutto dalla capacità dei territori di costruire modelli

organizzativi inclusivi, coerenti con le specificità locali e integrati nei processi di pianificazione dello sviluppo sostenibile.

1.6.5 IL RUOLO DELLE AMMINISTRAZIONI LOCALI NELLA PROMOZIONE DELLE COMUNITÀ ENERGETICHE RINNOVABILI

Le amministrazioni locali assumono un ruolo strategico nell'attuazione dei modelli di CER, configurandosi non soltanto come soggetti istituzionali coinvolti nei processi autorizzativi, ma come attori abilitanti della transizione energetica territoriale. In un paradigma caratterizzato dal progressivo decentramento della produzione energetica e dalla diffusione di sistemi distribuiti, il livello comunale rappresenta la scala privilegiata per integrare infrastrutture energetiche, pianificazione urbana, politiche ambientali e strategie di sviluppo locale.

Le CER, infatti, superano la tradizionale concezione dell'energia come semplice infrastruttura tecnica, assumendo una dimensione territoriale e sociale nella quale il Comune può svolgere una funzione di coordinamento, facilitazione e costruzione di consenso tra cittadini, imprese, enti pubblici e operatori energetici. Tale ruolo risulta particolarmente rilevante nei territori caratterizzati da fragilità socio-economiche, spopolamento e ridotta capacità di investimento, nei quali le CER possono rappresentare strumenti di innovazione istituzionale e rigenerazione territoriale.

1.6.5.1 Pianificazione energetica e territoriale

La prima funzione delle amministrazioni locali riguarda l'integrazione delle CER all'interno degli strumenti di pianificazione territoriale ed energetica. La diffusione degli impianti da fonti rinnovabili richiede infatti una lettura sistemica del territorio, capace di individuare potenzialità, vincoli e compatibilità tra produzione energetica, caratteristiche paesaggistiche e usi del suolo (Angelucci, 2012). In tale prospettiva, i Comuni possono contribuire attraverso:

- individuazione delle superfici disponibili per l'installazione di impianti FER, privilegiando aree già antropizzate quali coperture edilizie, aree produttive, parcheggi, edifici pubblici e infrastrutture esistenti;
- integrazione delle CER nei Piani Urbanistici Generali (PUG), nei Piani Energetici Comunali e negli strumenti di programmazione climatica locale;

- definizione di criteri localizzativi coerenti con la tutela paesaggistica e ambientale;
- promozione di strategie di autoconsumo collettivo connesse alla riqualificazione energetica del patrimonio edilizio.

L'approccio pianificatorio consente quindi di superare una logica esclusivamente autorizzativa, orientando lo sviluppo delle rinnovabili verso una maggiore coerenza territoriale e una riduzione dei conflitti localizzativi.

1.6.5.2 Facilitazione e accompagnamento dei processi

Oltre alla funzione pianificatoria, gli enti locali svolgono un ruolo fondamentale nella facilitazione dei processi di costituzione delle CER. La complessità normativa, tecnica ed economica che caratterizza tali configurazioni costituisce infatti una delle principali barriere alla loro diffusione, soprattutto nei piccoli comuni e nei contesti con limitata capacità amministrativa.

In questo quadro, il Comune può assumere il ruolo di soggetto promotore attraverso:

- creazione di sportelli energia o strutture di supporto tecnico-amministrativo;
- promozione di percorsi informativi rivolti a cittadini, imprese e associazioni;
- supporto alla costituzione dei soggetti giuridici necessari alla gestione delle CER;
- facilitazione del dialogo tra produttori, consumatori, distributori e operatori energetici.

L'amministrazione locale diviene quindi un intermediario istituzionale capace di ridurre le asimmetrie informative e favorire la partecipazione degli utenti finali, trasformando la transizione energetica da processo tecnico-specialistico a percorso collettivo.

1.6.5.3 Governance multilivello e partecipazione territoriale

La natura delle CER richiede modelli di governance aperti e partecipativi, nei quali il valore prodotto dall'energia rinnovabile venga distribuito tra gli attori coinvolti. In questo sistema, il Comune può svolgere una funzione di regia territoriale, promuovendo forme collaborative tra soggetti pubblici e privati.

La governance locale delle CER può includere:

- partenariati pubblico-privati;
- accordi tra amministrazioni, cittadini e imprese;

- coinvolgimento di cooperative energetiche e soggetti del terzo settore;
- processi partecipativi finalizzati alla definizione degli obiettivi della comunità energetica.

Questa dimensione assume particolare rilevanza perché l'accettabilità sociale degli impianti rinnovabili non dipende esclusivamente dalle loro prestazioni energetiche, ma anche dalla capacità dei progetti di generare benefici condivisi e riconoscibili dalla popolazione locale.
In tal senso, le CER rappresentano strumenti di democrazia energetica, nei quali il cittadino passa dal ruolo passivo di consumatore a quello attivo di partecipante alla produzione e gestione dell'energia.

1.6.5.4 Valorizzazione del patrimonio pubblico

Uno degli ambiti maggiormente strategici per il coinvolgimento delle amministrazioni locali riguarda la valorizzazione del patrimonio pubblico. Gli edifici comunali costituiscono infatti una risorsa territoriale immediatamente disponibile per l'integrazione di impianti FER e per la costruzione di configurazioni di autoconsumo collettivo.
Le superfici pubbliche potenzialmente interessate comprendono: scuole; sedi amministrative; impianti sportivi; strutture socio-sanitarie; parcheggi pubblici; aree produttive di proprietà comunale.
L'utilizzo del patrimonio pubblico consente di perseguire una duplice finalità, ossia, da un lato ridurre i consumi energetici e la spesa corrente delle amministrazioni; dall'altro generare benefici economici e sociali destinati alla comunità locale.
In particolare, gli investimenti nelle CER possono produrre effetti positivi attraverso la riduzione dei costi energetici, la creazione di nuove opportunità economiche e il reinvestimento dei benefici generati dall'energia condivisa in servizi territoriali.

1.6.5.5 Il ruolo delle CER nei piccoli comuni

Il ruolo delle amministrazioni locali risulta particolarmente rilevante nei comuni con popolazione inferiore ai 5.000 abitanti, individuati dal quadro nazionale come territori prioritari per gli interventi di sviluppo delle energie rinnovabili e di rafforzamento della coesione territoriale.
In questi contesti, le CER possono rappresentare strumenti multifunzionali in grado di integrare politiche energetiche locali, strategie contro lo spopolamento, valorizzazione delle risorse territoriali, sviluppo economico delle aree interne e contrasto alla povertà energetica.

Il sostegno previsto dal PNRR per la realizzazione di impianti da fonti rinnovabili nell'ambito delle CER e dei gruppi di autoconsumatori collettivi assume quindi una valenza che supera la sola dimensione energetica, configurandosi come una politica territoriale finalizzata alla creazione di nuove forme di cooperazione locale. La misura, inizialmente destinata agli interventi localizzati nei Comuni con popolazione inferiore a 5.000 abitanti, è stata successivamente ampliata estendendo la possibilità di accesso ai contributi anche ai Comuni con popolazione inferiore a 50.000 abitanti, aumentando così la platea dei territori coinvolti nella transizione energetica.

Tale ampliamento rappresenta un elemento significativo per la diffusione delle CER, in quanto consente di coinvolgere un numero maggiore di realtà locali e di rafforzare il ruolo degli enti territoriali nella promozione di modelli energetici decentralizzati. La possibilità di produrre e condividere energia rinnovabile consente infatti di trattenere valore economico all'interno delle comunità, rafforzando la resilienza dei territori, sostenendo lo sviluppo delle aree interne e contribuendo alla costruzione di modelli di crescita maggiormente sostenibili.

Per accedere al contributo PNRR, gli interventi devono rispettare specifiche tempistiche attuative: la richiesta di contributo deve essere presentata secondo le scadenze previste dalla misura, mentre gli impianti devono essere realizzati, allacciati alla rete e posti in esercizio entro il 30 giugno 2026. Tale termine costituisce una scadenza fondamentale per il completamento degli interventi finanziati e per il conseguimento degli obiettivi energetici e ambientali previsti dal Piano. La successiva rendicontazione delle spese consente di completare il procedimento e ottenere il saldo del contributo riconosciuto.

Il ruolo delle amministrazioni locali nelle CER non può essere interpretato esclusivamente in termini amministrativi o autorizzativi, ma deve essere letto come funzione strategica di governance territoriale. I Comuni rappresentano il livello istituzionale più vicino ai cittadini e possiedono la capacità di integrare energia, ambiente, paesaggio e sviluppo locale all'interno di una visione unitaria.

Le CER costituiscono pertanto strumenti attraverso cui le amministrazioni possono promuovere una transizione energetica territorialmente radicata, fondata sulla partecipazione, sulla redistribuzione dei benefici e sulla valorizzazione delle risorse locali. In

questa prospettiva, il passaggio dalla produzione energetica centralizzata a modelli distribuiti richiede una trasformazione anche istituzionale: il Comune non è più soltanto regolatore del territorio, ma diventa attore progettuale della transizione energetica, capace di costruire connessioni tra infrastrutture, comunità e paesaggi.

1.7 VERSO UN'INTEGRAZIONE NORMATIVA AMBIENTE–ENERGIA

Lo sviluppo delle FER e dei nuovi modelli energetici territoriali, tra cui le CER, richiede un progressivo superamento della tradizionale separazione tra politiche energetiche, ambientali e territoriali. La transizione energetica contemporanea non rappresenta infatti esclusivamente un processo tecnologico finalizzato alla sostituzione delle fonti fossili con fonti rinnovabili, ma configura una trasformazione sistemica che coinvolge infrastrutture, uso del suolo, paesaggio, modelli di governance e processi decisionali.

Nel contesto italiano, tale trasformazione si inserisce in un quadro normativo caratterizzato da una progressiva stratificazione di strumenti legislativi e amministrativi, sviluppatisi in risposta a esigenze differenti: promozione della produzione energetica da fonti rinnovabili, tutela dell'ambiente, salvaguardia del paesaggio e pianificazione territoriale. Sebbene tali ambiti perseguano obiettivi convergenti nell'ottica dello sviluppo sostenibile, la loro evoluzione separata ha determinato nel tempo una significativa complessità regolatoria, con frequenti sovrapposizioni di competenze e difficoltà di coordinamento tra livelli istituzionali (Antrop, 2005).

La governance delle FER si colloca infatti all'interno di un sistema multilivello nel quale interagiscono dimensioni europee, nazionali, regionali e locali. Il livello europeo definisce gli obiettivi strategici della decarbonizzazione e i principali indirizzi normativi attraverso le direttive sulle energie rinnovabili, mentre il livello nazionale recepisce tali indirizzi attraverso strumenti legislativi e programmi energetici. Parallelamente, le Regioni e gli enti locali assumono un ruolo determinante nell'attuazione territoriale delle politiche, attraverso strumenti di pianificazione, autorizzazione e regolazione dell'uso del suolo (Apostol, et al., 2016).

Questo assetto, pur consentendo una maggiore aderenza delle politiche energetiche alle specificità territoriali, ha generato una crescente difficoltà di integrazione tra obiettivi nazionali di sviluppo

delle FER e vincoli locali di natura ambientale e paesaggistica. In particolare, la localizzazione degli impianti rinnovabili evidenzia come la disponibilità della risorsa energetica non costituisca l'unico fattore determinante per l'attuazione dei progetti, risultando invece condizionata dalla compatibilità territoriale, dalla capacità amministrativa e dalla qualità degli strumenti di pianificazione.

La questione centrale non riguarda pertanto esclusivamente la velocità di autorizzazione degli impianti, ma la capacità del sistema istituzionale di costruire un modello decisionale integrato, nel quale produzione energetica, tutela degli ecosistemi, qualità paesaggistica e accettabilità sociale siano considerate all'interno di un'unica prospettiva di pianificazione. L'attuale configurazione normativa evidenzia infatti una prevalenza di approcci settoriali, nei quali gli aspetti energetici e ambientali vengono frequentemente affrontati attraverso procedure distinte e temporalmente disallineate.

In tale prospettiva, l'integrazione ambiente–energia assume un ruolo strategico per la costruzione di un modello di transizione energetica territorialmente sostenibile. Tale integrazione richiede non solo strumenti normativi più coordinati, ma anche nuovi approcci di governance capaci di collegare pianificazione energetica, valutazioni ambientali, strumenti digitali di supporto decisionale e processi partecipativi.

Il presente capitolo analizza quindi l'evoluzione del quadro normativo e istituzionale relativo alle FER, evidenziando le principali criticità derivanti dalla frammentazione regolatoria e le recenti strategie orientate alla semplificazione e all'integrazione. L'analisi costituisce il presupposto per comprendere il ruolo degli strumenti digitali e partecipativi affrontati nei capitoli successivi, quali elementi abilitanti per una pianificazione energetica maggiormente integrata, trasparente e territorialmente consapevole.

1.7.1 FRAMMENTAZIONE NORMATIVA E MULTILIVELLO

La governance delle FER in Italia si sviluppa all'interno di un sistema istituzionale multilivello, nel quale competenze normative, amministrative e pianificatorie risultano distribuite tra differenti soggetti pubblici. Tale configurazione deriva principalmente dall'articolazione costituzionale delle competenze in materia energetica e ambientale e dalla progressiva stratificazione di

disposizioni europee, nazionali e regionali che hanno accompagnato l'evoluzione della transizione energetica.

Ai sensi dell'articolo 117, comma 3, della Costituzione, come modificato dalla riforma del Titolo V, la materia relativa alla «produzione, trasporto e distribuzione nazionale dell'energia» rientra nell'ambito della legislazione concorrente. Allo Stato compete pertanto la definizione dei principi fondamentali, mentre alle Regioni è attribuita la disciplina attuativa e di dettaglio. Tale assetto risponde all'esigenza di adattare le politiche energetiche alle caratteristiche territoriali, ma ha progressivamente evidenziato criticità legate al coordinamento tra livelli istituzionali e alla definizione di criteri omogenei per lo sviluppo delle FER.

La complessità aumenta considerando che la localizzazione degli impianti rinnovabili non coinvolge esclusivamente la dimensione energetica, ma interessa ambiti regolatori differenti, quali tutela ambientale, pianificazione territoriale, gestione del paesaggio e uso del suolo. Ne deriva un sistema decisionale nel quale obiettivi formalmente convergenti – decarbonizzazione, sicurezza energetica, tutela degli ecosistemi e sviluppo territoriale sostenibile – vengono spesso perseguiti attraverso strumenti normativi e procedurali autonomi, non sempre pienamente integrati.

La frammentazione del sistema si manifesta pertanto su quattro livelli principali.

Un primo livello riguarda la **dimensione normativa**, caratterizzata dalla progressiva sovrapposizione di direttive europee, decreti legislativi nazionali, norme regionali e strumenti regolatori settoriali. La continua evoluzione del quadro legislativo ha consentito di recepire gli obiettivi climatici ed energetici sovranazionali, ma ha determinato una crescente complessità interpretativa e applicativa, rendendo più difficile la costruzione di un sistema regolatorio stabile e prevedibile.

Un secondo livello riguarda la **dimensione istituzionale**, determinata dalla presenza di una pluralità di soggetti coinvolti nei processi decisionali: amministrazioni statali, Regioni, Province autonome, enti locali, autorità ambientali e organismi tecnici. La distribuzione delle competenze, se da un lato consente una maggiore considerazione delle specificità territoriali, dall'altro può generare sovrapposizioni decisionali, conflitti di attribuzione e rallentamenti nelle procedure autorizzative.

Un terzo livello riguarda la **dimensione procedurale**, nella quale differenti strumenti autorizzativi e valutativi intervengono sul medesimo intervento secondo logiche e tempistiche non sempre coordinate. Le procedure di Autorizzazione Unica, Valutazione di Impatto Ambientale, Valutazione Ambientale Strategica e autorizzazioni paesaggistiche costituiscono strumenti fondamentali per garantire la sostenibilità degli interventi, ma la loro applicazione separata può determinare una frammentazione del processo decisionale, con conseguenti incrementi dei tempi amministrativi e dell'incertezza progettuale.

Infine, un quarto livello riguarda la dimensione temporale della pianificazione, caratterizzata dal disallineamento tra strategie energetiche nazionali, strumenti territoriali regionali e processi autorizzativi locali. La mancanza di una pianificazione integrata preventiva porta frequentemente a una gestione ex post dei conflitti, nella quale la compatibilità ambientale e territoriale viene valutata quando il progetto è già definito, anziché essere incorporata nelle fasi iniziali di programmazione.

Questa configurazione evidenzia una tensione strutturale tra due esigenze apparentemente contrapposte: da un lato la necessità di accelerare lo sviluppo delle FER per raggiungere gli obiettivi climatici ed energetici nazionali ed europei; dall'altro la necessità di garantire una trasformazione territoriale coerente con i valori ambientali, paesaggistici e sociali dei contesti interessati.

La frammentazione normativa non rappresenta quindi esclusivamente un problema amministrativo, ma costituisce un elemento critico della governance della transizione energetica. La difficoltà principale risiede nella capacità di trasformare un sistema composto da strumenti settoriali in un modello integrato, nel quale energia, ambiente e territorio siano considerati come componenti interdipendenti di un unico processo di pianificazione.

In questa prospettiva, l'evoluzione normativa recente mostra un progressivo tentativo di superare tale frammentazione attraverso strumenti di semplificazione, coordinamento procedurale e maggiore integrazione tra pianificazione energetica e territoriale, temi che saranno approfonditi nei paragrafi successivi.

1.7.2 EVOLUZIONE DEL QUADRO NORMATIVO NAZIONALE FER

Il quadro normativo italiano relativo alle FER si è sviluppato attraverso un processo progressivo di adattamento agli indirizzi europei e agli obiettivi climatici di lungo periodo. Tale evoluzione non ha riguardato esclusivamente l'incremento della produzione energetica da fonti rinnovabili, ma ha progressivamente coinvolto aspetti più complessi quali la semplificazione amministrativa, la tutela ambientale, la pianificazione territoriale e il coinvolgimento degli attori locali.

Una prima fase fondamentale è rappresentata dal Decreto Legislativo 29 dicembre 2003, n. 387, adottato in recepimento della Direttiva 2001/77/CE relativa alla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili. Il decreto costituisce il primo riferimento organico per lo sviluppo delle FER in Italia, introducendo principi destinati a caratterizzare il successivo sistema autorizzativo nazionale. Tra gli elementi più rilevanti assume particolare importanza l'introduzione dell'Autorizzazione Unica (AU) prevista dall'articolo 12, concepita come strumento di semplificazione e coordinamento dei procedimenti amministrativi necessari alla realizzazione degli impianti FER. L'obiettivo era superare la frammentazione delle autorizzazioni settoriali attraverso un procedimento integrato comprendente sia la realizzazione dell'impianto sia le opere connesse, incluse le infrastrutture di collegamento alla rete elettrica.

Parallelamente alla progressiva crescita delle FER, il legislatore ha rafforzato il ruolo della componente ambientale attraverso il Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152, noto come Testo Unico Ambientale. Il decreto ha definito un quadro organico per le principali procedure di valutazione ambientale, introducendo e coordinando gli strumenti della Valutazione Ambientale Strategica (VAS), della Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) e dell'Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA).

L'integrazione tra sviluppo energetico e tutela ambientale rappresenta uno degli aspetti più rilevanti introdotti dal Testo Unico Ambientale, poiché riconosce che la diffusione delle FER, pur rappresentando uno strumento essenziale della decarbonizzazione, determina trasformazioni territoriali che devono essere valutate considerando gli effetti sul paesaggio, sugli ecosistemi e sull'uso del suolo.

Il successivo Decreto Ministeriale 10 settembre 2010 ha rappresentato un ulteriore passaggio verso una maggiore uniformità del sistema autorizzativo nazionale, attraverso l'introduzione delle Linee guida

nazionali per l'autorizzazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili. Il provvedimento ha definito criteri generali per la localizzazione degli impianti, indicando principi per l'individuazione delle aree non idonee e fornendo un riferimento comune per le amministrazioni regionali.

Tale intervento normativo evidenzia una crescente consapevolezza della necessità di integrare la dimensione energetica con quella territoriale. Tuttavia, la successiva attuazione regionale ha mostrato significative differenze interpretative e applicative, contribuendo alla persistenza di un quadro nazionale disomogeneo.

Un'ulteriore fase evolutiva è rappresentata dal Decreto Legislativo 3 marzo 2011, n. 28, adottato in recepimento della Direttiva 2009/28/CE. Il provvedimento ha rafforzato il sistema di promozione delle FER attraverso l'introduzione di nuovi strumenti di incentivazione e disposizioni finalizzate al raggiungimento degli obiettivi nazionali di consumo energetico da fonti rinnovabili. In questa fase emerge progressivamente il passaggio da una logica esclusivamente impiantistica a una visione più ampia della transizione energetica, comprendente efficienza, autoconsumo e integrazione tra produzione e consumo.

La successiva evoluzione normativa è stata caratterizzata da una crescente attenzione alla semplificazione dei procedimenti e alla riduzione delle barriere amministrative. Il Decreto Legislativo 16 giugno 2017, n. 104, recependo la Direttiva 2014/52/UE, ha modificato il sistema delle valutazioni ambientali introducendo il Procedimento Autorizzatorio Unico Regionale (PAUR), finalizzato a concentrare in un unico procedimento la VIA e gli ulteriori titoli abilitativi necessari alla realizzazione degli interventi.

In questa fase il legislatore ha progressivamente riconosciuto che l'accelerazione della transizione energetica non poteva essere perseguita esclusivamente attraverso la riduzione dei tempi autorizzativi, ma richiedeva una maggiore integrazione tra strumenti ambientali, energetici e territoriali.

Tale orientamento è stato ulteriormente rafforzato dagli interventi normativi collegati al Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR). Il Decreto Legge 16 luglio 2020, n. 76, e successivamente il Decreto Legge 31 maggio 2021, n. 77, hanno introdotto misure di semplificazione amministrativa finalizzate ad accelerare gli interventi strategici per la transizione ecologica, intervenendo sui procedimenti di verifica

ambientale, sulle competenze amministrative e sulle soglie autorizzative.

Il Decreto Legge 77/2021 assume particolare rilevanza poiché collega direttamente la semplificazione amministrativa agli obiettivi del PNRR, favorendo lo sviluppo di settori strategici quali l'agrivoltaico, la produzione energetica distribuita e gli interventi funzionali alla decarbonizzazione.

Un passaggio decisivo è rappresentato dal Decreto Legislativo 8 novembre 2021, n. 199, adottato in recepimento della Direttiva (UE) 2018/2001 (RED II). Tale decreto introduce un nuovo paradigma nella governance delle FER, superando progressivamente una visione basata esclusivamente sull'autorizzazione dei singoli impianti e introducendo strumenti orientati alla pianificazione territoriale.

Tra gli elementi più innovativi assumono particolare rilievo:

- il riconoscimento e la disciplina delle CER;
- l'introduzione dei criteri per l'individuazione delle aree idonee e non idonee;
- il rafforzamento del coordinamento tra obiettivi energetici nazionali e pianificazione regionale;
- il collegamento con gli investimenti previsti dal PNRR, in particolare nel settore dell'agrivoltaico.

Con il D.Lgs. 199/2021 emerge quindi un cambio di paradigma: lo sviluppo delle FER viene progressivamente ricondotto non più soltanto alla disponibilità tecnologica o alla capacità autorizzativa, ma alla capacità del territorio di integrare produzione energetica, caratteristiche ambientali e dinamiche socio-economiche.

Gli interventi normativi più recenti, tra cui il Decreto Legge 13/2023, hanno ulteriormente rafforzato il coordinamento tra pianificazione energetica, agricola e territoriale, introducendo disposizioni finalizzate alla semplificazione dei procedimenti e alla maggiore coerenza tra sviluppo delle FER e gestione sostenibile del territorio.

Nel complesso, l'evoluzione normativa nazionale evidenzia un progressivo ampliamento della prospettiva regolatoria: da un modello iniziale prevalentemente orientato alla promozione quantitativa delle FER si è progressivamente passati verso un modello basato sulla compatibilità territoriale, sulla pianificazione e sull'integrazione tra energia e ambiente.

Tuttavia, tale evoluzione non ha ancora completamente superato la frammentazione istituzionale e procedurale descritta nel paragrafo

precedente. La necessità di una maggiore armonizzazione normativa costituisce pertanto una delle principali sfide della governance energetica italiana e rappresenta il presupposto per gli strumenti di integrazione e semplificazione analizzati nei paragrafi successivi, fino al recente tentativo di razionalizzazione normativa rappresentato dal Testo Unico delle Rinnovabili (TUR) oggetto di un'analisi approfondita (si veda Figura A.1 29 in Appendice 1).

1.7.3 SISTEMA DELLE VALUTAZIONI AMBIENTALI

All'interno del quadro normativo nazionale ed europeo, il sistema delle valutazioni ambientali costituisce uno degli strumenti principali attraverso cui integrare le esigenze della transizione energetica con la tutela dell'ambiente, del paesaggio e degli ecosistemi. Tali strumenti rappresentano il principale collegamento operativo tra pianificazione, autorizzazione degli interventi e verifica preventiva degli effetti territoriali derivanti dalla realizzazione di infrastrutture energetiche. Il sistema italiano delle valutazioni ambientali si fonda principalmente su tre strumenti:

- la Valutazione Ambientale Strategica (VAS), applicata a piani e programmi;
- la Valutazione di Impatto Ambientale (VIA), applicata ai singoli progetti;
- l'Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA), relativa agli impianti industriali caratterizzati da maggiore potenziale emissivo.

A questi si aggiunge la Valutazione di Incidenza Ambientale (VIncA), specificamente finalizzata alla tutela dei siti appartenenti alla rete ecologica europea Natura 2000, quando piani, programmi o progetti possono determinare effetti significativi sugli habitat e sulle specie tutelate.

La differenziazione funzionale tra tali strumenti riflette una diversa scala di intervento. La VAS opera infatti nella fase strategica e pianificatoria, consentendo di integrare preventivamente la componente ambientale nella definizione degli obiettivi e delle alternative di sviluppo. La VIA interviene invece nella fase progettuale, valutando gli effetti ambientali di una specifica opera o infrastruttura. L'AIA, infine, assume una funzione prevalentemente gestionale e autorizzativa, orientata alla prevenzione e riduzione integrata

dell'inquinamento attraverso l'applicazione delle migliori tecniche disponibili (**Best Available Techniques – BAT**).

1.7.3.1 La Valutazione Ambientale Strategica (VAS)

La VAS, introdotta dalla Direttiva europea 2001/42/CE e recepita nell'ordinamento italiano attraverso il D.Lgs. 152/2006, rappresenta lo strumento maggiormente orientato all'integrazione tra politiche energetiche, ambientali e territoriali. La sua finalità principale consiste nell'assicurare che le considerazioni ambientali siano incorporate nelle fasi iniziali di elaborazione e approvazione di piani e programmi, contribuendo alla definizione di strategie coerenti con gli obiettivi dello sviluppo sostenibile. Ai sensi dell'articolo 4 del D.Lgs. 152/2006, la VAS mira a:

- garantire un elevato livello di protezione ambientale;
- integrare le valutazioni ambientali nei processi decisionali;
- assicurare la coerenza tra sviluppo territoriale e sostenibilità ambientale.

Nel settore energetico, la VAS assume particolare rilevanza poiché trova applicazione nei piani e programmi relativi alla produzione e distribuzione dell'energia, alla pianificazione territoriale, alla gestione delle risorse naturali e alla riduzione delle emissioni climalteranti. Il procedimento comprende diverse fasi:

- verifica di assoggettabilità;
- elaborazione del Rapporto Ambientale;
- analisi delle alternative;
- consultazione dei soggetti competenti in materia ambientale e del pubblico interessato;
- valutazione degli effetti ambientali;
- monitoraggio degli impatti derivanti dall'attuazione del piano o programma.

Un elemento caratterizzante della VAS è quindi il superamento di una logica esclusivamente autorizzativa, introducendo un approccio preventivo e strategico. Attraverso la valutazione delle alternative progettuali e localizzative, essa consente di orientare lo sviluppo infrastrutturale verso soluzioni maggiormente compatibili con le caratteristiche territoriali.

Tuttavia, nella pratica applicativa, la VAS evidenzia ancora alcune criticità, legate soprattutto al rapporto non sempre efficace tra valutazione ambientale e pianificazione energetica. In molti casi, infatti, gli strumenti energetici regionali vengono sottoposti a VAS

senza che tale processo determini un reale coordinamento tra localizzazione degli impianti, disponibilità delle risorse territoriali e tutela paesaggistica.

1.7.3.2 La Valutazione di Impatto Ambientale (VIA)

La VIA costituisce lo strumento principale per la valutazione preventiva degli effetti ambientali associati alla realizzazione di singoli progetti infrastrutturali.

A differenza della VAS, che opera a livello strategico, la VIA si concentra sulla compatibilità ambientale di opere specifiche, quali impianti energetici, infrastrutture di rete e grandi interventi territoriali. Il procedimento considera gli effetti potenziali sulle principali componenti ambientali: suolo e sottosuolo; acqua; biodiversità; clima; paesaggio; patrimonio culturale; salute umana.

Lo Studio di Impatto Ambientale (SIA) rappresenta il documento tecnico centrale del procedimento e comprende:

- descrizione delle caratteristiche del progetto;
- analisi dello stato ambientale dell'area interessata;
- valutazione degli impatti;
- confronto tra alternative progettuali;
- individuazione delle misure di mitigazione e compensazione.

Nel settore delle FER, la VIA assume un ruolo particolarmente rilevante, considerando la crescente dimensione degli impianti eolici e fotovoltaici utility-scale e la conseguente necessità di valutare non solo gli impatti locali, ma anche quelli cumulativi derivanti dalla concentrazione territoriale degli interventi.

In tale prospettiva, la VIA rappresenta uno strumento fondamentale per bilanciare gli obiettivi di decarbonizzazione con la tutela dei valori paesaggistici e ambientali, ma presenta ancora limiti quando interviene in assenza di una preventiva pianificazione territoriale delle aree vocate allo sviluppo energetico.

1.7.3.3 L'Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA)

L'AIA costituisce il terzo elemento del sistema delle valutazioni ambientali e si applica alle installazioni industriali caratterizzate da maggiore impatto ambientale[28].

La sua finalità è garantire la prevenzione e la riduzione integrata dell'inquinamento attraverso un approccio complessivo alla gestione degli impatti, superando una valutazione separata delle singole matrici ambientali.

L'autorizzazione si basa sull'applicazione delle **BAT (Best Available Techniques)**, individuate a livello europeo attraverso i documenti di riferimento comunitari (**BREF**).

Rispetto a VAS e VIA, l'AIA assume quindi una funzione maggiormente gestionale, concentrandosi sulle modalità operative dell'impianto durante il suo esercizio.

1.7.3.4 La Valutazione di Incidenza Ambientale (VIncA)

Un ruolo specifico nell'integrazione ambiente–energia è svolto dalla VIncA, prevista dalla Direttiva 92/43/CEE "Habitat" e recepita nell'ordinamento italiano attraverso il D.P.R. 357/1997 e successive modificazioni.

La procedura è finalizzata a garantire la conservazione degli habitat e delle specie presenti nei siti appartenenti alla rete Natura 2000, verificando che piani, programmi o progetti non determinino effetti negativi significativi sull'integrità dei siti tutelati.

Il procedimento si articola generalmente in tre livelli:

- **screening**, finalizzato a individuare la possibile presenza di effetti significativi;
- **valutazione appropriata**, volta ad analizzare gli effetti sull'integrità del sito e individuare eventuali misure di mitigazione;
- **deroga ai sensi dell'articolo 6 della Direttiva Habitat**, applicabile solo in presenza di motivi imperativi di rilevante interesse pubblico, assenza di alternative e adeguate misure compensative.

[28] PRESENTAZIONE ON-LINE DELLE ISTANZE DI PROCEDURE VIA - Dettaglio - Valutazioni e Autorizzazioni Ambientali - VAS - VIA - AIA (mite.gov.it)

La VIncA assume particolare rilevanza nello sviluppo delle FER, poiché molte aree potenzialmente idonee alla produzione energetica possono sovrapporsi a territori caratterizzati da elevata sensibilità ecologica.

1.7.3.5 Verso un sistema integrato di valutazione

Nel complesso, il sistema delle valutazioni ambientali rappresenta un elemento fondamentale della governance della transizione energetica, poiché consente di integrare dimensione energetica, ambientale e territoriale. Tuttavia, permane una criticità strutturale: gli strumenti valutativi operano spesso secondo logiche separate rispetto ai processi di pianificazione energetica e territoriale. La VAS, pur essendo concepita come strumento strategico, non sempre riesce a orientare preventivamente le scelte localizzative degli impianti; la VIA interviene frequentemente quando le principali decisioni territoriali sono già state assunte; la VIncA opera prevalentemente come verifica di compatibilità nei contesti maggiormente sensibili. Ne deriva la necessità di un modello maggiormente integrato, nel quale valutazioni ambientali, pianificazione energetica e strumenti territoriali siano sviluppati secondo una logica coordinata e multilivello.

In tale prospettiva, le CER possono rappresentare un modello operativo capace di ridurre parte delle criticità evidenziate, poiché introducono una dimensione territoriale e partecipativa della transizione energetica, favorendo una maggiore coerenza tra produzione energetica, caratteristiche locali e accettabilità sociale degli interventi.

1.7.4 PIANIFICAZIONE TERRITORIALE ED ENERGETICA

La pianificazione territoriale ed energetica rappresenta il principale ambito nel quale si concretizza il tentativo di superare la separazione storica tra sviluppo delle FER, tutela ambientale e governo del territorio. Se le procedure autorizzative e valutative operano prevalentemente nella fase attuativa dei singoli interventi, la pianificazione assume una funzione preventiva, orientando la localizzazione delle infrastrutture energetiche e definendo un quadro strategico coerente con gli obiettivi climatici e territoriali.

La crescente diffusione delle FER ha infatti evidenziato la necessità di superare una logica esclusivamente autorizzativa, fondata sulla valutazione caso per caso dei singoli impianti, verso un modello programmatorio capace di individuare anticipatamente vocazioni

territoriali, condizioni di compatibilità ambientale e modalità di integrazione paesaggistica (Salazar, J. M. P., 2015)[29].

In questo quadro, la pianificazione energetica assume una natura necessariamente multilivello, coinvolgendo strumenti europei, nazionali, regionali e locali.

Come già illustrato nei capitoli precedenti, il quadro europeo e nazionale ha progressivamente integrato gli obiettivi della transizione energetica con quelli della sostenibilità ambientale e della pianificazione territoriale. In tale prospettiva, gli indirizzi introdotti dal Green Deal europeo, dal pacchetto Fit for 55, dal piano REPowerEU e dalla normativa sulle energie rinnovabili hanno rafforzato il ruolo della programmazione territoriale, della semplificazione amministrativa e della partecipazione locale. A livello nazionale, il PNIEC costituisce il principale riferimento strategico per il raggiungimento degli obiettivi energetici e climatici, la cui attuazione richiede tuttavia un'effettiva traduzione degli indirizzi nazionali negli strumenti di pianificazione e gestione adottati a livello regionale e locale.

1.7.4.1 Pianificazione regionale: dai PER ai PEAR

A livello regionale, gli strumenti principali di programmazione energetica sono rappresentati dai Piani Energetici Regionali (PER) e dai successivi Piani Energetici Ambientali Regionali (PEAR).

I PER, introdotti nel quadro della Legge 10/1991, hanno rappresentato il primo tentativo di attribuire alle Regioni un ruolo attivo nella programmazione energetica, definendo indirizzi per la produzione, distribuzione e uso razionale dell'energia.

Successivamente, l'evoluzione verso i PEAR ha evidenziato la necessità di integrare la dimensione energetica con quella ambientale e territoriale. Tali strumenti hanno infatti ampliato il proprio campo di applicazione includendo:

- sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili;
- riduzione delle emissioni climalteranti;
- incremento dell'efficienza energetica;
- tutela delle risorse naturali;
- integrazione con la pianificazione paesaggistica e territoriale;

[29] Salazar, J. M. P. (2015). Landscape Architecture and Water. *Agriculture and agricultural science procedia*, *4*, 320-326.

- promozione dell'innovazione tecnologica e delle reti intelligenti.

In questa prospettiva, il PEAR rappresenta un tentativo di costruire una governance integrata, nella quale le scelte energetiche non siano considerate esclusivamente come questioni infrastrutturali, ma come elementi capaci di incidere sull'organizzazione spaziale, economica e sociale del territorio.

Tuttavia, l'efficacia di tali strumenti risulta fortemente condizionata dalla capacità amministrativa regionale, dalla disponibilità di dati territoriali aggiornati e dal livello di coordinamento con gli strumenti urbanistici e paesaggistici.

L'analisi comparata dei contesti regionali evidenzia infatti una forte eterogeneità: alcune Regioni hanno sviluppato sistemi avanzati di pianificazione energetica, dotati di obiettivi quantitativi, monitoraggio e strumenti attuativi; altre presentano strumenti meno aggiornati o caratterizzati da una limitata capacità operativa.

Questa disomogeneità contribuisce alla frammentazione del quadro nazionale, determinando differenti condizioni di sviluppo delle FER e differenti livelli di certezza autorizzativa.

1.7.4.2 Rapporto tra pianificazione energetica e tutela del paesaggio

Un elemento centrale dell'integrazione ambiente–energia riguarda il rapporto tra pianificazione energetica e pianificazione paesaggistica. Il D.Lgs. 42/2004 – Codice dei beni culturali e del paesaggio ha rafforzato il ruolo della pianificazione paesaggistica come strumento di tutela e governo delle trasformazioni territoriali, introducendo una visione del paesaggio non più limitata alla conservazione vincolistica, ma orientata alla gestione dinamica delle trasformazioni (Council of Europe, 2004)[30].

In tale prospettiva, lo sviluppo delle FER richiede un approccio capace di superare la contrapposizione tra tutela e innovazione, considerando il paesaggio come un sistema complesso nel quale energia, ambiente, patrimonio culturale e attività economiche risultano interconnessi. La localizzazione degli impianti rinnovabili rappresenta infatti una questione territoriale prima ancora che esclusivamente energetica. La

[30] Council of Europe, 2004. European Landscape Convention, Firenze. ETS No. 176 - Firenze, 20.X.2000. Available online: https://www.coe.int/en/web/conventions/-/council-of-europe-european-landscape-convention-ets-no-176-translations (accessed on 20 February 2024).

concentrazione di grandi impianti fotovoltaici ed eolici in specifici territori ha evidenziato criticità legate a:

- consumo di suolo agricolo;
- frammentazione ecologica;
- alterazione delle percezioni paesaggistiche;
- conflitti con comunità locali;
- sovrapposizione tra differenti livelli di pianificazione.

Da questo punto di vista, strumenti quali l'individuazione delle aree idonee e non idonee previste dal D.Lgs. 199/2021 rappresentano un tentativo di introdurre maggiore selettività territoriale, indirizzando lo sviluppo degli impianti verso contesti maggiormente compatibili.

1.7.4.3 Pianificazione territoriale integrata e valorizzazione delle risorse locali e territorializzazione della transizione energetica

La progressiva evoluzione delle politiche energetiche e territoriali evidenzia il superamento di un modello prevalentemente settoriale, fondato sulla separazione tra pianificazione energetica, governo del territorio, tutela paesaggistica e valorizzazione del patrimonio pubblico. La transizione energetica contemporanea non può infatti essere interpretata esclusivamente come processo tecnologico finalizzato alla sostituzione delle fonti fossili con fonti rinnovabili, ma come un fenomeno di trasformazione territoriale nel quale infrastrutture energetiche, comunità locali, paesaggio e sistemi di governance interagiscono nella produzione di nuovi assetti spaziali (Geels, 2002; Larkin, 2013).

In questa prospettiva, il territorio non rappresenta un semplice supporto fisico per l'installazione di infrastrutture energetiche, ma diviene un elemento attivo nella costruzione della transizione. Tale interpretazione si collega alla teoria della produzione sociale dello spazio proposta da Lefebvre (1974), secondo cui lo spazio è continuamente prodotto attraverso relazioni economiche, sociali, istituzionali e tecnologiche. Applicata al settore energetico, questa prospettiva permette di leggere le CER non soltanto come strumenti di produzione e condivisione dell'energia, ma come dispositivi territoriali capaci di ridefinire il rapporto tra comunità, risorse locali e infrastrutture.

In tale processo assumono particolare rilevanza gli strumenti di pianificazione integrata e di governance interistituzionale orientati al superamento della frammentazione amministrativa. Tra questi, i Programmi Unitari di Valorizzazione Territoriale (PUVaT)

rappresentano un esempio significativo di strumento finalizzato alla cooperazione tra amministrazioni pubbliche e alla valorizzazione coordinata delle risorse territoriali. Introdotti nell'ambito delle politiche di valorizzazione del patrimonio immobiliare pubblico, i PUVaT sono concepiti come strumenti di cooperazione e copianificazione interistituzionale orientati alla promozione di iniziative di sviluppo sostenibile locale. La loro funzione non riguarda esclusivamente la rifunzionalizzazione di immobili pubblici, ma assume una dimensione più ampia di coordinamento territoriale, attraverso l'integrazione tra patrimonio pubblico, rigenerazione urbana, sviluppo economico locale e sostenibilità ambientale (Basti, 2015)[31]. In questa prospettiva, il patrimonio pubblico viene interpretato come una risorsa territoriale da attivare attraverso strategie integrate, capaci di coinvolgere amministrazioni, soggetti economici e comunità locali.

Tale approccio risulta coerente con l'evoluzione del concetto di paesaggio introdotta dalla Convenzione Europea del Paesaggio (Council of Europe, 2000)[32], che ha progressivamente superato una visione esclusivamente estetica e vincolistica del paesaggio, riconoscendolo come componente essenziale della qualità della vita delle popolazioni e come elemento integrante delle politiche di pianificazione territoriale. Il paesaggio contemporaneo viene quindi interpretato come risultato dinamico dell'interazione tra processi naturali, attività umane, infrastrutture e pratiche sociali.

Questa trasformazione concettuale assume particolare rilevanza nel contesto della transizione energetica, poiché la diffusione delle fonti energetiche rinnovabili introduce nuove relazioni tra infrastrutture tecniche e territorio. La localizzazione di impianti fotovoltaici, sistemi di accumulo, reti intelligenti e comunità energetiche genera infatti nuove configurazioni spaziali che richiedono strumenti capaci di integrare esigenze energetiche, qualità paesaggistica e accettabilità sociale.

In questo quadro, anche la funzione delle Soprintendenze per i beni culturali e paesaggistici assume una dimensione più ampia rispetto alla

---

31 A. Basti (2015).Valorizzazione del patrimonio immobiliare e territoriale: riflessioni per un approccio integrato. EWT/Eco Web Town Magazine of Sustainable Design Edizione SCUT. Avainable on-line: http://www.ecowebtown.it/n_12/pdf/12_10_basti_it.pdf (accessed of 20 Febbruary 2024).

32 Council of Europe. (2000). *European Landscape Convention*. Florence: Council of Europe.

sola tutela autorizzativa. La gestione della trasformazione territoriale richiede infatti un progressivo passaggio da una logica esclusivamente conservativa a una prospettiva capace di accompagnare processi di innovazione compatibili con i valori paesaggistici e culturali. Ciò implica l'elaborazione di strumenti di pianificazione e valutazione capaci di integrare tutela, trasformazione e sviluppo sostenibile (Basti, et al., 2023).

Parallelamente, gli strumenti di pianificazione energetica regionale hanno progressivamente ampliato il proprio campo di azione. I Piani Energetici Ambientali Regionali (PEAR) si caratterizzano infatti per un approccio multidimensionale che integra sviluppo delle FER, efficienza energetica, riduzione delle emissioni climalteranti, infrastrutture intelligenti, tutela delle risorse naturali e valorizzazione paesaggistica. In molti casi, tali strumenti introducono principi riconducibili all'economia circolare attraverso la valorizzazione delle biomasse, l'ottimizzazione dei flussi energetici e la riduzione degli sprechi, favorendo una maggiore integrazione tra sistemi energetici e cicli territoriali dei materiali. Le CER rappresentano uno degli strumenti operativi più significativi attraverso cui tali principi possono essere tradotti in pratiche locali, promuovendo modelli di autoconsumo collettivo, partecipazione degli utenti e valorizzazione delle risorse energetiche presenti nei territori.

Tuttavia, l'analisi dei contesti regionali evidenzia una significativa eterogeneità nell'applicazione di tali strumenti. Regioni come Lombardia, Piemonte ed Emilia-Romagna hanno sviluppato sistemi di pianificazione energetica maggiormente strutturati, dotati di strumenti di monitoraggio e dispositivi operativi, mentre altri territori presentano strumenti meno aggiornati o caratterizzati da una limitata capacità attuativa. Questa variabilità riflette differenze nelle capacità amministrative, nelle competenze tecniche disponibili e nel livello di integrazione tra politiche energetiche, ambientali e territoriali.

Negli ultimi anni si osserva inoltre una progressiva trasformazione degli strumenti energetici regionali verso modelli più settoriali, come Piani Energetici Regionali (PER) o strumenti specifici collegati alla qualità dell'aria, alla gestione delle acque, alla tutela della biodiversità e all'adattamento climatico. Sebbene questa specializzazione possa migliorare l'efficienza tecnica degli strumenti, essa rischia di accentuare la frammentazione istituzionale, rendendo più complesso il coordinamento tra strategie energetiche e pianificazione territoriale.

Questa criticità evidenzia la necessità di nuovi modelli di governance capaci di integrare differenti scale decisionali e differenti settori disciplinari. La pianificazione collaborativa proposta da Healey (1997) rappresenta un riferimento teorico utile in questa direzione, poiché interpreta la pianificazione non come semplice regolazione dello spazio, ma come costruzione di capacità collettive attraverso reti di attori pubblici e privati.

Da questa prospettiva, le CER possono essere interpretate come una forma emergente di pianificazione energetica territoriale dal basso, nella quale produzione, distribuzione e consumo energetico vengono ricondotti alla scala locale attraverso processi partecipativi. Esse rappresentano quindi non soltanto un modello tecnologico decentralizzato, ma una nuova forma di organizzazione territoriale nella quale energia, comunità e spazio abitato vengono riconfigurati attraverso pratiche cooperative.

La loro efficacia dipende tuttavia dalla capacità di integrare diversi livelli di conoscenza e pianificazione: disponibilità delle risorse energetiche locali, caratteristiche insediative, infrastrutture esistenti, patrimonio pubblico, vincoli paesaggistici, partecipazione sociale e obiettivi di sviluppo locale. In questo senso, gli strumenti di governance territoriale integrata, come i PUVaT, possono rappresentare un riferimento metodologico per superare una visione esclusivamente energetica delle CER e inserirle all'interno di strategie più ampie di rigenerazione territoriale.

La transizione energetica assume quindi una dimensione spaziale e istituzionale nella quale il territorio diventa un sistema socio-tecnico complesso, composto da infrastrutture, comunità, istituzioni e risorse locali. Tale prospettiva permette di interpretare l'evoluzione delle CER non solo come innovazione energetica, ma come parte di un più ampio processo di trasformazione del rapporto tra energia, territorio e governance.

1.7.4.4 Criticità della pianificazione attuale

Nonostante l'evoluzione degli strumenti programmatori, permane una serie di criticità strutturali. La prima riguarda la frammentazione tra strumenti diversi:

- piani energetici regionali;
- piani paesaggistici;
- strumenti urbanistici comunali;
- piani di gestione ambientale;

- strategie climatiche.

Tali strumenti spesso vengono elaborati secondo procedure autonome e con tempistiche non coordinate, determinando difficoltà nella costruzione di strategie territoriali coerenti.

Una seconda criticità riguarda la limitata capacità attuativa dei piani energetici. In molti casi gli strumenti regionali definiscono obiettivi generali, ma non dispongono di adeguati meccanismi operativi, sistemi di monitoraggio o strumenti finanziari capaci di tradurre le strategie in interventi concreti.

Infine, permane una distanza tra pianificazione e partecipazione pubblica. La localizzazione degli impianti FER continua frequentemente a essere percepita come un processo prevalentemente tecnico-amministrativo, con un coinvolgimento limitato delle comunità interessate.

1.7.4.5 Verso una pianificazione integrata energia–ambiente–territorio

Nel complesso, la pianificazione territoriale ed energetica rappresenta oggi uno dei principali ambiti di trasformazione della governance della transizione energetica. Il superamento dell'attuale frammentazione richiede un modello capace di integrare:

- obiettivi energetici nazionali;
- caratteristiche territoriali locali;
- tutela ambientale e paesaggistica;
- strumenti digitali di supporto decisionale;
- partecipazione degli *stakeholder*.

In questa prospettiva, la pianificazione delle FER non può essere considerata esclusivamente come individuazione di siti idonei alla produzione energetica, ma deve configurarsi come processo di costruzione territoriale condiviso. Le CER costituiscono un esempio concreto di tale evoluzione, poiché collegano produzione energetica, innovazione sociale, partecipazione locale e valorizzazione delle risorse territoriali. La sfida futura consiste quindi nel passaggio da una pianificazione prevalentemente autorizzativa a una pianificazione integrata e adattiva, nella quale energia, ambiente e territorio siano considerati componenti di un unico sistema di sviluppo sostenibile.

1.7.5 CRITICITÀ DELL'INTEGRAZIONE AMBIENTE–ENERGIA

Nonostante il progressivo rafforzamento del quadro normativo europeo e nazionale, l'integrazione tra politiche energetiche, ambientali e territoriali continua a presentare rilevanti criticità

strutturali. La transizione energetica richiede infatti un coordinamento crescente tra obiettivi di decarbonizzazione, tutela degli ecosistemi, valorizzazione del paesaggio e sviluppo socio-economico dei territori; tuttavia, il sistema decisionale attuale rimane caratterizzato da una significativa separazione tra strumenti, competenze e livelli amministrativi.

La principale criticità riguarda la persistente distinzione tra pianificazione energetica e valutazione ambientale. Sebbene strumenti quali VAS, VIA e VIncA siano stati introdotti con l'obiettivo di integrare la dimensione ambientale nei processi decisionali, nella pratica essi intervengono spesso in fasi successive rispetto alla definizione delle strategie energetiche e localizzative.

Questa sequenza procedurale determina una prevalenza di una logica valutativa rispetto a una logica realmente programmatoria: l'ambiente viene frequentemente considerato come elemento di verifica della compatibilità di interventi già definiti, anziché come componente strutturale nella fase iniziale di pianificazione. Tale criticità assume particolare rilevanza nel settore delle FER, dove la crescente diffusione di impianti eolici e fotovoltaici rende necessario un approccio territoriale preventivo capace di individuare opportunità, limiti e condizioni di compatibilità prima della fase autorizzativa.

1.7.5.1 Frammentazione istituzionale e sovrapposizione delle competenze

Un secondo elemento di criticità è rappresentato dalla complessità della governance multilivello.

La distribuzione delle competenze tra Stato, Regioni ed enti locali, pur consentendo un adattamento delle politiche alle specificità territoriali, ha prodotto nel tempo una pluralità di soggetti coinvolti nei processi decisionali: amministrazioni centrali competenti in materia energetica e ambientale; Regioni responsabili della programmazione territoriale ed energetica; Province e Città metropolitane; Comuni titolari della pianificazione urbanistica; autorità competenti per le valutazioni ambientali; enti preposti alla tutela paesaggistica e culturale. Questa molteplicità di attori genera frequentemente sovrapposizioni operative, differenti interpretazioni normative e difficoltà nel coordinamento delle procedure. La conseguenza è un aumento dell'incertezza autorizzativa, con effetti sia sulla capacità degli operatori di programmare gli investimenti sia sulla possibilità dei territori di governare efficacemente le trasformazioni.

Il problema non risiede quindi nella presenza di diversi livelli istituzionali, che rappresentano un elemento necessario in un sistema complesso, ma nella mancanza di strumenti efficaci di coordinamento e interoperabilità tra tali livelli.

1.7.5.2 Disallineamento tra strumenti di pianificazione

Un'ulteriore criticità deriva dal mancato allineamento temporale e metodologico tra gli strumenti di pianificazione.

Energia, ambiente, paesaggio e territorio vengono frequentemente disciplinati attraverso strumenti distinti: piani energetici regionali; piani paesaggistici; strumenti urbanistici comunali; piani di tutela ambientale; strategie climatiche; e programmi di sviluppo territoriale. Tali strumenti, pur affrontando tematiche fortemente interconnesse, vengono spesso elaborati secondo procedure autonome e con orizzonti temporali differenti.

Questa frammentazione può generare situazioni nelle quali gli obiettivi energetici risultano formalmente compatibili con la pianificazione nazionale, ma difficilmente traducibili a scala locale a causa di vincoli territoriali, paesaggistici o ambientali non adeguatamente considerati nella fase strategica.

Ne deriva una tensione tra la necessità di accelerare lo sviluppo delle FER e quella di garantire una corretta integrazione territoriale degli interventi.

1.7.5.3 Conflitto tra accelerazione della transizione e tutela territoriale

La diffusione delle FER ha reso evidente un conflitto crescente tra due esigenze entrambe strategiche: accelerare la decarbonizzazione attraverso un rapido incremento della produzione rinnovabile; e preservare valori ambientali, paesaggistici e identitari dei territori.

Questo conflitto non deve essere interpretato come una contrapposizione tra sviluppo energetico e tutela ambientale, ma come conseguenza della difficoltà di costruire criteri condivisi per orientare le trasformazioni.

L'esperienza italiana mostra infatti come l'assenza di una pianificazione territoriale preventiva possa determinare fenomeni di concentrazione degli interventi in specifiche aree caratterizzate da elevata disponibilità di risorsa, ma non necessariamente adeguate sotto il profilo infrastrutturale, paesaggistico o sociale.

In particolare, la localizzazione degli impianti FER può generare: pressione sulle aree agricole; frammentazione degli habitat; trasformazione dei paesaggi rurali; conflitti con le comunità locali;

opposizione sociale agli interventi. Tali fenomeni evidenziano la necessità di superare un modello basato esclusivamente sull'autorizzazione dei singoli impianti, introducendo criteri territoriali capaci di guidare lo sviluppo verso soluzioni maggiormente condivise.

1.7.5.4 Limiti della partecipazione e dell'accettabilità sociale

Un ulteriore elemento riguarda il ruolo ancora limitato dei processi partecipativi. La realizzazione delle infrastrutture energetiche comporta trasformazioni territoriali che incidono direttamente sulle comunità locali. Tuttavia, il coinvolgimento degli abitanti avviene frequentemente nella fase autorizzativa, quando le principali decisioni localizzative risultano già definite. Questa modalità contribuisce alla formazione di conflitti territoriali e alla percezione degli impianti FER come interventi esterni imposti al territorio. In tale prospettiva, le CER introducono un paradigma differente, basato sulla partecipazione attiva dei cittadini e sulla condivisione dei benefici economici ed energetici prodotti localmente. Le CER possono quindi rappresentare un modello alternativo di governance, capace di trasformare la transizione energetica da processo prevalentemente infrastrutturale a processo territoriale partecipato.

1.7.5.5 Verso un nuovo modello di governance integrata

Le criticità evidenziate mostrano come il principale limite dell'attuale sistema non sia rappresentato dalla mancanza di strumenti normativi, ma dalla difficoltà di coordinarli efficacemente all'interno di una visione comune. La sfida futura consiste quindi nel passaggio: da una governance settoriale a una governance integrata; da una logica autorizzativa a una logica programmatoria; e da una valutazione successiva degli impatti a una progettazione preventiva della compatibilità territoriale. In tale prospettiva, assumono particolare rilevanza tre direttrici di innovazione:

1. integrazione tra pianificazione energetica e territoriale, attraverso strumenti multilivello coerenti e aggiornati;
2. digitalizzazione dei processi decisionali, mediante sistemi informativi territoriali interoperabili e strumenti di supporto alla pianificazione;
3. rafforzamento della partecipazione locale, attraverso modelli cooperativi quali le CER.

L'integrazione ambiente–energia rappresenta pertanto una delle principali sfide della transizione energetica italiana: non si tratta solamente di autorizzare nuovi impianti, ma di costruire un sistema

territoriale capace di conciliare produzione energetica, tutela ambientale e sviluppo sostenibile.

1.7.6 IL RUOLO DEL QUADRO EUROPEO

Il processo di integrazione tra politiche energetiche, ambientali e territoriali trova il proprio riferimento principale nel quadro normativo europeo, che negli ultimi decenni ha progressivamente ridefinito il paradigma della transizione energetica, spostando l'attenzione dalla sola promozione delle fonti rinnovabili verso un modello sistemico fondato sulla decarbonizzazione, sull'efficienza delle risorse, sulla tutela degli ecosistemi e sulla partecipazione dei territori. L'UE ha svolto un ruolo determinante nella costruzione dell'attuale governance energetica attraverso un progressivo rafforzamento degli obiettivi climatici e degli strumenti normativi destinati agli Stati membri. La prima fase di sviluppo delle politiche europee sulle energie rinnovabili è stata caratterizzata prevalentemente da un approccio settoriale, finalizzato all'incremento della quota di energia prodotta da fonti rinnovabili attraverso obiettivi vincolanti nazionali.

In tale prospettiva si colloca la Direttiva 2001/77/CE, relativa alla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità, che ha rappresentato il primo intervento organico dell'Unione Europea volto a definire un quadro comune per lo sviluppo delle FER. Tale direttiva ha introdotto un primo sistema coordinato di obiettivi indicativi e ha posto le basi per l'armonizzazione delle politiche nazionali di incentivazione, successivamente recepita nell'ordinamento italiano attraverso il D.Lgs. 387/2003.

Un ulteriore passaggio fondamentale è rappresentato dalla Direttiva 2009/28/CE (RED II), che ha introdotto un quadro più strutturato per il raggiungimento degli obiettivi europei al 2020, rafforzando il ruolo della pianificazione nazionale e promuovendo una maggiore integrazione tra produzione energetica, efficienza e riduzione delle emissioni climalteranti. La direttiva ha inoltre riconosciuto la necessità di superare una visione esclusivamente impiantistica della transizione energetica, introducendo il principio della partecipazione dei cittadini e delle comunità locali attraverso forme di produzione distribuita e autoconsumo.

Questa evoluzione trova piena espressione nella Direttiva (UE) 2018/2001 (RED II), recepita in Italia attraverso il D.Lgs. 199/2021, che

introduce un cambio di paradigma nel rapporto tra energia e territorio. La normativa europea riconosce infatti il ruolo degli autoconsumatori di energia rinnovabile e delle CER come soggetti attivi del sistema energetico, promuovendo un modello decentralizzato e partecipativo della produzione energetica. Tale impostazione rappresenta un elemento innovativo poiché attribuisce al territorio non solo una funzione localizzativa, ma anche un ruolo attivo nella governance della transizione.

Parallelamente, il Green Deal europeo ha ulteriormente ampliato la prospettiva della politica energetica comunitaria, collocando la transizione energetica all'interno di una strategia complessiva di trasformazione economica e ambientale. L'obiettivo della neutralità climatica al 2050, sancito dal quadro europeo sul clima, ha determinato una progressiva integrazione tra politiche energetiche, tutela della biodiversità, economia circolare, uso sostenibile del suolo e adattamento ai cambiamenti climatici.

In questo quadro si inseriscono gli strumenti normativi e strategici successivi, tra cui il pacchetto "Fit for 55" e il piano REPowerEU, che hanno rafforzato ulteriormente gli obiettivi di diffusione delle fonti rinnovabili e di riduzione della dipendenza energetica dai combustibili fossili. La revisione della normativa europea sulle FER attraverso la Direttiva (UE) 2023/2413 (RED III) introduce target più ambiziosi per la quota di energia rinnovabile e mira alla riduzione dei tempi autorizzativi attraverso la definizione di aree accelerate per lo sviluppo delle FER (renewables acceleration areas).

L'approccio europeo più recente evidenzia quindi un progressivo passaggio da una logica prevalentemente autorizzativa a una logica programmatoria, nella quale la localizzazione degli impianti deve essere anticipata attraverso strumenti di pianificazione capaci di integrare caratteristiche territoriali, sensibilità ambientali e potenziale energetico.

Un ruolo significativo è inoltre svolto dalla Tassonomia europea delle attività sostenibili, introdotta dal Regolamento (UE) 2020/852, che definisce criteri comuni per identificare gli investimenti compatibili con gli obiettivi ambientali dell'Unione. Tale strumento contribuisce a collegare la politica energetica con gli aspetti finanziari, orientando gli investimenti pubblici e privati verso infrastrutture coerenti con il principio di sostenibilità e con il rispetto del principio "Do No Significant Harm" (DNSH).

Tuttavia, anche il quadro europeo evidenzia alcune criticità. La definizione di obiettivi comuni non elimina automaticamente le differenze nella capacità amministrativa degli Stati membri né le specificità territoriali dei diversi contesti nazionali. La necessità di conciliare accelerazione della transizione energetica e tutela ambientale continua infatti a generare tensioni tra esigenze sovranazionali di sviluppo delle FER e competenze locali nella gestione del territorio.

Nel caso italiano, tali criticità risultano amplificate dalla struttura istituzionale multilivello e dalla presenza di numerosi strumenti regionali e locali di pianificazione. Sebbene il quadro europeo abbia fornito una direzione strategica chiara, la traduzione degli obiettivi comunitari in politiche territoriali efficaci richiede un maggiore coordinamento tra Stato, Regioni ed enti locali, nonché una maggiore integrazione tra strumenti energetici, ambientali e urbanistici.

In questa prospettiva, il quadro europeo non rappresenta solamente un insieme di obblighi normativi, ma costituisce un riferimento metodologico per la costruzione di nuovi modelli di governance territoriale. La promozione delle FER, delle CER e dei sistemi energetici distribuiti assume infatti una dimensione spaziale e sociale, nella quale il territorio diventa parte integrante del processo decisionale.

Pertanto, la principale sfida futura consiste nel trasformare gli indirizzi europei in strumenti operativi capaci di integrare pianificazione energetica, valutazione ambientale e sviluppo territoriale, superando la frammentazione normativa e favorendo modelli partecipativi, digitalizzati e adattabili alle diverse condizioni locali. In tale prospettiva, l'evoluzione del quadro europeo costituisce il presupposto per una governance energetica maggiormente integrata, nella quale la transizione verso le energie rinnovabili sia accompagnata da una gestione equilibrata degli aspetti ambientali, paesaggistici e socio-economici.

1.7.7 SEMPLIFICAZIONE, PNRR E DIGITALIZZAZIONE

L'accelerazione della transizione energetica e il conseguimento degli obiettivi europei di decarbonizzazione hanno evidenziato la necessità di intervenire non soltanto sul piano degli incentivi economici, ma anche sull'efficienza del sistema amministrativo. La complessità e la durata dei procedimenti autorizzativi rappresentano infatti uno dei principali fattori che rallentano la realizzazione degli impianti

alimentati da fonti energetiche rinnovabili (FER), determinando un divario tra gli obiettivi programmati e l'effettiva capacità di installazione. In tale contesto, la semplificazione amministrativa e la digitalizzazione delle procedure assumono un ruolo strategico, configurandosi come strumenti essenziali per rendere maggiormente efficiente la governance della transizione energetica.

A partire dal 2020, il legislatore nazionale ha avviato un ampio processo di revisione normativa volto a ridurre gli oneri procedurali e ad accelerare i processi autorizzativi. Il primo intervento organico è rappresentato dal D.L. 16 luglio 2020, n. 76 (Decreto Semplificazioni), convertito nella Legge 11 settembre 2020, n. 120, che introduce misure finalizzate alla riduzione dei tempi amministrativi, al rafforzamento del principio del silenzio-assenso e alla digitalizzazione dei procedimenti della Pubblica Amministrazione. Nel settore energetico il decreto modifica le procedure di verifica di assoggettabilità a Valutazione di Impatto Ambientale (VIA), istituisce la Commissione Tecnica PNIEC-PNRR per l'esame dei progetti di competenza statale e introduce termini procedimentali più stringenti per le amministrazioni coinvolte. L'azione di semplificazione è stata ulteriormente rafforzata dal D.L. 31 maggio 2021, n. 77 (Governance del PNRR e Semplificazioni), convertito nella Legge 29 luglio 2021, n. 108, che costituisce uno dei principali strumenti normativi di attuazione del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR). Il decreto interviene in maniera significativa sulle procedure autorizzative relative agli impianti FER, ampliando i casi assoggettati a procedimenti semplificati, elevando le soglie dimensionali per la verifica di assoggettabilità a VIA e introducendo specifiche misure per favorire la diffusione degli impianti agrivoltaici avanzati. Contestualmente vengono rafforzati i poteri sostitutivi dello Stato nei casi di inerzia amministrativa, con l'obiettivo di garantire il rispetto delle tempistiche previste dagli investimenti finanziati attraverso il programma europeo NextGenerationEU.

Un ulteriore passaggio evolutivo è rappresentato dal D.L. 24 febbraio 2023, n. 13, convertito nella Legge 21 aprile 2023, n. 41, che introduce disposizioni urgenti per l'attuazione del PNRR e promuove un maggiore coordinamento tra pianificazione energetica, territoriale e agricola. Il decreto consolida il principio secondo cui la transizione energetica non può essere perseguita esclusivamente mediante la semplificazione autorizzativa, ma richiede una progressiva integrazione tra politiche settoriali, valorizzando strumenti di pianificazione coordinata e

favorendo la localizzazione degli impianti nelle aree maggiormente compatibili sotto il profilo ambientale e paesaggistico.

Parallelamente agli interventi normativi, il PNRR attribuisce un ruolo centrale alla trasformazione digitale della Pubblica Amministrazione. Nell'ambito della Missione 1 – Digitalizzazione, innovazione, competitività e cultura, e in particolare della Riforma 1.9, è prevista la digitalizzazione di oltre duecento procedimenti amministrativi, con particolare attenzione ai settori ambientale, energetico ed edilizio. L'obiettivo consiste nel realizzare un ecosistema amministrativo interoperabile, fondato sulla condivisione dei dati tra amministrazioni, sulla gestione telematica delle autorizzazioni e sulla progressiva eliminazione della documentazione cartacea.

La digitalizzazione delle procedure autorizzative costituisce un elemento di particolare rilevanza anche per gli strumenti di valutazione ambientale. La progressiva informatizzazione dei procedimenti di VAS, VIA, AIA e Valutazione di Incidenza Ambientale (VIncA) consente infatti di migliorare la trasparenza amministrativa, ridurre i tempi di istruttoria, facilitare il coordinamento tra le autorità competenti e garantire una maggiore tracciabilità dell'intero iter decisionale. L'utilizzo di piattaforme digitali condivise favorisce inoltre la partecipazione degli *stakeholder* e la consultazione pubblica, rafforzando i principi di trasparenza e *accountability* che caratterizzano la governance ambientale europea.

Tuttavia, la semplificazione procedurale non coincide necessariamente con una riduzione delle garanzie ambientali. La sfida consiste nel conciliare l'esigenza di accelerare la realizzazione degli impianti con il mantenimento di elevati livelli di tutela del paesaggio, della biodiversità e del patrimonio culturale. In tale prospettiva, la digitalizzazione non deve essere interpretata come un mero strumento di velocizzazione amministrativa, ma come un fattore abilitante di una governance maggiormente integrata, capace di mettere in relazione pianificazione energetica, valutazioni ambientali e gestione del territorio attraverso sistemi informativi interoperabili e basi dati condivise.

Questa evoluzione prepara il terreno alla più recente riforma organica del settore rappresentata dal Testo Unico delle Rinnovabili (TUR), che si propone di razionalizzare il quadro normativo esistente, coordinare le numerose disposizioni stratificatesi nel tempo e superare molte delle criticità derivanti dalla frammentazione legislativa analizzata nei paragrafi precedenti. Il TUR costituisce pertanto il principale tentativo

di trasformare la semplificazione amministrativa da insieme di interventi episodici a modello stabile di governance della transizione energetica, tema che sarà approfondito nel successivo § 1.7.8.

1.7.8 IL TESTO UNICO DELLE RINNOVABILI (TUR)

Il progressivo accumularsi di disposizioni normative in materia di fonti energetiche rinnovabili (FER), unitamente alla molteplicità dei procedimenti autorizzativi e alla frammentazione delle competenze tra amministrazioni statali, regionali e locali, ha determinato negli anni un quadro regolatorio caratterizzato da elevata complessità e scarsa omogeneità applicativa. Tale situazione ha rappresentato uno dei principali ostacoli allo sviluppo degli impianti da fonti rinnovabili, incidendo negativamente sia sulla certezza del diritto sia sulla capacità del sistema amministrativo di rispondere agli obiettivi di decarbonizzazione definiti dall'Unione europea.

Per rispondere a tali criticità, il legislatore ha avviato un processo di riordino organico culminato con l'adozione del Testo Unico delle Rinnovabili (TUR), approvato con il Decreto Legislativo 25 novembre 2024, n. 190, in attuazione della delega prevista dall'articolo 26 della Legge 5 agosto 2022, n. 118 (Legge annuale per il mercato e la concorrenza). Il provvedimento costituisce il primo tentativo sistematico di razionalizzare la disciplina nazionale in materia di autorizzazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili, superando la stratificazione normativa derivante da oltre vent'anni di interventi legislativi.

Successivamente ad un'attento studio del Testo Unico delle Rinnovabili (TUR) (si veda Figura A.1 29 in Appendice 1) l'obiettivo principale del TUR consiste nella costruzione di un sistema autorizzativo unitario, fondato sui principi di semplificazione amministrativa, certezza procedurale, proporzionalità e coordinamento tra i diversi livelli di governo del territorio. Il decreto non introduce soltanto nuove disposizioni, ma procede soprattutto al riordino e all'integrazione della normativa esistente, armonizzando le procedure autorizzative con gli obiettivi della Direttiva (UE) 2023/2413 (RED III) e con le strategie europee di accelerazione della transizione energetica.

Uno degli elementi di maggiore innovazione riguarda la razionalizzazione dei regimi amministrativi. Il TUR distingue le procedure autorizzative in funzione della complessità dell'intervento e

del relativo impatto territoriale, individuando tre principali livelli procedimentali:

- Attività libera, applicabile agli interventi di limitata rilevanza e privi di impatti significativi;
- Procedura Abilitativa Semplificata (PAS), destinata agli impianti di media complessità e caratterizzata da un iter amministrativo semplificato;
- Autorizzazione Unica (AU), riservata agli impianti di maggiore dimensione o localizzati in contesti territoriali particolarmente sensibili.

Questa articolazione sostituisce il precedente quadro frammentato, caratterizzato dalla coesistenza di numerosi procedimenti speciali introdotti nel tempo da decreti emergenziali e disposizioni settoriali, restituendo maggiore chiarezza agli operatori e alle amministrazioni coinvolte.

Il decreto attribuisce inoltre un ruolo centrale al tema delle aree idonee, già introdotto dal D.Lgs. 199/2021, rafforzando il principio secondo cui la localizzazione preventiva degli impianti rappresenta uno strumento essenziale per ridurre il conflitto tra sviluppo delle FER e tutela del paesaggio. L'individuazione delle aree idonee viene concepita come elemento di pianificazione preventiva capace di ridurre l'incertezza autorizzativa, favorendo la concentrazione degli impianti nei contesti maggiormente compatibili sotto il profilo ambientale, paesaggistico e infrastrutturale.

Parallelamente, il TUR rafforza il coordinamento tra le diverse amministrazioni coinvolte nei procedimenti autorizzativi, promuovendo una maggiore integrazione tra autorizzazione energetica, valutazioni ambientali e pianificazione territoriale. In tale prospettiva, il decreto consolida il ricorso alla Conferenza dei Servizi quale sede privilegiata di coordinamento istituzionale, riducendo il rischio di duplicazioni istruttorie e di conflitti tra enti competenti.

Particolare rilievo assume anche la progressiva digitalizzazione dei procedimenti amministrativi. Il TUR promuove infatti l'utilizzo di piattaforme digitali interoperabili per la presentazione delle istanze, la gestione documentale e lo scambio delle informazioni tra le amministrazioni competenti. Tale impostazione si inserisce nel più ampio processo di digitalizzazione della Pubblica Amministrazione previsto dal PNRR, contribuendo alla riduzione dei tempi procedurali e al miglioramento della trasparenza amministrativa.

Nonostante l'importante sforzo di razionalizzazione, il Testo Unico non elimina completamente le criticità strutturali che caratterizzano il sistema italiano. Permangono infatti rilevanti margini di discrezionalità regionale nell'individuazione delle aree idonee, nella disciplina urbanistica e nella pianificazione paesaggistica, con il rischio di mantenere significative differenze territoriali nei procedimenti autorizzativi. La natura concorrente della materia energetica, prevista dall'articolo 117 della Costituzione, continua infatti a rendere necessario un delicato equilibrio tra uniformità nazionale e autonomia regionale.

Ulteriori elementi di complessità derivano dal rapporto tra il TUR e gli strumenti di tutela ambientale e paesaggistica. Sebbene il decreto persegua una maggiore integrazione tra autorizzazioni energetiche e valutazioni ambientali, permane la necessità di coordinare efficacemente il nuovo sistema con la disciplina della VIA, della VAS, della VIncA, del Codice dei beni culturali e del paesaggio e con la pianificazione territoriale regionale. La reale efficacia del TUR dipenderà pertanto non solo dalla semplificazione procedurale, ma anche dalla capacità delle amministrazioni di sviluppare modelli di governance realmente integrati.

In questa prospettiva, il Testo Unico rappresenta un passaggio fondamentale nell'evoluzione della disciplina italiana delle fonti rinnovabili. Più che una semplice operazione di riordino normativo, esso costituisce il tentativo di trasformare il sistema autorizzativo da modello prevalentemente reattivo a modello programmatorio, nel quale pianificazione territoriale, tutela ambientale e sviluppo energetico siano concepiti come componenti di un'unica strategia di governo del territorio.

Tuttavia, come sarà evidenziato nel paragrafo successivo, il raggiungimento di una reale integrazione tra ambiente ed energia richiede un cambiamento che va oltre la semplificazione amministrativa. L'evoluzione del quadro europeo e nazionale mostra infatti come la sfida non consista esclusivamente nel ridurre i tempi autorizzativi, ma soprattutto nel costruire strumenti di pianificazione capaci di integrare in maniera sistemica gli obiettivi energetici, ambientali, paesaggistici e socio-economici. In tale prospettiva si collocano i più recenti tentativi di integrazione sviluppati sia dall'Unione europea sia dall'ordinamento italiano, oggetto del successivo § 1.7.9.

1.7.9 TENTATIVI DI INTEGRAZIONE: UNIONE EUROPEA E ITALIA

L'evoluzione del quadro normativo europeo e nazionale evidenzia un progressivo passaggio da una concezione settoriale delle politiche energetiche e ambientali verso un approccio maggiormente integrato, nel quale la produzione di energia da fonti rinnovabili, la tutela degli ecosistemi, la pianificazione territoriale e lo sviluppo socio-economico vengono considerati componenti di un unico sistema di governance. Sebbene tale percorso sia ancora incompleto, negli ultimi anni sono stati introdotti numerosi strumenti normativi e programmatori finalizzati a superare la tradizionale separazione tra ambiente ed energia, riconoscendo la necessità di affrontare la transizione ecologica attraverso politiche coordinate e multilivello.

A livello europeo, un punto di svolta è rappresentato dall'European Green Deal (2019), che ridefinisce la strategia di sviluppo dell'Unione ponendo la neutralità climatica al 2050 quale obiettivo trasversale delle politiche economiche, ambientali e industriali. Diversamente dalle precedenti strategie energetiche, il Green Deal non considera le fonti rinnovabili come un settore autonomo, ma le inserisce all'interno di una più ampia trasformazione sistemica che coinvolge l'economia circolare, la tutela della biodiversità, la mobilità sostenibile, la digitalizzazione e l'innovazione tecnologica.

Su questa impostazione si innestano i successivi pacchetti normativi europei. Il Fit for 55, presentato nel 2021, introduce un insieme coordinato di misure legislative finalizzate alla riduzione delle emissioni di gas a effetto serra del 55% entro il 2030, rafforzando il ruolo delle energie rinnovabili, dell'efficienza energetica e della pianificazione integrata. Parallelamente, il piano REPowerEU, elaborato nel 2022 in risposta alla crisi energetica internazionale, accelera ulteriormente il processo di diffusione delle FER, promuovendo procedure autorizzative più rapide, una maggiore autonomia energetica europea e una più stretta integrazione tra sicurezza energetica e sostenibilità ambientale.

Un ulteriore elemento di innovazione è rappresentato dalla progressiva evoluzione della Direttiva sulle Energie Rinnovabili, culminata nella Direttiva (UE) 2023/2413 (RED III). Oltre ad incrementare gli obiettivi vincolanti di produzione da fonti rinnovabili, la direttiva introduce il principio delle Renewables Acceleration Areas, aree individuate preventivamente dagli Stati membri nelle quali concentrare lo sviluppo degli impianti attraverso procedure autorizzative semplificate e tempi

certi. Tale approccio rappresenta un significativo cambiamento di paradigma: la tutela ambientale non viene più considerata un elemento successivo al processo autorizzativo, ma una componente preventiva della pianificazione territoriale.

L'Unione europea promuove inoltre un'integrazione sempre più stretta tra politiche energetiche e criteri di sostenibilità attraverso strumenti quali la Tassonomia europea delle attività sostenibili, il Regolamento sulla governance dell'Unione dell'energia e il Regolamento sul ripristino della natura (Nature Restoration Law), delineando un quadro nel quale gli investimenti energetici vengono progressivamente valutati anche sulla base delle loro prestazioni ambientali, climatiche e sociali.

Nel contesto italiano, il principale tentativo di recepire questa impostazione integrata è rappresentato dal PNIEC, che costituisce il documento strategico di riferimento per il conseguimento degli obiettivi europei al 2030. Il PNIEC integra, almeno sul piano programmatorio, politiche energetiche, climatiche, industriali e infrastrutturali, definendo obiettivi quantitativi per la diffusione delle fonti rinnovabili, l'efficienza energetica, la riduzione delle emissioni e la sicurezza del sistema energetico nazionale.

Accanto al PNIEC, il PNRR rappresenta uno dei principali strumenti di attuazione della transizione ecologica, destinando ingenti risorse finanziarie alla realizzazione di impianti da fonti rinnovabili, allo sviluppo delle reti intelligenti, ai sistemi di accumulo, alle CER e alla digitalizzazione delle procedure amministrative. La logica del PNRR supera l'approccio esclusivamente settoriale, promuovendo investimenti che integrano innovazione tecnologica, sostenibilità ambientale e sviluppo territoriale.

Anche a livello regionale emergono numerosi tentativi di costruire strumenti di pianificazione maggiormente integrati. L'evoluzione dei Piani Energetici Ambientali Regionali (PEAR), successivamente confluiti in differenti modelli regionali di pianificazione energetica, testimonia il progressivo riconoscimento della necessità di coordinare produzione energetica, tutela paesaggistica, gestione delle risorse naturali e sviluppo locale. Tuttavia, come evidenziato nei paragrafi precedenti, tale evoluzione si presenta ancora fortemente disomogenea, con significative differenze tra le diverse regioni sia sotto il profilo normativo sia sotto quello amministrativo.

Tra gli strumenti che meglio interpretano questa prospettiva integrata assumono particolare rilievo le CER. Esse rappresentano infatti un modello nel quale produzione energetica, partecipazione sociale, sviluppo economico locale e valorizzazione delle risorse territoriali convergono all'interno di un'unica configurazione organizzativa. Diversamente dagli impianti tradizionali, le CER introducono una dimensione territoriale della transizione energetica, favorendo l'autoconsumo collettivo, la riduzione delle perdite di rete, la distribuzione locale dei benefici economici e il coinvolgimento diretto delle amministrazioni pubbliche, delle imprese e dei cittadini.

Permangono tuttavia numerose criticità che limitano la piena integrazione tra ambiente ed energia. La frammentazione delle competenze amministrative, la disomogeneità delle discipline regionali, la pluralità degli strumenti pianificatori e il diverso livello di aggiornamento dei piani territoriali continuano a generare incertezza procedurale e rallentamenti autorizzativi. A ciò si aggiunge una limitata interoperabilità tra i sistemi informativi utilizzati dalle diverse amministrazioni, che rende ancora complesso il coordinamento tra pianificazione energetica, valutazioni ambientali e gestione del territorio.

La sfida futura non consiste pertanto esclusivamente nel proseguire il processo di semplificazione normativa, ma nel costruire un modello di governance integrata, capace di superare la tradizionale separazione tra pianificazione energetica, tutela ambientale e sviluppo territoriale. In tale prospettiva, la digitalizzazione dei processi decisionali, l'interoperabilità delle banche dati territoriali, la partecipazione degli *stakeholder* e l'utilizzo di strumenti avanzati di supporto alle decisioni rappresentano elementi fondamentali per garantire una transizione energetica realmente sostenibile.

È proprio in questa direzione che si sviluppa la riflessione della Parte III della presente ricerca. Se la Parte II ha analizzato l'evoluzione del quadro normativo e i tentativi di integrazione tra ambiente ed energia, la successiva sezione approfondisce il contributo delle tecnologie digitali e dei processi partecipativi alla costruzione di nuovi modelli di pianificazione territoriale. L'attenzione si sposta quindi dagli strumenti normativi agli strumenti operativi, analizzando come BIM, GIS, *Digital Twin*, *data-driven planning* e *Living Lab* possano supportare una governance più integrata delle CER e, più in generale, della transizione ecologica dei territori.

1.8 STRUMENTI DIGITALI PER LA PIANIFICAZIONE INTEGRATA

La crescente complessità della pianificazione energetica e territoriale richiede strumenti in grado di integrare informazioni eterogenee, supportare processi decisionali multilivello e migliorare il coordinamento tra i diversi attori coinvolti. In questo contesto, la digitalizzazione rappresenta uno dei principali fattori abilitanti della transizione energetica, non solo in termini di automazione dei procedimenti amministrativi, ma soprattutto come elemento di integrazione tra dati ambientali, territoriali, energetici e socio-economici.

L'evoluzione delle CER e dei nuovi modelli di produzione distribuita evidenzia infatti la necessità di superare approcci pianificatori tradizionali, basati su strumenti settoriali e scarsamente interoperabili. La gestione di configurazioni energetiche distribuite implica la capacità di analizzare simultaneamente variabili spaziali, caratteristiche edilizie, disponibilità delle risorse rinnovabili, reti infrastrutturali, consumi energetici e vincoli ambientali. Ne deriva l'esigenza di piattaforme digitali in grado di supportare una pianificazione integrata e dinamica.

Negli ultimi anni si è assistito ad una progressiva convergenza tra tecnologie appartenenti a domini differenti. I sistemi GIS (*Geographic Information Systems*) consentono la gestione delle informazioni territoriali georeferenziate; il BIM (*Building Information Modelling*) permette la rappresentazione digitale degli edifici e delle loro prestazioni; i *Digital Twin* introducono modelli dinamici capaci di simulare il comportamento del territorio in tempo reale; gli approcci data-driven utilizzano grandi quantità di dati provenienti da sensori, smart meter, immagini satellitari e banche dati pubbliche per supportare analisi predittive e scenari decisionali (Barresi, 2023).

Questi strumenti assumono particolare rilevanza nella pianificazione delle CER, dove la definizione delle configurazioni energetiche richiede l'integrazione di informazioni relative agli edifici, alla localizzazione degli impianti, ai profili di consumo, alle caratteristiche della rete elettrica e alle condizioni ambientali. La disponibilità di basi dati interoperabili consente inoltre di valutare preventivamente la sostenibilità degli interventi, ridurre le incertezze autorizzative e favorire una maggiore trasparenza nei processi decisionali.

L'impiego delle tecnologie digitali si inserisce pienamente nel processo di trasformazione promosso dall'Unione Europea attraverso il Green Deal, il programma Digital Europe e il Data Governance Act, nonché dalle strategie nazionali di digitalizzazione previste dal PNRR. In tale prospettiva, la digitalizzazione non costituisce esclusivamente uno strumento tecnologico, ma rappresenta un elemento strategico della governance territoriale, capace di favorire l'integrazione tra pianificazione energetica, tutela ambientale e partecipazione degli *stakeholder*.

I paragrafi successivi analizzano le principali tecnologie digitali oggi impiegate nella pianificazione integrata, evidenziandone potenzialità, limiti applicativi e prospettive di sviluppo nell'ambito delle CER.

1.8.1 BIM–GIS E INTEROPERABILITÀ

L'integrazione tra *Building Information Modelling* (BIM) e *Geographic Information Systems* (GIS) rappresenta uno dei principali sviluppi della digitalizzazione applicata alla pianificazione territoriale ed energetica. Le due tecnologie, nate per finalità differenti, risultano oggi sempre più complementari: il BIM descrive in modo dettagliato le caratteristiche fisiche, funzionali e prestazionali dei singoli edifici, mentre il GIS consente di analizzare tali informazioni all'interno del contesto territoriale nel quale gli edifici sono inseriti.

Tradizionalmente i due sistemi hanno operato su scale differenti. Il BIM si concentra sulla scala edilizia, includendo dati geometrici, materiali, impianti, prestazioni energetiche dell'edificio. Il GIS opera invece alla scala urbana e territoriale, integrando cartografie, infrastrutture, vincoli ambientali, dati catastali, uso del suolo e reti tecnologiche. La crescente necessità di pianificare sistemi energetici distribuiti ha reso indispensabile la convergenza di questi due ambienti informativi.

Nel contesto delle CER, l'interoperabilità BIM-GIS permette di individuare automaticamente gli edifici potenzialmente idonei all'installazione di impianti fotovoltaici, stimarne la producibilità energetica, valutare le ombreggiature, analizzare i consumi e simulare differenti configurazioni di autoconsumo collettivo. Allo stesso tempo consente di integrare tali informazioni con dati territoriali relativi ai vincoli paesaggistici, alle aree protette, alla rete elettrica, alle infrastrutture e alla distribuzione della popolazione. L'interoperabilità tra i due sistemi si basa sull'adozione di standard aperti, tra cui Industry Foundation Classes (IFC) per il BIM e CityGML per la rappresentazione

tridimensionale del territorio. L'utilizzo di tali standard favorisce lo scambio delle informazioni tra differenti software e riduce il rischio di duplicazione dei dati, elemento particolarmente rilevante nella costruzione di piattaforme territoriali condivise tra amministrazioni pubbliche, gestori di rete e soggetti privati.
Oltre agli aspetti tecnici, l'integrazione BIM-GIS assume una rilevanza strategica anche sotto il profilo decisionale. Essa consente infatti di valutare contemporaneamente prestazioni energetiche, compatibilità urbanistica, impatti ambientali e fattibilità economica degli interventi, superando la tradizionale separazione tra progettazione edilizia e pianificazione territoriale. In questa prospettiva, il BIM-GIS costituisce uno dei principali strumenti di supporto alla governance delle CER e alla costruzione di modelli di pianificazione maggiormente integrati.

1.8.2 DIGITAL TWIN TERRITORIALI

Tra gli strumenti più innovativi introdotti negli ultimi anni assumono particolare rilevanza i *Digital Twin* territoriali, ossia rappresentazioni digitali dinamiche di sistemi fisici aggiornate continuamente mediante dati provenienti dal territorio reale. Diversamente dai tradizionali modelli tridimensionali, il *Digital Twin* non costituisce una semplice riproduzione geometrica dello spazio urbano, ma un ambiente informativo capace di simulare il comportamento dei sistemi territoriali nel tempo.
L'evoluzione dei *Digital Twin* deriva dall'integrazione tra GIS, BIM, *Internet of Things* (IoT), sensoristica diffusa, reti intelligenti e tecniche di intelligenza artificiale. Attraverso tali tecnologie è possibile acquisire dati in tempo reale relativi ai consumi energetici, alla produzione da fonti rinnovabili, ai flussi di mobilità, alle condizioni meteorologiche, alla qualità dell'aria e al funzionamento delle infrastrutture urbane.
Nel settore energetico, i *Digital Twin* consentono di simulare scenari di sviluppo delle FER, valutare differenti configurazioni delle CER, stimare l'impatto dell'inserimento di nuovi impianti e ottimizzare la gestione dei flussi energetici all'interno delle reti locali. Le simulazioni possono riguardare sia aspetti tecnici, quali l'equilibrio tra domanda e offerta di energia, sia aspetti ambientali, economici e sociali, offrendo un importante supporto alle decisioni delle amministrazioni pubbliche.
Dal punto di vista della pianificazione territoriale, il *Digital Twin* permette inoltre di integrare informazioni provenienti da strumenti tradizionalmente separati, quali piani urbanistici, catasto, reti

infrastrutturali, banche dati ambientali e sistemi di monitoraggio energetico. Tale capacità di integrazione rende possibile una valutazione preventiva degli effetti derivanti da differenti politiche di sviluppo, migliorando la qualità delle decisioni e riducendo l'incertezza nei processi autorizzativi.

Nonostante le elevate potenzialità, l'applicazione dei *Digital Twin* territoriali è ancora limitata da diversi fattori, tra cui l'elevato costo di implementazione, la disponibilità non uniforme dei dati, la difficoltà di interoperabilità tra piattaforme e la necessità di competenze altamente specialistiche. Tali criticità risultano particolarmente evidenti nei contesti amministrativi di piccole dimensioni, dove la limitata disponibilità di risorse economiche e professionali rende complessa la gestione di sistemi digitali avanzati.

1.8.3 DATA-DRIVEN PLANNING

L'affermazione dei *Big Data* e delle tecnologie di analisi avanzata ha favorito lo sviluppo del cosiddetto *data-driven planning*, approccio che utilizza grandi quantità di dati per supportare la pianificazione territoriale e le decisioni pubbliche. In questo paradigma il processo decisionale non si fonda esclusivamente su previsioni teoriche o analisi statiche, ma si alimenta continuamente attraverso informazioni aggiornate provenienti da molteplici fonti.

Nel settore energetico tali dati derivano da smart meter, sistemi di monitoraggio degli impianti, immagini satellitari, rilievi climatici, open data delle amministrazioni pubbliche, dati catastali, banche dati geografiche e piattaforme di monitoraggio della rete elettrica. L'integrazione di queste informazioni consente di costruire modelli predittivi capaci di stimare la domanda energetica, individuare aree prioritarie per lo sviluppo delle FER, valutare la resilienza delle reti e simulare differenti scenari di sviluppo territoriale.

Per le CER il *data-driven planning* rappresenta uno strumento particolarmente rilevante, poiché permette di definire configurazioni ottimali sulla base dei reali profili di consumo degli utenti, della disponibilità delle superfici, della producibilità degli impianti e delle caratteristiche della rete elettrica locale. Ne deriva una maggiore efficienza nella progettazione delle CER e una riduzione dei rischi connessi alla loro implementazione (Carmona, 2019).

L'utilizzo di algoritmi di *machine learning* e di tecniche di intelligenza artificiale consente inoltre di migliorare progressivamente

l'accuratezza delle simulazioni, supportando processi decisionali adattivi e aggiornabili nel tempo. Ciò risulta particolarmente importante in un contesto caratterizzato dalla crescente variabilità della produzione da fonti rinnovabili e dall'evoluzione continua dei consumi energetici.

1.8.4 LIMITI E CRITICITÀ

Nonostante le notevoli potenzialità offerte dagli strumenti digitali, la loro diffusione nella pianificazione energetica e territoriale incontra ancora numerosi limiti di natura tecnica, organizzativa e normativa. Una prima criticità riguarda l'interoperabilità tra banche dati e piattaforme informatiche, spesso sviluppate secondo standard differenti e gestite da amministrazioni diverse, con conseguenti difficoltà nello scambio delle informazioni.

Ulteriori problematiche derivano dalla qualità e disponibilità dei dati. In molti contesti territoriali le informazioni risultano incomplete, non aggiornate o distribuite tra archivi non comunicanti, limitando l'affidabilità delle analisi e delle simulazioni. A ciò si aggiungono le questioni connesse alla protezione dei dati personali, alla *cybersecurity* e alla *governance* delle informazioni, particolarmente rilevanti nel caso dei dati energetici provenienti dagli utenti finali.

Dal punto di vista organizzativo, l'introduzione di strumenti digitali avanzati richiede competenze multidisciplinari che integrino conoscenze informatiche, urbanistiche, energetiche e ambientali. Molte amministrazioni locali, soprattutto di piccole dimensioni, non dispongono ancora delle risorse economiche e professionali necessarie per sviluppare e gestire piattaforme digitali complesse.

Infine, permane il rischio di interpretare la digitalizzazione come una soluzione esclusivamente tecnologica ai problemi della pianificazione territoriale. Gli strumenti digitali costituiscono infatti un supporto al processo decisionale, ma non possono sostituire il ruolo delle istituzioni, della pianificazione strategica e della partecipazione pubblica. La loro efficacia dipende dalla capacità di inserirli all'interno di un modello di governance integrato, nel quale tecnologia, competenze amministrative e coinvolgimento degli *stakeholder* operino in modo coordinato. Proprio quest'ultimo aspetto costituisce il tema del paragrafo successivo, dedicato ai processi partecipativi e ai *Living Lab* come strumenti di innovazione collaborativa per la transizione energetica.

1.9 PROCESSI PARTECIPATIVI E LIVING LAB

La transizione energetica contemporanea evidenzia come lo sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili non possa essere considerato esclusivamente una questione tecnologica o infrastrutturale, ma debba essere interpretato come un processo territoriale complesso, nel quale assumono un ruolo centrale le dimensioni sociali, culturali ed economiche. L'incremento della diffusione delle FER, in particolare attraverso modelli distribuiti quali le CER, modifica infatti il rapporto tradizionale tra produzione e consumo energetico, introducendo nuove forme di responsabilità collettiva e partecipazione locale.

In questo contesto, la partecipazione degli *stakeholder* assume una funzione strategica non soltanto come strumento di consenso, ma come componente strutturale della pianificazione energetica e territoriale. La realizzazione di impianti rinnovabili, soprattutto quando interessa territori caratterizzati da elevato valore paesaggistico, agricolo o culturale, richiede infatti un processo decisionale capace di integrare conoscenze tecniche, esigenze locali e aspettative sociali.

La progressiva evoluzione dei modelli partecipativi si inserisce in un cambiamento più ampio della governance pubblica, caratterizzato dal superamento di approcci prevalentemente gerarchici e dalla diffusione di modelli collaborativi basati sulla co-produzione delle decisioni. In tale prospettiva, i cittadini non rappresentano esclusivamente destinatari delle politiche energetiche, ma diventano soggetti attivi nella definizione delle strategie territoriali, contribuendo alla costruzione di soluzioni più adattive e condivise (Ballon, et al, 2015).

Per le CER tale approccio assume particolare rilevanza, poiché la loro efficacia dipende non solo dalla fattibilità tecnica ed economica degli impianti, ma anche dalla capacità di costruire relazioni stabili tra cittadini, amministrazioni locali, imprese e altri soggetti territoriali. La partecipazione diventa quindi un elemento abilitante per migliorare l'accettabilità sociale, favorire l'appropriazione locale delle infrastrutture energetiche e rafforzare la resilienza dei sistemi territoriali.

1.9.1 EVOLUZIONE DELLA PARTECIPAZIONE

La partecipazione pubblica nella pianificazione territoriale ed energetica ha conosciuto una profonda trasformazione nel corso degli ultimi decenni. Nei modelli tradizionali, il coinvolgimento dei cittadini

assumeva prevalentemente una funzione informativa o consultiva, collocandosi generalmente nelle fasi successive alla definizione delle principali scelte progettuali. Tale impostazione determinava una limitata capacità degli *stakeholder* di incidere effettivamente sui processi decisionali, concentrando il confronto soprattutto sulla gestione dei conflitti generati dalle trasformazioni territoriali. A partire dagli anni Settanta e Ottanta, la letteratura sulla partecipazione ha evidenziato i limiti dei modelli esclusivamente consultivi, proponendo forme più avanzate di coinvolgimento. Il modello della "scala della partecipazione" elaborato da Arnstein (1969) ha rappresentato uno dei primi contributi teorici nell'identificare differenti livelli di coinvolgimento, distinguendo tra forme passive di informazione e livelli più elevati caratterizzati da partnership e controllo condiviso dei processi decisionali.

Successivamente, gli studi sulla governance collaborativa hanno evidenziato la necessità di superare la contrapposizione tra istituzioni pubbliche e comunità locali, promuovendo modelli basati sulla cooperazione tra soggetti diversi. Secondo Fung (2006), i processi partecipativi efficaci devono essere progettati in funzione del contesto, garantendo non solo accessibilità al processo decisionale, ma anche reale capacità degli attori coinvolti di contribuire alla definizione delle soluzioni.

Nel settore energetico, tale evoluzione assume particolare rilevanza. La diffusione delle FER ha infatti modificato la natura dei conflitti territoriali: mentre in passato la produzione energetica era prevalentemente associata a grandi infrastrutture centralizzate, oggi la crescente diffusione di impianti distribuiti comporta una maggiore interazione con gli spazi abitati e con le comunità locali.

La partecipazione diventa quindi uno strumento fondamentale per:

- migliorare l'accettazione sociale degli interventi energetici;
- integrare conoscenze locali e caratteristiche territoriali;
- ridurre conflitti relativi agli impatti paesaggistici e ambientali;
- aumentare la qualità progettuale degli interventi.

La letteratura evidenzia come i processi partecipativi efficaci possano contribuire alla riduzione delle opposizioni locali, favorendo una maggiore legittimazione delle trasformazioni territoriali (Wolsink, 2012). Tale dinamica risulta particolarmente importante nel caso delle CER, dove il coinvolgimento degli utenti finali costituisce una componente essenziale del modello organizzativo e gestionale.

In questa prospettiva, la partecipazione evolve da strumento di mitigazione del conflitto a elemento progettuale della transizione energetica, assumendo un ruolo centrale nella costruzione di nuovi modelli di *governance* locale.

1.9.2 LIVING LAB COME STRUMENTI OPERATIVI

All'interno dei nuovi modelli di governance partecipativa, i *Living Lab* (LL) rappresentano strumenti operativi finalizzati a trasformare la partecipazione teorica in processi concreti di sperimentazione, innovazione e apprendimento collettivo.

Un *Living Lab* può essere definito come un ambiente reale di innovazione aperta nel quale cittadini, imprese, istituzioni pubbliche e comunità scientifica collaborano per sviluppare, testare e valutare nuove soluzioni tecnologiche e organizzative (Almirall & Wareham, 2008; Leminen et al., 2012). A differenza dei tradizionali processi consultivi, il *Living Lab* opera secondo una logica iterativa, nella quale gli utenti finali partecipano direttamente alla definizione, sperimentazione e modifica delle soluzioni proposte.

Nel settore energetico, i *Living Lab* assumono particolare rilevanza poiché consentono di affrontare la complessità dei sistemi energetici contemporanei, caratterizzati dall'interazione tra tecnologie rinnovabili, reti intelligenti, comportamenti degli utenti e caratteristiche territoriali. Applicati alle CER, i *Living Lab* possono svolgere diverse funzioni:

- co-progettazione delle configurazioni energetiche, attraverso il coinvolgimento degli utenti nella definizione degli impianti e dei modelli di autoconsumo;
- sperimentazione di soluzioni tecnologiche, quali sistemi di accumulo, *smart grid* e piattaforme digitali di gestione energetica;
- valutazione degli impatti territoriali, integrando aspetti energetici, ambientali, economici e sociali;
- formazione e *capacity building*, aumentando le competenze della comunità locale.

Attraverso l'utilizzo di strumenti digitali, simulazioni energetiche e piattaforme collaborative, i *Living Lab* consentono inoltre di costruire scenari condivisi e valutare preventivamente gli effetti delle diverse configurazioni progettuali.

In questo senso, il *Living Lab* rappresenta un ambiente intermedio tra ricerca, pianificazione e attuazione, nel quale il territorio diventa un laboratorio permanente di innovazione. La conoscenza scientifica e tecnica viene integrata con il sapere locale, generando processi decisionali maggiormente adattivi e coerenti con le specificità territoriali.

1.9.3 COINVOLGIMENTO DEGLI STAKEHOLDER

Il coinvolgimento degli *stakeholder* rappresenta uno degli elementi determinanti per il successo dei processi partecipativi applicati alla transizione energetica. La complessità dei sistemi FER e delle CER richiede infatti il coordinamento di soggetti caratterizzati da competenze, interessi e capacità decisionali differenti.

Gli *stakeholder* coinvolti possono comprendere cittadini e comunità locali; amministrazioni pubbliche; imprese energetiche e tecnologiche; professionisti e progettisti; associazioni ambientaliste e organizzazioni della società civile; università e centri di ricerca; e soggetti finanziari e investitori.

Secondo *Fischer* (2000) e *Innes* & *Booher* (2004), un processo partecipativo efficace richiede tre condizioni fondamentali.

La prima riguarda l'identificazione dei soggetti realmente interessati dal processo decisionale. Una partecipazione efficace non può infatti limitarsi agli attori istituzionali, ma deve includere anche gruppi sociali meno rappresentati, comprese comunità vulnerabili o soggetti potenzialmente esclusi dai benefici della transizione energetica.

La seconda condizione riguarda la qualità della comunicazione. La complessità tecnica delle FER, delle procedure autorizzative e dei modelli economici delle CER può rappresentare una barriera alla partecipazione. Risulta quindi necessario adottare linguaggi accessibili, strumenti informativi trasparenti e modalità di confronto continuativo.

La terza condizione riguarda l'integrazione tra conoscenza scientifica e conoscenza territoriale. La combinazione tra dati tecnici, analisi ambientali e percezioni locali consente infatti di sviluppare soluzioni maggiormente coerenti con il contesto.

Negli ultimi anni, gli strumenti digitali hanno ampliato le possibilità di partecipazione attraverso piattaforme online, sistemi GIS partecipativi, dashboard interattive e ambienti virtuali di simulazione. L'integrazione tra strumenti digitali e incontri in presenza consente di costruire

processi ibridi, aumentando trasparenza, accessibilità e capacità di coinvolgimento.

1.9.4 LIMITI DEL SISTEMA ATTUALE E PROPOSTA DI INTEGRAZIONE PROCEDURALE

Nonostante l'evoluzione dei modelli partecipativi e la crescente diffusione di strumenti digitali, il sistema attuale presenta ancora significative criticità nella capacità di integrare pianificazione energetica, valutazione ambientale e partecipazione territoriale.

Una prima criticità riguarda la persistenza di una struttura decisionale prevalentemente sequenziale, nella quale partecipazione e confronto pubblico intervengono spesso successivamente alla definizione delle principali scelte progettuali. Tale impostazione limita la possibilità degli *stakeholder* di contribuire realmente alla costruzione delle strategie e riduce la partecipazione a una funzione prevalentemente consultiva.

Un secondo elemento critico riguarda la frammentazione degli strumenti di pianificazione. La presenza contemporanea di strumenti energetici, urbanistici, ambientali e paesaggistici – quali PNIEC, PEAR/PER, Piani Urbanistici, Piani Paesaggistici Regionali, Piani di Gestione Ambientale e strumenti comunali – genera spesso sovrapposizioni e difficoltà di coordinamento. Tale frammentazione si riflette anche nella gestione dei dati. Sebbene siano sempre più disponibili strumenti GIS, BIM e piattaforme digitali, tali sistemi risultano frequentemente utilizzati in modo indipendente, senza una reale interoperabilità lungo l'intero ciclo decisionale.

Per superare tali criticità appare necessario sviluppare un modello procedurale integrato basato su quattro elementi principali:

1. integrazione preventiva della partecipazione, anticipando il coinvolgimento degli *stakeholder* alle fasi iniziali della pianificazione;
2. interoperabilità digitale, attraverso piattaforme capaci di integrare dati energetici, ambientali e territoriali;
3. coordinamento multilivello, favorendo il dialogo tra Stato, Regioni, Comuni e comunità locali;
4. monitoraggio continuo, attraverso sistemi capaci di valutare nel tempo gli effetti degli interventi realizzati.

In questa prospettiva, i *Living Lab* possono rappresentare un modello operativo capace di collegare innovazione tecnologica, governance

territoriale e partecipazione sociale. Essi consentono infatti di superare la tradizionale separazione tra progettazione e gestione, trasformando il territorio in un ambiente di apprendimento permanente. La piena integrazione tra strumenti digitali, processi partecipativi e pianificazione energetica costituisce quindi una delle condizioni fondamentali per sviluppare un modello di transizione energetica realmente territoriale, nel quale le CER assumano il ruolo di infrastrutture sociali oltre che energetiche.

2 | SECONDA PARTE
RIFLESSIONE E ANALISI CRITICA

2.1 INTRODUZIONE E METODOLOGIA DELL'ANALISI CRITICA

Il presente capitolo sviluppa un'analisi critica dello stato dell'arte delineato nel Capitolo I, con l'obiettivo di individuare le principali criticità, opportunità e condizioni abilitanti per la progettazione e implementazione delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER). L'analisi assume una prospettiva sistemica, considerando le CER non esclusivamente come strumenti di produzione e condivisione energetica, ma come sistemi territoriali complessi nei quali interagiscono dimensioni energetiche, ambientali, paesaggistiche, tecnologiche e sociali. La crescente diffusione delle FER e delle iniziative comunitarie evidenzia infatti la necessità di superare approcci settoriali, integrando pianificazione energetica, governo del territorio e processi partecipativi. In tale prospettiva, il capitolo mira a costruire una base metodologica per la successiva definizione di strategie operative e modelli integrati applicabili ai diversi contesti territoriali.

L'approccio metodologico adottato è di tipo transdisciplinare e combina analisi qualitative e quantitative finalizzate alla comprensione delle relazioni tra infrastrutture energetiche, caratteristiche territoriali, sistemi ambientali e comunità locali. Tale impostazione consente di analizzare le CER come strumenti di transizione energetica territoriale, evidenziando non solo gli aspetti tecnici legati alla produzione e gestione dell'energia, ma anche gli elementi di governance, partecipazione e replicabilità. La metodologia si articola attraverso cinque principali dimensioni di analisi:

1. Analisi bibliografica e comparativa, finalizzata all'identificazione di approcci teorici, modelli applicativi e buone pratiche nazionali e internazionali relative alle *energy communities* e ai processi di transizione energetica.
2. Analisi territoriale e dei sistemi energetici, basata sull'integrazione di dati territoriali, energetici e infrastrutturali, con l'obiettivo di comprendere le caratteristiche dei contesti locali e le potenzialità di sviluppo delle CER.
3. Analisi degli attori e dei processi partecipativi, volta a individuare il ruolo degli *stakeholder* pubblici e privati, i meccanismi decisionali e i fattori che influenzano l'accettazione sociale dei progetti energetici comunitari.
4. Valutazione delle relazioni tra energia, ambiente e paesaggio, attraverso strumenti di supporto alla pianificazione capaci di

considerare gli effetti territoriali delle infrastrutture energetiche e la loro integrazione nel contesto locale.

5. Analisi della replicabilità e scalabilità dei modelli CER, finalizzata all'identificazione dei fattori abilitanti e delle condizioni necessarie per trasferire esperienze virtuose in differenti contesti territoriali.

L'analisi critica sviluppata nel capitolo si fonda pertanto sull'integrazione di tre livelli principali: il livello territoriale, relativo alle caratteristiche fisiche e infrastrutturali dei luoghi; il livello tecnico-energetico, relativo alla configurazione dei sistemi di produzione e gestione dell'energia; il livello socio-istituzionale, relativo alla governance, alla partecipazione e alla capacità organizzativa degli attori coinvolti.

La revisione dello stato dell'arte evidenzia come, nonostante il crescente interesse verso le CER, permangano alcune criticità legate alla frammentazione degli strumenti di pianificazione, alla difficoltà di integrazione dei dati, alla complessità dei processi autorizzativi e alla necessità di rafforzare modelli di governance multilivello. Tali elementi costituiscono il punto di partenza per l'analisi delle criticità e delle opportunità sviluppata nei paragrafi successivi. Il capitolo rappresenta quindi il passaggio metodologico tra la ricognizione teorica del Capitolo I e la definizione di un modello integrato per la progettazione e valutazione delle CER.

2.2 DIMENSIONI CRITICHE DI INTERPRETAZIONE DELLE COMUNITÀ ENERGETICHE RINNOVABILI

La classificazione e la matrice analitica sviluppate nel Capitolo I (Cfr. Cap 1.4, 1.4.2; 1.4.3) hanno evidenziato come le CER costituiscano sistemi complessi caratterizzati dall'interazione tra componenti tecnologiche, territoriali, istituzionali ed economiche. Tale evidenza supera una concezione esclusivamente energetica delle CER, interpretandole come strumenti di trasformazione territoriale capaci di integrare produzione energetica distribuita, partecipazione locale e sviluppo sostenibile. A partire dai criteri individuati nello stato dell'arte, il presente capitolo propone una loro rilettura in chiave critica, finalizzata non solo alla classificazione dei casi studio, ma all'individuazione degli elementi che condizionano l'efficacia, la diffusione e la replicabilità delle CER nei diversi contesti territoriali.

L'analisi critica viene quindi organizzata attraverso cinque dimensioni interpretative principali:

1. Dimensione territoriale e paesaggistica

Questa dimensione riguarda la relazione tra infrastrutture energetiche e contesto spaziale nel quale vengono inserite. L'efficacia di una CER non dipende infatti esclusivamente dalla disponibilità di risorse rinnovabili, ma anche dalla capacità di integrare gli interventi con caratteristiche insediative, valori paesaggistici, vincoli ambientali e condizioni locali. La transizione energetica richiede pertanto un superamento della logica della localizzazione esclusivamente tecnica degli impianti, verso una pianificazione maggiormente attenta alle specificità territoriali.

2. Dimensione energetica e tecnologica

La seconda dimensione riguarda il ruolo delle tecnologie nella configurazione dei sistemi energetici distribuiti. L'integrazione delle fonti rinnovabili, dei sistemi di accumulo e degli strumenti di gestione digitale rappresenta un elemento fondamentale per aumentare flessibilità e resilienza delle CER. Tuttavia, la diffusione tecnologica deve essere valutata in relazione alla capacità delle infrastrutture esistenti, alla disponibilità dei dati e all'effettiva integrazione con le reti energetiche locali.

3. Dimensione istituzionale e di governance

La capacità delle CER di generare valore locale dipende in larga misura dal modello organizzativo adottato e dal livello di coordinamento tra soggetti pubblici, privati e comunitari. L'analisi evidenzia come la governance rappresenti uno degli elementi più rilevanti per determinare continuità, partecipazione e capacità gestionale delle iniziative, superando modelli decisionali esclusivamente centralizzati.

4. Dimensione sociale e partecipativa

Le CER introducono una trasformazione del ruolo degli utenti energetici, che assumono progressivamente la funzione di soggetti attivi nella produzione, gestione e condivisione dell'energia. La partecipazione della comunità, tuttavia, non può essere considerata automatica, ma richiede processi di coinvolgimento, formazione e costruzione di competenze locali.

5. Dimensione economica e strategica

La sostenibilità nel lungo periodo delle CER dipende infine dalla capacità dei modelli adottati di garantire equilibrio economico, accessibilità agli investimenti e possibilità di replicazione in contesti

differenti. La valutazione della replicabilità non riguarda quindi esclusivamente il trasferimento tecnologico, ma comprende condizioni normative, organizzative e territoriali che rendono possibile l'adattamento del modello.

Le cinque dimensioni individuate costituiscono pertanto il quadro interpretativo attraverso il quale vengono analizzate nei paragrafi successivi le principali criticità e opportunità delle CER. Esse consentono di passare dalla descrizione dei modelli esistenti, sviluppata nello stato dell'arte, alla comprensione dei fattori che possono favorire una loro evoluzione verso sistemi energetici territoriali integrati.

Le dimensioni critiche individuate costituiscono il quadro interpretativo attraverso il quale analizzare i principali bisogni e le criticità che caratterizzano l'attuale sviluppo delle Comunità Energetiche Rinnovabili. La diffusione delle CER, infatti, non dipende esclusivamente dalla disponibilità di risorse energetiche rinnovabili o dalla presenza di tecnologie adeguate, ma dalla capacità dei territori di integrare componenti energetiche, infrastrutturali, ambientali, istituzionali e sociali.

A partire da tale impostazione, il successivo paragrafo analizza i bisogni emergenti nei diversi contesti territoriali, evidenziando come le criticità riscontrate possano essere ricondotte alle cinque dimensioni precedentemente individuate: la necessità di una maggiore integrazione tra pianificazione energetica e territoriale; il rafforzamento degli strumenti tecnologici e digitali; la semplificazione dei processi autorizzativi; il consolidamento di modelli di governance partecipativa; e lo sviluppo di competenze locali capaci di sostenere nel tempo le iniziative comunitarie.

L'analisi dei bisogni rappresenta quindi il passaggio dalla classificazione dei modelli CER alla comprensione delle condizioni necessarie per la loro evoluzione verso sistemi energetici territoriali integrati.

2.3 PREMESSA AI RISULTATI DELLO STUDIO COMPARATO DELLE COMUNITÀ ENERGETICHE RINNOVABILI NEI CONTESTI NAZIONALI ANALIZZATI

L'analisi comparativa sviluppata nella presente ricerca ha avuto come obiettivo l'individuazione delle condizioni normative, istituzionali, territoriali e organizzative che hanno favorito l'emergere e il

consolidamento delle CER nei diversi contesti europei. Tale fase costituisce il passaggio intermedio tra l'inquadramento teorico e normativo delineato nel primo capitolo e la successiva analisi sistematica dei casi studio selezionati, assumendo una funzione conoscitiva finalizzata alla definizione del campione di indagine e alla costruzione del quadro interpretativo adottato.

La selezione dei Paesi analizzati deriva dalla classificazione preliminare dei sistemi nazionali europei in relazione al livello di maturità del recepimento normativo e dell'implementazione operativa della regolamentazione sulle CER e FER (Cfr. Cap. 1, § 1.4.2). Tale classificazione non intende attribuire un giudizio gerarchico ai differenti modelli nazionali, né definire una graduatoria di efficacia delle politiche energetiche adottate, ma rappresenta uno strumento metodologico volto a individuare differenti traiettorie evolutive nella costruzione dei sistemi energetici partecipativi.

A partire da tale classificazione, la ricerca ha selezionato cinque contesti nazionali caratterizzati da differenti condizioni normative e istituzionali: Italia (IT) e Austria (AT), appartenenti alla categoria dei Paesi definiti "pionieri" per il livello di recepimento anticipato e il progressivo consolidamento degli strumenti legislativi dedicati alle comunità energetiche; Francia (FR) e Spagna (SP), individuate come casi appartenenti al gruppo dei Paesi "avanzati", nei quali il quadro regolatorio risulta maggiormente strutturato e accompagnato da una crescente diffusione di iniziative territoriali; Regno Unito (GB), infine, è stato incluso quale caso comparativo extraeuropeo, in ragione della presenza di un percorso autonomo di sviluppo delle *energy communities* fondato su modelli partecipativi, cooperativi e di iniziativa locale antecedenti alla definizione del quadro europeo introdotto dalla Direttiva (UE) 2018/2001.

La scelta dei cinque contesti non assume pertanto una finalità statistico-rappresentativa dell'intero panorama europeo, ma risponde a una logica interpretativa basata sulla capacità dei casi selezionati di rappresentare differenti configurazioni del rapporto tra regolazione pubblica, iniziativa locale e trasformazione dei sistemi energetici territoriali. Tale impostazione consente di analizzare come il processo di diffusione delle CER sia condizionato non esclusivamente dalla disponibilità tecnologica o dalla presenza di risorse rinnovabili, ma dalla combinazione di fattori normativi, amministrativi, economici e spaziali.

Dal punto di vista regolatorio, il confronto tra i diversi contesti nazionali evidenzia come il recepimento delle Direttive europee RED II (Direttiva (UE) 2018/2001) e *Internal Electricity Market* (Direttiva (UE) 2019/944) abbia determinato processi differenziati di adattamento legislativo, caratterizzati da specifiche interpretazioni del concetto di Comunità Energetica Rinnovabile (CER) e configurazione di Autoconsumo (AC), dei criteri di partecipazione, dei requisiti di prossimità geografica e dei meccanismi di sostegno economico. Sebbene tali direttive abbiano introdotto principi comuni, quali il ruolo attivo dei cittadini, la produzione condivisa di energia rinnovabile e la possibilità di configurare nuovi modelli di governance energetica locale, la loro attuazione nei diversi ordinamenti nazionali ha generato modelli organizzativi differenti, influenzati dalle caratteristiche istituzionali e territoriali preesistenti.

L'analisi preliminare ha evidenziato pertanto la necessità di interpretare le CER come sistemi socio-tecnici complessi, nei quali la componente infrastrutturale rappresentata dagli impianti da fonti rinnovabili costituisce soltanto uno degli elementi costitutivi. La capacità di generare valore territoriale risulta infatti strettamente connessa alla struttura della governance, alla partecipazione degli attori locali, alla disponibilità di strumenti finanziari, alla relazione con gli strumenti di pianificazione urbana e territoriale e alla capacità degli interventi energetici di integrarsi con le caratteristiche morfologiche e paesaggistiche dei luoghi.

Su questa base, la seconda fase della ricerca ha previsto la raccolta e la sistematizzazione di esperienze operative di CER nei cinque Paesi selezionati attraverso una prima ricognizione dei progetti esistenti. Tale attività ha consentito di individuare un insieme iniziale di casi studio successivamente classificati secondo una matrice analitica multidimensionale, comprendente variabili relative al modello di sviluppo, allo stato di implementazione, alla scala territoriale dell'intervento, alle tecnologie energetiche adottate, agli attori coinvolti, alle modalità di finanziamento e al livello di integrazione con il sistema urbano e paesaggistico.

La distribuzione geografica e quantitativa dei casi analizzati nella fase preliminare è rappresentata nella Figura A.2 1 (Appendice 2), attraverso una rappresentazione radiale finalizzata a restituire la composizione del campione di indagine e la diversa articolazione delle esperienze considerate nei cinque contesti nazionali. Tale elaborazione

costituisce un supporto alla lettura dei risultati successivi, evidenziando la varietà delle configurazioni analizzate e il percorso metodologico che ha condotto alla selezione dei casi maggiormente significativi.

A seguito di questa prima classificazione comparativa, sono state elaborate specifiche schede conoscitive per i casi ritenuti maggiormente rappresentativi, selezionati sulla base della presenza di elementi di innovazione, replicabilità e capacità di integrazione tra dimensione energetica, territoriale e paesaggistica. Le schede costituiscono quindi il terzo livello della ricerca e rappresentano lo strumento attraverso il quale le esperienze individuate vengono approfondite sotto il profilo normativo, localizzativo, tecnologico e organizzativo.

Nel complesso, lo studio comparato evidenzia come la diffusione delle CER dipenda dall'interazione tra un quadro normativo favorevole, la capacità istituzionale degli enti territoriali, la presenza di modelli di governance inclusivi e la possibilità di integrare le infrastrutture energetiche all'interno delle strategie di sviluppo locale. Tale prospettiva costituisce il presupposto teorico e metodologico per la successiva analisi dei casi studio nazionali e per l'elaborazione degli indicatori comparativi discussi nei paragrafi successivi.

2.4 INTRODUZIONE METODOLOGICA ALL'ANALISI DEI CASI STUDIO

A seguito della classificazione dei contesti nazionali europei secondo differenti livelli di maturità normativa e operativa delle CER, illustrata nel precedente paragrafo 2.3, la seconda fase della ricerca è stata dedicata all'analisi approfondita di un insieme selezionato di esperienze considerate rappresentative di differenti traiettorie evolutive. La selezione dei casi studio non risponde a un criterio di rappresentatività statistica dell'intero panorama europeo, bensì assume una finalità interpretativa volta a individuare relazioni tra quadro normativo, modelli di governance, configurazioni tecnologiche, caratteristiche territoriali e modalità di integrazione paesaggistica delle infrastrutture energetiche.

L'indagine ha riguardato cinque contesti nazionali:

- Italia e Austria, inizialemnte appartenenti alla categoria dei Paesi pionieri nel recepimento della normativa europea sulle CER;

- Francia e Spagna, appartenenti alla categoria dei Paesi avanzati, caratterizzati da un progressivo consolidamento del quadro regolatorio e da una crescente diffusione delle iniziative locali;
- Regno Unito, analizzato quale caso comparativo extraeuropeo, in ragione dello sviluppo anticipato di modelli di community energy fondati su processi partecipativi e iniziative territoriali *top down* e *bottom-up*.

L'analisi dei casi è stata sviluppata attraverso la matrice metodologica (Cfr. Cap. 1, § 1.4.3), applicata secondo cinque dimensioni principali:

1. inquadramento normativo e istituzionale;
2. configurazione territoriale e relazione con il paesaggio;
3. caratteristiche tecnologiche e infrastrutturali;
4. modello organizzativo e governance energetica;
5. struttura economica, finanziaria e potenziale evolutivo.

Tale approccio consente di interpretare le CER non esclusivamente come sistemi di produzione decentralizzata di energia rinnovabile, ma come configurazioni territoriali complesse nelle quali infrastrutture tecnologiche, attori locali e caratteristiche spaziali concorrono alla costruzione di nuovi modelli energetici.

Per ciascun caso studio sono state pertanto elaborate specifiche schede analitiche contenenti informazioni relative alla localizzazione geografica, allo stato di attuazione, al modello di sviluppo, agli *stakeholder* coinvolti, alle FER utilizzate, alla potenza installata, alla configurazione spaziale dell'impianto, al quadro normativo di riferimento e agli elementi di integrazione urbana e paesaggistica. Le informazioni raccolte attraverso documentazione istituzionale, banche dati dedicate, siti ufficiali delle comunità energetiche e letteratura scientifica sono state organizzate in un database georeferenziato mediante *Google Earth Pro*, al fine di localizzare territorialmente ciascuna iniziativa e costruire un quadro conoscitivo omogeneo dei casi censiti. Tale attività non è stata finalizzata all'elaborazione di analisi spaziali di tipo GIS, bensì alla costruzione di un archivio territoriale funzionale alla successiva selezione delle esperienze ritenute maggiormente significative secondo i criteri definiti nella matrice metodologica illustrata nel §1.4.3.

I diagrammi interpretativi, permette inoltre di mettere in relazione la dimensione energetica con il contesto territoriale nel quale l'iniziativa

si inserisce, evidenziando il rapporto tra infrastrutture rinnovabili, morfologia urbana, uso del suolo e caratteristiche paesaggistiche.

2.4.1 AUSTRIA: RECEPIMENTO NORMATIVO RECENTE E SVILUPPO DI MODELLI TERRITORIALI DI COMUNITÀ ENERGETICA

L'A*ustria* (AT) rappresenta uno dei contesti europei più interessanti per lo sviluppo delle CER, grazie alla combinazione tra un quadro normativo favorevole, una forte cultura cooperativa locale e una tradizione consolidata di gestione territoriale delle risorse energetiche. L'esperienza austriaca evidenzia come la transizione energetica possa essere interpretata non esclusivamente come un processo tecnologico finalizzato alla sostituzione delle fonti fossili, ma come una trasformazione organizzativa e territoriale nella quale comunità locali, cittadini e amministrazioni assumono un ruolo attivo nella produzione, gestione e condivisione dell'energia rinnovabile.

L'analisi dei casi studio selezionati mostra come il modello austriaco delle comunità energetiche si sia sviluppato attraverso una progressiva integrazione tra normativa europea, strumenti nazionali e strategie locali. Le numerose esperienze presenti nei diversi *Länder* dimostrano infatti una capacità di adattamento del modello alle caratteristiche specifiche dei territori: dalle aree rurali dell'Alta Austria alle regioni alpine del *Tirolo* e del *Salisburghese*, fino ai contesti urbani come *Vienna* e *Wels*.

Il carattere distintivo del sistema austriaco risiede nella capacità delle comunità energetiche di diventare infrastrutture territoriali leggere, fondate sulla prossimità tra produzione e consumo, sulla valorizzazione del patrimonio edilizio esistente e sulla partecipazione degli utenti finali. In questo senso, la comunità energetica non viene concepita solamente come un soggetto energetico, ma come una forma di cooperazione locale capace di rafforzare l'autonomia dei territori e creare nuove relazioni tra abitanti, infrastrutture e ambiente.

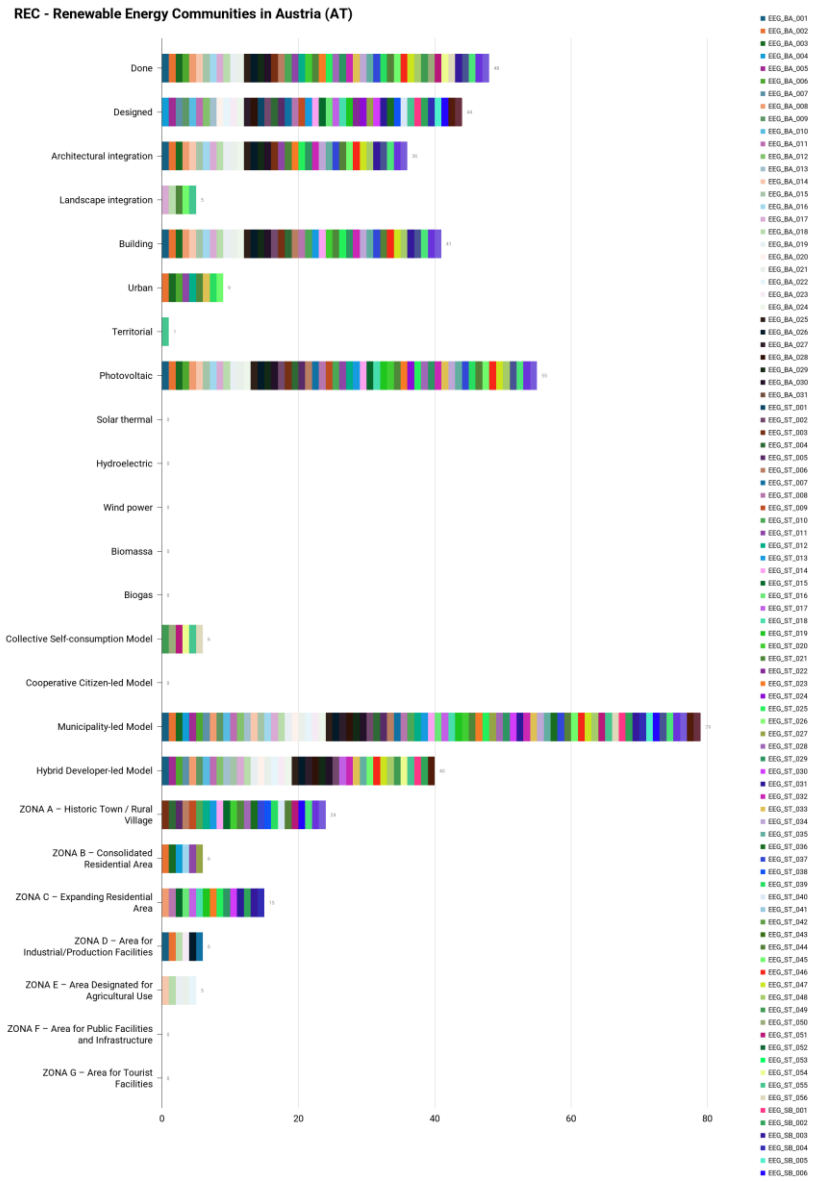


Figura A.2 7. Quadro comparativo delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) analizzate in *Austria* (AT), classificate per modello di sviluppo, fonti rinnovabili, scala di intervento, implicazioni territoriali e stato di attuazione. Elaborazione dell'autore. Supporto informatico: *Microsoft Excel*.

L'analisi delle esperienze evidenzia inoltre una forte attenzione alla compatibilità ambientale e paesaggistica della transizione energetica. In particolare, nei territori alpini e rurali emerge una strategia orientata alla minimizzazione dell'impatto territoriale attraverso l'integrazione degli impianti negli edifici esistenti, evitando il consumo di nuovo suolo e privilegiando una diffusione capillare delle tecnologie rinnovabili.

2.4.1.1 Quadro normativo e istituzionale

Lo sviluppo delle comunità energetiche in *Austria* è strettamente connesso al recepimento della normativa europea introdotta con il *Clean Energy Package* e, in particolare, con la Direttiva (UE) 2018/2001 sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili (RED II) e con

la Direttiva (UE) 2019/944 relativa al mercato interno dell'energia elettrica.

Il recepimento nazionale di tali direttive ha portato alla definizione del modello delle *Erneuerbare-Energie-Gemeinschaften* (EEG), ovvero Comunità Energetiche Rinnovabili Locali che consentono a cittadini, imprese, enti pubblici e organizzazioni territoriali di produrre, condividere e utilizzare energia rinnovabile all'interno di un determinato ambito geografico.

Un ruolo centrale è stato assunto dal *Renewable Energy Expansion* Act (*Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz* – EAG), che ha introdotto un quadro operativo favorevole allo sviluppo delle comunità energetiche, semplificando la partecipazione degli utenti e creando condizioni economiche più favorevoli per la produzione distribuita.

Il sistema normativo austriaco si distingue perché riconosce alle comunità energetiche una funzione strategica nella transizione energetica nazionale. Esse vengono considerate strumenti per aumentare la quota di energia rinnovabile, ridurre la dipendenza dai sistemi centralizzati e favorire una maggiore partecipazione dei cittadini.

Questa impostazione ha favorito una diffusione particolarmente ampia delle EEG nei territori locali, soprattutto nei comuni rurali e nelle aree caratterizzate da una forte identità comunitaria.

L'Alta Austria rappresenta uno dei territori maggiormente interessati da questo processo. I numerosi casi analizzati, tra cui EEG *Vogelweide-Laahen*, EEG *Enns*, EEG *Wolfern*, EEG *Regione Ried*, EEG *Silberbach*, EEG *Rainbach* e le comunità energetiche dell'area di *Rohrbach*, mostrano come il modello sia stato applicato in prevalenza attraverso reti locali di piccoli produttori e consumatori.

In questi contesti la comunità energetica si integra con una struttura territoriale caratterizzata da piccoli centri abitati, presenza agricola e patrimonio edilizio diffuso. La produzione energetica viene quindi inserita all'interno del paesaggio esistente, utilizzando prevalentemente superfici di copertura e strutture già disponibili.

Anche nelle regioni alpine del *Tirolo* e del *Salisburghese* il modello EEG assume caratteristiche particolari. Le esperienze analizzate, come EEG *Iseltal*, EEG *Lechtal*, EEG *Ötztal*, EEG *Stanzertal*, Comunità energetica di *Hallwang*, *SalzachSonne Neukirchen* e *Plainfeld Hub*, mostrano una particolare attenzione alla relazione tra sviluppo energetico e tutela del paesaggio.

In questi territori, caratterizzati da elevata sensibilità ambientale e paesaggistica, la transizione energetica viene costruita attraverso interventi compatibili con il contesto locale, privilegiando sistemi distribuiti e integrati rispetto a grandi infrastrutture energetiche.
Il caso viennese della Comunità Energetica Cittadina *SiSi Elettricità* rappresenta invece una declinazione urbana del modello, nella quale la comunità energetica viene utilizzata come strumento per valorizzare superfici edilizie disponibili e favorire la partecipazione degli abitanti nei quartieri densamente costruiti.

2.4.1.2 Analisi comparativa dei casi studio dell'Austria

L'analisi comparativa dei casi studio evidenzia come il modello austriaco delle comunità energetiche sia caratterizzato da una notevole capacità di adattamento alle diverse condizioni territoriali.
Nonostante le differenze regionali, riportate nel quadro comparativo completo in Appendice 2 (Figura A.2 7), dove i casi austriaci sono classificati secondo le categorie interpretative adottate nella ricerca (Cfr. Cap. 1.4, § 1.4.3). emerge un elemento comune rappresentato dalla prevalenza di sistemi energetici decentralizzati basati sulla produzione distribuita, principalmente attraverso impianti fotovoltaici integrati nel patrimonio edilizio esistente.
La maggior parte delle esperienze analizzate non prevede infatti grandi impianti energetici concentrati, ma una rete diffusa di piccoli produttori collegati all'interno della stessa comunità territoriale. Questa configurazione consente di ridurre l'impatto paesaggistico e di valorizzare infrastrutture già presenti.
Nei territori rurali dell'Alta Austria prevale un modello fondato sulla partecipazione diretta degli abitanti. Comunità come noi siamo energiegemeinschaft 0523 UW *Erlauf*, EEG *Rainbach* o EEG *Rohrbach* mostrano come la comunità energetica possa diventare uno strumento di rafforzamento dell'autonomia locale, coinvolgendo famiglie, piccoli produttori e attività economiche presenti sul territorio.
In questi casi il valore principale non risiede soltanto nella quantità di energia prodotta, ma nella capacità della comunità di costruire una rete collaborativa tra soggetti locali.
Nei territori periurbani del *Salisburghese* emerge invece una maggiore attenzione alla relazione tra crescita urbana, qualità paesaggistica e sostenibilità ambientale. Le esperienze di *Hallwang*, *Plainfeld Hub* e *SalzachSonne Neukirchen* mostrano come le comunità energetiche possano fungere da elemento di connessione tra sistemi urbani e

territori rurali, mantenendo un equilibrio tra sviluppo energetico e conservazione del paesaggio.

Il *Tirolo* presenta una situazione ancora più specifica, caratterizzata dalla presenza di territori montani e vallivi con elevata sensibilità paesaggistica. I casi analizzati dimostrano come la transizione energetica possa essere integrata in contesti complessi attraverso soluzioni tecnologiche leggere, distribuite e compatibili con la struttura insediativa esistente.

Le comunità energetiche del *Tirolo* evidenziano infatti una particolare attenzione alla riduzione degli impatti visivi e territoriali, privilegiando l'utilizzo delle coperture degli edifici, delle infrastrutture locali e delle superfici già antropizzate.

Nel complesso, il modello austriaco appare fortemente orientato verso una strategia di diffusione capillare dell'energia rinnovabile, nella quale la transizione non avviene attraverso la trasformazione radicale dei territori, ma attraverso una progressiva integrazione delle infrastrutture energetiche nel paesaggio costruito.

2.4.1.3 Governance, tecnologia e relazione territoriale

Uno degli aspetti più significativi emersi dall'analisi dei casi austriaci riguarda il modello di governance adottato.

La maggior parte delle esperienze appartiene al modello *Citizen-led Model* o Cooperative *Model*, nel quale cittadini e utenti energetici assumono un ruolo centrale nella costituzione e nella gestione della comunità energetica.

La partecipazione degli utenti rappresenta un elemento fondamentale perché consente di trasformare il consumatore tradizionale in un soggetto attivo della transizione energetica. Gli abitanti non sono solamente utilizzatori dell'energia prodotta, ma diventano produttori, membri della comunità e partecipanti alle decisioni collettive.

In molti casi emerge inoltre una collaborazione tra cittadini, amministrazioni locali e operatori energetici, creando forme ibride di governance nelle quali la dimensione partecipativa viene integrata con competenze tecniche e istituzionali.

Dal punto di vista tecnologico, il fotovoltaico rappresenta la tecnologia dominante nella maggior parte delle esperienze analizzate. Questa scelta deriva dalla possibilità di integrare gli impianti nelle superfici edilizie esistenti, riducendo il consumo di suolo e limitando le trasformazioni paesaggistiche.

L'approccio austriaco evidenzia quindi una particolare attenzione alla relazione tra tecnologia e territorio. Gli impianti energetici vengono concepiti come elementi integrati nel paesaggio abitato e non come infrastrutture estranee.

Questa caratteristica risulta particolarmente evidente nelle regioni alpine, dove la tutela del paesaggio costituisce un elemento fondamentale della pianificazione territoriale. Nei casi del Tirolo e del Salisburghese la transizione energetica viene perseguita attraverso un modello compatibile con le caratteristiche ambientali locali, evitando interventi invasivi e privilegiando la valorizzazione delle superfici già costruite.

Da questo punto di vista, le comunità energetiche austriache rappresentano un esempio di transizione sostenibile basata sull'integrazione piuttosto che sulla sostituzione del territorio.

2.4.1.4 Discussione critica dei casi in Austria

L'analisi delle esperienze austriache evidenzia un modello particolarmente avanzato di comunità energetica, nel quale normativa, governance locale e caratteristiche territoriali convergono verso una strategia comune di decentralizzazione energetica.

Il principale elemento di forza del modello austriaco consiste nella capacità di collegare la produzione di energia rinnovabile con le specificità dei territori. Le comunità energetiche non vengono sviluppate come interventi isolati, ma come strumenti inseriti all'interno delle dinamiche locali.

Le esperienze analizzate dimostrano che la transizione energetica può essere compatibile con la tutela ambientale e paesaggistica quando viene costruita attraverso interventi diffusi, integrati e partecipati.

In particolare, i casi delle regioni alpine mostrano come sia possibile aumentare la produzione energetica rinnovabile senza compromettere la qualità del paesaggio, attraverso una strategia basata sull'utilizzo delle infrastrutture esistenti e sulla riduzione delle trasformazioni territoriali.

Rispetto ad altri contesti europei, il modello austriaco presenta una maggiore maturità istituzionale e una più ampia diffusione delle comunità energetiche, favorita dalla presenza di strumenti normativi chiari e da una forte cultura cooperativa.

Tuttavia, emergono anche alcune criticità. La forte prevalenza del fotovoltaico può determinare una limitata diversificazione tecnologica, mentre la partecipazione effettiva degli utenti può variare tra comunità

fortemente cooperative e modelli maggiormente orientati alla semplice condivisione energetica.
Un ulteriore elemento di attenzione riguarda la necessità di mantenere un equilibrio tra incremento della produzione rinnovabile e tutela dei paesaggi sensibili, soprattutto nelle aree alpine e turistiche.
Nel complesso, l'esperienza austriaca evidenzia tre principi fondamentali per lo sviluppo delle comunità energetiche:

- la decentralizzazione della produzione energetica attraverso piccoli sistemi distribuiti;
- la partecipazione dei cittadini come elemento di governance e di costruzione sociale della transizione;
- l'integrazione territoriale delle infrastrutture energetiche nel rispetto del paesaggio e dell'identità locale.

Per queste ragioni il modello austriaco rappresenta un riferimento significativo per altri contesti europei, in particolare per territori rurali, montani e periurbani nei quali la transizione energetica deve necessariamente confrontarsi con la tutela dell'ambiente, la qualità del paesaggio e la valorizzazione delle comunità locali.

2.4.2 ITALIA: RECEPIMENTO NORMATIVO RECENTE E SVILUPPO DI MODELLI TERRITORIALI DI COMUNITÀ ENERGETICA

2.4.2.1 Quadro normativo e istituzionale

L'*Italia* rappresenta uno dei Paesi pionieri nello sviluppo delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER), sebbene la fase di piena implementazione operativa abbia subito una significativa accelerazione solo negli ultimi anni. Il recepimento della Direttiva (UE) 2018/2001 (RED II) attraverso il Decreto Legislativo 8 novembre 2021, n.199, ha introdotto nell'ordinamento nazionale il modello della Comunità Energetica Rinnovabile come soggetto giuridico autonomo finalizzato alla produzione, condivisione e gestione collettiva dell'energia da fonti rinnovabili.
Il successivo quadro regolatorio definito dal *Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica* (MASE), dall'*Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente* (ARERA) e dal *Gestore dei Servizi Energetici* (GSE) ha progressivamente definito le modalità operative per l'autoconsumo diffuso e per la costituzione delle CER.
Il modello italiano presenta alcune specificità rispetto agli altri contesti europei, in particolare per il ruolo attribuito alla dimensione territoriale e al principio della prossimità energetica. La configurazione

delle comunità energetiche è infatti strettamente collegata al riferimento tecnico della cabina primaria, elemento che influenza la possibilità di aggregazione degli utenti e la scala spaziale degli interventi (Candelise, et al., 2020).

Questa caratteristica determina una forte interconnessione tra pianificazione energetica e pianificazione territoriale, ma evidenzia anche alcune criticità legate alla complessità amministrativa, alla frammentazione istituzionale e alla necessità di coordinamento tra diversi livelli decisionali.

L'analisi dei casi studio evidenzia tuttavia come il modello italiano abbia sviluppato una particolare attenzione alla dimensione istituzionale e sociale della transizione energetica. Numerose esperienze sono infatti nate dall'iniziativa di Comuni, *Unioni montane*, *Gruppi di Azione Locale* (GAL) e società pubbliche territoriali, configurando la CER non solo come infrastruttura energetica, ma come strumento di sviluppo locale.

Le esperienze analizzate mostrano infatti come le comunità energetiche siano progressivamente associate a processi più ampi di: riqualificazione energetica del patrimonio pubblico e privato; valorizzazione delle risorse energetiche locali; contrasto alla marginalizzazione delle aree interne; costruzione di nuove forme di governance pubblico-private; generazione di benefici economici e sociali condivisi.

Rispetto al modello spagnolo, caratterizzato da una forte diffusione di iniziative rurali e agricole, il caso italiano evidenzia una maggiore varietà organizzativa e territoriale, con la presenza di modelli: *Municipality-led*, promossi direttamente dagli enti locali; *Hybrid Developer-led*, basati sulla collaborazione tra amministrazioni, imprese e soggetti tecnici; *Citizen/cooperative-led*, fondati sulla partecipazione diretta degli utenti.

2.4.2.2 Analisi comparativa dei casi studio italiani: modelli di sviluppo, configurazioni territoriali e caratteristiche tecnologiche

Il campione dei casi studio italiani comprende esperienze sviluppate in differenti configurazioni territoriali, evidenziando come il modello CER assuma caratteristiche diverse in relazione alla struttura insediativa, alla disponibilità delle risorse energetiche e alla capacità organizzativa degli attori locali.

L'applicazione della matrice analitica definita nel paragrafo 1.4.3 ha consentito di classificare le iniziative secondo quattro dimensioni principali: modello di sviluppo e governance; tecnologia energetica

prevalente; scala territoriale dell'intervento; relazione tra infrastruttura energetica e contesto territoriale.

Il quadro comparativo completo è riportato nell'Appendice 2 (Figura A.2 8), dove i casi italiani sono classificati secondo le categorie interpretative adottate nella ricerca (Cfr. Cap. 1.4, § 1.4.3).

Dall'analisi emerge una prevalenza di iniziative caratterizzate da un forte coinvolgimento degli enti locali e da una progressiva evoluzione dalla dimensione del singolo edificio verso configurazioni territoriali più ampie.

Nei territori rurali e montani emergono casi quali CER di *Magliano Alpi* (CN); CER di *Roseto Valfortore* (FG); CER *Valle Grana* e *Valle Maira* (CN); REC di *Blufi* (PA); Progetto RECOCER della *Comunità Collinare del Friuli*. Queste esperienze mostrano come la CER venga utilizzata come strumento di sviluppo delle aree interne, integrando produzione energetica, valorizzazione delle risorse locali e collaborazione tra amministrazioni.

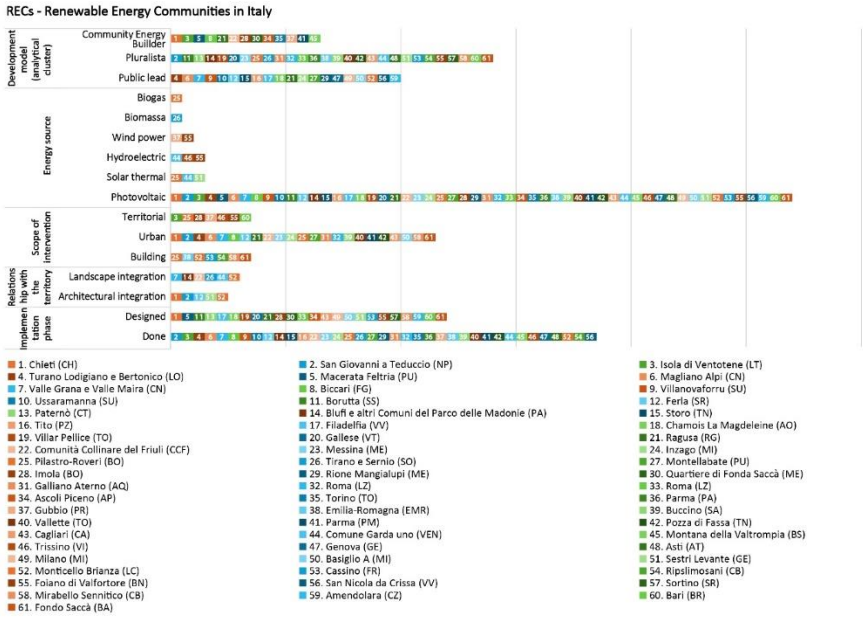


Figura A.2 8.
Quadro comparativo delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) analizzate in *Italia* (IT), classificate per modello di sviluppo, fonti rinnovabili, scala di intervento, implicazioni territoriali e stato di attuazione. Elaborazione dell'autore. Supporto informatico: *Microsoft Excel*.

La CER di *Magliano Alpi* rappresenta uno dei casi più significativi per il carattere sperimentale e replicabile del modello. L'integrazione tra riqualificazione degli edifici pubblici e agricoli, strumenti open-source sviluppati attraverso il progetto ERIGRID e la successiva creazione della *Energy City Hall* evidenziano la possibilità di trasformare una comunità energetica locale in una piattaforma metodologica trasferibile ad altri comuni.

La CER *Valle Grana* e *Valle Maira* introduce invece una dimensione sovracomunale, coinvolgendo 22 comuni alpini e dimostrando come la

comunità energetica possa diventare parte integrante della pianificazione energetica regionale.

Un secondo gruppo comprende i casi legati ai borghi storici e ai processi di rigenerazione urbana.

La REC *ComOn Light* di *Ferla* (SR) rappresenta un esempio emblematico di integrazione tra transizione energetica e valorizzazione del patrimonio storico, attraverso interventi sugli edifici pubblici e una strategia energetica coordinata con la pianificazione climatica locale.

La REC di *Monticello Brianza* evidenzia invece il ruolo della componente paesaggistica e sociale, attraverso impianti fotovoltaici integrati sulle coperture private e la destinazione di parte dei benefici economici a programmi di welfare territoriale.

Nei contesti urbani emergono configurazioni maggiormente complesse.

Il progetto GECO – *Green Energy Community* del quartiere *Roveri-Pilastro* di *Bologna* rappresenta un modello di comunità energetica urbana nel quale produzione rinnovabile, innovazione tecnologica e inclusione sociale vengono integrate all'interno di una strategia di rigenerazione urbana.

Analogamente, la CERTo di *Torino* introduce una dimensione digitale avanzata attraverso sistemi IoT e intelligenza artificiale per la gestione dei dati energetici e il coinvolgimento delle imprese.

Infine, il modello *Garda Uno*, con il coinvolgimento di 43 comuni, rappresenta una delle esperienze italiane più avanzate di comunità energetica territoriale estesa, superando la scala comunale e configurandosi come infrastruttura energetica intercomunale.

2.4.2.3 Governance, tecnologia e relazione territoriale

Dall'analisi comparativa emerge che il principale elemento distintivo del modello italiano riguarda la centralità della governance territoriale. Rispetto a modelli maggiormente orientati alla sola produzione energetica, molte CER italiane attribuiscono agli enti locali un ruolo di attivazione e coordinamento.

Il Comune assume frequentemente funzioni di aggregatore degli utenti; il facilitatore amministrativo; il promotore della pianificazione energetica locale; e garante della distribuzione dei benefici.

Questo ruolo risulta particolarmente evidente nei casi di *Magliano Alpi*, *Ferla*, *Roseto Valfortore* e *Blufi*, dove la comunità energetica viene integrata nelle strategie di sviluppo locale.

Dal punto di vista tecnologico, il fotovoltaico rappresenta la tecnologia dominante grazie alla sua elevata adattabilità e alla possibilità di integrazione con gli edifici pubblici; le abitazioni private; le strutture agricole; e le aree produttive.
Tuttavia, emerge una crescente diversificazione tecnologica attraverso l'idroelettrico nei territori alpini; la biomassa e biogas nelle aree agricole; e i sistemi digitali di gestione energetica.
Un elemento caratterizzante del modello italiano è inoltre la crescente integrazione tra infrastruttura energetica e gestione dei dati. In questo senso assumono particolare rilievo la la piattaforma IoT-AI della CERTo di *Torino*; gli strumenti di simulazione sviluppati con ERIGRID a *Magliano Alpi*; ed i modelli di *business* del progetto RECOCER.
Parallelamente si osserva una progressiva evoluzione verso configurazioni territoriali estese come *Garda Uno*; *Valle Grana* e *Valle Maira*; *Comunità Collinare del Friuli*; *C.E.R.Chiamo Energia*.
Questi casi dimostrano il passaggio della CER da semplice aggregazione energetica locale a strumento di pianificazione territoriale multilivello.

2.4.2.4 Discussione critica dei casi studio italiani: relazione tra comunità energetiche e contesto territoriale

L'analisi complessiva dei casi italiani evidenzia come la comunità energetica rappresenti un modello adattivo, nel quale tecnologia, governance e territorio risultano strettamente interdipendenti.
Nei contesti rurali e montani, come *Magliano Alpi*, *Roseto Valfortore*, *Blufi e Valle Grana-Valle Maira*, la CER assume principalmente una funzione di sviluppo locale.
In questi territori la produzione energetica rinnovabile diventa uno strumento per: rafforzare l'autonomia energetica; valorizzare risorse locali; contrastare lo spopolamento; creare nuove reti collaborative tra comuni.
La principale criticità riguarda tuttavia la capacità amministrativa e tecnica dei piccoli enti locali, che spesso richiede il supporto di soggetti esterni.
Nei borghi storici, come *Ferla* e *Monticello Brianza*, la comunità energetica assume invece una funzione di rigenerazione urbana e paesaggistica. L'utilizzo del patrimonio edilizio esistente consente di integrare la produzione energetica riducendo il consumo di nuovo suolo.

Nei contesti urbani, come *Bologna* e *Torino*, emergono invece potenzialità legate alla maggiore densità energetica, alla disponibilità di superfici produttive e alla possibilità di integrare sistemi digitali avanzati. Tuttavia, la maggiore complessità gestionale richiede modelli di governance più articolati.

Nel complesso, dall'analisi emerge che il valore innovativo delle CER italiane non risiede esclusivamente nella produzione di energia rinnovabile, ma nella capacità di costruire nuove forme di cooperazione territoriale.

La comunità energetica si configura quindi come uno strumento di pianificazione integrata nel quale energia, paesaggio, patrimonio edilizio e comunità locali vengono coordinati all'interno di un unico processo di trasformazione.

Rispetto agli altri casi europei analizzati, il modello italiano si distingue per una forte componente istituzionale e territoriale, nella quale gli enti locali assumono un ruolo centrale nella costruzione di nuovi modelli di governance energetica multilivello.

Le esperienze analizzate mostrano pertanto elevate potenzialità di replicabilità, scalabilità e trasferibilità, soprattutto nei territori caratterizzati da piccoli comuni, patrimonio edilizio diffuso, disponibilità di risorse rinnovabili locali e necessità di strategie di rigenerazione economica e sociale.

2.4.3 FRANCIA: AUTOCONSUMO COLLETTIVO E INTEGRAZIONE DELLE COMUNITÀ ENERGETICHE NELLE STRATEGIE TERRITORIALI

2.4.3.1 Quadro normativo e istituzionale

La *Francia* rappresenta uno dei Paesi europei pionieri nello sviluppo dei modelli di autoconsumo collettivo e di comunità energetiche, caratterizzandosi per un approccio progressivo nel quale la dimensione energetica viene progressivamente integrata all'interno delle strategie territoriali e dei processi di transizione ecologica locale.

Rispetto ad altri contesti europei, il modello francese si è sviluppato inizialmente attorno al concetto di autoconsommation collective, successivamente integrato dal recepimento delle disposizioni europee relative alle *Renewable Energy Communities* (REC) e alle *Citizen Energy Communities* (CEC) introdotte dalle Direttive (UE) 2018/2001 (RED II) e 2019/944.

Il quadro normativo francese ha favorito la diffusione di configurazioni basate sulla produzione decentralizzata, sulla condivisione locale dell'energia e sul coinvolgimento diretto dei cittadini attraverso forme cooperative o associative. L'autoconsumo collettivo rappresenta infatti uno degli strumenti principali attraverso cui la *Francia* ha promosso la produzione distribuita da fonti rinnovabili, consentendo a più utenti situati in prossimità geografica di condividere l'energia prodotta localmente.

Tale impostazione ha favorito una stretta relazione tra sviluppo energetico e pianificazione territoriale, soprattutto attraverso il coinvolgimento degli enti locali, delle intercommunalités e delle strutture cooperative territoriali. La comunità energetica viene quindi interpretata non esclusivamente come un dispositivo tecnico finalizzato alla produzione di energia rinnovabile, ma come uno strumento di partecipazione locale, valorizzazione delle risorse territoriali e rafforzamento dell'autonomia energetica.

L'analisi dei casi studio francesi evidenzia come il modello nazionale presenti una particolare attenzione verso la dimensione comunitaria e cooperativa, con numerose esperienze sviluppate attraverso cittadini organizzati, cooperative energetiche e partenariati pubblico-privati. Rispetto al modello italiano, caratterizzato frequentemente da una forte iniziativa municipale e da una funzione propulsiva degli enti locali, il caso francese mostra una maggiore presenza di configurazioni citizen-led e cooperative, nelle quali la comunità assume direttamente il ruolo di soggetto promotore e gestore dell'iniziativa.

Le esperienze analizzate evidenziano inoltre una significativa capacità di adattamento del modello alle diverse condizioni territoriali francesi. Le comunità energetiche vengono infatti sviluppate in contesti differenti, comprendendo territori rurali e piccoli comuni; aree urbane consolidate; territori insulari e periferici; aree caratterizzate dalla presenza di patrimonio storico e paesaggistico. In tali contesti, la produzione energetica viene integrata con obiettivi più ampi quali: riduzione della dipendenza energetica locale; valorizzazione delle risorse rinnovabili territoriali; coinvolgimento diretto dei cittadini; sviluppo di economie locali basate sulla transizione energetica; recupero e riqualificazione del patrimonio edilizio esistente.

Il quadro francese mostra quindi un modello nel quale la comunità energetica rappresenta un elemento di innovazione istituzionale e

sociale, capace di collegare produzione rinnovabile, partecipazione civica e strategie locali di adattamento climatico.

2.4.3.2 Analisi comparativa dei casi studio francesi

L'analisi dei casi studio francesi nel quadro comparativo complessivo delle iniziative analizzate secondo le categorie interpretative adottate nella ricerca (Cfr. Cap. 1.4, § 1.4.3) è riportato in Appendice 2 (Figura A.2 9), evidenzia una notevole varietà di configurazioni organizzative e territoriali, nelle quali il modello dell'autoconsumo collettivo viene declinato secondo differenti scale di intervento e differenti modalità di governance.

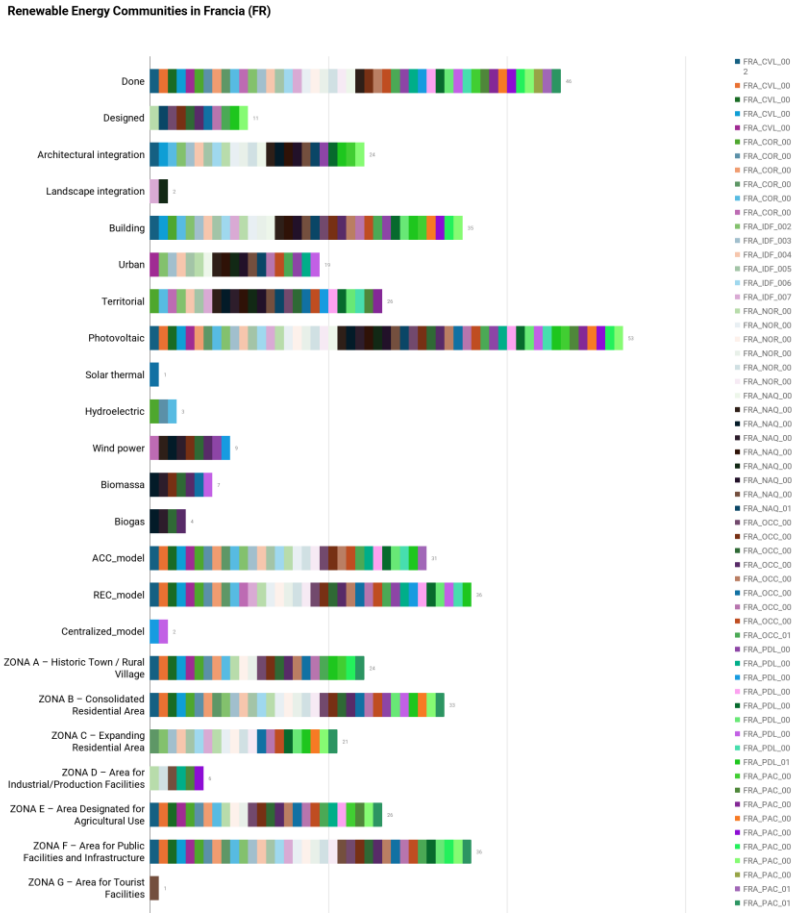


Figura A.2 9. Quadro comparativo delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) analizzate in *Francia* (FR), classificate per modello di sviluppo, fonti rinnovabili, scala di intervento, implicazioni territoriali e stato di attuazione. Elaborazione dell'autore. Supporto informatico: *Microsoft Excel*.

Un primo gruppo significativo riguarda le esperienze sviluppate in contesti rurali e piccoli comuni, caratterizzate da un forte ruolo delle cooperative energetiche e dalla partecipazione diretta degli abitanti.

La comunità energetica *Rahin Coop Énergies*, sviluppata nel territorio di *Rahin et Chérimont – Pays de Lure*, rappresenta un esempio emblematico di modello cooperativo locale. L'iniziativa nasce dalla volontà di valorizzare le risorse energetiche territoriali attraverso una configurazione basata sull'autoconsumo collettivo e sul

coinvolgimento diretto dei cittadini. La presenza di una potenza installata significativa e il coinvolgimento di cittadini, autorità locali, imprese e organizzazioni territoriali evidenziano come il progetto superi la dimensione esclusivamente energetica, configurandosi come strumento di cooperazione locale e di sviluppo territoriale.

Un approccio analogo emerge nella Coop *Solaire Nord Franche-Comté*, sviluppata ad *Anjoutey* nel territorio della *Franche-Comté*. Il progetto rappresenta un modello avanzato di produzione fotovoltaica cittadina, nel quale la cooperativa assume il ruolo di soggetto aggregatore per la realizzazione di impianti distribuiti. L'esperienza evidenzia come il modello cooperativo francese consenta di mobilitare capitale sociale e finanziario locale attraverso forme di partecipazione collettiva, favorendo la replicabilità dell'iniziativa in altri territori rurali.

Un secondo gruppo di casi riguarda invece territori urbani e periurbani nei quali la comunità energetica viene integrata all'interno di strategie più ampie di transizione energetica locale.

La *Com.TOIT Énergie Citoyenne*, sviluppata nella comunità di *Vichy Communauté*, rappresenta un esempio significativo di integrazione tra amministrazione locale e partecipazione cittadina. Il progetto mostra come gli enti territoriali possano assumere una funzione abilitante attraverso la creazione di condizioni favorevoli allo sviluppo dell'autoconsumo collettivo, favorendo il coordinamento tra cittadini, istituzioni e soggetti tecnici.

Analogamente, il progetto VoisiWATT, sviluppato nel territorio di *Valence Romans*, evidenzia una configurazione orientata alla produzione fotovoltaica distribuita e alla costruzione di una rete energetica locale. Il caso dimostra la capacità del modello francese di adattarsi anche a territori urbani intermedi, nei quali la comunità energetica diventa uno strumento per integrare produzione rinnovabile e gestione collettiva dei consumi.

Un ulteriore esempio è rappresentato da *L'Éclatante*, sviluppata a *Lons-le-Saunier*. L'iniziativa evidenzia un modello caratterizzato dalla collaborazione tra soggetti locali e dalla valorizzazione della produzione fotovoltaica come elemento di transizione energetica urbana. Il progetto conferma la tendenza francese verso comunità energetiche di piccola e media scala, nelle quali la prossimità territoriale costituisce il principale elemento organizzativo.

Un caso particolarmente rilevante per la relazione tra energia e paesaggio è rappresentato dalla *Centrale solaire citoyenne du Mont-*

Saint-Michel, sviluppata nell'ambito dell'autoconsumo collettivo territoriale. L'esperienza assume particolare interesse poiché si colloca in un contesto caratterizzato da elevato valore storico e paesaggistico. La produzione fotovoltaica viene quindi interpretata non come infrastruttura isolata, ma come elemento integrato all'interno di un territorio sensibile, nel quale la compatibilità paesaggistica rappresenta un requisito fondamentale.

Infine, il caso della *Communauté d'Agglomération de Bastia – projets autoconsommation collective* evidenzia l'applicazione del modello francese nei territori insulari. In *Corsica*, la comunità energetica assume una funzione strategica legata alla riduzione della dipendenza energetica esterna e al rafforzamento della resilienza locale. L'iniziativa mostra come l'autoconsumo collettivo possa essere applicato anche in contesti urbani consolidati attraverso l'utilizzo delle coperture edilizie e delle infrastrutture esistenti. Nel complesso, il campione francese evidenzia quindi tre principali configurazioni: comunità cooperative rurali basate sulla partecipazione diretta dei cittadini; comunità urbane fondate sull'integrazione tra enti locali e utenti energetici; e comunità territoriali strategiche sviluppate in contesti caratterizzati da specifiche condizioni ambientali o paesaggistiche.

2.4.3.3 Governance, tecnologia e relazione territoriale

L'analisi comparativa dei casi francesi evidenzia come il principale elemento distintivo del modello nazionale sia rappresentato dalla centralità della governance partecipativa.

Rispetto a modelli nei quali l'ente pubblico assume frequentemente il ruolo di promotore principale, il sistema francese mostra una maggiore presenza di configurazioni cooperative e citizen-led, nelle quali cittadini e comunità locali partecipano direttamente alla progettazione, al finanziamento e alla gestione delle infrastrutture energetiche.

Le esperienze analizzate mostrano infatti una pluralità di modelli organizzativi: *Cooperative Citizen-led Model*, particolarmente diffuso nei casi *Rahin Coop Énergies* e *Coop Solaire Nord Franche-Comté*; *Municipality-led Model*, presente nelle esperienze nelle quali gli enti locali assumono funzione di coordinamento; *Hybrid Developer-led Model*, caratterizzato dalla collaborazione tra amministrazioni, soggetti tecnici e comunità locali.

In questo quadro, la governance non rappresenta solamente un elemento gestionale, ma costituisce il principale strumento attraverso

cui la comunità energetica costruisce consenso territoriale e legittimazione sociale.

Dal punto di vista tecnologico, il fotovoltaico rappresenta la tecnologia dominante in tutti i casi analizzati, grazie alla sua adattabilità ai differenti contesti territoriali.

Gli impianti vengono prevalentemente integrati attraverso: coperture degli edifici pubblici e privati; strutture produttive;
superfici urbane disponibili; infrastrutture territoriali esistenti.

Questa configurazione consente di limitare il consumo di nuovo suolo e favorire una progressiva integrazione della produzione energetica nel tessuto costruito.

Un elemento caratterizzante del modello francese riguarda inoltre il rapporto tra infrastruttura energetica e paesaggio. Diversamente dai grandi impianti centralizzati, le comunità energetiche analizzate privilegiano interventi distribuiti e di piccola scala, maggiormente compatibili con il contesto locale.

Il caso del *Mont-Saint-Michel* evidenzia in particolare come la produzione rinnovabile possa essere integrata anche in territori sottoposti a forte tutela paesaggistica, attraverso strategie orientate alla mitigazione visiva e alla compatibilità territoriale.

Dal punto di vista della scala territoriale emerge inoltre una progressiva evoluzione dal singolo progetto energetico verso configurazioni territoriali più ampie. Le esperienze di *Vichy Communauté*, *Bastia* e *Valence Romans* mostrano infatti come l'autoconsumo collettivo possa diventare uno strumento di pianificazione energetica locale, capace di coordinare produzione, consumo e partecipazione sociale.

2.4.3.4 Discussione critica dei casi studio in Francia: relazione tra comunità energetiche e contesto territoriale

L'analisi dei casi francesi evidenzia come il modello delle comunità energetiche presenti una forte capacità di adattamento alle differenti configurazioni territoriali.

Nei territori rurali, come *Rahin Coop Énergies* e *Coop Solaire Nord Franche-Comté*, la comunità energetica assume principalmente una funzione di sviluppo locale e valorizzazione delle risorse territoriali. In questi contesti la produzione energetica diventa uno strumento per rafforzare il senso di appartenenza, creare nuove forme di cooperazione economica e aumentare l'autonomia energetica locale.

La principale criticità riguarda tuttavia la capacità organizzativa necessaria per avviare e mantenere tali iniziative. I modelli cooperativi richiedono infatti un elevato livello di partecipazione sociale e competenze tecniche specifiche.

Nei contesti urbani, come *Bastia*, *Vichy Communauté* e *Valence Romans*, la comunità energetica assume invece una funzione maggiormente infrastrutturale e gestionale. La presenza di una maggiore densità abitativa e di numerosi utenti consente una maggiore capacità di aggregazione, ma aumenta contemporaneamente la complessità organizzativa.

Nei territori caratterizzati da particolare valore paesaggistico, come il *Mont-Saint-Michel*, emerge invece il tema della compatibilità tra produzione energetica e tutela del territorio. Questi casi dimostrano come le comunità energetiche possano rappresentare un'alternativa ai modelli energetici centralizzati, grazie alla possibilità di integrare gli impianti all'interno del patrimonio costruito e del paesaggio esistente.

Nel complesso, il caso francese evidenzia che il valore innovativo delle comunità energetiche non risiede esclusivamente nella produzione di energia rinnovabile, ma nella capacità di costruire nuove forme di relazione tra cittadini, istituzioni e territorio.

Rispetto al modello italiano, il sistema francese appare maggiormente orientato verso forme cooperative e partecipative dal basso, mentre il modello italiano mostra una maggiore centralità dell'attore pubblico locale come soggetto promotore.

La principale caratteristica del modello francese risiede quindi nella capacità della comunità energetica di diventare uno strumento di democratizzazione della transizione energetica, nel quale produzione, consumo e governance vengono ricondotti alla dimensione locale.

Le esperienze analizzate mostrano elevate potenzialità di replicabilità e trasferibilità, soprattutto nei territori caratterizzati da risorse solari disponibili, presenza di comunità locali attive e necessità di rafforzare l'autonomia energetica attraverso modelli distribuiti e partecipativi.

2.4.4 SPAGNA: ACCELERAZIONE DELLE COMUNITÀ ENERGETICHE E INTEGRAZIONE CON LA PIANIFICAZIONE CLIMATICA NAZIONALE

2.4.4.1 Quadro normativo e istituzionale

La Spagna (ES) rappresenta uno dei contesti europei nei quali lo sviluppo delle comunità energetiche rinnovabili ha conosciuto una

crescita particolarmente significativa, favorita dalla progressiva integrazione degli obiettivi europei di decarbonizzazione all'interno delle strategie energetiche nazionali e regionali.

Il quadro normativo spagnolo si inserisce nel processo europeo avviato dalla Direttiva (UE) 2018/2001 RED II, che introduce il concetto di *Renewable Energy Community* (REC), e dalla Direttiva (UE) 2019/944, relativa alle *Citizen Energy Communities* (CEC). Tali direttive hanno definito un nuovo paradigma energetico basato sulla partecipazione attiva degli utenti finali, sull'autoconsumo collettivo e sulla produzione decentralizzata da fonti rinnovabili.

A livello nazionale, il principale riferimento strategico è rappresentato dal *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima* (PNIEC), che definisce gli obiettivi della transizione energetica spagnola attraverso l'aumento della quota di energia rinnovabile, la riduzione delle emissioni climalteranti e la progressiva decentralizzazione del sistema energetico. Il piano attribuisce un ruolo crescente ai sistemi distribuiti, all'autoconsumo e alle configurazioni collettive di produzione e condivisione dell'energia.

Un elemento determinante nello sviluppo delle comunità energetiche spagnole è rappresentato dal superamento delle precedenti limitazioni normative sull'autoconsumo, che ha consentito una maggiore diffusione dei sistemi fotovoltaici distribuiti e delle forme di autoconsumo condiviso. Tale evoluzione ha favorito la nascita di numerose iniziative locali promosse da comuni, cooperative, imprese e cittadini, con una forte differenziazione territoriale.

Il modello spagnolo presenta infatti una struttura istituzionale multilivello. Sebbene il quadro normativo generale sia definito a livello nazionale, molte iniziative sono state sviluppate attraverso programmi regionali e locali, con particolare dinamismo in alcune Comunità Autonome quali *Catalogna*, *Andalusia*, *Navarra*, *Paesi Baschi*, *Galizia*, *Asturie* ed *Estremadura*. Le amministrazioni regionali e locali hanno assunto un ruolo importante nella promozione delle comunità energetiche attraverso strumenti di finanziamento, supporto tecnico e programmi dedicati alla transizione energetica.

Dal punto di vista territoriale, il quadro normativo nazionale si collega inoltre alle strategie di pianificazione energetica e ambientale relative all'integrazione paesaggistica degli impianti rinnovabili. Il PNIEC promuove infatti un utilizzo razionale del territorio, privilegiando

superfici già antropizzate, aree industriali, coperture edilizie e terreni degradati al fine di limitare il consumo di nuovo suolo.

Particolare rilevanza assume anche il tema dell'integrazione tra produzione energetica e sistemi agricoli. Nel contesto mediterraneo spagnolo, caratterizzato da elevata radiazione solare, scarsità idrica e fenomeni crescenti di stress climatico, si stanno sviluppando modelli innovativi di agrivoltaico finalizzati a combinare produzione energetica, adattamento climatico e tutela delle colture. Esperienze sperimentali come il *PVpico Project* in *Murcia*, basato sull'utilizzo di pannelli mobili integrati con serre agricole, evidenziano una possibile evoluzione verso sistemi nei quali la produzione energetica diventa parte integrante delle strategie territoriali agricole.

In questo quadro, le comunità energetiche spagnole non possono essere interpretate esclusivamente come strumenti tecnologici, ma come dispositivi territoriali inseriti all'interno di un più ampio processo di trasformazione energetica, ambientale e sociale.

2.4.4.2 Analisi comparativa dei casi studio in Spagna

L'analisi dei casi studio selezionati nel quadro comparativo complessivo delle iniziative analizzate secondo le categorie interpretative adottate nella ricerca (Cfr. Cap. 1.4, § 1.4.3), riportato in Appendice 2 (Figura A.2 10), evidenzia come il modello spagnolo delle comunità energetiche sia caratterizzato da una forte diversificazione territoriale, nella quale la configurazione energetica risulta strettamente legata alla struttura insediativa, alle attività economiche prevalenti e alle caratteristiche paesaggistiche locali. Il campione analizzato comprende esperienze distribuite in numerose Comunità Autonome spagnole, includendo territori rurali, urbani, agricoli, produttivi e insulari. Tale distribuzione consente di osservare come il fenomeno delle comunità energetiche non sia limitato a una specifica tipologia territoriale, ma assuma configurazioni differenti in relazione al contesto locale.

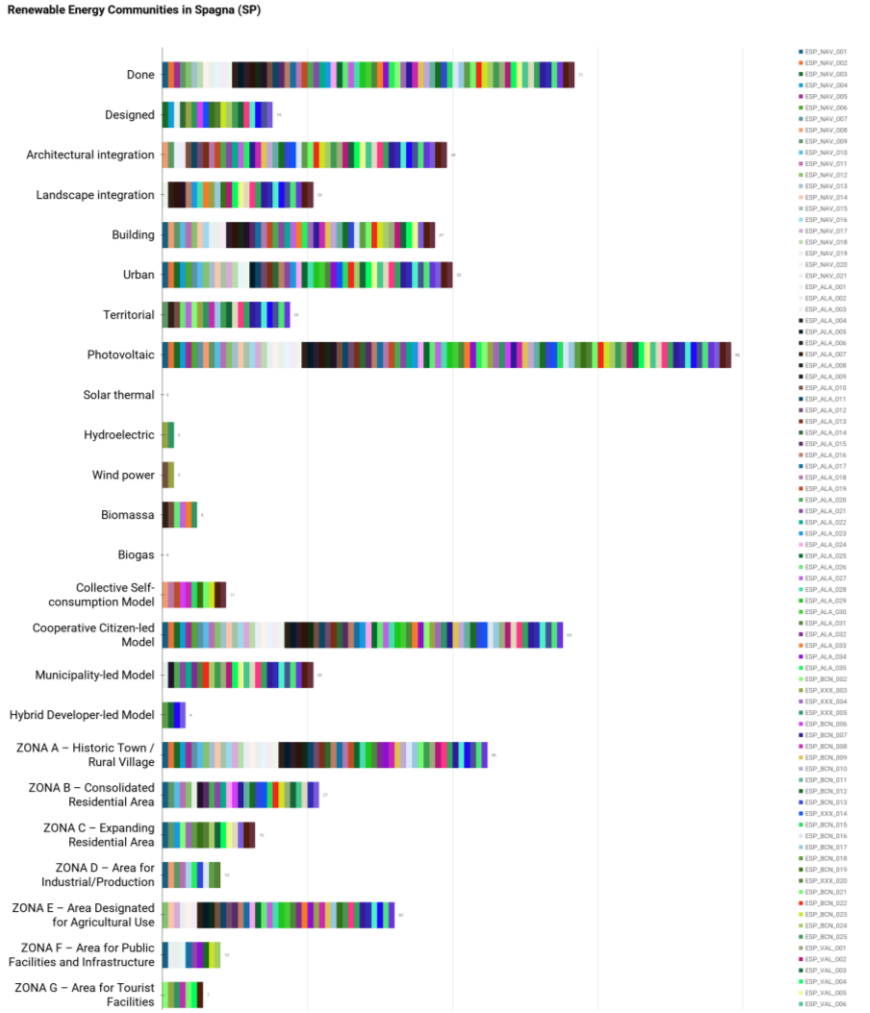


Figura A.2 10.
Quadro comparativo delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) analizzate in Spagna (ES), classificate per modello di sviluppo, fonti rinnovabili, scala di intervento, implicazioni territoriali e stato di attuazione. Elaborazione dell'autore. Supporto informatico: *Microsoft Excel*.

Una quota significativa dei casi riguarda piccoli comuni rurali e borghi storici, appartenenti alla Zona A – *Historic Town / Rural Village*, dove la comunità energetica assume una funzione di valorizzazione territoriale oltre che energetica. In questa categoria rientrano esperienze quali *Villaverde (Lagrán)*, *Tavèrnoles*, *Escarrilla*, *Ansó*, *La Tejería*, *Biscarrués*, *Torremocha de Jarama*, *Rascafría*, *El Escorial*, *Montánchez*, *Garciaz*, *Benquerencia*, *Casar de Cáceres*, *Entrimo*, *El Franco*, *Lena*, *San Martín de Jubera*, *Santa Marina* e *Larriba*. In questi contesti la produzione energetica si integra con il patrimonio edilizio esistente, con gli edifici pubblici e con le reti sociali locali, assumendo spesso una funzione strategica nei processi di sviluppo rurale e contrasto alla marginalizzazione territoriale.

Un secondo gruppo significativo è rappresentato dai contesti agricoli e rurali produttivi appartenenti alla Zona E – *Area Designated for Agricultural Use*. I casi di *Agrícola Sant Isidre de la Fatarella*, *Hacedera Solar (Soria)*, *Padul*, *Camposancos*, *Buchabade* e altre iniziative galiziane mostrano come la comunità energetica possa essere integrata con le

attività agricole attraverso impianti fotovoltaici distribuiti, utilizzo delle coperture esistenti e possibile valorizzazione delle biomasse locali. In questi casi l'energia diventa una componente complementare dell'economia rurale, contribuendo alla riduzione dei costi energetici e alla valorizzazione delle risorse territoriali.

Il campione comprende inoltre esperienze sviluppate in contesti urbani consolidati, appartenenti alla Zona B – *Consolidated Residential Area*, come il progetto di *Barcelona* (*Bon Pastor district*), oltre a casi nei sistemi urbani baschi e catalani quali *Bergara*, *Eibar*, *Tolosa*, *Urnieta*, *Andoain*, *Zizurkil*, *Aizarnazabal*, *Beizama* e *Tarragona*. In tali contesti la comunità energetica assume prevalentemente il ruolo di strumento per l'autoconsumo collettivo, la rigenerazione energetica del patrimonio edilizio e il coinvolgimento degli abitanti attraverso modelli organizzativi più complessi.

Una configurazione specifica emerge nei territori insulari e turistici della Zona G – *Area for Tourist Facilities*, rappresentata dai casi delle *Canarie*, tra cui *La Graciosa*, *Valleseco*, *Siete Palmas* e *Sevilla de Goro* (*Gran Canaria*). Qui la comunità energetica assume una funzione strategica legata alla resilienza energetica, alla riduzione della dipendenza dalle reti esterne e alla compatibilità tra sviluppo turistico e sostenibilità ambientale.

Dal punto di vista tecnologico, la quasi totalità dei casi analizzati evidenzia una prevalenza del fotovoltaico distribuito, generalmente integrato nelle coperture degli edifici esistenti o nelle infrastrutture locali. Nei contesti rurali e agricoli emerge inoltre una maggiore integrazione con biomassa e sistemi energetici legati alle risorse territoriali.

Dal punto di vista organizzativo, il modello prevalente è quello *Hybrid Developer-led Model*, caratterizzato dalla collaborazione tra cittadini, amministrazioni locali, imprese e soggetti promotori. Tale configurazione ricorre in numerosi casi come *Casar de Cáceres*, *Entrimo*, *Llena Conecta*, *Camposancos*, *Buchabade*, *Hacedera Solar* e *Agrícola Sant Isidre de la Fatarella*, mostrando come la transizione energetica locale si sviluppi attraverso forme di governance condivisa più che attraverso modelli esclusivamente centralizzati.

Nel complesso, l'analisi comparativa evidenzia che il modello spagnolo delle comunità energetiche si caratterizza per un'elevata capacità di adattamento territoriale. La tecnologia rimane prevalentemente la stessa, ma cambia il ruolo assunto dalla comunità energetica:

strumento di sviluppo locale nei piccoli comuni rurali, dispositivo di rigenerazione urbana nei quartieri consolidati, supporto alla competitività agricola nelle aree produttive e infrastruttura di resilienza nei territori insulari.

2.4.4.3 Governance, tecnologia e relazione territoriale

L'analisi dei casi studio evidenzia come lo sviluppo delle comunità energetiche in Spagna sia caratterizzato da un modello di governance fortemente policentrico. Pur in presenza di un quadro normativo nazionale comune, definito dal recepimento delle direttive europee e dal *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima* (PNIEC), l'attuazione concreta delle comunità energetiche è fortemente influenzata dalle iniziative promosse dalle Comunità Autonome e dagli enti locali.

I casi analizzati mostrano infatti una distribuzione territoriale estremamente ampia, comprendendo *Catalogna*, *Aragona*, *Galizia*, *Asturie*, *Cantabria*, *La Rioja*, *Estremadura*, *Comunità di Madrid*, *Andalusia* e *Canarie*. Tale diffusione evidenzia come la governance non sia guidata esclusivamente dallo Stato centrale, ma si sviluppi attraverso una collaborazione multilivello tra amministrazioni regionali, comuni, cooperative, cittadini e imprese locali.

Dal punto di vista organizzativo prevale il modello *Hybrid Developer-led*, osservabile in numerosi casi quali *Casar de Cáceres*, *Entrimo*, *Llena Conecta*, *Camposancos*, *Buchabade*, *Agrícola Sant Isidre de la Fatarella* e *Hacedera Solar*, nei quali soggetti promotori, amministrazioni comunali e comunità locali condividono responsabilità e benefici della produzione energetica.

Dal punto di vista tecnologico emerge una netta predominanza del fotovoltaico distribuito, generalmente installato sulle coperture degli edifici esistenti, mentre il ricorso alla biomassa interessa prevalentemente i contesti rurali e agricoli. Nei territori caratterizzati da produzioni agricole, come *La Fatarella*, *Padul* e *Soria*, la produzione energetica tende a integrarsi con il sistema produttivo locale, anticipando modelli riconducibili all'agrivoltaico e alla valorizzazione delle biomasse residuali.

Questa tendenza risulta coerente con l'evoluzione della pianificazione energetica nazionale. Il PNIEC promuove infatti un utilizzo prioritario di superfici già antropizzate o degradate, limitando il consumo di nuovo suolo e favorendo l'integrazione paesaggistica degli impianti. Analogamente, le procedure autorizzative prevedono forme di coordinamento tra valutazioni ambientali e pianificazione territoriale,

con particolare attenzione agli impianti di accumulo energetico, per i quali sono introdotte procedure semplificate per interventi di minore dimensione e specifiche linee guida per la mitigazione paesaggistica.
Parallelamente, il contesto climatico mediterraneo sta orientando lo sviluppo di soluzioni innovative che combinano produzione energetica e adattamento climatico. Esperienze sperimentali, come il *PVpico Project* nella Regione di *Murcia*, dimostrano il potenziale dell'agrivoltaico mediante pannelli mobili installati sopra serre orticole, mentre altre iniziative riguardano coltivazioni permanenti quali oliveti, mandorleti e vigneti. Sebbene tali sperimentazioni non coincidano direttamente con i casi studio analizzati, esse rappresentano l'evoluzione tecnologica verso cui si stanno orientando numerose comunità energetiche rurali spagnole.
Nel complesso, i casi studio mostrano come la relazione tra tecnologia e territorio costituisca il principale elemento distintivo del modello spagnolo: la comunità energetica non viene progettata secondo uno schema uniforme, ma si adatta alle caratteristiche fisiche, produttive e sociali dei diversi contesti territoriali, favorendo un'integrazione tra produzione rinnovabile, sviluppo locale e pianificazione paesaggistica.

2.4.4.4 Discussione critica dei casi studio in Spagna (SP): relazione tra comunità energetiche e contesto territoriale

1. Il territorio come elemento determinante nello sviluppo delle comunità energetiche

L'analisi comparativa dei casi studio spagnoli evidenzia come la comunità energetica non rappresenti un modello tecnologico standardizzato, ma un dispositivo territoriale adattivo, la cui configurazione dipende dalle caratteristiche insediative, economiche e paesaggistiche del contesto nel quale viene sviluppata.
La distribuzione dei casi analizzati mostra una netta prevalenza di iniziative localizzate in piccoli comuni rurali, aree agricole e territori periferici, mentre risultano meno frequenti le esperienze nei contesti urbani densi e produttivi. Questa distribuzione evidenzia come la prima fase di diffusione delle comunità energetiche in Spagna sia stata particolarmente favorita nei territori caratterizzati da:
forte identità locale;
presenza di amministrazioni comunali attive;
disponibilità di superfici edilizie e territoriali;
necessità di rafforzare l'autonomia energetica locale.

In tali contesti la comunità energetica assume quindi una funzione che supera la semplice produzione di energia rinnovabile, diventando uno strumento di sviluppo locale, contrasto alla marginalizzazione territoriale e valorizzazione delle risorse endogene.

2. Relazione tra configurazione territoriale e modello energetico

La classificazione territoriale adottata (Zone A–G) permette di evidenziare come differenti contesti producano differenti configurazioni energetiche.

Zona A – *Historic Town / Rural Village*

I casi appartenenti ai piccoli centri rurali, come *Torremocha de Jarama*, *Rascafría*, *El Escorial*, *Montánchez*, *Garciaz*, *Benquerencia*, *Casar de Cáceres*, *San Martín de Jubera*, *Santa Marina*, *Larriba*, *Buchabade*, *El Franco* e *Lena*, rappresentano il gruppo più numeroso.

In questi territori la comunità energetica è strettamente collegata alla dimensione sociale del luogo. L'energia diventa un elemento di coesione comunitaria e di valorizzazione del patrimonio esistente attraverso: coperture fotovoltaiche; edifici pubblici; infrastrutture comunali; e piccoli impianti distribuiti.

Il modello prevalente è quello *Hybrid Developer-led*, nel quale amministrazioni locali, cittadini e soggetti promotori collaborano alla realizzazione del progetto.

La principale criticità riguarda la dipendenza da competenze tecniche e finanziarie esterne nella fase iniziale, ma il livello di replicabilità risulta molto elevato nei piccoli comuni europei.

Zona B – *Consolidated Residential Area*

Nei contesti urbani consolidati, come il quartiere Bon Pastor di Barcellona e Siete Palmas nelle Canarie, la comunità energetica assume caratteristiche differenti.

L'obiettivo principale diventa l'autoconsumo collettivo attraverso:

- installazioni fotovoltaiche sugli edifici;
- condivisione dell'energia tra residenti;
- processi di rigenerazione energetica del patrimonio edilizio.

Rispetto ai territori rurali aumenta il potenziale quantitativo grazie alla maggiore densità abitativa, ma cresce anche la complessità gestionale dovuta alla necessità di coordinare numerosi utenti con interessi e capacità economiche differenti.

Zona E – *Area Designated for Agricultural Use*

Le aree agricole rappresentano uno degli ambiti più interessanti del modello spagnolo.

Casi come *Agrícola Sant Isidre de la Fatarella*; *Hacedera Solar* (*Soria*); *Padul*; *Camposancos*; *Entrimo*; *Buchabade* mostrano come la produzione energetica possa integrarsi con il sistema produttivo locale. In questi contesti l'energia rinnovabile diventa una componente dell'economia rurale attraverso: fotovoltaico su edifici agricoli; utilizzo di superfici già antropizzate; valorizzazione della biomassa; possibile evoluzione verso sistemi agrivoltaici.

La principale criticità riguarda il possibile conflitto tra produzione energetica e uso agricolo del territorio. Per questo motivo risultano maggiormente coerenti gli interventi basati sull'integrazione con strutture esistenti e non sulla trasformazione di suolo agricolo libero.

Zona F e Zona G – Funzione pubblica e territori turistici

Gli edifici pubblici rappresentano un elemento trasversale a molti casi analizzati, poiché spesso costituiscono il primo elemento catalizzatore della comunità energetica.

Municipi, scuole e strutture pubbliche svolgono una doppia funzione: infrastruttura energetica; luogo di aggregazione sociale.

Nei territori turistici e insulari, come *La Graciosa*, *Valleseco e Sevilla de Goro*, la comunità energetica assume invece un ruolo strategico per aumentare la resilienza energetica locale e ridurre la dipendenza dalle reti esterne.

3. Criticità e prospettive future del modello spagnolo

Dall'analisi emerge che il modello spagnolo presenta una forte capacità di adattamento territoriale, ma anche alcune criticità.

Le principali problematiche riguardano: difficoltà amministrative nella fase iniziale; necessità di competenze tecniche specialistiche; complessità della governance nei contesti urbani; rischio di concentrazione degli investimenti nei territori più organizzati.

Parallelamente, emergono importanti prospettive di sviluppo:

integrazione con sistemi di accumulo; crescita dell'agrivoltaico nei territori mediterranei; maggiore coinvolgimento delle aree industriali; sviluppo di comunità energetiche integrate con mobilità elettrica e *smart grid*.

L'analisi dei casi studio spagnoli dimostra che la CER non può essere interpretata esclusivamente come un modello tecnico di produzione decentralizzata, ma come una forma di innovazione territoriale.

Nei piccoli comuni rurali essa agisce come strumento di sviluppo locale e rafforzamento della comunità; nei quartieri urbani come dispositivo di rigenerazione energetica; nelle aree agricole come integrazione tra

produzione energetica e sistema economico locale; nei territori turistici come strumento di resilienza.

Il principale elemento distintivo del modello spagnolo risiede quindi nella capacità di adattare la tecnologia energetica alle caratteristiche specifiche del territorio. La replicabilità delle comunità energetiche dipende meno dalla tecnologia utilizzata e maggiormente dalla presenza di condizioni favorevoli di governance, partecipazione sociale e integrazione con la struttura spaziale locale.

2.4.5 REGNO UNITO: PIANIFICAZIONE ENERGETICA TERRITORIALE, COMMUNITY ENERGY E MODELLI PARTECIPATIVI EXTRA UE

L'analisi del Regno Unito introduce una prospettiva differente rispetto ai modelli precedentemente osservati nei contesti europei continentali, poiché il processo di transizione energetica non viene interpretato esclusivamente attraverso la diffusione delle comunità energetiche locali, ma attraverso la costruzione di un sistema territoriale integrato nel quale governance istituzionale, innovazione tecnologica e partecipazione comunitaria concorrono alla definizione di nuovi modelli energetici sostenibili.

In questo quadro, il Regno Unito rappresenta un caso di particolare interesse non soltanto per il numero e la varietà delle iniziative di community energy sviluppate nei diversi contesti regionali, ma soprattutto per la capacità di integrare tali esperienze all'interno di strategie più ampie di pianificazione energetica locale. La transizione energetica britannica si caratterizza infatti per il progressivo superamento di un approccio basato esclusivamente sulla realizzazione di singoli interventi infrastrutturali, evolvendo verso una visione sistemica nella quale il territorio viene considerato come un insieme complesso di relazioni tra produzione energetica, consumo, edifici, mobilità, infrastrutture digitali e comunità locali. A differenza di altri contesti analizzati, nei quali la comunità energetica costituisce prevalentemente uno strumento di aggregazione degli utenti finali attorno alla produzione e condivisione dell'energia rinnovabile, nel Regno Unito essa assume una funzione più ampia, diventando parte integrante di un processo di pianificazione territoriale orientato al raggiungimento degli obiettivi *Net Zero*. In questa prospettiva, le iniziative locali non rappresentano elementi isolati, ma componenti di

una strategia multilivello capace di collegare indirizzi nazionali, programmi regionali e capacità operative delle comunità.

Il caso britannico evidenzia pertanto una particolare convergenza tra approcci *top-down* e *bottom-up*, nella quale la definizione degli obiettivi strategici da parte delle istituzioni nazionali e regionali viene accompagnata dalla partecipazione attiva degli attori locali. Questa integrazione costituisce uno degli aspetti più rilevanti del modello britannico, poiché consente di combinare capacità programmatoria, disponibilità di dati e innovazione tecnologica con conoscenza territoriale, accettabilità sociale e radicamento locale degli interventi.

2.4.5.1 Quadro normativo e istituzionale: dalla community energy alla pianificazione energetica locale integrata

Il quadro britannico della transizione energetica si è sviluppato attraverso un progressivo ampliamento del concetto di community energy, inizialmente associato a iniziative locali promosse da cittadini, cooperative e organizzazioni territoriali, fino a diventare parte di una strategia più articolata di pianificazione energetica locale. Pur collocandosi al di fuori del quadro normativo europeo successivamente alla *Brexit*, il Regno Unito ha mantenuto una forte coerenza con i principi generali della transizione energetica sostenibile sviluppati a livello internazionale, fondati sulla decarbonizzazione del sistema energetico, sulla diffusione delle fonti rinnovabili e sul coinvolgimento degli attori locali nei processi decisionali.

Un elemento distintivo del modello britannico è rappresentato dall'introduzione di strumenti di pianificazione energetica territoriale quali i *Local Area Energy Plans* (LAEP), che hanno progressivamente assunto il ruolo di strumenti strategici per tradurre gli obiettivi nazionali di decarbonizzazione in scenari energetici adattati alle caratteristiche specifiche dei territori.

Attraverso tali strumenti, il territorio non viene considerato esclusivamente come superficie destinata alla localizzazione degli impianti energetici, ma come un sistema dinamico nel quale devono essere integrate diverse componenti: fabbisogni energetici locali, caratteristiche edilizie, disponibilità di risorse rinnovabili, infrastrutture di rete, sistemi di mobilità e condizioni socioeconomiche della popolazione.

In questo processo assume particolare rilevanza il ruolo di organizzazioni dedicate all'innovazione energetica, tra cui *Catapult*

Energy Systems[33], che hanno contribuito alla sperimentazione di metodologie integrate per la progettazione dei futuri sistemi energetici territoriali. Il valore di tali iniziative risiede nella capacità di creare connessioni tra ricerca, industria, amministrazioni pubbliche e comunità locali, favorendo un approccio basato sull'uso dei dati, sulla modellazione degli scenari energetici e sulla valutazione degli impatti territoriali.

Il modello britannico evidenzia quindi una transizione concettuale significativa: dalla comunità energetica intesa come semplice aggregazione di produttori e consumatori, alla comunità come componente di un sistema territoriale complesso nel quale la governance energetica diventa strumento di pianificazione dello sviluppo sostenibile.

2.4.5.2 Analisi comparativa dei casi studio britannici: dalla scala comunitaria alla scala territoriale

L'analisi dei casi studio britannici evidenzia una forte diversificazione territoriale, che costituisce uno degli elementi più significativi del modello del Regno Unito. I casi considerati, distribuiti tra *Galles*, *Scozia*, *Inghilterra* sud-occidentale e altre aree regionali, mostrano come i processi di transizione energetica assumano configurazioni differenti in relazione alle caratteristiche paesaggistiche, insediative ed economiche dei territori coinvolti.

Nel contesto gallese, rappresentato dai numerosi casi distribuiti tra *Cardiff*, *Swansea*, *Newport*, *Gwynedd*, *Pembrokeshire*, *Powys*, *Anglesey* e altri territori locali, emerge una particolare attenzione alla relazione tra energia e identità territoriale. Il Galles presenta infatti una forte articolazione tra aree urbane, territori rurali, zone costiere e paesaggi caratterizzati da elevato valore ambientale. In questo contesto, la transizione energetica non riguarda esclusivamente l'incremento della produzione rinnovabile, ma anche la necessità di garantire compatibilità paesaggistica e integrazione con le caratteristiche locali. Le esperienze gallesi mostrano come la pianificazione energetica debba confrontarsi con il tema dell'accettabilità degli interventi, soprattutto nei territori caratterizzati dalla presenza di aree naturali sensibili o da forti valori identitari. La qualità del processo di

[33] Sito on-line: Innovazione energetica a zero emissioni nette | Catapulta dei Sistemi Energetici

transizione viene quindi valutata non soltanto in termini quantitativi, attraverso la capacità produttiva installata, ma anche attraverso la capacità degli interventi di inserirsi armonicamente nei sistemi territoriali esistenti.

Il caso scozzese presenta invece caratteristiche differenti. Le esperienze localizzate nelle *Highlands*, nell'*Aberdeenshire*, nelle regioni di *Glasgow*, *Lothians* e *Tayside* evidenziano il ruolo della dimensione territoriale estesa e delle condizioni di marginalità geografica. In tali contesti, caratterizzati da bassa densità abitativa, grandi distanze e significativa disponibilità di risorse rinnovabili, la community energy assume una funzione strategica nella costruzione di autonomia energetica locale e nella valorizzazione economica delle risorse territoriali.

La transizione energetica scozzese evidenzia quindi un rapporto diretto tra produzione energetica, resilienza territoriale e sviluppo locale, mostrando come le comunità energetiche possano contribuire non soltanto alla decarbonizzazione, ma anche al rafforzamento delle economie periferiche.

Diversamente, i casi riferibili alle aree urbane e metropolitane dell'*Inghilterra* sud-occidentale e alle *Combined Authorities* mostrano un progressivo passaggio verso una scala maggiormente sistemica. In tali contesti la questione energetica viene integrata con altri settori strategici quali edilizia, mobilità elettrica, infrastrutture digitali e gestione dei servizi urbani.

Questi casi rappresentano il passaggio dalla comunità energetica come iniziativa locale alla pianificazione energetica territoriale come processo integrato, nel quale il territorio viene interpretato come un vero e proprio ecosistema energetico.

2.4.5.3 Governance multilivello, innovazione tecnologica e relazione con il territorio

Uno degli aspetti maggiormente caratterizzanti del modello britannico riguarda la struttura della governance energetica, fondata sulla cooperazione tra diversi livelli decisionali e sulla capacità di integrare competenze istituzionali, tecnologiche e sociali. La transizione energetica nel *Regno Unito* si sviluppa infatti attraverso una struttura multilivello nella quale il livello nazionale definisce gli obiettivi strategici di decarbonizzazione, mentre il livello regionale e locale traduce tali obiettivi attraverso strumenti di pianificazione adattati alle specificità territoriali.

In questo sistema, le amministrazioni locali assumono un ruolo sempre più rilevante come soggetti intermedi capaci di coordinare interessi diversi: dagli operatori energetici ai cittadini, dalle imprese agli enti di ricerca. Parallelamente, le comunità locali garantiscono il radicamento sociale dei processi di trasformazione, contribuendo alla definizione delle priorità territoriali e alla costruzione del consenso attorno agli interventi.

La peculiarità britannica risiede quindi nella capacità di superare una contrapposizione tradizionale tra pianificazione istituzionale e iniziativa comunitaria. Il modello emerge infatti dalla loro integrazione: la governance pubblica fornisce capacità strategica, strumenti regolativi e risorse, mentre la partecipazione locale garantisce conoscenza del territorio, legittimità sociale e adattamento degli interventi alle condizioni specifiche dei luoghi.

In questo quadro, *Catapult Energy Systems* rappresenta un elemento centrale, poiché agisce come infrastruttura di connessione tra innovazione tecnologica e pianificazione territoriale. Attraverso metodologie basate su dati, simulazioni energetiche e scenari futuri, contribuisce a trasformare la progettazione energetica da un processo settoriale a un processo sistemico. Il contributo principale di questo approccio consiste nella possibilità di valutare preventivamente gli effetti territoriali della transizione, considerando non soltanto la quantità di energia prodotta, ma anche la qualità complessiva del risultato: integrazione paesaggistica, efficienza infrastrutturale, equità sociale e capacità di adattamento locale.

2.4.5.4 Discussione critica dei casi nel Regno Unito: qualità della transizione energetica attraverso l'integrazione top-down e bottom-up

L'analisi dei casi britannici evidenzia un modello di transizione energetica differente rispetto alle esperienze osservate negli altri Paesi europei considerati. Il principale elemento distintivo non risiede esclusivamente nella diffusione delle comunità energetiche, ma nella capacità di costruire un sistema coordinato nel quale pianificazione, innovazione tecnologica e partecipazione convergono verso obiettivi territoriali condivisi.

Il *Regno Unito* rappresenta quindi un caso nel quale la qualità della transizione energetica viene perseguita attraverso l'integrazione tra dimensione quantitativa e qualitativa. Da un lato emerge la necessità di incrementare la produzione da fonti rinnovabili e raggiungere gli obiettivi di neutralità climatica; dall'altro emerge la necessità di

garantire che tali trasformazioni siano compatibili con le caratteristiche ambientali, paesaggistiche e sociali dei territori interessati.

Rispetto al modello italiano, nel quale la comunità energetica rappresenta principalmente uno strumento di innovazione sociale, inclusione territoriale e valorizzazione delle risorse locali; rispetto al modello francese, maggiormente orientato alla strutturazione dell'autoconsumo collettivo come dispositivo di organizzazione energetica locale; rispetto al modello austriaco, caratterizzato dalla forte diffusione delle *Erneuerbare-Energie-Gemeinschaften* attraverso un quadro normativo favorevole e una capillare partecipazione degli utenti; e rispetto al modello spagnolo, nel quale le comunità energetiche si configurano come strumenti di cooperazione territoriale fortemente connessi alla dimensione municipale, alle cooperative energetiche e alla rigenerazione delle economie locali, il *Regno Unito* propone un paradigma maggiormente orientato alla pianificazione strategica del sistema energetico territoriale.

La *Spagna* rappresenta infatti un modello intermedio particolarmente significativo nel panorama europeo. A differenza dell'esperienza austriaca, basata su un quadro regolatorio estremamente favorevole alla diffusione delle comunità energetiche locali, e dell'esperienza britannica, caratterizzata da una forte componente di pianificazione energetica sistemica, il modello spagnolo evidenzia il ruolo delle comunità energetiche come strumenti di trasformazione territoriale capaci di integrare produzione rinnovabile, partecipazione sociale e sviluppo locale.

Nei contesti spagnoli analizzati emerge una particolare attenzione alla dimensione municipale e alla capacità delle comunità energetiche di diventare dispositivi di riattivazione territoriale, soprattutto nei contesti rurali, periferici e caratterizzati da condizioni di vulnerabilità energetica. In questo senso, la transizione energetica non viene interpretata esclusivamente come sostituzione tecnologica delle fonti fossili, ma come processo di costruzione di nuove relazioni tra cittadini, amministrazioni locali, imprese e territorio.

La peculiarità spagnola risiede quindi nella capacità di combinare una dimensione fortemente partecipativa con una crescente integrazione istituzionale, attraverso un modello nel quale le amministrazioni locali assumono un ruolo di facilitazione e coordinamento, mentre cittadini

e cooperative energetiche contribuiscono alla definizione e alla gestione dei nuovi sistemi energetici locali.

La lettura comparativa evidenzia pertanto quattro principali configurazioni europee della transizione energetica comunitaria:

- *Italia*: comunità energetica come strumento di innovazione sociale, inclusione territoriale e valorizzazione delle risorse locali;
- *Francia*: autoconsumo collettivo e comunità energetiche come strumenti di organizzazione locale della produzione e del consumo energetico;
- *Spagna*: comunità energetiche come strumenti di cooperazione territoriale, rigenerazione locale e sviluppo energetico partecipato;
- *Austria*: diffusione capillare delle comunità energetiche attraverso un quadro normativo favorevole e una forte strutturazione istituzionale;
- *Regno Unito*: pianificazione energetica territoriale integrata attraverso governance multilivello, innovazione tecnologica e partecipazione comunitaria.

L'analisi comparativa mostra quindi come non esista un unico modello europeo di comunità energetica, ma differenti modalità attraverso cui i territori interpretano la transizione sostenibile in relazione alle proprie caratteristiche istituzionali, territoriali e socioeconomiche.

Il caso britannico assume pertanto un ruolo metodologico rilevante nella ricerca perché dimostra come la transizione sostenibile non possa essere valutata esclusivamente sulla base della quantità di energia rinnovabile prodotta o del numero di comunità attivate, ma debba essere interpretata attraverso la capacità dei territori di costruire sistemi energetici coerenti con le proprie caratteristiche ambientali, paesaggistiche e sociali.

In questa prospettiva, il *Regno Unito* rappresenta un riferimento significativo per lo sviluppo di metodologie capaci di integrare pianificazione energetica, qualità territoriale e governance partecipativa, evidenziando come la sostenibilità energetica costituisca non soltanto una trasformazione tecnologica, ma un processo complesso di costruzione territoriale condivisa.

Allo stesso tempo, il confronto con *Spagna*, *Italia*, *Francia* e *Austria* consente di evidenziare come la qualità della transizione energetica derivi dalla capacità di combinare differenti livelli di azione: la

pianificazione istituzionale, l'innovazione tecnologica, la partecipazione degli utenti e la compatibilità degli interventi con i caratteri ambientali e paesaggistici dei luoghi.

2.4.6 SINTESI DELL'ANALISI DEI CASI STUDIO

L'applicazione della matrice comparativa ai cinque contesti nazionali evidenzia come le Comunità Energetiche Rinnovabili assumano configurazioni differenti in relazione ai sistemi normativi, alle strutture istituzionali e alle caratteristiche territoriali.

I casi analizzati mostrano che il livello di maturità di una comunità energetica non dipende esclusivamente dalla disponibilità tecnologica o dagli incentivi economici, ma dalla capacità del modello di integrare:

- governance partecipativa;
- pianificazione territoriale;
- infrastrutture energetiche;
- caratteristiche paesaggistiche;
- strumenti finanziari.

Le informazioni raccolte nelle schede analitiche costituiscono pertanto la base dati per la successiva fase comparativa (Capitolo 2.5), nella quale gli indicatori derivanti dalla matrice saranno elaborati attraverso rappresentazioni grafiche e analisi incrociate finalizzate all'individuazione di pattern ricorrenti, fattori abilitanti e condizioni di trasferibilità dei modelli analizzati.

2.5 ANALISI COMPARATIVA DEI BISOGNI TERRITORIALI E DELLE CRITICITÀ PER L'ATTUAZIONE DELLE COMUNITÀ ENERGETICHE RINNOVABILI

L'analisi comparativa dei casi studio sviluppati nei diversi contesti nazionali evidenzia come l'attuazione delle Comunità Energetiche Rinnovabili non possa essere interpretata esclusivamente come un processo di diffusione tecnologica delle fonti energetiche rinnovabili, ma debba essere considerata come una trasformazione complessa dei sistemi territoriali, nella quale interagiscono dimensioni energetiche, ambientali, paesaggistiche, istituzionali e sociali.

L'esperienza dei cinque Paesi analizzati – Italia, Francia, Spagna, Austria e Regno Unito – mostra infatti come le comunità energetiche assumano configurazioni differenti in relazione alle caratteristiche territoriali, ai modelli di governance e al livello di maturità normativa raggiunto. Pur nella diversità dei percorsi nazionali, emerge un

elemento comune: la necessità di superare una visione settoriale della transizione energetica, orientata esclusivamente all'incremento della produzione da fonti rinnovabili, a favore di un approccio sistemico capace di integrare produzione energetica, infrastrutture, ambiente, paesaggio e partecipazione delle comunità locali.
In questo quadro, i bisogni territoriali individuati attraverso l'analisi comparata possono essere ricondotti a quattro dimensioni interdipendenti: energia, ambiente, paesaggio e governance. Tali dimensioni non rappresentano ambiti separati, ma componenti di un unico sistema territoriale nel quale la qualità della transizione dipende dalla capacità di coordinare obiettivi energetici e condizioni locali.

2.5.1 BISOGNI TERRITORIALI EMERGENTI DALLA TRANSIZIONE ENERGETICA: INTEGRAZIONE ENERGIA–AMBIENTE–PAESAGGIO–GOVERNANCE

La prima evidenza emersa dall'analisi comparata riguarda la necessità di interpretare le comunità energetiche come strumenti di pianificazione territoriale e non esclusivamente come configurazioni tecniche di produzione e consumo condiviso dell'energia.
Dal punto di vista energetico, il principale bisogno riguarda la capacità dei territori di integrare quantità crescenti di energia rinnovabile mantenendo equilibrio, sicurezza e resilienza dei sistemi locali. L'incremento della produzione distribuita da fonti rinnovabili richiede infatti un progressivo adattamento delle reti elettriche, una gestione più efficiente dei flussi energetici e un maggiore coordinamento tra produzione, consumo e sistemi di accumulo.
I casi analizzati evidenziano tuttavia differenti modalità di risposta. In Italia, la crescita delle comunità energetiche è fortemente condizionata dalla necessità di armonizzare sviluppo delle FER, capacità della rete e strumenti autorizzativi. In Austria emerge invece un modello caratterizzato da una diffusione capillare delle comunità energetiche, favorito da un quadro normativo più consolidato, nel quale il tema centrale diventa la capacità di integrare tali iniziative con la pianificazione territoriale locale. La *Francia* evidenzia invece l'importanza del coordinamento tra autoconsumo collettivo, attori locali e strategie energetiche urbane, mentre la Spagna mostra la necessità di governare una forte espansione delle fonti rinnovabili in territori caratterizzati da rilevanti potenzialità solari ed eoliche. Il Regno Unito introduce infine un modello maggiormente orientato alla

pianificazione energetica territoriale integrata, attraverso strumenti quali il *Local Area Energy Planning* e piattaforme di supporto alla progettazione sistemica.

Accanto alla dimensione energetica emerge con crescente rilevanza la componente ambientale. L'implementazione delle CER richiede infatti una valutazione preventiva degli effetti cumulativi degli interventi energetici sul territorio, considerando non soltanto la riduzione delle emissioni climalteranti, ma anche il consumo di suolo, la trasformazione degli ecosistemi e l'utilizzo efficiente delle risorse locali.

L'analisi dei casi studio evidenzia come la transizione energetica debba essere accompagnata da criteri localizzativi capaci di privilegiare soluzioni compatibili con le caratteristiche ambientali esistenti, favorendo ad esempio l'utilizzo di superfici già urbanizzate, edifici pubblici, aree industriali dismesse e infrastrutture esistenti.

In tale prospettiva, il tema paesaggistico assume un ruolo centrale. La diffusione delle infrastrutture energetiche rinnovabili introduce infatti una trasformazione fisica dei territori che richiede una valutazione non limitata agli aspetti autorizzativi, ma orientata alla costruzione di un equilibrio tra produzione energetica e qualità dei paesaggi.

Le esperienze analizzate mostrano approcci differenti: mentre alcuni territori italiani e spagnoli evidenziano criticità legate alla possibile conflittualità tra sviluppo delle FER e tutela del paesaggio, i contesti austriaci e britannici mostrano una maggiore attenzione alla compatibilità territoriale attraverso processi di pianificazione preventiva e strumenti di valutazione integrata.

Infine, la dimensione della governance rappresenta il fattore trasversale che condiziona l'efficacia delle altre componenti. Le comunità energetiche richiedono infatti un modello decisionale capace di integrare diversi livelli istituzionali, soggetti privati, operatori energetici e comunità locali.

L'analisi comparata evidenzia come la presenza di un quadro normativo favorevole costituisca una condizione necessaria ma non sufficiente. La capacità di trasformare gli obiettivi energetici in risultati territoriali concreti dipende dalla presenza di strumenti di coordinamento, capacità amministrativa, disponibilità di dati e processi partecipativi strutturati.

2.5.2 CRITICITÀ INFRASTRUTTURALI, DIGITALI E DI INTEGRAZIONE DEI SISTEMI ENERGETICI

Una seconda criticità emersa dall'analisi comparativa riguarda la difficoltà di integrare le nuove configurazioni energetiche distribuite all'interno dei sistemi infrastrutturali esistenti.

La crescente diffusione delle fonti rinnovabili comporta infatti un passaggio da un modello energetico centralizzato a uno maggiormente distribuito, nel quale milioni di piccoli produttori e consumatori diventano parte attiva del sistema. Tale trasformazione richiede reti più flessibili, strumenti di monitoraggio avanzati e capacità di gestione dinamica dei flussi energetici.

Nei casi italiani analizzati emerge una particolare criticità legata alla frammentazione infrastrutturale e alla difficoltà di coordinamento tra sviluppo delle FER e capacità della rete locale. Analogamente, in Spagna la rapida crescita della produzione rinnovabile pone il tema della gestione delle infrastrutture di rete e dell'integrazione territoriale dei grandi impianti.

I modelli francese e austriaco evidenziano invece una maggiore capacità di sviluppare configurazioni locali di produzione e consumo, pur mantenendo la necessità di migliorare l'integrazione tra comunità energetiche, reti intelligenti e sistemi di accumulo.

Particolarmente significativo risulta il caso britannico, nel quale la pianificazione energetica locale viene supportata da strumenti digitali e modelli previsionali capaci di integrare dati relativi a consumi, infrastrutture, mobilità, edifici e potenziale rinnovabile.

L'analisi evidenzia quindi un fabbisogno comune: lo sviluppo di piattaforme integrate capaci di collegare dati energetici, ambientali e territoriali. L'utilizzo di strumenti GIS, BIM, *Digital Twin* e sistemi data-driven rappresenta una condizione fondamentale per costruire scenari affidabili e supportare decisioni coerenti con le caratteristiche dei territori.

La disponibilità tecnologica, tuttavia, deve essere accompagnata da una reale interoperabilità dei dati e da standard comuni di analisi. L'assenza di tali strumenti rischia infatti di generare processi decisionali frammentati e difficoltà nella valutazione degli impatti cumulativi.

2.5.3 COMPATIBILITÀ AMBIENTALE E PAESAGGISTICA DELLA TRANSIZIONE ENERGETICA

Uno degli elementi maggiormente evidenziati dalla comparazione internazionale riguarda la necessità di integrare gli obiettivi energetici con la tutela dei valori ambientali e paesaggistici.

La transizione energetica comporta inevitabilmente una trasformazione spaziale dei territori attraverso nuove infrastrutture, impianti di produzione, sistemi di accumulo e reti di distribuzione. Pertanto, la sostenibilità delle CER non può essere valutata esclusivamente attraverso indicatori energetici, ma deve comprendere anche la capacità degli interventi di inserirsi coerentemente nei contesti locali.

Il caso italiano evidenzia una particolare complessità dovuta alla sovrapposizione tra normativa energetica, ambientale e paesaggistica, che può generare rallentamenti autorizzativi e conflitti territoriali.

La *Francia* mostra invece un modello maggiormente orientato alla valorizzazione delle iniziative locali e alla progressiva integrazione dell'autoconsumo collettivo nella pianificazione urbana.

La *Spagna* rappresenta un caso emblematico della necessità di bilanciare una forte espansione delle fonti rinnovabili con la tutela degli ecosistemi e dei paesaggi rurali.

L'*Austria* evidenzia invece una maggiore attenzione alla relazione tra infrastrutture energetiche e qualità territoriale, soprattutto nei contesti caratterizzati da elevato valore paesaggistico.

Il *Regno Unito* introduce un approccio particolarmente significativo attraverso strumenti di pianificazione energetica locale che consentono di valutare preventivamente scenari territoriali complessi, riducendo conflitti e migliorando la qualità delle decisioni.

Da tale confronto emerge la necessità di superare una logica esclusivamente autorizzativa, introducendo metodologie integrate capaci di valutare contemporaneamente benefici energetici, impatti ambientali e compatibilità paesaggistica.

2.5.4 GOVERNANCE MULTILIVELLO E PARTECIPAZIONE COME FATTORI ABILITANTI

L'ultima dimensione emersa dall'analisi riguarda la governance, identificata come elemento determinante per la riuscita delle comunità energetiche.

La comparazione internazionale dimostra infatti che il successo delle CER non dipende soltanto dalla disponibilità di tecnologie o incentivi economici, ma dalla capacità dei sistemi territoriali di costruire processi decisionali coordinati e inclusivi.

L'*Italia* evidenzia un forte interesse locale verso le comunità energetiche, ma anche una persistente frammentazione istituzionale che limita la capacità di coordinamento tra livelli amministrativi differenti.

La *Francia* mostra una maggiore integrazione tra iniziative locali e strumenti pubblici di pianificazione, mentre l'Austria evidenzia il ruolo centrale delle comunità locali e delle cooperative energetiche nella costruzione di modelli partecipativi consolidati.

La *Spagna* presenta un modello in rapida evoluzione, nel quale la crescita delle iniziative richiede un progressivo rafforzamento delle strutture organizzative e della capacità amministrativa locale.

Il *Regno Unito* rappresenta invece un riferimento particolarmente significativo per l'integrazione tra governance istituzionale, innovazione tecnologica e partecipazione comunitaria. L'esperienza britannica dimostra come la combinazione tra strategie nazionali, pianificazione locale e coinvolgimento degli *stakeholder* possa favorire una transizione energetica maggiormente coerente con le specificità territoriali.

Nel complesso, l'analisi evidenzia che la principale criticità non risiede nell'assenza di strumenti normativi o tecnologici, ma nella difficoltà di integrarli all'interno di un quadro operativo comune.

La transizione energetica richiede pertanto modelli di governance capaci di coordinare differenti livelli decisionali, armonizzare strumenti di pianificazione e garantire processi partecipativi informati.

L'analisi comparata dei casi studio evidenzia come la diffusione delle CER rappresenti un processo profondamente dipendente dalle condizioni territoriali, istituzionali e paesaggistiche dei diversi contesti.

Pur nella diversità dei modelli osservati, emerge un elemento comune: la necessità di superare una concezione esclusivamente tecnologica della transizione energetica, adottando un approccio sistemico nel quale energia, ambiente, paesaggio e governance siano considerati componenti interdipendenti di un unico processo territoriale.

Le esperienze analizzate mostrano che la qualità della transizione non può essere misurata esclusivamente attraverso indicatori quantitativi, quali capacità installata o numero di comunità attivate, ma attraverso la capacità dei territori di costruire sistemi energetici coerenti con le proprie caratteristiche ambientali e sociali.

Le principali criticità individuate riguardano pertanto la frammentazione della governance, la difficoltà di integrazione tra pianificazione energetica e territoriale, la limitata interoperabilità dei dati e la necessità di rafforzare processi partecipativi strutturati.

Tali evidenze costituiscono il presupposto metodologico per lo sviluppo del modello proposto nei capitoli successivi, orientato alla definizione di strumenti integrati per una pianificazione energetica territoriale sostenibile, partecipata e compatibile con i valori ambientali e paesaggistici dei territori.

2.6 GOVERNANCE MULTILIVELLO DELLE FER: REGIMI AUTORIZZATIVI, RETE ELETTRICA E STRUMENTI DIGITALI DI SUPPORTO

L'analisi comparativa dei casi studio evidenzia come l'attuazione delle Fonti Energetiche Rinnovabili (FER) e delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) sia fortemente condizionata dalla capacità dei sistemi di governance di coordinare differenti livelli decisionali. La transizione energetica non dipende infatti esclusivamente dalla disponibilità di risorse rinnovabili o dalla presenza di incentivi economici, ma dalla possibilità di integrare pianificazione energetica, procedure autorizzative, capacità infrastrutturale della rete e caratteristiche territoriali.

I diversi modelli nazionali analizzati mostrano configurazioni differenti: mentre alcuni contesti hanno sviluppato sistemi maggiormente integrati tra pianificazione energetica e territoriale, altri evidenziano una maggiore frammentazione tra livelli istituzionali, strumenti autorizzativi e disponibilità di dati. Tale differenza incide direttamente sulla capacità dei territori di sviluppare FER e CER coerenti con le condizioni ambientali, paesaggistiche e socio-economiche locali.

In questo quadro, gli strumenti digitali assumono una funzione abilitante, poiché consentono di integrare informazioni energetiche, territoriali e ambientali a supporto dei processi decisionali. Modelli digitali della rete elettrica, piattaforme GIS, database territoriali e

sistemi di simulazione possono contribuire a migliorare la valutazione preventiva degli interventi, individuare criticità infrastrutturali e favorire una maggiore coerenza tra obiettivi energetici e compatibilità territoriale.

L'analisi viene pertanto articolata secondo tre livelli interconnessi:

- livello nazionale, relativo alla definizione degli obiettivi strategici, alla sicurezza del sistema elettrico e alla pianificazione delle infrastrutture di rete;
- livello regionale, relativo alla mediazione tra strategie nazionali, criteri localizzativi e procedure autorizzative;
- livello locale, relativo all'attuazione territoriale, al ruolo delle CER e all'integrazione con strumenti urbanistici e processi partecipativi.

Questa lettura multilivello costituisce la base conoscitiva per lo sviluppo di un modello integrato energia–territorio–digitale finalizzato a migliorare la qualità dei processi autorizzativi e della pianificazione energetica territoriale.

2.6.1 LIVELLO NAZIONALE: PIANIFICAZIONE STRATEGICA, RETE ELETTRICA E COORDINAMENTO DEL SISTEMA ENERGETICO

Il livello nazionale definisce gli indirizzi generali della transizione energetica attraverso strumenti di programmazione quali il Piano Nazionale Integrato Energia e Clima (PNIEC) e la pianificazione dello sviluppo della rete elettrica nazionale. In questa scala prevale una logica strategica orientata alla sicurezza energetica, alla decarbonizzazione e all'integrazione progressiva delle FER nel sistema elettrico.

La principale criticità riguarda il rapporto tra crescita della produzione rinnovabile e capacità infrastrutturale della rete. La localizzazione delle risorse energetiche non sempre coincide infatti con la distribuzione dei consumi e con la disponibilità della rete di trasmissione, generando squilibri territoriali, congestioni e rallentamenti nell'attuazione degli interventi.

I regimi autorizzativi nazionali, pur garantendo un coordinamento unitario per gli interventi di maggiore rilevanza, possono risultare poco sensibili alle specificità territoriali quando non sono accompagnati da strumenti capaci di integrare informazioni ambientali, paesaggistiche e infrastrutturali.

In tale prospettiva, il modello digitale della rete elettrica assume un ruolo strategico come strumento di supporto alla decisione, consentendo di valutare preventivamente la capacità di connessione, simulare scenari energetici e migliorare il coordinamento tra sviluppo delle FER e pianificazione territoriale.
Il livello nazionale evidenzia quindi una condizione caratterizzata da elevata capacità strategica, ma da una necessità di maggiore integrazione con le specificità territoriali e con gli strumenti conoscitivi disponibili alle scale inferiori.

2.6.2 LIVELLO REGIONALE: CRITERI LOCALIZZATIVI, AUTORIZZAZIONI E INTEGRAZIONE TERRITORIALE

Il livello regionale rappresenta la scala di raccordo tra gli obiettivi nazionali e l'attuazione concreta degli interventi energetici. In questo ambito vengono definiti criteri localizzativi, procedure autorizzative e strumenti di pianificazione capaci di orientare lo sviluppo delle FER in relazione alle caratteristiche territoriali.
L'analisi comparativa evidenzia tuttavia come la principale criticità sia rappresentata dalla disomogeneità dei sistemi regionali, sia in termini normativi sia nella capacità di integrare energia, ambiente e paesaggio. La presenza di criteri differenti tra territori può generare incertezza procedurale, tempi autorizzativi variabili e difficoltà nella valutazione degli impatti cumulativi.
Le esperienze più avanzate mostrano invece come il livello regionale possa assumere una funzione di coordinamento attraverso strumenti informativi integrati, osservatori energetico-ambientali e sistemi di supporto alla pianificazione. In tali condizioni, la Regione non opera esclusivamente come soggetto autorizzativo, ma come piattaforma di connessione tra dati, amministrazioni locali e strategie energetiche.
Il rafforzamento di questa scala richiede pertanto strumenti interoperabili capaci di integrare dati relativi alla rete elettrica, al potenziale FER, ai vincoli ambientali e alle caratteristiche paesaggistiche, migliorando la qualità delle decisioni e riducendo i conflitti territoriali.

2.6.3 LIVELLO LOCALE: COMUNITÀ ENERGETICHE RINNOVABILI, PIANIFICAZIONE TERRITORIALE E PARTECIPAZIONE

Il livello locale rappresenta la dimensione nella quale la transizione energetica assume una concreta configurazione territoriale. È infatti

alla scala comunale e sovracomunale che gli interventi FER interagiscono direttamente con sistemi insediativi, valori paesaggistici, caratteristiche ambientali e bisogni delle comunità.

Le CER costituiscono uno degli strumenti più significativi di questa trasformazione poiché introducono una modalità di produzione e gestione dell'energia fondata sulla partecipazione degli attori locali e sulla valorizzazione delle risorse territoriali.

L'analisi dei casi studio evidenzia tuttavia che la diffusione delle CER dipende dalla capacità delle amministrazioni locali di integrare strumenti diversi: pianificazione urbanistica, strategie climatiche, dati energetici, informazioni ambientali e processi partecipativi. La principale criticità risiede quindi nella frammentazione delle conoscenze e nella limitata interoperabilità degli strumenti disponibili.

Le esperienze più avanzate, in particolare quelle caratterizzate da modelli di pianificazione energetica locale integrata, mostrano l'efficacia di approcci basati sull'utilizzo combinato di dati territoriali, strumenti digitali e processi partecipativi. Tali strumenti consentono di individuare opportunità localizzative, valutare compatibilità ambientali e costruire strategie condivise con gli *stakeholder*.

In questa prospettiva, le CER non devono essere interpretate esclusivamente come configurazioni energetiche distribuite, ma come dispositivi territoriali capaci di collegare produzione energetica, qualità del paesaggio e sviluppo locale.

L'analisi multilivello evidenzia che la principale sfida della transizione energetica non riguarda esclusivamente l'aumento della capacità rinnovabile installata, ma la capacità dei sistemi territoriali di coordinare infrastrutture, procedure autorizzative, strumenti digitali e processi partecipativi.

Il livello nazionale garantisce indirizzi strategici e sicurezza del sistema energetico; il livello regionale svolge una funzione di mediazione e integrazione territoriale; il livello locale rappresenta la scala nella quale FER e CER possono essere trasformate in strumenti di sviluppo sostenibile.

Le criticità individuate convergono verso la necessità di un modello integrato capace di superare la frammentazione tra energia, ambiente, paesaggio e governance. Tale esigenza costituisce il presupposto metodologico per il successivo sviluppo di un modello integrato di *Governance*, Pianificazione e Localizzazione, orientato alla costruzione

di processi decisionali più coerenti, trasparenti e territorialmente adattivi.

2.6.4 CRITICITÀ DEI PROCESSI AUTORIZZATIVI E FRAMMENTAZIONE TRA PIANIFICAZIONE ENERGETICA, AMBIENTALE E TERRITORIALE

L'analisi dei processi autorizzativi relativi agli impianti da fonti energetiche rinnovabili e alle configurazioni territoriali associate alle CER evidenzia un elemento critico comune: la distanza tra il livello di integrazione previsto dal quadro normativo e la capacità effettiva degli strumenti di pianificazione di operare in modo coordinato.

Il sistema italiano dispone infatti di numerosi strumenti dedicati alla programmazione energetica, alla valutazione ambientale e alla pianificazione territoriale; tuttavia, tali strumenti risultano spesso caratterizzati da una limitata interoperabilità operativa. La coesistenza di piani energetici, strumenti urbanistici, valutazioni ambientali e procedure autorizzative genera una configurazione frammentata, nella quale le decisioni vengono frequentemente assunte secondo logiche settoriali e sequenziali anziché attraverso una visione integrata del territorio.

Un primo elemento di criticità riguarda il ruolo della Valutazione Ambientale Strategica (VAS), concepita dalla Direttiva 2001/42/CE come strumento di integrazione preventiva degli aspetti ambientali nella pianificazione. Sebbene formalmente orientata a supportare la definizione delle alternative e degli indirizzi strategici, nella pratica applicativa essa presenta livelli di efficacia variabili, con una capacità ancora limitata di incidere sulle scelte localizzative delle infrastrutture energetiche e sulla gestione degli impatti cumulativi.

Un secondo elemento riguarda la governance multilivello. La distribuzione delle competenze tra Stato, Regioni ed enti locali consente una maggiore articolazione territoriale delle decisioni, ma determina anche differenze nei criteri localizzativi, nelle procedure autorizzative e nella disponibilità di strumenti conoscitivi. Tale frammentazione può generare incertezza procedurale, difficoltà di coordinamento e conflitti tra obiettivi energetici nazionali e specificità ambientali e paesaggistiche locali.

Un ulteriore fattore critico è rappresentato dalla limitata integrazione dei sistemi informativi a supporto delle decisioni. La disponibilità di dati energetici, territoriali e ambientali risulta spesso distribuita tra

piattaforme non interoperabili, riducendo la possibilità di elaborare scenari integrati, valutare preventivamente la compatibilità degli interventi e supportare processi decisionali trasparenti.

Nel complesso, emerge quindi un divario tra integrazione normativa e integrazione operativa: mentre il quadro europeo e nazionale promuove una transizione energetica fondata su coordinamento multilivello, sostenibilità ambientale e partecipazione territoriale, gli strumenti attuativi risultano ancora prevalentemente organizzati secondo approcci settoriali.

Questa criticità assume particolare rilevanza nel caso delle CER, la cui efficacia non dipende esclusivamente dalla disponibilità tecnologica o dagli incentivi economici, ma dalla capacità di integrare produzione energetica, caratteristiche territoriali, vincoli ambientali e processi partecipativi. La necessità individuata non riguarda pertanto la creazione di nuovi strumenti di pianificazione, ma il miglioramento della capacità di coordinamento tra quelli esistenti attraverso procedure integrate, basi informative condivise e strumenti digitali di supporto decisionale.

Tale esigenza costituisce il presupposto metodologico per lo sviluppo del modello proposto nei capitoli successivi, finalizzato alla costruzione di un sistema integrato capace di connettere pianificazione energetica, valutazione territoriale e attuazione progettuale.

2.7 GAP TECNOLOGICI, NORMATIVI E SOCIALI NELLA PIANIFICAZIONE DELLE FER E DELLE CER

L'analisi comparata dei sistemi energetici e dei processi autorizzativi evidenzia come la principale criticità della transizione energetica non risieda esclusivamente nella disponibilità di risorse rinnovabili o nella capacità installativa degli impianti, ma nella difficoltà di integrare dimensioni energetiche, territoriali, ambientali e sociali all'interno di un unico processo decisionale (Antrop, 2006).

Il quadro attuale mostra infatti un progressivo aumento della diffusione delle FER e delle configurazioni di comunità energetiche, accompagnato tuttavia da una limitata evoluzione degli strumenti di pianificazione e governance necessari a gestire trasformazioni territoriali complesse. Tale disallineamento genera tre principali categorie di *gap*: un *gap* di integrazione tra strumenti normativi e pianificazione territoriale, un *gap* tecnologico legato alla gestione dei

dati e un *gap* sociale relativo ai processi partecipativi e alla capacità istituzionale.

2.7.1 GAP DI INTEGRAZIONE TRA PIANIFICAZIONE ENERGETICA, TERRITORIALE E AMBIENTALE

Un primo elemento critico riguarda la persistente separazione tra strumenti di pianificazione energetica, urbanistica e ambientale. Sebbene il quadro normativo europeo e nazionale promuova principi di integrazione e sostenibilità, nella pratica i diversi strumenti operano frequentemente secondo logiche settoriali.

La pianificazione delle infrastrutture energetiche, gli strumenti paesaggistici, i piani territoriali e gli strumenti climatici locali presentano livelli differenti di aggiornamento, scala territoriale e capacità operativa, determinando difficoltà nel coordinamento delle decisioni localizzative.

Questa frammentazione risulta particolarmente evidente nella valutazione degli impatti cumulativi delle FER, dove la singola autorizzazione tende a prevalere rispetto a una visione complessiva degli effetti territoriali. La Valutazione Ambientale Strategica (VAS), pur rappresentando lo strumento principale di integrazione ambientale, mantiene spesso una funzione prevalentemente procedurale, con una capacità limitata di orientare preventivamente le scelte progettuali e localizzative.

Ne deriva uno scarto tra integrazione normativa e integrazione operativa: il sistema dispone di numerosi strumenti, ma manca un dispositivo capace di coordinarli in modo continuo e coerente.

2.7.2 GAP PROGETTUALE, DIGITALE E INFORMATIVO NELLA GESTIONE DELLE FER

Un ulteriore elemento critico riguarda lo scollamento tra il paradigma progettuale introdotto dal Codice dei Contratti Pubblici (D.Lgs. 36/2023) e le procedure attualmente applicate alla realizzazione degli impianti da Fonti Energetiche Rinnovabili.

Il Codice dei Contratti Pubblici interpreta il progetto come un processo strutturato finalizzato alla qualità, alla sostenibilità e alla gestione integrata delle trasformazioni territoriali, attraverso livelli progressivi di definizione progettuale, integrazione degli aspetti ambientali e paesaggistici e progressiva digitalizzazione dei processi.

Nel settore FER, invece, le procedure autorizzative (PAS, Autorizzazione Unica e PAUR) risultano prevalentemente orientate alla verifica tecnico-amministrativa della compatibilità dell'intervento, senza una piena integrazione di strumenti progettuali avanzati capaci di rappresentare la relazione tra infrastruttura energetica, territorio e paesaggio.

Questo determina uno scollamento tra la crescente complessità degli interventi energetici e il livello di approfondimento progettuale richiesto per governarne gli effetti territoriali. Gli impianti FER, pur configurandosi come infrastrutture con rilevanti ricadute ambientali, paesaggistiche e sociali, vengono frequentemente trattati secondo una logica autorizzativa prevalentemente documentale, nella quale la progettazione assume un ruolo funzionale all'ottenimento del titolo abilitativo più che come strumento di conoscenza, simulazione e mediazione territoriale.

La principale criticità non riguarda quindi esclusivamente l'assenza di specifiche tecnologie digitali, ma la mancanza di un processo progettuale integrato capace di collegare analisi territoriale, valutazione ambientale, configurazione tecnica e gestione dell'opera.

In questa prospettiva, strumenti già consolidati in altri settori infrastrutturali, quali ambienti informativi condivisi e modelli digitali integrati, rappresentano potenziali elementi abilitanti per superare l'attuale frammentazione informativa e costruire processi decisionali più trasparenti e coerenti.

2.7.3 GAP ISTITUZIONALE E PARTECIPATIVO

Un ulteriore elemento critico riguarda la capacità dei sistemi territoriali di governare processi energetici sempre più complessi attraverso forme efficaci di coordinamento e partecipazione.

L'analisi dei casi studio evidenzia come i contesti maggiormente avanzati non siano necessariamente quelli caratterizzati dalla maggiore disponibilità tecnologica, ma quelli nei quali esiste una maggiore capacità di coordinamento tra istituzioni, comunità locali e soggetti economici.

In Italia, la frammentazione delle competenze tra livelli nazionale, regionale e locale costituisce uno dei principali ostacoli alla costruzione di strategie integrate. La partecipazione pubblica, sebbene formalmente prevista nei processi autorizzativi, risulta spesso limitata

a una fase consultiva, senza trasformarsi in un reale processo di co-progettazione.
Questo aspetto assume particolare rilevanza per le CER, il cui successo dipende non solo dalla fattibilità tecnica degli impianti, ma dalla capacità di costruire modelli organizzativi condivisi, basati sulla fiducia, sulla trasparenza informativa e sulla distribuzione dei benefici territoriali.

2.7.4 SINTESI DEI GAP E NECESSITÀ DI UN MODELLO INTEGRATO

Nel complesso, l'analisi evidenzia un disallineamento tra la crescente complessità della transizione energetica e gli strumenti attualmente disponibili per governarla. I principali *gap* individuati possono essere sintetizzati in quattro dimensioni:

- *gap* normativo-operativo, determinato dalla difficoltà di tradurre principi di integrazione ambientale e territoriale in procedure coordinate;
- *gap* informativo, dovuto alla limitata interoperabilità dei dati e all'assenza di infrastrutture digitali condivise;
- *gap* progettuale, legato alla prevalenza di approcci autorizzativi documentali rispetto a processi integrati di conoscenza e simulazione;
- *gap* istituzionale-sociale, connesso alla necessità di rafforzare coordinamento multilivello e partecipazione territoriale.

Questi elementi evidenziano la necessità di un cambio di paradigma: dalla gestione separata degli strumenti energetici e territoriali verso un modello integrato capace di collegare dati, pianificazione, progettazione e governance.
Tale esigenza costituisce il presupposto metodologico per lo sviluppo del modello proposto nei capitoli successivi, finalizzato alla costruzione di un processo decisionale interoperabile e multilivello per la pianificazione delle FER e delle Comunità Energetiche Rinnovabili.

2.8 PROCEDURE AUTORIZZATIVE FER E LIMITI DEL MODELLO DECISIONALE ATTUALE

L'attuale sistema autorizzativo italiano per gli impianti da Fonti Energetiche Rinnovabili (FER) si fonda su differenti procedure, definite in funzione della dimensione, della tecnologia e della rilevanza territoriale degli interventi. Le principali modalità autorizzative – Procedura Abilitativa Semplificata (PAS), Autorizzazione Unica (AU) e

Provvedimento Autorizzatorio Unico Regionale (PAUR) – sono state progressivamente introdotte con l'obiettivo di accelerare la diffusione delle fonti rinnovabili e semplificare i processi amministrativi. Tuttavia, l'evoluzione della transizione energetica ha modificato profondamente la natura degli interventi FER, che non possono più essere considerati esclusivamente infrastrutture tecniche, ma costituiscono trasformazioni territoriali complesse con effetti energetici, ambientali, paesaggistici e sociali. In questo contesto emerge una criticità strutturale: le procedure autorizzative risultano prevalentemente orientate alla verifica della conformità amministrativa degli interventi, mentre dispongono di strumenti limitati per supportare processi decisionali integrati, basati su valutazioni territoriali preventive e scenari alternativi. Il problema non riguarda quindi l'assenza di procedure, ma la loro capacità di governare la complessità crescente degli interventi energetici e di collegare efficacemente pianificazione, progettazione e attuazione.

2.8.1 PROCEDURA ABILITATIVA SEMPLIFICATA (PAS): RAPIDITÀ PROCEDURALE E LIMITI DELLA VALUTAZIONE TERRITORIALE

La Procedura Abilitativa Semplificata è stata concepita come strumento destinato a interventi di dimensione ridotta, con l'obiettivo di ridurre gli oneri amministrativi e favorire una rapida realizzazione degli impianti FER.

La progressiva estensione del suo utilizzo a interventi caratterizzati da maggiore complessità territoriale ha tuttavia evidenziato alcuni limiti strutturali. La PAS mantiene infatti un'impostazione prevalentemente dichiarativa e documentale, nella quale la verifica dell'intervento avviene principalmente attraverso il controllo della completezza degli elaborati presentati dal proponente. Le principali criticità riguardano:

- l'assenza di livelli progettuali progressivi capaci di accompagnare l'evoluzione delle decisioni;
- la limitata capacità di valutare gli effetti cumulativi rispetto ad altri impianti o infrastrutture esistenti;
- la prevalenza di una logica autorizzativa puntuale rispetto a una valutazione territoriale integrata;
- il ruolo marginale degli attori locali e delle comunità energetiche nei processi di definizione progettuale.

La PAS garantisce pertanto una maggiore efficienza procedurale, ma presenta una capacità ridotta di interpretare gli interventi energetici

come componenti di sistemi territoriali complessi. Tale condizione può risultare critica soprattutto nei contesti caratterizzati da elevata pressione localizzativa o da particolare sensibilità paesaggistica.

2.8.2 AUTORIZZAZIONE UNICA (AU): COORDINAMENTO AMMINISTRATIVO E INSUFFICIENTE INTEGRAZIONE PROGETTUALE

L'Autorizzazione Unica rappresenta il principale procedimento previsto per impianti FER di maggiore rilevanza, configurandosi come strumento finalizzato al coordinamento delle diverse valutazioni necessarie alla realizzazione dell'intervento. Rispetto alla PAS, l'AU presenta un livello maggiore di articolazione istituzionale, coinvolgendo differenti amministrazioni e competenze specialistiche. Tuttavia, tale coordinamento rimane prevalentemente concentrato sulla dimensione procedurale, senza tradursi necessariamente in un'integrazione effettiva delle informazioni e dei criteri decisionali. Le criticità principali riguardano:

- la prevalenza di elaborati orientati alla verifica autorizzativa rispetto alla costruzione di scenari progettuali alternativi;
- la difficoltà di integrare sistematicamente dati energetici, ambientali e paesaggistici;
- la limitata interoperabilità tra gli strumenti conoscitivi utilizzati dai diversi soggetti coinvolti;
- la ridotta capacità di valutare preventivamente gli effetti cumulativi degli interventi.

L'AU rappresenta quindi un importante strumento di semplificazione amministrativa, ma evidenzia un limite più generale del sistema: il coordinamento tra enti non coincide automaticamente con la costruzione di una conoscenza condivisa del territorio.

2.8.3 PROVVEDIMENTO AUTORIZZATORIO UNICO REGIONALE (PAUR): INTEGRAZIONE PROCEDURALE E CRITICITÀ DELL'INTEGRAZIONE CONOSCITIVA

Il PAUR costituisce il tentativo più avanzato di integrazione procedurale, attraverso il coordinamento tra Valutazione di Impatto Ambientale (VIA), autorizzazioni ambientali e ulteriori titoli abilitativi necessari alla realizzazione degli interventi. La sua finalità è superare la frammentazione amministrativa attraverso un unico procedimento coordinato. Tuttavia, anche in questo caso permane una differenza

significativa tra integrazione procedurale e integrazione conoscitiva. La presenza di molteplici soggetti istituzionali non garantisce infatti automaticamente la disponibilità di basi informative condivise, criteri valutativi omogenei e strumenti capaci di simulare scenari territoriali complessi. Le principali criticità riguardano:

- la difficoltà di armonizzare dati provenienti da enti diversi;
- la prevalenza di valutazioni settoriali rispetto a una lettura sistemica del territorio;
- la limitata capacità di supportare processi decisionali basati su simulazioni preventive;
- l'assenza di un ruolo strutturato delle comunità energetiche nella costruzione delle strategie territoriali.

Il PAUR rappresenta quindi un importante passo verso una maggiore integrazione amministrativa, ma evidenzia come la complessità delle trasformazioni energetiche richieda strumenti ulteriori rispetto alla sola concentrazione procedurale.

2.8.4 IL PARADOSSO DELLA TRANSIZIONE ENERGETICA: SEMPLIFICAZIONE AMMINISTRATIVA E QUALITÀ PROGETTUALE

L'analisi comparata delle procedure autorizzative evidenzia una tensione strutturale tra due modelli differenti di gestione delle trasformazioni territoriali.

Da un lato, il settore delle opere pubbliche ha progressivamente sviluppato un paradigma basato sulla qualità progettuale, sulla digitalizzazione dei processi, sulla gestione informativa e sulla valutazione integrata dell'opera.

Dall'altro lato, gli interventi FER, pur determinando trasformazioni territoriali di scala significativa, continuano a essere governati prevalentemente attraverso procedure autorizzative finalizzate alla semplificazione e alla velocizzazione dei processi. Si determina quindi un possibile paradosso: maggiore rilevanza territoriale degli interventi; maggiore necessità di conoscenza e progettazione integrata; e minore presenza di strumenti progettuali strutturati nei processi autorizzativi.

La criticità non riguarda la necessità di accelerare la transizione energetica, ma la modalità attraverso cui tale accelerazione viene governata. Una semplificazione priva di adeguati strumenti conoscitivi rischia infatti di trasferire la complessità dalla fase progettuale alla fase conflittuale, aumentando le difficoltà di integrazione con il paesaggio, gli ecosistemi e le comunità locali.

In questa prospettiva, il superamento dell'attuale modello autorizzativo non richiede necessariamente la sostituzione delle procedure esistenti, ma la loro evoluzione verso un sistema capace di integrare dati territoriali, progettazione digitale, valutazioni ambientali e partecipazione. La principale sfida consiste quindi nel trasformare il procedimento autorizzativo da strumento di verifica amministrativa a processo decisionale informato, multilivello e interoperabile. Tale esigenza costituisce il presupposto metodologico per lo sviluppo del modello integrato proposto nei capitoli successivi.

2.9 GAP NORMATIVI: DISALLINEAMENTO TRA QUADRO REGOLATORIO E INTEGRAZIONE TERRITORIALE DELLE FER

L'analisi del quadro normativo relativo alla diffusione delle Fonti Energetiche Rinnovabili evidenzia un elemento centrale: il sistema italiano dispone di un insieme articolato di strumenti legislativi e regolatori orientati alla sostenibilità ambientale, alla tutela paesaggistica e alla semplificazione amministrativa, ma tali strumenti non risultano pienamente integrati nella fase attuativa.

Il principale limite non risiede quindi nell'assenza di norme, bensì nella difficoltà di trasformare principi e obiettivi generali in processi decisionali coordinati tra dimensione energetica, ambientale, paesaggistica e territoriale. Il quadro regolatorio delle FER si sviluppa infatti attraverso sistemi normativi paralleli:

- la disciplina energetica, orientata al raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione e sicurezza del sistema elettrico;
- la normativa ambientale, finalizzata alla valutazione preventiva degli impatti attraverso strumenti quali VIA, VAS e VIncA;
- la normativa paesaggistica, orientata alla tutela dei valori territoriali e culturali;
- gli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica, responsabili della regolazione degli usi del suolo.

Sebbene tali strumenti perseguano finalità complementari, la loro applicazione avviene spesso secondo logiche settoriali e sequenziali, determinando una separazione tra autorizzazione energetica, valutazione ambientale e pianificazione territoriale.

Ne deriva un sistema nel quale la sostenibilità viene valutata prevalentemente attraverso verifiche successive, piuttosto che attraverso un processo integrato capace di orientare preventivamente

localizzazione, configurazione progettuale e compatibilità territoriale degli interventi.

2.9.1 COERENZA NORMATIVA E LIMITE DELL'INTEGRAZIONE OPERATIVA

Il sistema legislativo italiano presenta numerosi elementi potenzialmente favorevoli a un approccio integrato. Il D.lgs. 152/2006 introduce strumenti di valutazione ambientale strategica e preventiva; il D.lgs. 42/2004 riconosce il valore del paesaggio come componente strutturale del territorio; il D.lgs. 36/2023 promuove qualità progettuale, digitalizzazione e gestione informativa delle opere pubbliche; la normativa energetica nazionale recepisce gli obiettivi europei attraverso strumenti quali PNIEC e PNRR. Tuttavia, tali principi non trovano una piena convergenza nel settore delle FER. Il principale gap riguarda infatti la mancanza di un quadro metodologico unitario capace di collegare: la pianificazione energetica; la valutazione ambientale; la progettazione tecnica; la compatibilità paesaggistica; e la partecipazione territoriale. In particolare, mentre altri settori infrastrutturali hanno progressivamente introdotto processi progettuali strutturati, modelli informativi e sistemi digitali di gestione dell'opera, gli impianti FER continuano a essere prevalentemente gestiti attraverso procedure autorizzative basate sulla verifica documentale.

Questo determina una prevalenza della conformità amministrativa rispetto alla qualità progettuale, limitando la capacità pubblica di valutare scenari alternativi, impatti cumulativi e configurazioni territorialmente più appropriate.

2.9.2 FRAMMENTAZIONE NORMATIVA E ASSENZA DI STRUMENTI INTEGRATIVI

Un ulteriore elemento critico riguarda la frammentazione tra strumenti normativi e livelli amministrativi. La distribuzione delle competenze tra Stato, Regioni ed enti locali consente una gestione multilivello del sistema energetico, ma produce anche differenze significative nell'applicazione dei criteri localizzativi, nelle modalità autorizzative e nella capacità tecnica degli enti coinvolti. Le principali criticità possono essere sintetizzate in:

- assenza di criteri metodologici uniformi per la valutazione degli impatti cumulativi;

- limitata interoperabilità tra banche dati energetiche, ambientali e territoriali;
- difficoltà di coordinamento tra pianificazione energetica e strumenti urbanistici;
- differenze regionali nella definizione delle aree idonee e nei processi autorizzativi;
- insufficiente integrazione delle Comunità Energetiche Rinnovabili nei processi decisionali territoriali.

In particolare, le CER rappresentano un elemento ancora poco valorizzato dal sistema normativo, nonostante il loro potenziale ruolo come dispositivi territoriali capaci di integrare produzione energetica, partecipazione sociale e pianificazione locale.

L'attuale quadro autorizzativo tende infatti a considerare gli impianti FER prevalentemente come infrastrutture energetiche, mentre una prospettiva territoriale richiederebbe di considerarli come trasformazioni complesse del paesaggio e dei sistemi locali.

2.9.3 DAL GAP NORMATIVO ALLA NECESSITÀ DI UN MODELLO INTEGRATO

L'analisi evidenzia quindi un paradosso: il sistema normativo italiano presenta principi coerenti con gli obiettivi europei di transizione energetica sostenibile, ma manca un dispositivo operativo capace di integrarli nella pratica progettuale.

Il problema non riguarda pertanto la disponibilità di strumenti normativi, ma la loro capacità di funzionare come sistema coordinato.

Il superamento di tale criticità richiede un passaggio da un modello autorizzativo basato sulla verifica sequenziale degli adempimenti a un modello integrato fondato su:

- pianificazione preventiva delle trasformazioni territoriali;
- integrazione tra dati energetici, ambientali e paesaggistici;
- strumenti digitali interoperabili;
- valutazione multicriteriale degli scenari;
- coinvolgimento strutturato degli attori territoriali.

In questa prospettiva, il gap normativo costituisce il punto di connessione tra le criticità evidenziate nei paragrafi precedenti e la necessità di sviluppare un nuovo modello metodologico.

La costruzione di un *framework* integrato energia–territorio–digitale rappresenta quindi una risposta alla principale debolezza emersa dall'analisi: la distanza tra la complessità delle trasformazioni

energetiche e la capacità degli strumenti normativi attuali di governarle in modo coordinato, trasparente e territorialmente sostenibile.

2.10 GAP SOCIALI

La transizione energetica basata sulle Fonti Energetiche Rinnovabili (FER) e sulle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) non rappresenta esclusivamente una trasformazione tecnologica e infrastrutturale, ma implica un profondo cambiamento nei modelli di governance, partecipazione e gestione del territorio. L'efficacia delle CER dipende infatti dalla capacità di integrare dimensioni energetiche, ambientali e sociali, superando una visione esclusivamente tecnico-impiantistica della transizione. Nonostante il crescente riconoscimento normativo delle comunità energetiche, permangono rilevanti criticità nella capacità dei territori di partecipare attivamente ai processi decisionali, comprendere gli effetti delle trasformazioni energetiche e contribuire alla definizione delle scelte progettuali. Il principale gap sociale risiede quindi nello scollamento tra la crescente complessità degli interventi energetici e la limitata capacità delle comunità locali di assumere un ruolo attivo nei processi di pianificazione e attuazione.
Le criticità emergenti possono essere ricondotte a tre dimensioni principali: partecipazione della comunità, capacità locale e inclusione degli *stakeholder*.

2.10.1 PARTECIPAZIONE DELLA COMUNITÀ

La partecipazione delle comunità locali costituisce un elemento determinante per la legittimità e la sostenibilità dei processi di transizione energetica. Tuttavia, nell'attuale configurazione dei processi autorizzativi FER, il coinvolgimento pubblico risulta spesso limitato a momenti consultivi e successivi alla definizione delle principali scelte localizzative e progettuali. Tale impostazione produce una partecipazione prevalentemente informativa, nella quale cittadini e attori territoriali sono chiamati a esprimere osservazioni su decisioni già strutturate, senza una reale possibilità di incidere sulle alternative progettuali o sulle modalità di integrazione degli impianti nel contesto locale. Nel caso delle CER, questa criticità assume particolare rilevanza poiché tali configurazioni energetiche richiedono un coinvolgimento diretto degli utenti finali, non soltanto come consumatori o produttori di energia, ma come soggetti attivi nella definizione degli obiettivi

territoriali e nella gestione condivisa delle risorse energetiche. L'assenza di processi partecipativi strutturati limita pertanto la capacità delle comunità di contribuire alla costruzione di soluzioni condivise, aumentando il rischio di conflitti territoriali, opposizioni locali e percezione degli impianti FER come trasformazioni imposte dall'esterno.

La partecipazione deve quindi essere interpretata non come fase procedurale aggiuntiva, ma come componente strutturale della pianificazione energetica, capace di integrare conoscenze locali, esigenze sociali e caratteristiche specifiche dei territori.

2.10.2 AWARENESS E CAPACITY BUILDING: CONSAPEVOLEZZA E SVILUPPO DELLE CAPACITÀ LOCALI

Un secondo elemento critico riguarda la limitata capacità conoscitiva e organizzativa degli attori locali coinvolti nei processi di transizione energetica. La complessità tecnica, normativa ed economica delle CER richiede infatti competenze diffuse non solo tra gli operatori specializzati, ma anche all'interno delle amministrazioni locali, delle comunità e degli *stakeholder* territoriali. In molti contesti, cittadini ed enti locali dispongono di informazioni limitate rispetto ai meccanismi energetici, agli effetti territoriali degli impianti FER, ai possibili benefici economici e ambientali e alle modalità di partecipazione alla gestione delle comunità energetiche. Questa asimmetria informativa può generare una distanza tra soggetti tecnici e comunità locali, riducendo la capacità del territorio di orientare consapevolmente le trasformazioni.

Il rafforzamento delle competenze attraverso programmi di awareness e *capacity building* rappresenta pertanto un elemento abilitante per rendere le comunità energetiche strumenti effettivi di innovazione territoriale. Non si tratta esclusivamente di aumentare la conoscenza tecnica, ma di sviluppare capacità decisionali, organizzative e collaborative in grado di supportare la gestione condivisa dei processi energetici.

In questa prospettiva, la formazione continua di amministratori, cittadini e *stakeholder* diventa un requisito essenziale per ridurre le asimmetrie informative, aumentare la qualità del confronto pubblico e favorire modelli replicabili di sviluppo energetico locale.

2.10.3 INCLUSIONE DEGLI STAKEHOLDER E GOVERNANCE SOCIALE

La realizzazione efficace delle CER richiede il coinvolgimento coordinato di una pluralità di soggetti: amministrazioni pubbliche, cittadini, imprese, operatori energetici, associazioni, enti culturali e realtà del territorio. La complessità delle trasformazioni energetiche rende infatti insufficiente un approccio basato esclusivamente sulla relazione tra proponente e autorità autorizzativa. L'assenza di strumenti strutturati per il coordinamento tra *stakeholder* determina spesso una frammentazione degli interessi coinvolti, con difficoltà nel conciliare obiettivi energetici, esigenze territoriali, tutela paesaggistica e aspettative sociali.

In particolare, il ruolo delle CER risulta ancora parzialmente valorizzato nei processi decisionali relativi alla localizzazione e alla progettazione degli impianti FER. Sebbene esse rappresentino forme innovative di partecipazione energetica e di gestione collettiva delle risorse, non sono sempre integrate nei meccanismi ordinari di pianificazione e autorizzazione.

Una maggiore inclusione degli *stakeholder* consentirebbe invece di trasformare il processo energetico da semplice localizzazione di infrastrutture a costruzione condivisa di strategie territoriali. In questa prospettiva, le CER possono assumere un ruolo più ampio, diventando strumenti di coesione sociale, innovazione organizzativa e rafforzamento della governance locale.

Nel complesso, i *gap* sociali evidenziano che la transizione energetica non può essere valutata esclusivamente attraverso indicatori tecnici di produzione o capacità installata, ma deve considerare la qualità dei processi attraverso cui le comunità partecipano, comprendono e orientano il cambiamento.

La principale criticità non risiede quindi nella mancanza di interesse verso le tecnologie rinnovabili, ma nella distanza ancora presente tra infrastrutture energetiche, processi decisionali e dimensione sociale del territorio. Il superamento di tale divario costituisce una condizione necessaria per trasformare le CER da strumenti di sola produzione energetica a dispositivi territoriali capaci di generare valore ambientale, sociale e comunitario.

2.11 OPPORTUNITÀ DI INTEGRAZIONE TRA ENERGIA, AMBIENTE, PAESAGGIO E GOVERNANCE

2.11.1 INTRODUZIONE

L'analisi dei *gap* normativi, tecnologici, progettuali e sociali evidenziati nei paragrafi precedenti mostra come la transizione energetica basata sulle Fonti Energetiche Rinnovabili (FER) non possa essere affrontata esclusivamente come processo di sostituzione tecnologica delle fonti fossili, ma debba essere interpretata come una trasformazione territoriale complessa, nella quale interagiscono dimensioni energetiche, ambientali, paesaggistiche, economiche e sociali.

Il quadro regolatorio nazionale ed europeo ha introdotto strumenti orientati alla decarbonizzazione, alla semplificazione amministrativa e all'accelerazione degli investimenti nelle FER. Tuttavia, la crescente diffusione di impianti energetici distribuiti e di grandi infrastrutture rinnovabili evidenzia la necessità di superare una visione settoriale della transizione, favorendo modelli capaci di integrare pianificazione energetica, tutela ambientale, qualità paesaggistica e partecipazione territoriale.

La principale criticità non risiede quindi nell'obiettivo della transizione energetica, ma nella modalità attraverso cui essa viene tradotta in interventi territoriali. In assenza di strumenti di coordinamento multilivello, sistemi informativi interoperabili e processi partecipativi strutturati, il rischio è quello di produrre una progressiva separazione tra luoghi di produzione energetica, sistemi territoriali e comunità locali.

Tale fenomeno è stato interpretato nella letteratura sulla giustizia energetica e sui conflitti ecologici distributivi come possibile forma di asimmetria territoriale, nella quale alcune aree periferiche o rurali assumono prevalentemente una funzione produttiva rispetto a esigenze energetiche sovralocali, senza una corrispondente integrazione dei benefici economici, sociali e infrastrutturali. In questa prospettiva, il tema non riguarda una contrapposizione tra sviluppo delle energie rinnovabili e tutela dei territori, ma la necessità di costruire modelli di transizione capaci di distribuire equamente costi, benefici e capacità decisionali.

Il superamento di tali criticità richiede un cambio di paradigma: gli impianti FER devono essere considerati non come elementi infrastrutturali isolati, ma come componenti di sistemi territoriali

complessi, integrati con reti ecologiche, sistemi agricoli, infrastrutture digitali e comunità locali.
In questa prospettiva, l'integrazione tra energia, ambiente, paesaggio e governance costituisce una condizione fondamentale per trasformare la transizione energetica in un processo di rigenerazione territoriale sostenibile.

2.11.2 SINERGIE PROGETTUALI E MULTIDISCIPLINARI

La costruzione di un modello integrato per le FER richiede il superamento della tradizionale separazione tra pianificazione energetica, pianificazione territoriale e valutazione ambientale. Tale integrazione deve svilupparsi secondo tre principali direzioni: verticale, orizzontale e digitale.

2.11.2.1 Integrazione verticale: dalla scala europea alla scala locale

La pianificazione energetica deve essere interpretata come processo multilivello nel quale gli obiettivi europei e nazionali vengono tradotti attraverso strumenti regionali e locali coerenti. A livello nazionale, strumenti quali il PNIEC definiscono gli obiettivi strategici della transizione energetica; a livello regionale, i Piani Energetici Ambientali Regionali (PEAR) possono svolgere una funzione di coordinamento territoriale; a livello locale, strumenti come i PAESC e gli strumenti urbanistici comunali consentono di adattare tali obiettivi alle caratteristiche specifiche dei territori.
L'efficacia di tale sistema dipende tuttavia dalla capacità di creare coerenza tra i diversi livelli decisionali, evitando sovrapposizioni e conflitti tra pianificazione energetica, ambientale e territoriale.

2.11.2.2 Integrazione orizzontale: energia, ambiente, paesaggio e agricoltura

La progettazione degli impianti FER richiede un approccio interdisciplinare capace di considerare simultaneamente:

- capacità energetica e infrastrutture di rete;
- consumo e uso del suolo;
- valori ambientali ed ecosistemici;
- caratteristiche paesaggistiche e percettive;
- vocazioni agricole e produttive;
- esigenze delle comunità locali.

In questa prospettiva, il paesaggio non deve essere interpretato esclusivamente come sistema di vincoli, ma come infrastruttura

territoriale capace di orientare la localizzazione, la configurazione e la qualità degli interventi energetici.

La progettazione paesaggistica diventa quindi uno strumento attivo di trasformazione, in grado di favorire soluzioni integrate tra produzione energetica, biodiversità, qualità dello spazio rurale e identità territoriale.

2.11.2.3 Integrazione digitale: dati, simulazione e trasparenza decisionale

Un elemento fondamentale per la nuova governance energetico-territoriale è rappresentato dall'integrazione degli strumenti digitali. L'utilizzo coordinato di:

- GIS per l'analisi territoriale;
- BIM per la modellazione degli interventi;
- *Common Data Environment* (CDE) per la gestione condivisa delle informazioni;
- *Digital Twin* per simulazioni e monitoraggio;
- consente di costruire processi decisionali più trasparenti, basati su dati verificabili e scenari alternativi.

Tali strumenti permettono di superare una progettazione esclusivamente documentale, introducendo capacità predittive relative agli impatti ambientali, paesaggistici, infrastrutturali e sociali.

2.11.3 PIANIFICAZIONE ENERGETICA SOSTENIBILE

La pianificazione energetica sostenibile richiede un passaggio dalla logica della semplice localizzazione degli impianti alla progettazione di sistemi territoriali energetici integrati.

In questa prospettiva, le Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) assumono un ruolo strategico perché rappresentano configurazioni socio-tecniche nelle quali produzione, consumo, gestione energetica e partecipazione comunitaria vengono integrate all'interno di un medesimo modello organizzativo.

Le CER non costituiscono quindi esclusivamente strumenti per incrementare la produzione rinnovabile, ma possono diventare dispositivi di innovazione territoriale capaci di: aumentare l'autonomia energetica locale; favorire la partecipazione dei cittadini; generare benefici economici distribuiti; sviluppare competenze tecniche locali; rafforzare la resilienza delle comunità.

Le esperienze europee mostrano come la dimensione locale possa rappresentare un laboratorio di innovazione istituzionale. Nel Regno

Unito, i modelli di *Local Area Energy Planning* (LAEP) evidenziano l'importanza di integrare dati energetici, pianificazione territoriale e partecipazione degli *stakeholder*. In *Germania*, il modello delle cooperative energetiche (*Energiegenossenschaften*) dimostra come la proprietà collettiva degli impianti possa favorire una maggiore redistribuzione dei benefici economici. In Danimarca e nei *Paesi Bassi*, numerosi progetti di comunità energetica hanno evidenziato il valore della combinazione tra infrastrutture rinnovabili, governance locale e strumenti finanziari partecipativi.
Queste esperienze confermano che la transizione energetica efficace non dipende solamente dall'efficienza tecnologica degli impianti, ma dalla capacità di costruire sistemi organizzativi e territoriali coerenti.

2.11.4 PROGETTAZIONE PAESAGGISTICA INTEGRATA

La progettazione paesaggistica rappresenta una delle principali opportunità per superare il conflitto tra sviluppo delle FER e tutela territoriale.
Gli impianti energetici devono essere progettati attraverso una valutazione preventiva delle relazioni con il contesto, considerando non solo aspetti quantitativi come superficie occupata o produzione energetica, ma anche elementi percettivi, culturali ed ecologici.
L'approccio della *Landscape Ecology* e della *unified landscape approach* evidenzia come il paesaggio possa essere considerato un sistema dinamico nel quale infrastrutture energetiche, ecosistemi e attività umane interagiscono reciprocamente. In questa prospettiva, strumenti quali:

- analisi di visibilità;
- modellazione tridimensionale;
- progettazione parametrica;
- simulazioni ambientali;
- valutazioni multicriterio;

consentono di verificare preventivamente la compatibilità degli interventi e individuare configurazioni progettuali più coerenti con le caratteristiche locali.
Gli strumenti di indirizzo progettuale, ispirati ai principi del Documento di Indirizzo alla Progettazione (DIP) previsto dal Codice dei Contratti Pubblici, potrebbero essere adattati al settore FER attraverso documenti preliminari specifici capaci di definire obiettivi energetici, ambientali, paesaggistici e sociali prima della fase autorizzativa. In tale

prospettiva, il paesaggio diventa una componente progettuale attiva e non un elemento di sola limitazione normativa.

2.11.5 ECONOMIA CIRCOLARE E SVILUPPO TERRITORIALE

La transizione energetica sostenibile richiede inoltre un'integrazione con i principi dell'economia circolare, considerando la progettazione che deve quindi orientarsi verso: una modularità degli impianti; una reversibilità delle strutture; la riduzione dell'uso delle risorse; l'utilizzo di materiali riciclati o riciclabili; e la gestione programmata del fine vita.

2.11.5.1 Integrazione tra energia, ambiente e servizi ecosistemici

La progettazione ecosistemica permette di integrare gli impianti FER con elementi ambientali quali corridoi ecologici, sistemi vegetazionali e micro-*habitat*.

Gli interventi energetici possono quindi contribuire non solo alla produzione rinnovabile, ma anche alla valorizzazione della biodiversità e alla rigenerazione ecologica dei territori.

2.11.5.2 SVILUPPO DI COMPETENZE LOCALI E GREEN JOBS

Le CER possono assumere un ruolo fondamentale nello sviluppo di capacità locali attraverso:

- formazione tecnica;
- gestione partecipata degli impianti;
- monitoraggio ambientale;
- sviluppo di competenze digitali.

La transizione energetica diventa così occasione di crescita economica e sociale, favorendo occupazione qualificata e riducendo la dipendenza da operatori esterni.

2.11.5.3 RIDUZIONE DELLA MARGINALIZZAZIONE TERRITORIALE

L'integrazione tra infrastrutture energetiche, economia circolare e partecipazione locale permette di trasformare territori marginali da semplici aree di produzione energetica a sistemi territoriali attivi.

Attraverso modelli cooperativi, redistribuzione dei benefici e sviluppo di competenze locali, le FER possono contribuire alla costruzione di nuove economie territoriali resilienti.

2.11.6 Verso un modello integrato di transizione energetica TERRITORIALE

Le opportunità individuate evidenziano come la transizione energetica debba essere interpretata come processo territoriale complesso, nel

quale tecnologia, ambiente, paesaggio e società costituiscono dimensioni inseparabili.

L'integrazione tra pianificazione multilivello, strumenti digitali, progettazione paesaggistica e governance partecipativa rappresenta una condizione necessaria per trasformare gli impianti FER da infrastrutture isolate a componenti di sistemi territoriali resilienti.

In questo quadro, le CER possono rappresentare un modello operativo capace di connettere produzione energetica, innovazione sociale e sviluppo locale. Il passaggio successivo consiste quindi nella definizione di modelli di governance e partenariato pubblico-privato capaci di tradurre tali principi in strumenti operativi, affrontando il tema della pianificazione integrata e della gestione multilivello della transizione energetica.

2.12 MODELLI DI GOVERNANCE E PARTENARIATO PUBBLICO-PRIVATO PER LA TRANSIZIONE ENERGETICA TERRITORIALE

La transizione energetica non rappresenta esclusivamente un processo tecnologico finalizzato alla sostituzione delle fonti fossili con sistemi energetici rinnovabili, ma costituisce una trasformazione territoriale complessa nella quale infrastrutture energetiche, paesaggio, ambiente e comunità locali risultano strettamente interconnessi. Le criticità emerse nei precedenti capitoli mostrano come la principale difficoltà non risieda nella disponibilità delle tecnologie FER o nella definizione degli obiettivi climatici, bensì nella capacità dei sistemi istituzionali di governare trasformazioni territoriali caratterizzate da molteplici attori, scale decisionali e interessi differenti.

L'attuale modello autorizzativo italiano presenta infatti una prevalente impostazione procedurale, nella quale la valutazione degli interventi avviene spesso attraverso verifiche settoriali successive, senza una preventiva integrazione tra pianificazione energetica, pianificazione territoriale, tutela paesaggistica e dimensione sociale. Tale configurazione può determinare una condizione di asimmetria decisionale nella quale gli operatori privati, dotati di maggiore capacità tecnica e progettuale, assumono un ruolo prevalente nella definizione delle localizzazioni, mentre gli enti territoriali intervengono prevalentemente nella fase autorizzativa.

Il problema non è quindi rappresentato dalla presenza del settore privato, indispensabile per il raggiungimento degli obiettivi energetici, ma dall'assenza di strumenti capaci di riequilibrare il rapporto tra capacità progettuale privata e capacità strategica pubblica. La governance energetica deve pertanto evolvere da un modello prevalentemente autorizzativo verso un modello territoriale integrato, nel quale le decisioni siano costruite attraverso processi coordinati, trasparenti e partecipativi.

In questa prospettiva, i modelli multilivello della governance della transizione (Ostrom, 2010; Meadowcroft, 2009) costituiscono un riferimento teorico utile per ricomporre il rapporto tra differenti livelli decisionali. Il livello macro comprende gli indirizzi europei e nazionali relativi alla decarbonizzazione e alla sicurezza energetica; il livello meso riguarda la pianificazione regionale e territoriale; il livello micro coinvolge comuni, comunità energetiche, cittadini e operatori locali.

La principale innovazione consiste nel considerare tali livelli non come sistemi separati, ma come componenti di un'unica infrastruttura decisionale nella quale dati, conoscenze territoriali e responsabilità istituzionali vengono integrate lungo l'intera progettazione.

2.12.1 CRITICITÀ DELL'ATTUALE MODELLO DI GOVERNANCE ENERGETICA

L'attuale configurazione istituzionale presenta una frammentazione sia verticale sia orizzontale.

La frammentazione verticale riguarda la difficoltà di coordinamento tra Unione Europea, Stato, Regioni e Comuni. Gli obiettivi strategici vengono definiti prevalentemente ai livelli sovranazionale e nazionale, mentre gli effetti territoriali delle infrastrutture energetiche ricadono principalmente sulle comunità locali.

La frammentazione orizzontale riguarda invece la separazione tra strumenti e competenze differenti: pianificazione energetica, valutazione ambientale, tutela paesaggistica, pianificazione urbanistica e gestione delle reti infrastrutturali.

Questa separazione produce una valutazione spesso parziale degli interventi, nella quale gli aspetti energetici vengono analizzati indipendentemente dalle caratteristiche ecologiche, paesaggistiche e sociali del territorio.

Ne deriva la necessità di introdurre strumenti di coordinamento capaci di anticipare il conflitto e non solamente gestirlo nella fase autorizzativa.

2.12.2 IL FRAMEWORK MULTILEVEL COME INFRASTRUTTURA DI COORDINAMENTO DECISIONALE

All'interno della ricerca, il *framework multilevel* operativo VIA/VinCA assume il ruolo di infrastruttura metodologica finalizzata a superare la frammentazione decisionale attraverso l'integrazione di informazioni territoriali, ambientali ed energetiche. Il suo valore non consiste nella sostituzione degli strumenti normativi esistenti, ma nella loro connessione operativa attraverso un sistema interoperabile basato su GIS, BIM, *Common Data Environment* e modelli digitali territoriali. Tale approccio consente di:

- verificare preventivamente la compatibilità territoriale degli interventi;
- integrare dati ambientali, paesaggistici ed energetici;
- valutare effetti cumulativi e scenari alternativi;
- migliorare la trasparenza dei processi decisionali;
- ridurre conflitti nella fase autorizzativa.

Il *framework* diventa quindi un dispositivo di supporto alla governance, capace di collegare programmazione strategica e progettazione operativa.

2.12.3 PARTENARIATO PUBBLICO-PRIVATO E COMUNITÀ ENERGETICHE COME STRUMENTI TERRITORIALI

Nel nuovo modello di governance, il partenariato pubblico-privato assume una funzione strategica non limitata alla realizzazione finanziaria delle opere, ma orientata alla costruzione di valore territoriale condiviso.

Il soggetto pubblico deve assumere un ruolo di indirizzo e coordinamento, definendo criteri localizzativi, obiettivi ambientali e condizioni di integrazione territoriale. Il settore privato contribuisce attraverso capacità tecnologiche, finanziarie e gestionali, mentre le comunità locali partecipano alla definizione degli obiettivi e alla distribuzione dei benefici.

In questo quadro, le CER rappresentano un modello particolarmente significativo perché trasformano il rapporto tra territorio ed energia: la comunità non è più soltanto destinataria di un'infrastruttura

energetica, ma diventa soggetto attivo della produzione, gestione e valorizzazione delle risorse locali.

Le esperienze analizzate nei casi studio mostrano infatti come le CER possano costituire strumenti di rigenerazione territoriale capaci di integrare produzione energetica, inclusione sociale, sviluppo economico locale e maggiore autonomia energetica.

2.12.4 VERSO UN MODELLO REPLICABILE DI GOVERNANCE ENERGETICA TERRITORIALE

La transizione energetica richiede quindi un modello nel quale la localizzazione delle infrastrutture non sia determinata esclusivamente dalla disponibilità della risorsa energetica, ma dalla capacità del territorio di integrare tali trasformazioni all'interno dei propri sistemi ambientali, paesaggistici e sociali.

Il modello proposto dalla ricerca assume pertanto una governance collaborativa e multilivello fondata su quattro principi:

- integrazione istituzionale, attraverso il coordinamento tra differenti livelli amministrativi;
- integrazione informativa, attraverso sistemi digitali interoperabili;
- partecipazione territoriale, attraverso il coinvolgimento delle comunità locali;
- responsabilità condivisa, attraverso partenariati pubblico-privati orientati alla produzione di benefici territoriali.

In questa prospettiva, la governance energetica diventa non soltanto un meccanismo amministrativo per autorizzare nuovi impianti, ma uno strumento di pianificazione territoriale capace di trasformare la transizione energetica in un processo di rigenerazione ambientale, economica e sociale.

2.12.5 VERSO UNA NUOVA GOVERNANCE INTEGRATA: DAL MODELLO AUTORIZZATIVO AL MODELLO COOPERATIVO

L'analisi dei diversi livelli di pianificazione evidenzia come la principale criticità della transizione energetica non risieda nella disponibilità di tecnologie rinnovabili o nella mancanza di indirizzi normativi, ma nella difficoltà di trasformare tali indirizzi in processi decisionali coordinati e territorialmente coerenti.

L'attuale modello di governance delle infrastrutture energetiche presenta infatti una prevalenza di approcci settoriali e autorizzativi, nei

quali la valutazione degli interventi avviene prevalentemente attraverso verifiche successive di conformità normativa, senza un'effettiva fase preliminare di coordinamento tra obiettivi energetici, caratteristiche territoriali, sensibilità ambientali e aspettative delle comunità locali.

Questo assetto produce una condizione di asimmetria decisionale: il soggetto proponente dispone generalmente di maggiori capacità tecniche, economiche e informative rispetto agli enti territoriali chiamati a valutare gli interventi, mentre le amministrazioni locali intervengono spesso in una fase avanzata del processo, quando le principali scelte localizzative risultano già definite.

Il superamento di tale criticità richiede il passaggio verso un modello di governance progettuale e collaborativa, nel quale la decisione non sia il risultato finale di una sequenza autorizzativa, ma l'esito di un processo integrato di conoscenza, valutazione e negoziazione territoriale.

In questa prospettiva, il partenariato pubblico–privato assume un significato differente rispetto alla tradizionale collaborazione finalizzata esclusivamente alla realizzazione dell'opera. Esso deve configurarsi come un sistema di corresponsabilità nel quale soggetti pubblici, operatori energetici, comunità locali e portatori di interesse condividono obiettivi, dati e criteri di valutazione.

Il ruolo del soggetto pubblico deve quindi evolvere da funzione prevalentemente autorizzativa a funzione strategica di coordinamento, definizione degli indirizzi territoriali e garanzia dell'equilibrio tra interesse energetico generale e tutela dei valori locali.

In questo modello, le CER assumono un ruolo particolarmente rilevante, poiché rappresentano un esempio concreto di governance distribuita, dove produzione energetica, partecipazione sociale e benefici territoriali vengono ricomposti all'interno di un unico sistema socio-tecnico.

La nuova governance proposta dalla ricerca si fonda pertanto su tre principi fondamentali:

- integrazione multilivello, per coordinare le diverse scale decisionali europea, nazionale, regionale e locale;
- integrazione interdisciplinare, per superare la separazione tra energia, ambiente, paesaggio e pianificazione territoriale;

- partecipazione attiva, per trasformare le comunità locali da soggetti passivi a protagonisti della transizione energetica.

In questo quadro, il *framework multilevel* operativo VIA/VinCA rappresenta un dispositivo di supporto decisionale finalizzato a rendere operativo tale modello, attraverso l'integrazione di dati territoriali, strumenti digitali e procedure valutative.

2.12.6 INTEGRAZIONE OPERATIVA DELLE AREE IDONEE ATTRAVERSO IL FRAMEWORK MULTILEVEL

La definizione delle aree idonee rappresenta uno degli ambiti nei quali emerge con maggiore evidenza la necessità di superare una pianificazione esclusivamente settoriale. L'individuazione preventiva degli ambiti territoriali maggiormente compatibili con lo sviluppo delle FER non può infatti essere interpretata come una semplice classificazione amministrativa del territorio, ma deve configurarsi come un processo dinamico di valutazione integrata delle relazioni tra infrastrutture energetiche, caratteristiche ambientali, struttura paesaggistica e condizioni socio-territoriali.

Il *framework multilevel* proposto dalla ricerca interpreta le aree idonee come sistemi territoriali adattivi, nei quali la compatibilità di un intervento deriva dalla combinazione di differenti livelli informativi:

- caratteristiche fisiche e potenziale energetico del territorio;
- presenza di elementi di vulnerabilità ambientale ed ecosistemica;
- qualità paesaggistica e sensibilità percettiva;
- capacità infrastrutturale e connessione alla rete;
- condizioni socioeconomiche e disponibilità delle comunità locali alla partecipazione.

Attraverso l'integrazione di strumenti GIS, BIM, database territoriali interoperabili e modelli di valutazione ambientale, il *framework* consente di trasformare il concetto di area idonea da criterio statico di localizzazione a strumento dinamico di pianificazione preventiva. L'obiettivo non è individuare territori esclusivamente disponibili alla trasformazione energetica, ma definire condizioni di compatibilità capaci di orientare gli interventi verso soluzioni territorialmente sostenibili. In tale prospettiva, la valutazione delle aree idonee deve essere articolata secondo un principio di gerarchizzazione territoriale:

- aree preferenziali, caratterizzate da elevata compatibilità energetica e limitata sensibilità ambientale e paesaggistica;

- aree condizionate, nelle quali lo sviluppo degli impianti richiede specifiche misure di mitigazione e integrazione progettuale;
- aree non compatibili, nelle quali prevalgono valori ecologici, paesaggistici o culturali incompatibili con trasformazioni infrastrutturali significative.

Questa classificazione consente di anticipare le criticità nella fase strategica, riducendo conflitti successivi nelle procedure autorizzative e migliorando la qualità complessiva dei progetti.

Il *framework multilevel* assume quindi una funzione di raccordo tra pianificazione strategica e progettazione operativa: da un lato supporta gli enti pubblici nella definizione preventiva degli indirizzi territoriali; dall'altro fornisce ai soggetti proponenti criteri chiari per sviluppare interventi coerenti con il contesto.

La governance proposta supera pertanto la logica del semplice bilanciamento tra produzione energetica e tutela ambientale, introducendo un modello nel quale la transizione energetica diventa occasione di rigenerazione territoriale.

In questa prospettiva, le infrastrutture FER non vengono più considerate elementi estranei da compensare successivamente, ma componenti progettuali da integrare all'interno dei sistemi paesaggistici, ecologici e sociali esistenti.

Il risultato atteso è un modello di pianificazione capace di coniugare accelerazione della transizione energetica, qualità territoriale e giustizia spaziale, attraverso una governance multilivello fondata sulla conoscenza condivisa, sulla trasparenza decisionale e sulla partecipazione degli attori locali.

2.13 INFRASTRUTTURA DIGITALE E PIATTAFORME COLLABORATIVE PER LA GOVERNANCE INTEGRATA DELLA TRANSIZIONE ENERGETICA

La governance multilivello della transizione energetica descritta nel precedente paragrafo richiede strumenti capaci di rendere operative le relazioni tra istituzioni, operatori energetici, comunità locali e sistemi territoriali. In assenza di una infrastruttura informativa condivisa, infatti, anche un modello decisionale formalmente integrato rischia di mantenere le criticità dell'attuale sistema, caratterizzato dalla frammentazione dei dati, dalla separazione tra procedure

autorizzative e conoscenza territoriale e dalla difficoltà di valutare gli effetti cumulativi delle trasformazioni energetiche.

L'infrastruttura digitale assume pertanto un ruolo abilitante: non rappresenta un semplice supporto tecnico alla progettazione, ma costituisce l'ambiente operativo attraverso cui integrare dati territoriali, informazioni ambientali, modelli progettuali e processi decisionali. In questa prospettiva, la digitalizzazione diventa uno strumento di coordinamento tra pianificazione energetica, valutazione ambientale e governo del territorio. L'evoluzione normativa in materia di autorizzazione degli impianti da fonti energetiche rinnovabili, attraverso il progressivo consolidamento di procedure unificate e digitalizzate, evidenzia la necessità di superare un approccio esclusivamente amministrativo alla valutazione dei progetti. La semplificazione procedurale, infatti, può produrre risultati efficaci solo se accompagnata da un sistema informativo capace di anticipare le criticità territoriali, verificare preventivamente la compatibilità degli interventi e rendere trasparenti le scelte localizzative. In questo quadro, l'integrazione tra *Geographic Information System* (GIS), *Building Information Modeling* (BIM), *Common Data Environment* (CDE), modelli ambientali e sistemi di monitoraggio costituisce una architettura informativa multilivello in grado di accompagnare gli interventi energetici: dalla pianificazione strategica alla localizzazione, dalla progettazione alla fase autorizzativa, fino alla gestione e al monitoraggio operativo.

Il principio alla base di tale modello è il passaggio da una gestione documentale frammentata a una gestione informativa integrata, nella quale dati territoriali, ambientali e progettuali vengono organizzati secondo criteri di interoperabilità, tracciabilità e aggiornamento continuo.

2.13.1 DALLA SEMPLIFICAZIONE AUTORIZZATIVA ALLA GOVERNANCE DIGITALE

Il sistema autorizzativo degli impianti FER è stato progressivamente orientato verso una maggiore razionalizzazione attraverso la distinzione tra procedure differenti in funzione della dimensione e della complessità dell'intervento. L'Autorizzazione Unica (AU), la Procedura Abilitativa Semplificata (PAS) e l'Attività Edilizia Libera (AEL) rappresentano livelli diversi di controllo amministrativo, proporzionati alla rilevanza territoriale dell'opera. Tuttavia, la semplificazione

procedurale non risolve automaticamente le criticità legate alla qualità delle decisioni. Le principali difficoltà riscontrate nei procedimenti autorizzativi derivano spesso dalla mancanza di un quadro conoscitivo condiviso tra soggetti coinvolti, dalla disomogeneità delle banche dati disponibili e dalla valutazione tardiva degli effetti ambientali e paesaggistici.

Il limite dell'attuale sistema non è quindi rappresentato esclusivamente dalla durata delle procedure, ma dalla modalità con cui le informazioni vengono raccolte, organizzate e utilizzate nel processo decisionale. La digitalizzazione deve pertanto essere interpretata come strumento di prevenzione del conflitto e non soltanto come meccanismo di accelerazione amministrativa.

All'interno del *framework multilevel* operativo VIA/VinCA, gli strumenti digitali consentono di introdurre una fase preventiva di analisi territoriale, nella quale il progetto viene valutato rispetto alla struttura ecologica, paesaggistica, infrastrutturale e sociale del territorio interessato. La Tabella A.2 1 (Appendice 2) sintetizza il rapporto tra procedure autorizzative, livello di complessità dell'intervento e strumenti digitali di supporto.

Tabella A.2 1 | Procedure autorizzative FER e integrazione nel sistema digitale multilivello

Procedura	**Ambito applicativo**	**Criticità ricorrenti**	**Supporto digitale previsto**
Autorizzazione Unica (AU)	Impianti FER di grande scala e infrastrutture energetiche	Elevata complessità territoriale, interferenze ambientali e paesaggistiche	GIS multilivello, modelli territoriali predittivi, integrazione con VIA/VinCA e pianificazione energetica
Procedura Abilitativa Semplificata (PAS)	Impianti di scala medio-piccola	Necessità di verifica rapida della compatibilità urbanistica e ambientale	Checklist digitali, banche dati territoriali interoperabili, verifica automatizzata dei vincoli
Attività Edilizia Libera (AEL)	Micro-interventi e impianti	Rischio di frammentazione degli interventi	Sistemi informativi semplificati e verifica

Procedura	Ambito applicativo	Criticità ricorrenti	Supporto digitale previsto
	integrati negli edifici		automatica della compatibilità normativa

L'obiettivo non è sostituire il procedimento amministrativo, ma aumentare la qualità informativa sulla quale esso si fonda, riducendo incertezza, richieste integrative e conflitti successivi.

2.13.2 ECOSISTEMA DIGITALE INTEGRATO GIS–BIM–CDE–DIGITAL TWIN

L'efficacia della governance energetica territoriale dipende dalla capacità di integrare differenti livelli informativi. In tale prospettiva, il sistema GIS–BIM–CDE–*Digital Twin* rappresenta una possibile architettura operativa per collegare territorio, progetto e processo decisionale. Il GIS costituisce il livello territoriale del sistema, consentendo la gestione delle informazioni relative a: vincoli ambientali e paesaggistici; uso del suolo; biodiversità; infrastrutture esistenti; aree idonee e non idonee; vulnerabilità climatiche.

Il BIM rappresenta invece il livello progettuale, permettendo di associare caratteristiche geometriche, prestazionali e ambientali dell'opera attraverso modelli informativi tridimensionali.

L'integrazione tra GIS e BIM consente di superare la separazione tradizionale tra analisi territoriale e progettazione tecnica, permettendo una valutazione più completa delle interferenze tra infrastruttura energetica e sistema territoriale.

Il *Common Data Environment* (CDE) assume il ruolo di ambiente collaborativo per la gestione dei dati prodotti dai diversi soggetti coinvolti: amministrazioni pubbliche, progettisti, operatori energetici, enti ambientali e comunità locali.

Infine, il *Digital Twin* territoriale introduce una dimensione dinamica, consentendo la simulazione degli effetti prodotti dalle trasformazioni energetiche nel tempo attraverso l'integrazione di dati ambientali, climatici e infrastrutturali.

Questa architettura consente di trasformare la valutazione ambientale da processo prevalentemente documentale a processo conoscitivo dinamico, nel quale gli effetti degli interventi possono essere simulati e confrontati prima della loro realizzazione.

2.13.3 SUPPORTI DIGITALI PER VIA, VAS E VINCA DI NUOVA GENERAZIONE

Le procedure VIA, VAS e VinCA costituiscono strumenti fondamentali per garantire la compatibilità tra sviluppo energetico e tutela ambientale. Tuttavia, la loro efficacia dipende dalla qualità e disponibilità delle informazioni utilizzate.

Il *framework* digitale proposto introduce un modello di valutazione preventiva basato sull'integrazione di:

- banche dati territoriali interoperabili;
- analisi GIS multilivello;
- indicatori ambientali e paesaggistici;
- simulazioni degli scenari progettuali;
- matrici di coerenza con la pianificazione vigente.

Attraverso tali strumenti è possibile sviluppare un sistema di pre-valutazione capace di individuare criticità prima della fase autorizzativa formale. In particolare:

- la VIA può essere supportata attraverso simulazioni degli impatti cumulativi;
- la VAS può integrare scenari territoriali e climatici;
- la VinCA può utilizzare analisi spaziali per verificare le interferenze con habitat e specie protette.

Il valore aggiunto del modello risiede nella possibilità di collegare valutazioni ambientali oggi spesso separate, favorendo una lettura sistemica delle trasformazioni prodotte dagli impianti FER.

2.13.4 PIATTAFORME COLLABORATIVE E PARTECIPAZIONE TERRITORIALE

La digitalizzazione della governance energetica non riguarda esclusivamente l'efficienza amministrativa, ma anche la capacità di costruire processi decisionali condivisi. Le piattaforme collaborative consentono infatti di creare ambienti nei quali amministrazioni, operatori e comunità locali possono accedere a informazioni comuni, verificare scenari alternativi e partecipare alla definizione delle strategie energetiche. Tale approccio assume particolare rilevanza nel caso delle CER, dove la produzione energetica non rappresenta esclusivamente una questione infrastrutturale, ma un processo sociale fondato sulla partecipazione degli utenti. Strumenti digitali partecipativi possono supportare:

- individuazione condivisa delle aree di intervento;

- monitoraggio degli impatti ambientali;
- raccolta di osservazioni territoriali;
- valutazione delle ricadute economiche e sociali.

La partecipazione digitale diventa quindi un elemento complementare alla governance multilivello, contribuendo a ridurre l'asimmetria informativa tra soggetti pubblici, privati e comunità.

2.13.5 VANTAGGI OPERATIVI DEL MODELLO INTEGRATO

L'adozione di una infrastruttura digitale multilivello produce diversi vantaggi operativi:

- miglioramento della qualità delle decisioni attraverso dati condivisi e aggiornabili;
- riduzione dei tempi autorizzativi mediante verifiche preventive;
- diminuzione del contenzioso grazie alla maggiore trasparenza dei criteri decisionali;
- integrazione tra pianificazione energetica, ambientale e territoriale;
- maggiore capacità delle amministrazioni locali di governare processi complessi;
- rafforzamento del ruolo delle comunità energetiche come soggetti attivi della transizione.

In questa prospettiva, la digitalizzazione non rappresenta una semplice innovazione tecnologica, ma costituisce una componente strutturale della nuova governance energetica territoriale.

Il modello GIS–BIM–CDE–*Digital Twin* permette infatti di trasformare il processo autorizzativo da una sequenza frammentata di verifiche successive a un sistema integrato di conoscenza, simulazione e decisione, coerente con gli obiettivi della transizione energetica sostenibile.

2.14 OPPORTUNITÀ DI REPLICABILITÀ E SCALABILITÀ DEL FRAMEWORK PROPOSTO

La replicabilità costituisce uno degli elementi distintivi del *framework multilevel* proposto, poiché il modello non è concepito come una soluzione progettuale applicabile in modo uniforme, ma come un sistema metodologico adattivo capace di essere trasferito a differenti contesti territoriali, energetici e amministrativi.

La scalabilità del modello deriva dalla separazione tra componenti strutturali, che rimangono costanti nei diversi contesti applicativi, e componenti adattabili, che vengono calibrate sulla base delle caratteristiche locali. Le prime comprendono l'architettura digitale integrata GIS–BIM–CDE–*Digital Twin*, il sistema di indicatori ambientali e territoriali, le procedure di valutazione preventiva e il modello di governance multilivello. Le seconde riguardano invece la configurazione energetica, gli attori coinvolti, le caratteristiche paesaggistiche, i vincoli ambientali e le specificità socioeconomiche del territorio.

In questa prospettiva, la replicabilità non coincide con la riproduzione di un modello unico, ma con la capacità del *framework* di generare configurazioni territoriali differenti mantenendo invariati i principi di coerenza, trasparenza decisionale e integrazione tra energia, ambiente e territorio.

2.14.1 CONDIZIONI ABILITANTI PER LA REPLICABILITÀ

La possibilità di applicare il *framework* in contesti differenti dipende da quattro condizioni principali:

2.14.1.1 Integrazione informativa e digitale

L'utilizzo di piattaforme GIS multilivello, modelli informativi e ambienti collaborativi consente di costruire un quadro conoscitivo comune, adattabile a differenti scale territoriali. La disponibilità di dati interoperabili permette di applicare il modello sia a piccoli interventi locali sia a sistemi energetici territoriali più complessi.

2.14.1.2 Adattamento territoriale

Il *framework* integra criteri energetici, ambientali, paesaggistici e climatici, consentendo di valutare preventivamente la compatibilità degli interventi rispetto alle caratteristiche specifiche del territorio. Tale approccio evita una localizzazione standardizzata degli impianti FER e favorisce soluzioni coerenti con la capacità di carico territoriale.

2.14.1.3 Governance multilivello e partecipazione

La replicabilità richiede un modello organizzativo nel quale amministrazioni, operatori energetici e comunità locali possano interagire attraverso procedure trasparenti e strumenti condivisi. In questo senso, il *framework* costituisce un dispositivo di coordinamento tra soggetti con competenze differenti, riducendo le asimmetrie informative e aumentando l'accettabilità sociale degli interventi.

2.14.1.4 Monitoraggio e miglioramento continuo

L'integrazione di KPI energetici, ambientali e sociali consente di verificare nel tempo le prestazioni delle CER e di aggiornare progressivamente il modello sulla base dei risultati ottenuti. La replicabilità diventa quindi un processo dinamico e non una semplice trasferibilità iniziale.

2.14.2 TRASFERIMENTO ADATTIVO DEL MODELLO

Il *framework* può essere applicato a differenti configurazioni territoriali attraverso un processo di trasferimento adattivo articolato in tre fasi:

3 Analisi del contesto locale, attraverso la raccolta dei dati energetici, ambientali, territoriali e socioeconomici disponibili;

4 Configurazione del modello, mediante la selezione degli strumenti digitali, degli indicatori e delle procedure più adeguate alla scala dell'intervento;

5 Implementazione e monitoraggio, attraverso la verifica delle prestazioni energetiche, ambientali e sociali e il successivo aggiornamento del sistema.

Questa impostazione permette di applicare il *framework* sia in territori urbani caratterizzati da elevata densità infrastrutturale, sia in aree rurali o fragili dove le CER possono rappresentare strumenti di resilienza energetica e contrasto alla povertà energetica.

2.14.3 SCALABILITÀ OPERATIVA DEL FRAMEWORK

La scalabilità del modello è garantita dalla sua struttura modulare. I diversi livelli applicativi possono essere implementati progressivamente in funzione della maturità amministrativa e tecnologica del territorio.

Un Comune può utilizzare inizialmente il *framework* per la valutazione preliminare delle aree idonee e per la definizione delle CER locali; successivamente il sistema può essere esteso alla gestione integrata degli impianti, al monitoraggio ambientale e alla connessione con strumenti di pianificazione sovralocale.

La natura modulare consente quindi un'applicazione incrementale, evitando che la complessità tecnologica costituisca una barriera all'adozione del modello.

2.14.4 VALORE STRATEGICO DELLA REPLICABILITÀ

La principale opportunità del *framework* non risiede esclusivamente nella possibilità di aumentare il numero di impianti FER o CER realizzati, ma nella capacità di costruire un metodo replicabile per governare la transizione energetica territoriale.

Attraverso l'integrazione tra pianificazione, valutazione ambientale, strumenti digitali e partecipazione, il modello consente di trasformare le CER da interventi isolati a componenti di una strategia territoriale coordinata.

La replicabilità diventa pertanto un elemento di innovazione istituzionale: non trasferisce un progetto specifico, ma trasferisce una capacità decisionale, adattabile a differenti territori e coerente con gli obiettivi europei di decarbonizzazione, resilienza climatica e sviluppo sostenibile.

2.15 CASE STUDY: EVIDENZE APPLICATIVE E VALIDAZIONE DEL FRAMEWORK

L'analisi di casi studio costituisce un passaggio metodologico finalizzato a verificare l'applicabilità dei principi alla base del *framework multilevel* operativo VIA/VinCA, attraverso l'osservazione di esperienze in cui governance energetica, strumenti digitali, integrazione paesaggistica e partecipazione territoriale sono stati sperimentati in contesti reali.

I casi selezionati non vengono analizzati come modelli da replicare in modo diretto, ma come esperienze da cui estrarre principi trasferibili e criteri operativi adattabili a differenti condizioni territoriali.

2.15.1 COMUNITÀ ENERGETICHE E GOVERNANCE PARTECIPATIVA

Le esperienze di comunità energetica rappresentano il primo ambito applicativo in cui emerge il superamento del modello energetico centralizzato verso sistemi basati sulla partecipazione locale e sulla condivisione dei benefici. Il caso della cooperativa *Taradell Sostenible* in *Catalogna* evidenzia come la produzione energetica rinnovabile possa essere integrata con meccanismi di inclusione sociale, partecipazione degli utenti e gestione collettiva delle risorse energetiche. L'elemento maggiormente rilevante ai fini del *framework* non è esclusivamente la tecnologia fotovoltaica adottata, ma il modello organizzativo basato sulla corresponsabilità degli attori locali e sulla

distribuzione dei benefici. Analogamente, il progetto *Blackstone Hybrid Energy Project* in Australia occidentale e la microrete solare *Nuru Solar Minigrid* nella Repubblica Democratica del Congo mostrano come sistemi energetici distribuiti possano incrementare resilienza territoriale e autonomia energetica attraverso l'integrazione tra tecnologie rinnovabili, sistemi di accumulo, gestione digitale e partenariati pubblico-privati.

Queste esperienze confermano il ruolo della governance multilivello proposta dal *framework*, nella quale amministrazioni pubbliche, operatori energetici e comunità locali partecipano alla definizione delle strategie energetiche territoriali.

2.15.2 INTEGRAZIONE DIGITALE E SUPPORTO ALLE DECISIONI

Un secondo ambito di validazione riguarda l'impiego di strumenti digitali avanzati per migliorare la qualità delle decisioni nei processi di pianificazione e autorizzazione. Le esperienze europee mostrano una crescente integrazione tra sistemi GIS, BIM, modelli tridimensionali e piattaforme collaborative per la gestione di infrastrutture complesse. Nei progetti ferroviari tedeschi della Deutsche Bahn, ad esempio, l'integrazione BIM–GIS ha consentito di anticipare la valutazione degli impatti ambientali e paesaggistici attraverso simulazioni preventive. Nel Regno Unito, l'esperienza dei progetti *High Speed 2* (HS2) evidenzia il ruolo dei *Common Data Environment* (CDE) nella gestione integrata delle informazioni progettuali e ambientali, favorendo maggiore trasparenza nei processi decisionali. Analogamente, i *Digital Twin* urbani sviluppati in città come *Copenaghen* hanno dimostrato la capacità dei modelli digitali territoriali di supportare simulazioni, monitoraggio ambientale e valutazione di scenari alternativi.

Tali esperienze confermano la validità dell'approccio proposto, nel quale GIS, BIM, CDE e *Digital Twin* costituiscono strumenti abilitanti per integrare dati territoriali, valutazioni ambientali e processi autorizzativi.

2.15.3 FER INTEGRATE NEL PAESAGGIO E PROGETTAZIONE TERRITORIALE

Un ulteriore elemento di confronto riguarda la necessità di superare una visione esclusivamente impiantistica delle infrastrutture energetiche, considerando gli impianti FER come elementi inseriti all'interno di sistemi territoriali complessi.

Le esperienze europee di *Energy Landscape Design* evidenziano come la progettazione degli impianti rinnovabili possa integrare criteri paesaggistici, ecologici e sociali attraverso la valutazione preventiva delle alternative localizzative, la riduzione degli impatti visivi e la valorizzazione delle relazioni tra infrastruttura e territorio.
In questo senso, gli strumenti GIS multilivello, le analisi visuali e gli indicatori ambientali previsti dal *framework* consentono di trasformare la fase autorizzativa da verifica finale di compatibilità a processo anticipativo di progettazione territoriale.

2.15.4 SINTESI DELLE EVIDENZE E RELAZIONE CON IL FRAMEWORK PROPOSTO

L'analisi dei casi studio evidenzia quattro elementi ricorrenti:

- la necessità di una governance multilivello capace di integrare istituzioni, operatori e comunità locali;
- l'importanza di strumenti digitali interoperabili per migliorare conoscenza territoriale e trasparenza decisionale;
- la necessità di integrare produzione energetica, tutela paesaggistica e adattamento climatico;
- la possibilità di trasferire modelli energetici attraverso processi adattivi e non mediante semplici replicazioni.

Le esperienze analizzate confermano pertanto che la transizione energetica territoriale richiede un passaggio da un modello autorizzativo frammentato a un modello integrato, nel quale dati, conoscenza territoriale e partecipazione costituiscono elementi strutturali del processo decisionale.
Il *framework multilevel* operativo VIA/VinCA si colloca in questa prospettiva come infrastruttura metodologica capace di tradurre principi strategici di sostenibilità e governance in procedure operative applicabili a differenti scale territoriali.

2.16 CAPACITY BUILDING TERRITORIALE COME MODELLO OPERATIVO DEL FRAMEWORK

2.16.1 DAL TRASFERIMENTO TECNOLOGICO ALLA COSTRUZIONE DI CAPACITÀ TERRITORIALI

La transizione energetica non può essere interpretata esclusivamente come un processo di sostituzione tecnologica, ma richiede la costruzione di nuove capacità territoriali in grado di governare la

complessità ambientale, sociale e istituzionale dei cambiamenti in corso. In questa prospettiva, il *Capacity Building* territoriale assume un ruolo strategico, non come semplice attività di formazione, ma come processo permanente di rafforzamento delle competenze, delle relazioni istituzionali e degli strumenti decisionali necessari per accompagnare la trasformazione energetica.

Secondo l'approccio sistemico proposto dall'UNDP (2009), la capacità di un territorio non dipende esclusivamente dalla disponibilità di infrastrutture o tecnologie, ma dalla presenza di condizioni organizzative, conoscitive e collaborative che consentano agli attori locali di pianificare, attuare e monitorare le trasformazioni. Tale principio assume particolare rilevanza nel contesto italiano, caratterizzato da una forte eterogeneità territoriale, da differenti livelli di capacità amministrativa e dalla necessità di integrare politiche energetiche, ambientali e paesaggistiche. Il *framework* sviluppato in questo lavoro interpreta quindi il *Capacity Building* come una componente strutturale della transizione energetica: non un intervento successivo alla realizzazione degli impianti, ma un processo che accompagna tutte le fasi del ciclo progettuale, dalla conoscenza del territorio alla gestione adattativa delle infrastrutture.

In tale prospettiva, strumenti digitali, processi partecipativi e approcci paesaggistici non costituiscono elementi separati, ma parti di un unico sistema operativo finalizzato a costruire una capacità territoriale diffusa. Il territorio diventa così non solo il luogo nel quale vengono realizzati gli interventi energetici, ma un soggetto attivo capace di apprendere, adattarsi e generare nuove soluzioni.

2.16.2 IL CICLO ADATTIVO RICERCA–APPLICAZIONE

Il *framework* proposto si basa su un ciclo adattivo di ricerca–applicazione, ispirato ai principi dell'*action research* e del *design* sistemico (Manzini, 2015; Thackara, 2006), nel quale conoscenza, sperimentazione e gestione operativa sono integrate in un processo continuo di apprendimento. A differenza degli approcci lineari, nei quali la progettazione precede la realizzazione e la valutazione avviene esclusivamente a posteriori, il modello proposto considera la transizione energetica come un processo iterativo nel quale dati, esperienze e risultati alimentano costantemente le fasi successive.

Il ciclo si articola in cinque fasi principali:

- Diagnosi territoriale e costruzione della conoscenza

- Co-progettazione e sperimentazione delle soluzioni
- Implementazione operativa e gestione digitale
- Monitoraggio, valutazione e miglioramento continuo
- Formazione, trasferimento e consolidamento delle competenze

Ogni fase produce conoscenze e strumenti che alimentano le successive, configurando un processo circolare nel quale il territorio acquisisce progressivamente maggiore capacità di governo della transizione energetica.

2.16.2.1 Diagnosi territoriale e costruzione della conoscenza

La prima fase del ciclo riguarda la costruzione di una conoscenza integrata del territorio, necessaria per superare approcci settoriali e decisioni basate su informazioni frammentarie. La diagnosi combina dati energetici, ambientali, paesaggistici e socio-economici attraverso strumenti di analisi territoriale multilivello. L'obiettivo non è esclusivamente individuare le aree idonee allo sviluppo delle FER, ma comprendere le relazioni tra infrastrutture energetiche, vulnerabilità ambientali, caratteristiche paesaggistiche e capacità organizzative locali. Attraverso GIS multilivello, analisi multicriterio e indicatori territoriali vengono costruite mappe di sensibilità e scenari interpretativi capaci di orientare le successive fasi progettuali. La conoscenza territoriale diventa quindi una infrastruttura decisionale condivisa, utile non solo alla progettazione tecnica, ma anche alla costruzione del consenso e alla riduzione dei conflitti.

2.16.2.2 Co-progettazione e sperimentazione integrata

La seconda fase riguarda la trasformazione delle conoscenze territoriali in scenari progettuali attraverso processi collaborativi che coinvolgono amministrazioni, comunità locali, progettisti e soggetti economici. La co-progettazione rappresenta il momento nel quale il *framework* integra dimensione energetica, ambientale, paesaggistica e sociale, superando la tradizionale separazione tra infrastruttura tecnica e territorio. In questa fase assumono particolare rilevanza: Comunità Energetiche Rinnovabili come dispositivi di innovazione sociale e gestione collettiva dell'energia; strategie di integrazione paesaggistica delle FER; recupero di aree dismesse e patrimonio edilizio esistente; soluzioni di eco-*design* e progettazione circolare; strumenti di simulazione e modellazione digitale per confrontare scenari alternativi.

La sperimentazione non viene intesa come semplice verifica tecnica, ma come processo di apprendimento collettivo attraverso il quale il territorio definisce soluzioni coerenti con le proprie caratteristiche ambientali e culturali.

2.16.2.3 Implementazione operativa e gestione adattiva

La fase implementativa rappresenta il passaggio dalla progettazione alla gestione concreta degli interventi.

In questo ambito, gli strumenti digitali assumono il ruolo di infrastruttura informativa del *framework*, permettendo di integrare dati progettuali, energetici, ambientali e gestionali all'interno di sistemi interoperabili.

Il BIM, integrato con GIS e piattaforme di monitoraggio territoriale, consente di costruire modelli informativi aggiornabili lungo l'intero iter degli interventi, collegando progettazione, realizzazione, manutenzione e valutazione delle performance.

L'approccio *bottom-up* alla modellazione digitale risulta particolarmente rilevante per lo sviluppo di un futuro *Digital Twin* energetico-territoriale: la qualità del modello complessivo dipende infatti dalla capacità di integrare progressivamente dati provenienti dai singoli impianti, dalle infrastrutture locali e dai sistemi di monitoraggio.

In questa prospettiva, la digitalizzazione non rappresenta soltanto uno strumento di efficienza tecnica, ma un dispositivo di governance capace di aumentare trasparenza, tracciabilità e capacità decisionale.

2.16.2.4 Monitoraggio, valutazione e miglioramento continuo

Il quarto elemento del ciclo riguarda la valutazione degli effetti prodotti dagli interventi e la capacità di correggere progressivamente strategie e soluzioni. Il monitoraggio integra indicatori energetici, ambientali, economici e sociali, consentendo di valutare non solo la produzione rinnovabile, ma anche la qualità complessiva della trasformazione territoriale. Particolare attenzione viene dedicata a: distribuzione dei benefici economici; riduzione della vulnerabilità energetica; accettabilità sociale degli interventi; effetti sul paesaggio e sulla biodiversità; e capacità delle amministrazioni di governare il processo.

Il miglioramento continuo rappresenta quindi il meccanismo attraverso cui il territorio apprende dai risultati ottenuti, trasformando le esperienze realizzate in conoscenza trasferibile.

2.16.2.5 Formazione, trasferimento e consolidamento delle competenze

La fase conclusiva del ciclo riguarda la diffusione delle conoscenze e la costruzione di competenze permanenti. La replicabilità del *framework* non dipende infatti dalla semplice esportazione di un modello tecnico, ma dalla capacità di trasferire metodi, strumenti e capacità decisionali adattabili ai diversi contesti territoriali. La formazione coinvolge amministrazioni pubbliche, tecnici, imprese e comunità locali attraverso: programmi formativi su energia, ambiente e strumenti digitali; laboratori territoriali; percorsi di co-design; sviluppo di nuove competenze professionali legate alla transizione ecologica; condivisione di dati e conoscenze attraverso piattaforme aperte.

In questa prospettiva, il *Capacity Building* diventa il principale fattore abilitante della replicabilità: ogni territorio può acquisire gli strumenti necessari per interpretare le proprie caratteristiche, progettare soluzioni coerenti e adattare il modello alle proprie condizioni.

2.16.3 SINTESI METODOLOGICA: VERSO UN TERRITORIO ENERGETICAMENTE COMPETENTE

Il *framework* proposto interpreta quindi la transizione energetica come un processo di costruzione progressiva di capacità territoriali. L'innovazione principale non risiede esclusivamente nell'integrazione tra CER, FER, strumenti digitali e pianificazione paesaggistica, ma nella creazione di un sistema operativo capace di collegare conoscenza, progettazione, gestione e apprendimento.

Il territorio diventa così un sistema adattivo nel quale infrastrutture energetiche, comunità locali e strumenti decisionali evolvono insieme. In questa prospettiva, il *Capacity Building* rappresenta il collegamento tra replicabilità e sostenibilità nel lungo periodo: consente non solo di realizzare nuovi modelli energetici, ma di costruire comunità e istituzioni capaci di governarne continuamente l'evoluzione.

2.17 STRUMENTI DI SUPPORTO

Nella transizione energetica territoriale, i sistemi di supporto digitale e metodologico giocano un ruolo centrale nel garantire coerenza, trasparenza e sostenibilità dei processi decisionali. Gli strumenti qui analizzati consentono non solo di raccogliere e gestire dati, ma di tradurli in conoscenza operativa, integrando dimensioni energetiche, ambientali, paesaggistiche e socio-economiche. La loro efficacia dipende dall'adozione di un approccio integrato, in cui BIM, GIS,

protocolli ESG e KPI multidimensionali diventano dispositivi di governance attiva, riproducibile e scalabile. Questi strumenti costituiscono la base per una governance multilivello, trasparente e basata su dati verificabili, rendendo operativo il ciclo metodologico di ricerca–applicazione descritto nel Capitolo 4.

L'efficacia del *framework* proposto dipende dalla capacità di integrare dati, conoscenze e processi decisionali all'interno di un ambiente informativo condiviso. In questa prospettiva, il *Common Data Environment* (CdE) rappresenta l'infrastruttura digitale abilitante per la connessione tra pianificazione territoriale, progettazione energetica, valutazioni ambientali e gestione partecipativa delle CER. Il CdE non viene inteso esclusivamente come archivio digitale o piattaforma collaborativa, ma come sistema informativo territoriale dinamico, capace di organizzare e rendere interoperabili dati provenienti da fonti differenti: cartografie GIS, modelli BIM, dati energetici, informazioni ambientali, indicatori territoriali e contributi provenienti dagli *stakeholder* locali.

Questa impostazione consente di superare la frammentazione informativa che caratterizza frequentemente i processi autorizzativi e decisionali relativi agli impianti FER, favorendo una gestione basata su dati condivisi, aggiornabili e verificabili. Il CdE diventa quindi uno strumento di coordinamento tra amministrazioni pubbliche, progettisti, operatori energetici e comunità locali, migliorando trasparenza, tracciabilità delle decisioni e qualità della pianificazione.

2.17.1 INTEGRAZIONE GIS–BIM PER LA MODELLAZIONE ENERGETICO-TERRITORIALE

L'integrazione tra sistemi GIS e modelli BIM costituisce il principale elemento tecnico del CdE, poiché permette di collegare la dimensione territoriale con quella progettuale.

Il GIS consente di rappresentare la complessità del territorio attraverso la sovrapposizione di informazioni energetiche, ambientali, paesaggistiche e socioeconomiche, mentre il BIM permette di descrivere gli elementi progettuali secondo una logica informativa tridimensionale e parametrica. La loro integrazione permette di sviluppare modelli digitali capaci di:

- analizzare preventivamente la compatibilità territoriale degli interventi FER;

- simulare scenari alternativi di localizzazione e configurazione degli impianti;
- valutare interazioni tra infrastrutture energetiche, paesaggio e comunità locali;
- supportare le procedure autorizzative attraverso informazioni strutturate e verificabili;
- aggiornare progressivamente il modello durante le fasi di realizzazione e gestione.

In questo senso, il modello GIS–BIM costituisce la base informativa per la costruzione di un *Digital Twin* energetico-territoriale, inteso non come semplice replica digitale dello spazio fisico, ma come ambiente operativo per il monitoraggio, la simulazione e il miglioramento continuo delle strategie energetiche locali.

2.17.2 DIGITAL TWIN E GESTIONE ADATTIVA DEI SISTEMI ENERGETICI

All'interno del *framework* proposto, il *Digital Twin* assume una funzione strategica nella transizione da una pianificazione statica a una gestione adattiva del territorio.

Attraverso l'integrazione di dati energetici, ambientali e territoriali, il modello digitale consente di monitorare l'evoluzione dei sistemi energetici locali, valutare scenari futuri e supportare decisioni basate su evidenze. Nel caso delle CER, il *Digital Twin* può favorire:

- la previsione dei rapporti tra produzione rinnovabile e domanda energetica locale;
- l'ottimizzazione dei flussi energetici attraverso modelli di simulazione;
- il monitoraggio delle performance degli impianti;
- la valutazione degli effetti territoriali delle scelte progettuali;
- la condivisione delle informazioni con gli attori coinvolti nella governance.

La componente più innovativa non risiede quindi nella tecnologia digitale in sé, ma nella possibilità di creare un sistema di apprendimento territoriale continuo, nel quale dati, progettazione e gestione evolvono in modo iterativo.

2.17.3 INDICATORI INTEGRATI ENERGIA–AMBIENTE–PAESAGGIO (KPI TERRITORIALI)

Un elemento fondamentale del *framework* riguarda la definizione di indicatori multidimensionali capaci di valutare gli interventi FER oltre la sola dimensione energetica. Gli indicatori Energia–Ambiente–Paesaggio consentono infatti di analizzare simultaneamente: prestazioni energetiche e capacità produttiva degli impianti; compatibilità ambientale e resilienza ecosistemica; trasformazioni paesaggistiche e qualità percettiva; accettabilità sociale e distribuzione dei benefici territoriali. L'integrazione dei KPI all'interno del CdE permette di trasformare il monitoraggio da attività finale di verifica a processo continuo di supporto decisionale.

Gli indicatori diventano quindi strumenti dinamici, adattabili alle caratteristiche dei diversi territori e utilizzabili per confrontare scenari progettuali alternativi, facilitando la replicabilità del modello in contesti differenti.

2.17.4 PROTOCOLLI ESG E SISTEMI DI MONITORAGGIO DELLA SOSTENIBILITÀ TERRITORIALE

Nel *framework* proposto, i protocolli ESG vengono considerati come strumenti di organizzazione e comunicazione delle *performance* ambientali, sociali e di governance generate dai sistemi energetici locali. La loro integrazione consente di affiancare agli indicatori tecnici tradizionali una valutazione più ampia degli effetti territoriali delle CER e delle FER integrate. La dimensione ambientale riguarda la riduzione delle emissioni, la tutela degli ecosistemi e l'uso responsabile delle risorse; la dimensione sociale considera partecipazione, inclusione energetica e distribuzione dei benefici; la dimensione della governance valuta trasparenza, collaborazione istituzionale e capacità gestionale.

In questa prospettiva, gli ESG non rappresentano un sistema certificativo separato, ma una struttura di supporto alla valutazione strategica del progetto, coerente con una visione di transizione energetica orientata alla sostenibilità territoriale.

2.17.5 FUNZIONE DEL CDE NEL FRAMEWORK REPLICABILE

Il Common Data Environment costituisce quindi il collegamento operativo tra conoscenza territoriale, progettazione integrata e gestione adattiva. La sua funzione principale è trasformare dati frammentati in conoscenza condivisa, permettendo ai territori di

sviluppare capacità autonome di pianificazione, valutazione e gestione dei sistemi energetici. La replicabilità del *framework* non deriva dalla semplice applicazione di strumenti digitali standardizzati, ma dalla possibilità di trasferire una struttura metodologica adattabile, composta da: ambiente informativo condiviso; integrazione GIS–BIM; *Digital Twin* energetico-territoriale; indicatori multidimensionali; processi decisionali partecipativi.

In questo modo il CdE diventa l'infrastruttura digitale attraverso cui il territorio può apprendere, adattarsi e governare la transizione energetica nel tempo, rafforzando la capacità delle comunità locali di sviluppare sistemi FER e CER coerenti con le proprie caratteristiche ambientali, sociali e paesaggistiche.

2.18 CONCLUSIONI

Il presente capitolo ha evidenziato come la transizione energetica territoriale non possa essere interpretata esclusivamente come un processo tecnologico finalizzato alla diffusione delle fonti rinnovabili, ma debba essere considerata come una trasformazione complessa che coinvolge simultaneamente dimensioni energetiche, ambientali, paesaggistiche, digitali e socio-istituzionali.

L'analisi dei casi studio, il ciclo di ricerca-applicazione sviluppato e l'approfondimento degli strumenti GIS-BIM, *Digital Twin* e *Common Data Environment* hanno consentito di individuare i principali limiti degli approcci tradizionali alla pianificazione energetica e, al contempo, di definire le condizioni necessarie per costruire modelli territoriali più resilienti, partecipativi e replicabili.

Il principale risultato emerso riguarda la necessità di superare una visione settoriale della transizione energetica, sostituendola con un approccio integrato nel quale dati, competenze, strumenti digitali e processi partecipativi concorrono alla costruzione di decisioni territoriali basate su evidenze.

2.18.1 PRINCIPALI GAP E OPPORTUNITÀ

L'analisi condotta ha evidenziato quattro principali criticità che limitano oggi l'efficacia dei processi di sviluppo delle CER e delle FER integrate nel territorio. Il primo riguarda il *gap* informativo, determinato dalla frammentazione dei dati energetici, ambientali e territoriali e dalla difficoltà di integrare informazioni provenienti da fonti e livelli amministrativi differenti. Tale condizione riduce la

capacità preventiva di valutare compatibilità territoriali, impatti cumulativi e scenari alternativi. Il secondo riguarda il *gap* decisionale, legato alla prevalenza di procedure autorizzative spesso orientate alla verifica *ex post* degli interventi, piuttosto che alla costruzione anticipata di scenari condivisi e supportati da strumenti tecnico-scientifici. Il terzo riguarda il *gap* istituzionale e organizzativo, evidenziato dalla difficoltà di molte amministrazioni locali nel gestire processi complessi che richiedono competenze multidisciplinari, coordinamento multilivello e capacità di gestione dei dati. Il quarto riguarda il *gap* sociale, relativo alla limitata partecipazione delle comunità locali nei processi decisionali e alla conseguente difficoltà di costruire consenso e appartenenza attorno alle infrastrutture energetiche.

Tali criticità rappresentano tuttavia altrettante opportunità di innovazione. L'integrazione tra strumenti digitali interoperabili, modelli di governance partecipativa e approcci progettuali sensibili al paesaggio consente infatti di trasformare la transizione energetica in un processo territoriale condiviso, capace di generare benefici energetici, ambientali e sociali.

2.18.2 STRATEGIE DI INTEGRAZIONE MULTIDISCIPLINARE

Alla luce dei *gap* individuati, il *framework* proposto si fonda sull'integrazione di quattro dimensioni operative tra loro interdipendenti. La prima è la dimensione energetico-territoriale, nella quale CER e FER vengono interpretate come elementi di trasformazione del territorio e non come semplici infrastrutture tecniche. La progettazione energetica deve quindi essere integrata con analisi spaziali, caratteristiche paesaggistiche, disponibilità delle risorse rinnovabili e condizioni socio-economiche locali. La seconda è la dimensione digitale, basata sull'utilizzo coordinato di GIS, BIM, piattaforme di *Common Data Environment* e modelli *Digital Twin*. Tali strumenti permettono di integrare dati eterogenei, simulare scenari alternativi e supportare processi decisionali trasparenti e verificabili. La terza è la dimensione socio-istituzionale, nella quale il *Capacity Building* assume un ruolo centrale per rafforzare competenze locali, capacità amministrative e forme di collaborazione tra enti pubblici, operatori economici e comunità. La quarta è la dimensione progettuale e culturale, nella quale il paesaggio, il *design* e le pratiche partecipative diventano strumenti per migliorare l'integrazione degli impianti

energetici nei contesti locali, trasformandoli da elementi potenzialmente conflittuali a dispositivi di rigenerazione territoriale.
Queste dimensioni non rappresentano ambiti separati, ma componenti di un unico sistema operativo nel quale innovazione tecnologica, qualità progettuale e partecipazione sociale si rafforzano reciprocamente.

2.18.3 RACCOMANDAZIONI: POLICY MAKERS, PROGETTISTI E COMUNITÀ LOCALI

Le evidenze emerse consentono di formulare alcune raccomandazioni operative rivolte ai principali attori coinvolti nei processi di transizione energetica.
Per la *policy makers*, risulta necessario favorire una maggiore integrazione tra pianificazione energetica, pianificazione territoriale e strumenti digitali di supporto decisionale. La semplificazione normativa dovrebbe essere accompagnata da sistemi informativi interoperabili capaci di aumentare la qualità preventiva delle valutazioni e ridurre conflitti e ritardi autorizzativi.
Per i progettisti e gli operatori tecnici, emerge la necessità di adottare approcci integrati fin dalle prime fasi progettuali, combinando strumenti GIS-BIM, analisi energetiche, valutazioni paesaggistiche e scenari previsionali. La progettazione delle FER deve essere considerata come un processo multidimensionale nel quale prestazioni energetiche, qualità ambientale e inserimento territoriale vengono valutati congiuntamente.
Per le comunità locali, il ruolo non deve limitarsi alla consultazione finale, ma deve evolvere verso forme di partecipazione attiva nella progettazione, gestione e monitoraggio dei sistemi energetici. Le CER rappresentano in questo senso strumenti privilegiati per sviluppare consapevolezza energetica, nuove competenze e forme innovative di collaborazione territoriale.

2.18.4 PROSPETTIVE FUTURE DI RICERCA E SVILUPPI APPLICATIVI

Il modello pensato apre diverse prospettive di ricerca finalizzate alla sua validazione e applicazione in contesti territoriali differenti.
Un primo ambito riguarda il potenziamento degli strumenti digitali attraverso lo sviluppo di modelli territoriali dinamici, capaci di

integrare dati energetici, ambientali e sociali per supportare scenari previsionali e processi decisionali adattivi.

Un secondo ambito riguarda l'approfondimento dei modelli di governance delle CER, con particolare attenzione ai meccanismi di partecipazione, redistribuzione dei benefici e costruzione della fiducia tra istituzioni e comunità locali.

Un terzo ambito riguarda la definizione di sistemi di indicatori multidimensionali in grado di valutare non soltanto la produzione energetica, ma anche gli effetti ambientali, paesaggistici e sociali degli interventi.

Infine, un ulteriore sviluppo riguarda la sperimentazione del *framework* in differenti contesti territoriali, al fine di verificarne la capacità di adattamento e replicabilità rispetto a condizioni climatiche, infrastrutturali e socio-economiche diverse.

2.18.5 IMPLICAZIONI METODOLOGICHE PER LO SVILUPPO DEL FRAMEWORK

Alla luce delle analisi svolte, il *framework* elaborato può essere interpretato come un modello operativo multilivello finalizzato a integrare conoscenza territoriale, innovazione digitale e capacità istituzionale. Il suo valore non risiede nella proposta di una nuova tecnologia, ma nella capacità di mettere in relazione strumenti già disponibili all'interno di un processo coordinato, adattivo e replicabile.

Il *framework* si articola quindi secondo quattro principi fondamentali:

1. Conoscenza integrata del territorio
   Attraverso GIS multilivello, analisi energetiche e valutazioni ambientali, il territorio viene interpretato come sistema complesso nel quale individuare opportunità, vulnerabilità e compatibilità.
2. Progettazione integrata energia–paesaggio
   Le infrastrutture energetiche vengono concepite come elementi territoriali capaci di generare qualità spaziale, valore ambientale e benefici collettivi.
3. Governance digitale e partecipativa
   L'integrazione tra GIS-BIM, *Digital Twin* e *Common Data Environment* consente di migliorare trasparenza, monitoraggio e collaborazione tra gli attori coinvolti.
4. *Capacity Building* e replicabilità territoriale

La costruzione di competenze locali permette di trasformare il modello in un processo adattabile a differenti contesti, favorendo una diffusione scalabile delle CER e delle FER integrate.

In questa prospettiva, la transizione energetica viene reinterpretata come un progetto territoriale complesso nel quale tecnologia, paesaggio e comunità concorrono alla costruzione di sistemi energetici più resilienti, inclusivi e sostenibili.

Il *framework* proposto costituisce quindi una base metodologica per orientare future applicazioni progettuali e sperimentazioni territoriali, ponendo la governance integrata come elemento centrale della trasformazione energetica contemporanea.

3 | TERZA PARTE
IPOTESI E OBIETTIVI DELLA RICERCA

3.1 INTRODUZIONE

Il presente capitolo rappresenta il passaggio dalla fase analitico-critica alla formulazione dell'impianto ipotetico della ricerca. Le evidenze emerse nei capitoli precedenti mostrano come la pianificazione delle FER e delle CER sia caratterizzata da una discontinuità tra strumenti normativi, processi progettuali e procedure autorizzative. In particolare, la fase decisionale risulta spesso frammentata e tardiva rispetto alle scelte progettuali, con una collocazione delle valutazioni ambientali e paesaggistiche a valle del processo. Tale configurazione riduce la capacità di incidere sulle opzioni strategiche iniziali e limita l'efficacia complessiva della pianificazione territoriale. Ne deriva la necessità di un impianto metodologico capace di anticipare l'integrazione tra dati, strumenti e livelli decisionali, rafforzando la coerenza tra progetto energetico e contesto territoriale.

3.2 IPOTESI DI RICERCA E CONTINUITÀ CON LO STATO DELL'ARTE

L'ipotesi di ricerca si fonda sull'esigenza di ricostruire una continuità operativa tra pianificazione, progettazione e autorizzazione, superando la frammentazione evidenziata nello stato dell'arte. L'assenza di un dispositivo strutturato nelle fasi preliminari determina infatti una scarsa integrazione tra dimensioni energetiche, ambientali, paesaggistiche e socio-territoriali. In risposta a tale criticità, la ricerca propone il rafforzamento del ruolo del progetto come dispositivo generativo, in grado di anticipare le valutazioni e orientare le scelte. Si assume pertanto che una struttura modulare di analisi e supporto decisionale, organizzata per temi e scale, possa ridurre la distanza tra conoscenza e decisione, migliorando la qualità e la coerenza dei processi.

3.3 APPROCCIO TRANSDISCIPLINARE A MULTI-SCALA ENERGIA–AMBIENTE–PAESAGGIO

La transizione energetica implica effetti simultanei su sistemi infrastrutturali, assetti paesaggistici e dinamiche sociali, rendendo insufficiente un approccio settoriale. La ricerca adotta un'impostazione transdisciplinare e multi-scala che integra tre dimensioni interdipendenti:

- energetica, legata alla produzione, distribuzione e organizzazione delle fonti rinnovabili;

- ambientale e paesaggistica, relativa agli impatti su ecosistemi, suolo e configurazioni visive;
- socio-culturale, connessa a partecipazione, percezione e accettabilità delle trasformazioni.

Tali dimensioni interagiscono attraverso una relazione non gerarchica ma circolare tra scala macro (politiche e infrastrutture), meso (pianificazione territoriale) e micro (progetto architettonico e urbano). In questo quadro, il paesaggio assume il ruolo di interfaccia operativa tra energia e territorio.

3.4 PARADIGMA METODOLOGICO: RESEARCHING BY DESIGN

La ricerca è fondata sull'approccio del *Research by Design*, inteso come metodologia integrata di produzione della conoscenza attraverso l'azione progettuale. Il progetto è assunto come strumento epistemologico in grado di generare conoscenza a partire dall'interazione tra dati, simulazioni e sperimentazione spaziale. Il processo metodologico si articola in un *framework* modulare (M1–M6), che integra analisi, progettazione e valutazione.

3.4.1 STRUTTURA MODULARE M1–M6

Il *framework* si articola come segue:

- M1 – Analisi territoriale e costruzione del quadro conoscitivo
  Costruzione della base informativa attraverso l'integrazione di dati GIS, energetici, ambientali e territoriali finalizzata alla caratterizzazione del contesto e all'individuazione delle vulnerabilità territoriali.
- M2 – Integrazione territoriale e definizione degli scenari
  Analisi delle relazioni tra risorse energetiche, caratteristiche territoriali, vincoli e opportunità, mediante la costruzione di scenari multi-scala per la transizione energetica locale.
- M3 – Integrazione paesaggistica e valutazione percettiva
  Analisi della compatibilità paesaggistica attraverso strumenti digitali di simulazione, valutazione degli impatti visivi e interpretazione dei valori culturali e identitari del territorio.
- M4 – Valutazione ambientale e multicriteriale degli scenari progettuali
  Confronto delle alternative attraverso indicatori ambientali,

territoriali ed energetici finalizzati alla selezione delle soluzioni maggiormente sostenibili e resilienti.

- M5 – Governance multilivello e supporto ai processi decisionali
  Coordinamento tra soggetti istituzionali, comunità locali e *stakeholder* attraverso strumenti collaborativi, sistemi informativi interoperabili e integrazione dei procedimenti autorizzativi.
- M6 – Applicazione progettuale integrata e implementazione operativa
  Traduzione del *framework* nei contesti territoriali specifici attraverso lo sviluppo progettuale, la verifica della conformità normativa e procedurale, il monitoraggio dei risultati e la predisposizione di strategie replicabili.

Il sistema non è sequenziale, ma iterativo e adattivo, e consente di integrare continuamente analisi e progetto.

3.4.2 CICLO ITERATIVO DELAL RICERCA

Il modello operativo si sviluppa secondo un ciclo continuo articolato in cinque fasi: Analisi: costruzione del quadro conoscitivo integrato; Progettazione: definizione di scenari energetico-territoriali; perimentazione: simulazione e test dei modelli; Valutazione: verifica della coerenza ambientale, paesaggistica e sociale; Disseminazione: trasferimento dei risultati agli *stakeholder*. Il ciclo consente un processo adattivo in cui ogni fase alimenta la successiva, riducendo la distanza tra teoria e applicazione.

3.5 CAPACITY BUILDING TERRITORIALE

Il *Capacity Building* è interpretato come infrastruttura immateriale della transizione energetica, finalizzata al rafforzamento delle competenze istituzionali, tecniche e sociali. Non si tratta di formazione puntuale, ma di un processo continuo di apprendimento territoriale che coinvolge amministrazioni, tecnici e comunità locali. L'obiettivo è migliorare la capacità dei territori di interpretare dati complessi, valutare scenari e partecipare ai processi decisionali, rafforzando la governance multilivello.

3.5.1 DIMENSIONI DEL CAPACITY BUILDING

Il rafforzamento delle competenze è suddiviso in tre aree principali:

- Competenze tecniche – strumetni digitali e analisi territoriale;

- Competenze organizzative – gestione dei provcessi decisionali;
- Competenze sociali – partecipazione e mediazione territoriale.

3.5.2 RUOLO DEGLI STAKEHOLDER

Gli *stakeholder* istituzionali e locali diventano attori attivi del processo decisionale, supportati da strumenti digitali e modelli di analisi condivisi. Ciò favorisce trasparenza, riduzione dei conflitti e maggiore qualità progettuale.

3.5.3 REPLICABILITÀ

La struttura modulare consente la trasferibilità delle metodologie a contesti differenti, garantendo adattabilità e coerenza operativa.

3.6 CONCLUSIONI

Il Capitolo III definisce un impianto metodologico integrato basato sul *Research by Design* e su un *framework* modulare M1–M6, orientato a superare la frammentazione tra pianificazione, progetto e autorizzazione. L'approccio proposto consente di trasformare le criticità del sistema attuale in opportunità progettuali, attraverso l'integrazione tra dimensione energetica, ambientale, paesaggistica e istituzionale. In questa prospettiva, il progetto assume un ruolo centrale come dispositivo di governance territoriale, mentre il *Capacity Building* rafforza la capacità dei territori di gestire la transizione energetica in modo consapevole, adattivo e condiviso.

3.7 OBIETTIVI DELLA RICERCA

3.7.1 PREMESSA

Se il capitolo precedente ha definito l'ipotesi di ricerca, chiarendo il quadro teorico, metodologico e concettuale entro cui si colloca lo studio, il presente capitolo ha l'obiettivo di tradurre tale ipotesi in un sistema strutturato di obiettivi, risultati attesi e indicatori di successo. In coerenza con l'approccio *Researching by Design* e con la logica del *Project Cycle Management* (PCM) & *Plan*, *Do*, *Check*, *Act* (PDCA), gli obiettivi della ricerca non sono intesi come enunciazioni astratte, ma come elementi operativi, verificabili e monitorabili nel tempo. Essi costituiscono il punto di connessione tra il quadro teorico sviluppato nei capitoli precedenti e la successiva dimensione sperimentale, progettuale e valutativa. La struttura del capitolo segue una progressiva operativizzazione articolata in quattro livelli

interdipendenti: un obiettivo generale, corrispondente al livello di impatto; una serie di obiettivi specifici, associati agli outcome di ricerca; i risultati attesi, riferiti agli output concreti; un sistema di indicatori finalizzato al monitoraggio multi-scala e alla verifica della coerenza interna dell'intero *framework* metodologico. La ricerca affronta una delle criticità centrali della transizione energetica contemporanea: la difficoltà di integrare, all'interno di processi decisionali complessi, obiettivi energetici, tutela ambientale e paesaggistica, governance territoriale e partecipazione degli attori locali. Tale complessità richiede un approccio interdisciplinare capace di superare la tradizionale frammentazione tra pianificazione energetica, progettazione territoriale e gestione istituzionale. In risposta a questa criticità, il progetto di ricerca assume una prospettiva transdisciplinare orientata all'azione, nella quale il progetto non rappresenta soltanto un esito applicativo finale, ma un vero e proprio dispositivo di produzione di conoscenza. L'obiettivo non consiste quindi nella semplice realizzazione di singoli interventi energetici, bensì nello sviluppo, nella sperimentazione e nella validazione di un *framework* metodologico integrato capace di supportare la pianificazione energetica territoriale, rafforzare i processi di governance partecipata, garantire compatibilità ambientale e paesaggistica e produrre modelli replicabili e trasferibili in differenti contesti territoriali.

3.7.2. OBIETTIVO GENERALE DELLA RICERCA

L'obiettivo generale della ricerca consiste nel contribuire ai processi di transizione energetica multi-scala attraverso la costruzione di un modello metodologico integrato che connetta ricerca, progettazione e sperimentazione operativa, promuovendo forme di governance partecipata e rafforzando le capacità locali e istituzionali necessarie allo sviluppo e alla replicabilità delle CER. Tale obiettivo si colloca al livello di impatto del Quadro Logico e si riferisce a un cambiamento strutturale di lungo periodo, che la ricerca intende sostenere mediante la produzione di conoscenze scientifiche, strumenti metodologici e sperimentazioni progettuali applicabili alla pianificazione energetica territoriale. Il *framework* proposto integra processi partecipativi, strumenti digitali avanzati, *Living Lab* territoriali e sistemi decisionali adattivi, con l'obiettivo di rendere la pianificazione e l'implementazione delle infrastrutture energetiche maggiormente coerenti con i valori

ambientali e paesaggistici, più efficaci dal punto di vista tecnico ed economico, più accettabili socialmente e maggiormente replicabili in contesti territoriali differenti. La ricerca assume inoltre che la transizione energetica non possa essere interpretata esclusivamente come un processo tecnologico, ma debba incorporare in maniera sistemica dimensioni culturali, sociali e paesaggistiche, garantendo che la trasformazione infrastrutturale avvenga attraverso processi adattivi, partecipativi e data-driven coerenti con il modello PCM–PDCA.

3.7.2.1 Integrazione tra ricerca, progettazione e sperimentazione (Researching by Design)

Un primo asse dell'obiettivo generale riguarda la capacità di integrare ricerca scientifica, progettazione e sperimentazione operativa in un processo iterativo di apprendimento continuo. La ricerca assume che la transizione energetica non debba essere affrontata come una sequenza lineare di decisioni tecniche, ma come un processo dinamico di costruzione progressiva della conoscenza. In questa prospettiva, il *Researching by Design* viene assunto come paradigma metodologico capace di trasformare il progetto in dispositivo conoscitivo, attraverso cui testare scenari alternativi, valutare impatti energetici, ambientali e paesaggistici e produrre evidenze utili a supportare la governance territoriale. L'adozione di un approccio multi-scala – articolato nelle dimensioni macro, eco, meso e micro – consente di interpretare la transizione energetica come processo sistemico, evitando soluzioni isolate e favorendo la coerenza verticale tra politiche nazionali, pianificazione regionale e interventi locali. Il progetto diviene pertanto il luogo in cui ipotesi teoriche, strumenti tecnici e istanze sociali vengono continuamente verificati, adattati e ridefiniti, generando conoscenza applicabile e scientificamente validabile.

3.7.2.2 Promuovere governance partecipata e replicabilità delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) attraverso il Capacity Building

Un secondo asse strategico dell'obiettivo generale riguarda il rafforzamento della governance partecipata quale condizione strutturale per la sostenibilità di lungo periodo dei processi di transizione energetica. La ricerca assume che l'efficacia delle Comunità Energetiche Rinnovabili non dipenda esclusivamente dall'infrastruttura tecnologica, ma soprattutto dalla capacità degli attori locali di comprenderne, governarne e adattarne i modelli organizzativi. In questa prospettiva, il *Capacity Building* viene assunto come leva metodologica centrale finalizzata ad abilitare una

partecipazione informata di cittadini, amministrazioni pubbliche e imprese locali, supportare i processi di costituzione e gestione delle CER e rafforzare competenze tecniche, amministrative, gestionali e decisionali. L'*empowerment* degli *stakeholder* territoriali costituisce pertanto una condizione necessaria non soltanto per la sostenibilità dei progetti pilota, ma soprattutto per garantire replicabilità e scalabilità dei modelli sperimentati. La governance partecipata viene così interpretata non come elemento accessorio del processo progettuale, ma come infrastruttura istituzionale indispensabile alla stabilizzazione di modelli territoriali di transizione energetica sostenibile.

3.8 OBIETTIVI SPECIFICI

La transizione energetica sostenibile rappresenta una sfida multidimensionale che richiede l'integrazione simultanea di innovazione tecnologica, pianificazione territoriale, governance collaborativa e strumenti di supporto alle decisioni capaci di operare su differenti scale spaziali. La complessità di tali processi deriva dal fatto che le decisioni energetiche producono effetti simultanei sulle dimensioni ambientali, economiche, infrastrutturali, sociali e paesaggistiche, richiedendo pertanto modelli metodologici in grado di superare approcci settoriali e frammentati. Il presente progetto propone un modello operativo multi-scala finalizzato a generare risultati misurabili, replicabili e coerenti con gli obiettivi europei e nazionali della transizione ecologica (cfr. Cap. 2, §2.6). L'impianto metodologico si fonda sull'integrazione tra innovazione tecnologica, strumenti normativi, pianificazione territoriale e partecipazione civica, configurando un ecosistema decisionale capace di supportare processi di pianificazione informati, adattivi e condivisi. La struttura logica degli obiettivi specifici, riportata nella Figura A.3 1 (Appendice 3), mette in relazione, per ciascun ambito di intervento, criticità individuate, strumenti metodologici adottati e benefici attesi, coerentemente con il paradigma del *Researching by Design*, che riconosce al progetto una funzione conoscitiva e sperimentale (Frayling, 1993) [34]. L'impiego di

[34] Cfr. Frayling, C. (1994). Research in art and design (Royal College of Art Research Papers, vol 1, no 1, 1993/4). Nel saggio *Research in Art and Design*, Christopher Frayling mette in discussione la tradizionale separazione tra pratica creativa e ricerca, evidenziando come anche le attività artistiche e

strumenti digitali avanzati, quali BIM-GIS, *digital twin* e dashboard di monitoraggio, risponde all'esigenza di supportare processi decisionali complessi e multilivello sempre più centrali nella pianificazione energetica contemporanea (Batty, 2018[35]; Eastman et al., 2011[36]; Castán Broto, V., et al, 2013). La rappresentazione integrata dei dati territoriali consente infatti di superare approcci statici e settoriali, favorendo una lettura sistemica delle trasformazioni territoriali in atto. Parallelamente, la promozione di modelli di governance partecipata e di *capacity building* si fonda sui contributi della letteratura sulla *collaborative governance* e sui *Living Labs*, intesi come ambienti di co-creazione e sperimentazione aperta che coinvolgono attivamente cittadini, istituzioni e attori economici nei processi di pianificazione energetica (Ansell & Gash, 2008[37]; Schaffers et al., 2011[38]; Castán Broto, V., et al, 2013[39]). L'integrazione tra energia, ambiente e paesaggio, esplicitata negli obiettivi 3.4 e 3.5, richiama inoltre il quadro concettuale e normativo delineato dalla Convenzione Europea del Paesaggio (Council of Europe, 2000[40]) e dagli studi sugli *energy landscapes*, che sottolineano la necessità di considerare gli impatti territoriali e percettivi delle infrastrutture energetiche come parte integrante delle strategie di transizione (Chezel, E., et al, 2018[41]; Broto,

progettuali possano generare conoscenza. L'autore distingue tre principali modalità di ricerca: research into art and design, che riguarda studi storici, teorici e critici sulle arti e sul design; research through art and design, in cui il processo creativo diventa strumento di indagine e produzione di conoscenza documentata; e research for art and design, che consiste nell'insieme di esplorazioni e riferimenti funzionali alla realizzazione dell'opera o del progetto. Questa distinzione chiarisce come la pratica artistica e progettuale possa assumere diverse forme di relazione con la ricerca, variando dal supporto alla creazione fino alla produzione esplicita di conoscenza condivisibile.

35 Batty, M. (2018). Digital twins. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 45(5), 817-820.

36 Eastman, C. M. (2011). BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. John Wiley & Sons.

37 Ansell, C., & Gash, A. (2008). Collaborative governance in theory and practice. *Journal of public administration research and theory*, *18*(4), 543-571.

38 Cfr. Schaffers, H., Sällström, A., Pallot, M., Hernández-Muñoz, J. M., Santoro, R., & Trousse, B. (2011, June). Integrating living labs with future internet experimental platforms for co-creating services within smart cities. In *2011 17th International Conference on Concurrent Enterprising* (pp. 1-11). IEEE. Gli autori evidenziano il ruolo dei Living Labs come ambienti di innovazione aperta che integrano infrastrutture tecnologiche (testbed, piattaforme ICT, dati pubblici) con risorse sociali e organizzative (comunità di utenti, collaborazione tra stakeholder, capitale umano), favorendo processi di co-creazione e sperimentazione di servizi per smart cities.

39 Castán Broto, V., Oballa, B., & Junior, P. (2013). Governing climate change for a just city: challenges and lessons from Maputo, Mozambique. *Local Environment*, *18*(6), 678-704.

40 Council of Europe. (2000). *European Landscape Convention*. Florence.

41 Chezel, E., & Labussière, O. (2018). Energy landscape as a polity. Wind power practices in Northern Friesland (Germany). *Landscape Research*, *43*(4), 503-516.

V. C.; 2019[42]; Pasqualetti, 2011[43]). Nel suo insieme, l'impianto metodologico proposto mira alla costruzione di modelli replicabili e scalabili, in linea con le strategie europee per una transizione energetica sostenibile, inclusiva e territorialmente consapevole (European Commission, 2019[44]; IRENA, 2020; OECD, 2020[45]).

3.8.1 ALLINEAMENTO METODOLOGICO DEL FRAMEWORK OPERATIVO

Al fine di garantire solidità scientifica e coerenza metodologica, i moduli operativi del *framework* proposto (M1–M6) vengono esplicitamente allineati ai principali riferimenti teorici presenti nella letteratura internazionale. Tale allineamento risponde a una duplice esigenza: evitare una lettura puramente procedurale dei moduli operativi e dimostrare come ciascuna fase del processo sia radicata in approcci consolidati di pianificazione territoriale, governance multilivello, progettazione ambientale e innovazione socio-tecnica. La Tabella A.3 1 (Appendice 3) evidenzia il ruolo dei moduli non come semplici fasi sequenziali, ma come dispositivi cognitivi e decisionali dotati di specifiche funzioni interpretative e trasformative del territorio.

Il *framework* si configura quindi come un sistema integrato capace di tradurre concetti complessi – resilienza territoriale, integrazione paesaggistica, partecipazione, sostenibilità e transizione energetica – in strumenti applicabili, verificabili e trasferibili. In particolare: M1–M2 risultano fondati sulle teorie della pianificazione data-driven e della progettazione strategica adattativa (Batty, 2018; Goodchild, 2018; Healey, 2007; Roggema, 2016); M3 traduce i contributi della *landscape research* e della visualizzazione avanzata in strumenti in grado di anticipare conflitti percettivi e culturali, trasformando la valutazione paesaggistica da processo reattivo a processo preventivo (Bishop, 2015; Antrop, 2018); M4 garantisce la coerenza ambientale del sistema

---

42 Broto, V. C. (2019). *Urban energy landscapes*. Cambridge University Press.

43 Pasqualetti, M. J. (2011). Opposing wind energy landscapes: a search for common cause. *Annals of the Association of American Geographers*, *101*(4), 907-917.

44 European Commission. (2019). *Clean energy for all Europeans package*. Publications Office of the European Union.

45 OECD (2020), "Smart Cities and Inclusive Growth: Building on the outcomes of the 1st OECD Roundtable fon Smart Cities and Inclusive Growth", OECD Regional Development Papers, No. 91, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/8a4ce475-en.

quantitativo e qualitativo nell'approccio procedurale (Finnveden et al., 2009); M5–M6 costituiscono il livello di sintesi del *framework*, integrando governance multilivello, analisi multi-criterio e resilienza socio-territoriale a supporto di processi autorizzativi più trasparenti e contestualizzati (Hooghe & Marks, 2003; ESPON, 2020; Sharifi, 2016; Meerow et al., 2019).

Nel loro insieme, i moduli operano come infrastruttura cognitiva della transizione energetica territoriale, risultando particolarmente rilevanti nel contesto italiano, caratterizzato da frammentazione normativa, disomogeneità regionale e crescente complessità dei processi autorizzativi relativi a FER e CER.

3.8.2 OBIETTIVI SPECIFICI OPERATIVI DELAL RICERCA

Il *framework* metodologico viene articolato in cinque obiettivi specifici strettamente interconnessi. Il primo obiettivo riguarda l'integrazione tra ricerca, progettazione e sperimentazione attraverso l'approccio *Researching by Design*. La crescente complessità dei sistemi energetici rende infatti insufficiente l'impiego di modelli decisionali statici basati su dati frammentari. Il progetto viene pertanto assunto come dispositivo iterativo capace di integrare analisi scientifica, simulazione, sperimentazione e adattamento continuo (Frayling, 1993; Endsley, M. R., et al, 2025[46]; Roggema, 2016). L'integrazione tra BIM, GIS e *digital twin* consente di sviluppare simulazioni multidimensionali capaci di supportare decisioni territoriali *evidence-based* (Batty, 2018; Bolpagni et al., 2019; Calvano et al., 2022). Il secondo obiettivo riguarda il rafforzamento della governance partecipata e dei processi di *Capacity Building*. La letteratura dimostra come la sostenibilità dei processi di transizione energetica dipenda direttamente dal coinvolgimento attivo di cittadini, imprese e istituzioni locali, mentre livelli ridotti di partecipazione compromettono accettabilità sociale ed efficacia operativa dei progetti (Arnstein, 1969; Ansell & Gash, 2008)[47]. *Living Lab* territoriali, piattaforme collaborative e percorsi di co-progettazione rappresentano in questo quadro strumenti fondamentali per

[46] Endsley, M.R., & Jones, D.G. (2025). Designing for Situation Awareness: An Approach to User-Centered Design, Third Edition (3rd ed.). CRC Press.

[47] Arnstein, S. R. (1969). A ladder of citizen participation. *Journal of the American Institute of planners*, *35*(4), 216-224.

consolidare *empowerment* locale, coesione sociale e competenze diffuse. Il terzo obiettivo concerne lo sviluppo di strumenti digitali avanzati e metodologie partecipative a supporto dei processi decisionali. La gestione integrata di dati territoriali complessi richiede ecosistemi digitali capaci di elaborare simulazioni multi-criterio e rappresentazioni territoriali dinamiche. L'integrazione tra BIM-GIS, dashboard interattive e sistemi *digital twin* consente di costruire processi decisionali trasparenti, verificabili e aggiornabili nel tempo, migliorando qualità delle decisioni progettuali e apprendimento collettivo (Batty et al., 2012; Eastman et al., 2018; Hietanen & Saari, 2019)[48]. Il quarto obiettivo riguarda la costruzione di sinergie tra energia, ambiente e paesaggio. La pianificazione energetica tradizionale produce frequentemente conflitti con sistemi ambientali sensibili, determinando consumo di suolo, impatti visivi e resistenze territoriali (OECD, 2017[49]; United Nations, 2019)[50]. Il *framework* proposto assume il paesaggio non come vincolo statico ma come variabile progettuale attiva, integrando simulazioni territoriali, mappe di compatibilità e progettazione infrastrutturale finalizzate a ridurre conflitti territoriali e migliorare qualità ambientale e paesaggistica. Il quinto obiettivo concerne la costruzione di modelli metodologici replicabili e scalabili. La letteratura evidenzia come molti progetti pilota falliscano nel trasferimento su scala più ampia a causa dell'assenza di standardizzazione metodologica (Geels et al., 2017; OECD, 2019). La ricerca affronta tale criticità attraverso cicli iterativi di progettazione, implementazione, monitoraggio e valutazione supportati da sistemi digitali integrati, protocolli operativi standardizzati e dashboard multi-criterio, finalizzati alla trasferibilità delle buone pratiche e al rafforzamento della resilienza territoriale. Nel loro insieme, tali obiettivi definiscono un *framework* operativo unitario in cui innovazione tecnologica, governance collaborativa, pianificazione territoriale e sostenibilità ambientale convergono nella

---

[48] Batty, M., Axhausen, K. W., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., ... & Portugali, Y. (2012). Smart cities of the future. *The European Physical Journal Special Topics*, *214*(1), 481-518.

[49] OECD (2017), The Governance of Land Use in OECD Countries: Policy Analysis and Recommendations, OECD Regional Development Studies, OECD Publishing, Paris.

[50] United Nations, Department of Economic and Social Affairs. (2019). The future is now: Science for achieving sustainable development – Global Sustainable Development Report 2019. United Nations.

costruzione di un modello di transizione energetica integrato, adattivo e replicabile.

3.9 RISULTATI ATTESI

La transizione energetica sostenibile richiede approcci integrati capaci di connettere innovazione tecnologica, governance partecipativa e pianificazione territoriale. La letteratura recente evidenzia come l'impiego di strumenti digitali avanzati – quali sistemi BIM-GIS, *digital twin* e piattaforme di simulazione – combinato con metodologie partecipative basate su *Living Lab* e processi di *Capacity Building*, possa migliorare significativamente la qualità delle decisioni, l'efficacia dei processi di governance e l'accettabilità sociale degli interventi energetici (Boje, G., et al, 2020[51]; Bilal et al., 2016; Veeckman, Schuurman, & Valcke, 2013; Schaffers et al., 2011). Persistono tuttavia limiti rilevanti legati alla difficoltà di replicare i modelli sperimentali, standardizzare i processi operativi e misurare in modo sistematico gli impatti ambientali, sociali ed economici generati dai progetti di transizione energetica (United Nations, 2019). In risposta a tali criticità, la presente ricerca non si limita alla realizzazione di singole infrastrutture o progetti pilota, ma mira alla produzione di conoscenza trasferibile, metodologie operative replicabili e strumenti decisionali capaci di supportare policy maker, *stakeholder* territoriali e comunità locali nei processi di pianificazione energetica sostenibile (Batty et al., 2012[52]; European Commission, 2020). L'integrazione tra infrastrutture digitali, modelli partecipativi e sperimentazione progettuale consente infatti di sviluppare un *framework* metodologico in grado di produrre risultati misurabili su due livelli complementari: da un lato, la realizzazione di sistemi operativi concreti e sperimentazioni territoriali; dall'altro, la costruzione di conoscenza scientifica applicabile e trasferibile ad altri contesti territoriali (Boje et al., 2020;

---

[51] Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in construction*, *114*, 103179.

[52] Batty, M., Axhausen, K. W., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., ... & Portugali, Y. (2012). Smart cities of the future. *The European Physical Journal Special Topics*, *214*(1), 481-518.

United Nations, 2019; Bilal et al., 2016[53]). I risultati attesi vengono articolati nei seguenti ambiti principali.

3.9.1 RAFFORZAMENTO DELLE CAPACITÀ TECNICHE E DELLA GOVERNANCE

Uno dei risultati centrali della ricerca riguarda il rafforzamento delle competenze tecniche, amministrative e decisionali degli attori coinvolti nei processi di transizione energetica, comprendendo amministrazioni pubbliche, operatori economici, imprese locali e cittadini. La letteratura evidenzia come la governance energetica contemporanea richieda non soltanto competenze tecnologiche, ma anche capacità istituzionali diffuse, in grado di gestire processi complessi caratterizzati da elevata interdipendenza tra dimensione energetica, ambientale, economica e sociale. In tale prospettiva, la sperimentazione di processi partecipativi associata all'utilizzo di strumenti digitali avanzati consente di migliorare significativamente la capacità di governare sistemi territoriali complessi. Gli strumenti previsti comprendono percorsi formativi dedicati alle amministrazioni locali, *workshop* partecipativi multi-attore, piattaforme digitali collaborative integrate con sistemi BIM-GIS e modelli *digital twin*, finalizzati a rafforzare le capacità di gestione, monitoraggio e valutazione delle decisioni territoriali. I benefici attesi riguardano il miglioramento dell'efficacia della governance multilivello, una maggiore consapevolezza decisionale, il rafforzamento del capitale sociale territoriale e una maggiore coesione tra gli attori coinvolti. Sul piano operativo, i principali output attesi consistono nello sviluppo di piattaforme digitali operative, nella realizzazione di percorsi di formazione specialistica completati e nella produzione di linee guida metodologiche per il supporto alla governance energetica territoriale *evidence-based*. Tra le criticità potenziali emerge il rischio di limitata partecipazione nei processi collaborativi, mitigabile attraverso strategie di coinvolgimento progressivo, comunicazione continua e meccanismi di engagement strutturato.

---

[53] Bilal, M., Oyedele, L. O., Qadir, J., Munir, K., Ajayi, S. O., Akinade, O. O., ... & Pasha, M. (2016). Big Data in the construction industry: A review of present status, opportunities, and future trends. *Advanced engineering informatics*, *30*(3), 500-521.

3.9.2 ATTIVAZIONE DI PROGETTI PILOTA E FILIERE LOCALI SOSTENIBILI

Un secondo risultato atteso riguarda la sperimentazione operativa di progetti pilota territoriali finalizzati a verificare sul campo l'efficacia del *framework* metodologico proposto.

In particolare, la ricerca considera la realizzazione di Comunità Energetiche Rinnovabili (CER), *micro-grid* locali e infrastrutture FER integrate come contesti sperimentali in grado di produrre evidenze empiriche utili alla validazione metodologica del modello (United Nations, 2019). Numerosi studi dimostrano come le CER possano rappresentare strumenti strategici non soltanto per la produzione energetica decentralizzata, ma anche per la costruzione di filiere economiche locali sostenibili, la creazione di *green jobs* e la generazione di nuove opportunità occupazionali coerenti con i principi della transdisciplinarità e dell'innovazione socio-tecnica (Steen, van Bueren, & van Bueren, 2017[54]; European Commission, 2020). Gli strumenti operativi previsti comprendono progettazione partecipata, sistemi digitali per la gestione condivisa dei flussi energetici, simulazioni multi-criterio di scenari territoriali e monitoraggio continuo delle performance energetiche. La letteratura sui *Living Lab* e sui *Digital Twin* territoriali sottolinea come il coinvolgimento attivo degli *stakeholder*, associato alla simulazione avanzata dei flussi energetici, possa incrementare robustezza decisionale e accettabilità sociale delle soluzioni progettuali (Veeckman, Schuurman, & Valcke, 2013; Boje, Guerriero, Kubicki, & Rezgui, 2020). Permangono tuttavia criticità legate all'allineamento tra *stakeholder* differenti e alla replicabilità dei modelli sperimentali, elementi che richiedono processi iterativi di co-progettazione e meccanismi continui di *feedback* adattivo (Schaffers et al., 2011; Bilal et al., 2016). I benefici attesi comprendono incremento occupazionale locale, attrazione di investimenti, rafforzamento delle competenze professionali territoriali e sviluppo di economie locali legate alla transizione energetica. Gli output concreti includono CER operative, accordi di partenariato

[54] Steen, K., & Van Bueren, E. (2017). The defining characteristics of urban living labs. *Technology innovation management review*, *7*(7).

locale e strumenti digitali condivisi per la gestione energetica distribuita.

3.9.3 MIGLIORAMENTO DELLA QUALITÀ AMBIENTALE E PAESAGGISTICA

La ricerca mira inoltre a migliorare la qualità ambientale e paesaggistica dei territori interessati dalla trasformazione energetica, affrontando uno dei principali limiti della pianificazione energetica tradizionale, spesso caratterizzata da approcci settoriali incapaci di integrare correttamente esigenze infrastrutturali e tutela territoriale. L'obiettivo consiste nel ridurre gli impatti ambientali, territoriali e visivi delle infrastrutture energetiche mediante una progettazione integrata che consideri simultaneamente prestazioni energetiche, compatibilità ambientale e valori paesaggistici locali. L'impiego di strumenti digitali avanzati, in particolare BIM-GIS integrato e modelli *Digital Twin* territoriali, consente di realizzare simulazioni predittive degli impatti ambientali, valutazioni territoriali contestualizzate e verifiche preventive della compatibilità progettuale (Boje et al., 2020; Batty et al., 2012). I benefici attesi riguardano la riduzione della vulnerabilità ambientale, la tutela dei sistemi ecosistemici, la valorizzazione delle risorse paesaggistiche locali e una migliore integrazione tra infrastrutture energetiche e territorio. Gli *output* concreti includono scenari progettuali territorialmente compatibili, micro-infrastrutture energetiche integrate, piani di mobilità sostenibile e soluzioni progettuali coerenti con le strategie europee di resilienza urbana e sostenibilità ambientale (European Commission, 2020).

3.9.4 PRODUZIONE DI CONOSCENZA TRASFERIBILE PER POLICY MAKER E STAKEHOLDER

Oltre ai risultati operativi diretti, uno degli obiettivi strategici della ricerca riguarda la produzione di conoscenza trasferibile, orientata alla costruzione di metodologie, *framework* decisionali e linee guida replicabili. La letteratura internazionale evidenzia come la disponibilità di strumenti standardizzati e scalabili costituisca una condizione fondamentale per supportare *policy maker* e *stakeholder* territoriali nella definizione di politiche pubbliche coerenti con gli obiettivi di sostenibilità energetica, resilienza territoriale e pianificazione

integrata (United Nations, 2019; Steen et al., 2017[55]). Il progetto produce pertanto un insieme di strumenti metodologici fondati su evidenze empiriche, processi partecipativi e sperimentazioni operative, finalizzati a facilitare il trasferimento di conoscenze verso altri territori o contesti amministrativi. I benefici attesi includono una maggiore replicabilità territoriale del modello, un migliore allineamento con le strategie energetiche nazionali ed europee e il rafforzamento dei processi decisionali *evidence-based*. Gli output concreti comprendono guide metodologiche, *report* analitici, *framework* decisionali e protocolli operativi utilizzabili in altri contesti di pianificazione energetica territoriale. In prospettiva di lungo periodo, il modello sviluppato mira a costituire una base metodologica trasferibile e scalabile, capace di supportare ulteriori programmi di transizione energetica a differenti scale amministrative e territoriali (Veeckman et al., 2013; Schaffers et al., 2011).

3.10 INDICATORI DI SUCCESSO E MONITORAGGIO

La valutazione dell'efficacia della ricerca richiede un sistema strutturato di indicatori multidimensionali e multi-scala, costruito in coerenza con l'approccio *Project Cycle Management* (PCM), con il ciclo *Plan–Do–Check–Act* (PDCA) e con il paradigma metodologico del *Researching by Design*. Il sistema di monitoraggio adottato risulta inoltre allineato ai principali *framework* europei e internazionali per la sostenibilità, includendo gli *Sustainable Development Goals* (SDGs) promossi dalle *United Nations* (United Nations, 2015)[56], la tassonomia per la finanza sostenibile dell'*European Union* (European Union, 2020)[57], le strategie energetiche nazionali come il PNIEC (MASE, 2023) e i criteri ESG, come definiti dagli standard del *Global Reporting Initiative* (GRI, 2021)[58]. Tale integrazione consente di verificare non

---

[55] Steen, K., & Van Bueren, E. (2017). The defining characteristics of urban living labs. *Technology innovation management review*, *7*(7).

[56] United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York: United Nations.

[57] European Commission (2020). *Taxonomy: Final report of the Technical Expert Group on Sustainable Finance*. Brussels: European Commission.

[58] Gli Standard GRI costituiscono un sistema modulare e integrato di rendicontazione della sostenibilità, articolato in tre insiemi interconnessi: gli Standard Universali, applicabili a tutte le organizzazioni indipendentemente dal settore; gli Standard di Settore, progettati per rispondere alle specificità dei diversi ambiti economici; e gli Standard Tematici, che definiscono le informative relative a singoli temi materiali. L'adozione di tale framework consente di identificare in modo strutturato le questioni rilevanti (material issues), favorendo una rendicontazione trasparente e orientata allo sviluppo sostenibile

soltanto l'efficacia delle soluzioni progettuali sviluppate, ma anche il loro posizionamento strategico rispetto alle politiche europee di transizione ecologica, innovazione digitale e sviluppo territoriale sostenibile (European Commission, 2019). Gli indicatori vengono articolati nelle seguenti dimensioni.

3.10.1 INDICATORI TECNICI

Gli indicatori tecnici misurano le prestazioni energetiche delle soluzioni sviluppate e il livello di innovazione tecnologica introdotto dal *framework* metodologico. Essi riguardano principalmente il miglioramento dell'efficienza energetica degli interventi, l'incremento della produzione da fonti energetiche rinnovabili, la riduzione delle emissioni climalteranti e il grado di integrazione di strumenti digitali avanzati quali BIM-GIS, sistemi di simulazione territoriale e *Digital Twin*. Tali indicatori risultano coerenti con gli obiettivi di decarbonizzazione definiti dal PNIEC (MASE, 2023)[59], con i criteri ambientali previsti dalla tassonomia europea (European Union, 2020) e con gli SDGs 7 (Affordable and Clean Energy) e 13 (Climate Action) (United Nations, 2015). Un ulteriore parametro di valutazione è rappresentato dal numero di Comunità Energetiche Rinnovabili effettivamente attivate e operative, quale indicatore della capacità di implementare modelli energetici decentralizzati e sostenibili (IEA, 2022).

3.10.2 INDICATORI AMBIENTALI E PAESAGGISTICI

Gli indicatori ambientali e paesaggistici valutano gli effetti territoriali generati dagli interventi progettuali, verificando il livello di compatibilità tra sviluppo energetico, tutela ecosistemica e qualità paesaggistica. In questo ambito assume particolare rilevanza il principio europeo del Do No Significant Harm (DNSH), previsto dalla tassonomia europea per gli investimenti sostenibili (European Union, 2020). Gli indicatori considerano la riduzione degli impatti ambientali delle infrastrutture energetiche, il miglioramento della qualità

---

e alla creazione di valore nel lungo periodo. Cfr. Global Reporting Initiative. (2021). *GRI Standards*. Amsterdam: GRI.

[59] Il 1 luglio 2024, il ministero ha trasmesso alla Commissione Europea l'aggiornamento del Piano Nazionale Integrato Energia e Clima (PNIEC). Cfr. Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. (2023). *Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) – Aggiornamento*. Roma.

ecosistemica locale, il contenimento del consumo di suolo e la verifica della coerenza delle soluzioni progettuali rispetto alle Norme Tecniche di Attuazione (NTA) e ai vincoli territoriali esistenti. Essi risultano direttamente collegati agli SDGs 11 (Sustainable Cities and Communities) e 15 (*Life on Land*) (United Nations, 2015) e ai principi di equilibrio tra sviluppo territoriale e tutela paesaggistica promossi a livello europeo (European Environment Agency, 2021).

3.10.3 INDICATORI SOCIALI E PARTECIPATIVI

La dimensione sociale viene monitorata attraverso indicatori capaci di misurare inclusione, partecipazione e sviluppo delle competenze degli *stakeholder* coinvolti. La letteratura sulla governance collaborativa evidenzia infatti come la sostenibilità dei processi di transizione energetica dipenda fortemente dalla capacità delle comunità locali di partecipare attivamente ai processi decisionali. Gli indicatori includono il livello di partecipazione ai processi collaborativi, il grado di coinvolgimento nei *Living Lab* territoriali, le competenze sviluppate attraverso attività di *Capacity Building* e il livello di consapevolezza energetica, ambientale e paesaggistica raggiunto dalle comunità coinvolte. Questa dimensione risulta coerente con i criteri ESG (GRI, 2021) e con gli SDGs 4 (Quality Education) e 17 (Partnerships for the Goals) promossi dalle *United Nations* (United Nations, 2015).

3.10.4 MONITORAGGIO MULTI-SCALA E FEEDBACK ITERATIVO

Il sistema di monitoraggio viene strutturato secondo una logica multi-scala che consente di valutare i risultati della ricerca a livello locale, regionale e nazionale, in coerenza con i sistemi europei di *reporting* e con i meccanismi di *governance* delle politiche energetiche e ambientali (European Commission, 2019). Particolare attenzione viene dedicata alla valutazione della replicabilità dei modelli sviluppati, considerata elemento essenziale per la diffusione delle buone pratiche e per il trasferimento metodologico verso altri territori (European Environment Agency, 2021)[60]. Il monitoraggio si basa inoltre su cicli iterativi di *feedback* continuo, coerenti con il paradigma del *Researching by Design*, che consentono aggiornamenti progressivi dei

[60] European Environment Agency (EEA) (2019), *Sustainability transitions: policy and practice*, EEA Report No 09/2019, 10 September 2019, Copenhagen: European Environment Agency.

modelli digitali, adattamento delle strategie operative e miglioramento continuo del *framework* metodologico. Questo approccio dinamico risulta perfettamente coerente sia con il ciclo PCM–PDCA sia con i principi ESG definiti dal *Global Reporting Initiative* (GRI, 2021)[61].

Nel suo complesso, il sistema di monitoraggio sviluppato consente di trasformare la pianificazione territoriale da processo statico e settoriale a sistema adattivo, misurabile e progressivamente migliorabile. La ricerca assume infatti che la transizione energetica non possa essere interpretata come semplice somma di interventi tecnologici isolati, ma debba essere affrontata come processo sistemico nel quale tecnologia, *governance* e partecipazione operano in modo interdipendente. Il coordinamento tra scale decisionali differenti – macro, eco, meso e micro – viene supportato dai moduli metodologici M5 e M6, che traducono i principi della *governance* multilivello in strumenti operativi applicabili. Parallelamente, la gestione dei dati territoriali attraverso sistemi BIM-GIS, *Digital Twin* e dashboard di monitoraggio consente di raccogliere, integrare e aggiornare informazioni energetiche, ambientali, paesaggistiche e socio-economiche, trasformando il dato in conoscenza applicabile e verificabile (Batty, 2018; Boje et al., 2020; Eastman et al., 2018[62]). La dimensione partecipativa viene invece garantita attraverso *Living Lab* territoriali, *workshop* collaborativi e programmi di *Capacity Building*, strumenti che favoriscono *empowerment* locale, partecipazione informata e co-produzione di soluzioni energetiche sostenibili (Veeckman et al., 2013; Schaffers et al., 2011[63]; Ansell & Gash, 2008[64]). L'integrazione tra coordinamento istituzionale, gestione dei dati e coinvolgimento degli *stakeholder* consente quindi di costruire un ecosistema metodologico unitario capace di supportare decisioni multilivello, ridurre conflitti territoriali, incrementare l'accettabilità sociale dei progetti e garantire replicabilità e trasferibilità dei modelli sviluppati. In questa prospettiva, il *framework* proposto non

---

61 Global Reporting Initiative. (2021). *GRI Standards*. Amsterdam: GRI.

62 Eastman, C. M. (2011). BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. John Wiley & Sons.

63 Schaffers, H., Komninos, N., Pallot, M., Trousse, B., Nilsson, M., & Oliveira, A. (2011). Smart cities and the future internet: Towards cooperation frameworks for open innovation. In *The future internet assembly* (pp. 431-446). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

64 Ansell, C., & Gash, A. (2008). Collaborative governance in theory and practice. *Journal of public administration research and theory*, *18*(4), 543-571.

rappresenta soltanto uno strumento operativo per la pianificazione energetica territoriale, ma una vera infrastruttura cognitiva e decisionale per guidare processi di transizione energetica sistemici, adattivi, inclusivi e territorialmente consapevoli.

4 | QUARTA PARTE
METODOLOGIA DELLA RICERCA

4.1 INTRODUZIONE GENERALE

La metodologia adottata nella presente ricerca si fonda su un modello metodologico integrato basato sull'interazione tra *Project Cycle Management* (PCM) e ciclo *Plan–Do–Check–Act* (PDCA), applicato alla progettazione e implementazione di Comunità Energetiche Rinnovabili (CER). Il PCM costituisce la struttura strategico-operativa del *framework* metodologico, consentendo di pianificare, monitorare e valutare in modo sistematico l'intero ciclo di progetto, dall'identificazione dei bisogni iniziali fino alla valutazione finale dei risultati. Tale approccio, ampiamente adottato nei programmi europei e nei modelli di cooperazione internazionale, garantisce coerenza tra obiettivi, attività, risultati attesi e indicatori di performance verificabili attraverso il *Logical Framework Approach* (LFA)[65]. In integrazione al PCM, il ciclo PDCA introduce una logica iterativa di miglioramento continuo, finalizzata a verificare progressivamente l'efficacia delle azioni implementate e ad adattare il processo decisionale sulla base dei risultati ottenuti. L'integrazione tra i due modelli consente di sviluppare un *framework* metodologico dinamico, orientato non soltanto alla gestione procedurale del progetto, ma anche alla sua adattabilità operativa in contesti territoriali complessi (Deming, 1986[66]; USAID, 1999[67]; ISO, 2015[68]; NORAD, 1999[69]; European Commission, 2004; European Commission, DG DEVCO, 2004[70]). Il modello risultante si articola quindi come un sistema ciclico di *governance* progettuale in cui pianificazione strategica, implementazione operativa, monitoraggio, valutazione e ricalibrazione delle decisioni costituiscono un processo continuo. Tale impostazione permette di rafforzare la qualità del processo decisionale, favorire la partecipazione

---

65 Logical Framework Approach (LFA) è uno strumento riconosciuto per tradurre obiettivi complessi in risultati verificabili, con indicatori, verifiability sources e assunzioni. È usato in pianificazione, monitoraggio e valutazione di progetti di sviluppo.

66 Deming, W. E. (1986). Out of the Crisis MIT Press. *Reprint, ISBN*, *13*.

67 USAID. (1999). The Logical Framework: Handbook for Objectives-Oriented Planning (4th ed.). USAID.

68 ISO. (2015). *ISO 9001:2015 – Quality management systems – Requirements.* International Organization for Standardization.

69 NORAD. (1999). *The logical framework approach (LFA) : handbook for objectives-oriented planning* (4. ed). NORAD, Direktoratet for utviklingshjelp, Norwegian Agency for Development Cooperation.

70 European Commission, DG DEVCO; (2004). Aid Delivery Methods. Volume 1: Project Cycle Management Guidelines. European Commission.

multilivello degli *stakeholder* e garantire replicabilità metodologica in differenti contesti applicativi (Rodríguez-Rivero, R., et al 2022)[71].

Il presente capitolo applica il *framework* metodologico sviluppato nel Capitolo 3 al caso studio selezionato, con l'obiettivo di verificarne l'efficacia operativa in un contesto territoriale caratterizzato da elevata complessità sistemica. L'analisi non riprende il quadro teorico precedentemente discusso, ma ne testa la traduzione applicativa attraverso strumenti digitali, scenari progettuali e dispositivi di valutazione multi-criterio.

Il caso studio è stato selezionato in quanto rappresentativo delle criticità tipiche dei processi di transizione energetica multi-scala, in particolare rispetto all'interazione tra vincoli territoriali, infrastrutture energetiche e dinamiche di *governance* locale. Il capitolo si articola quindi secondo una sequenza operativa coerente con il *framework* metodologico adottato, dalla costruzione del quadro conoscitivo alla simulazione degli scenari fino alla valutazione comparativa degli esiti.

4.1.1 LA TRANSIZIONE ENERGETICA COME PROBLEMA TERRITORIALE COMPLESSO

La transizione energetica costituisce un fenomeno territoriale complesso, determinato dall'interazione non lineare tra variabili ambientali, infrastrutturali, economiche e socio-istituzionali. La diffusione delle FER implica infatti scelte integrate di localizzazione, progettazione e gestione, accompagnate da processi di coinvolgimento delle comunità locali, con effetti diretti sul paesaggio, sulle economie territoriali e sui processi di coesione sociale (Walker & Devine-Wright, 2008[72]; De Vidovich et al., 2021[73]).

4.1.2 FER, PAESAGGIO E PIANIFICAZIONE INTEGRATA

L'innovazione metodologica proposta si colloca nell'ambito della pianificazione integrata applicata alle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER), assumendo performance energetica, compatibilità

---

[71] Rodríguez-Rivero, R., & Ortiz-Marcos, I. (2022). The methodology of the Logical Framework with a Risk Management Approach to Improve the Sustainability in the International Development Projects. *Sustainability*, *14*(2), 756.

[72] Walker, G., & Devine-Wright, P. (2008). Community renewable energy: What should it mean?. *Energy policy*, *36*(2), 497-500.

[73] De Pascali, P. (2021). Introduzione all'integrazione necessaria energia-urbanistica. *Archivio di studi urbani e regionali: 131, supplemento, 2021*, 5-22.

paesaggistica e accettabilità sociale come dimensioni interdipendentidel processo decisionale (Clark, 2007; Ostrom, 2009[74]). In coerenza con i principi della *sustainability science*, la transizione energetica viene interpretata come processo adattivo orientato all'apprendimento istituzionale.

Il modello integra quattro dimensioni complementari: la dimensione architettonico-urbanistica, relativa all'integrazione spaziale e visiva degli impianti (Pettit, C., 2018); la dimensione ingegneristica, finalizzata all'ottimizzazione energetica (Batty, 2018); la dimensione territoriale ed ecosistemica, riferita alla tutela ambientale e paesaggistica (Forman & Godron, 1986[75]); e infine la dimensione sociale, orientata ai processi partecipativi e di co-progettazione (Jenkins et al., 2016[76]; Walker & Devine-Wright, 2008).

4.1.3 CONNESSIONE CON I FRAMEWORK INTERNAZIONALI

Il *framework* di ricerca si colloca in continuità con i principali indirizzi internazionali in materia di transizione energetica e sostenibilità, garantendo coerenza metodologica e trasferibilità dei risultati. In particolare, il modello proposto si allinea agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDGs 7, 11 e 13), alle strategie europee di decarbonizzazione definite dal *Green Deal* Europeo, dal pacchetto *Fit-for*-55, dalle direttive RED III e *REPowerEU*, nonché ai sistemi di gestione ambientale e qualità definiti dagli standard ISO e dalla Convenzione Europea del Paesaggio (European Commission, 2004; Council of Europe, 2000). Tale allineamento garantisce la compatibilità del modello con i quadri regolativi sovranazionali che orientano la pianificazione energetica contemporanea.

---

[74] Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, *325*(5939), 419-422.

[75] Forman, R. T. (1990). Landscape Ecology Plans for Managing Forests¹. In Is Forest Fragmentation a Management Issue in the Northwest?: Papers from the Technical Session Sponsored by the Wildlife and Fish Ecology Working Group, Society of American Foresters' Annual Convention, October 19, 1988, Rochester, NY (Vol. 140, p. 27). US Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station.

[76] Jenkins, K., McCauley, D., Heffron, R., Stephan, H., & Rehner, R. (2016). Energy justice: A conceptual review. *Energy research & social science*, *11*, 174-182.

4.1.4 GAP SCIENTIFICI E CONTRIBUTO ORIGINALE DELLA RICERCA

La letteratura scientifica evidenzia tre criticità principali nei processi di pianificazione delle fonti energetiche rinnovabili (Cfr. Cap. 2): la limitata disponibilità di modelli replicabili di *governance* multilivello applicati alle FER (Hooghe & Marks, 2001; Smith, 2007); la debole integrazione tra pianificazione energetica, strumenti urbanistici e processi autorizzativi; e la persistente sottovalutazione delle dinamiche di accettabilità sociale nella localizzazione delle infrastrutture energetiche. (Walker & Devine-Wright, 2008; Jenkins et al., 2016; De Vidovich et al., 2023). In risposta a tali criticità, la ricerca sviluppa un modello integrato multilivello basato su quattro componenti complementari: il ciclo PCM–PDCA come struttura di miglioramento iterativo; i moduli operativi M1–M6 come traduzione progettuale e decisionale; l'integrazione di strumenti digitali avanzati (GIS, BIM e *Digital Twin*) per simulazione e supporto alle decisioni (Batty, 2018); e l'adozione di *Living Lab* come dispositivi di validazione sociale e *governance* adattiva (Schaffers et al., 2011). L'integrazione di tali elementi costituisce il principale contributo originale della ricerca, orientato alla replicabilità metodologica e alla trasferibilità del modello in contesti territoriali differenti.

4.2 APPROCCIO TRANSDISCIPLINARE E MULTI-SCALA ENERGIA–AMBIENTE–PAESAGGIO

La complessità dei processi di transizione energetica richiede il superamento di modelli pianificatori tradizionalmente settoriali, spesso incapaci di integrare simultaneamente dimensioni ambientali, infrastrutturali, paesaggistiche e socio-istituzionali. In tale prospettiva, la ricerca adotta un approccio transdisciplinare inteso come dispositivo metodologico capace di mettere in relazione competenze scientifiche, strumenti progettuali e conoscenze contestuali provenienti dagli attori territoriali. Tale impostazione consente di affrontare la pianificazione delle CER come processo integrato, in cui progettazione tecnica, *governance* multilivello, valutazione ambientale e partecipazione sociale operano come componenti interdipendenti di un unico sistema decisionale (Antonini, 2024).

4.2.1 SUPERAMENTO DELL'APPROCCIO SETTORIALE ALLA PIANIFICAZIONE

I modelli convenzionali di pianificazione energetica risultano frequentemente frammentati sul piano disciplinare, determinando una separazione tra progettazione infrastrutturale, pianificazione territoriale, tutela paesaggistica e processi decisionali locali. Tale frammentazione limita la capacità di valutare le interdipendenze sistemiche che caratterizzano l'inserimento delle fonti energetiche rinnovabili nei territori complessi. La ricerca propone pertanto un approccio integrato finalizzato a ricomporre tali dimensioni in un quadro metodologico unitario, capace di connettere analisi tecnica, valutazione ambientale, *governance* istituzionale e partecipazione comunitaria (Angelidou, 2021; Forman, 1990[77]).

4.2.1.1 Limiti dell'approccio settoriale

L'approccio settoriale alla pianificazione territoriale ed energetica mostra limiti strutturali quando applicato a sistemi complessi come quelli della transizione energetica. La suddivisione disciplinare delle conoscenze tende infatti a produrre analisi parziali, incapaci di cogliere le interdipendenze tra dimensioni energetiche, ambientali, sociali e paesaggistiche (Antonini, et al. 2024).

In tale contesto, la frammentazione dei processi decisionali riduce la capacità di valutare effetti cumulativi e dinamiche sistemiche, favorendo soluzioni poco integrate e scarsamente adattive rispetto alla variabilità territoriale. Ne deriva una ridotta resilienza delle strategie di intervento, soprattutto in contesti caratterizzati da elevata complessità socio-territoriale. Un ulteriore limite riguarda la dimensione partecipativa. Nei modelli settoriali, il coinvolgimento degli *stakeholder* risulta spesso marginale o confinato a fasi consultive, senza un'effettiva integrazione nei processi decisionali. Ciò comporta una perdita di conoscenze locali e contestuali, fondamentali per la definizione di soluzioni coerenti con le specificità dei territori.

---

[77] Forman, R. T. (1990). LANDSCAPE ECOLOGY PLANS FOR MANAGING FORESTS¹. In Is Forest Fragmentation a Management Issue in the Northwest?: Papers from the Technical Session Sponsored by the Wildlife and Fish Ecology Working Group, Society of American Foresters' Annual Convention, October 19, 1988, Rochester, NY (Vol. 140, p. 27). US Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station.

4.2.1.2 La transdisciplinarità come superamento del settorialismo

Il superamento dei limiti dell'approccio settoriale richiede un paradigma transdisciplinare, in grado di integrare saperi disciplinari differenti e conoscenze *extra*-accademiche all'interno di un processo orientato alla risoluzione di problemi reali. A differenza dell'approccio multidisciplinare, la transdisciplinarità non si limita a giustapporre contributi specialistici, ma costruisce un quadro unitario di interpretazione e intervento fondato sull'interazione tra conoscenze scientifiche, competenze tecniche e saperi contestuali. In questo senso, la ricerca e la progettazione si strutturano secondo alcuni principi chiave:

- centralità del problema reale, inteso come punto di partenza del processo conoscitivo e progettuale;
- integrazione funzionale delle discipline, selezionate in base al loro contributo alla comprensione del fenomeno;
- valorizzazione dei saperi locali ed esperienziali, come parte integrante del processo conoscitivo;
- coinvolgimento attivo degli *stakeholder*, non solo consultivi ma partecipativi nelle fasi di definizione e co-produzione delle soluzioni.

Questo approccio consente di affrontare problemi complessi e interdipendenti, tipici della transizione energetica, superando logiche riduzioniste e settoriali e promuovendo soluzioni maggiormente contestualizzate, robuste e adattive (Lang et al., 2012; Stremke & van den Dobbelsteen, 2018).

4.2.1.3 Verso un'integrazione multiscalare nella pianificazione delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER)

La diffusione delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) evidenzia la necessità di superare una visione esclusivamente tecnico-settoriale della pianificazione energetica, riconoscendo la transizione energetica come processo territoriale complesso che coinvolge simultaneamente dimensioni infrastrutturali, ambientali, sociali ed economiche.

In questa prospettiva, integrare la pianificazione energetica nazionale con una visione territoriale coordinata non rappresenta un obiettivo accessorio, ma una condizione necessaria per garantire una transizione equa, resiliente e duratura. Il territorio, il paesaggio e la qualità ambientale non possono essere considerati meri vincoli alla localizzazione delle infrastrutture energetiche, ma fattori strategici capaci di orientare le scelte progettuali e i processi decisionali.

Le CER non costituiscono esclusivamente configurazioni tecniche di produzione e condivisione dell'energia, ma dispositivi territoriali complessi, in grado di ridefinire il rapporto tra infrastrutture energetiche, spazio costruito e comunità locali. La loro efficacia dipende dalla capacità di integrare dinamiche *bottom-up*, basate sulla partecipazione attiva dei cittadini, con logiche *top-down* derivanti dalla pianificazione energetica nazionale e dagli indirizzi europei.

Da questa prospettiva emerge la necessità di un approccio multiscalare capace di mettere in relazione i diversi livelli della *governance* energetica e territoriale, garantendo coerenza tra strategie sovraordinate, condizioni infrastrutturali, pianificazione urbanistica locale e bisogni delle comunità. Tale impostazione consente di superare la frammentazione tradizionale tra pianificazione di rete, governo del territorio e sviluppo locale, promuovendo modelli di transizione energetica maggiormente integrati, adattivi e replicabili.

L'approccio proposto si colloca quindi all'interno di una visione transdisciplinare che integra conoscenze tecnico-ingegneristiche, pianificazione territoriale, dimensione paesaggistica e *governance* partecipativa, riconoscendo il territorio e le comunità locali come componenti attive del processo di trasformazione energetica.

4.2.1.4 Riferimenti teorici e cornice concettuale

La letteratura scientifica evidenzia la crescente necessità di approcci integrati nella pianificazione energetica e territoriale, capaci di combinare dimensioni ecologiche, sociali e tecniche.

Gli studi sugli *energy landscapes* sottolineano l'importanza di considerare in modo congiunto gli impatti energetici e paesaggistici delle infrastrutture rinnovabili, evidenziando il ruolo del territorio come sistema complesso e non riducibile a supporto tecnico (Stremke, S., et al, 2012)[78].

La ricerca sulla transdisciplinarità evidenzia inoltre come l'integrazione di saperi scientifici e conoscenze locali sia fondamentale per migliorare la qualità dei processi decisionali nelle politiche pubbliche e nei progetti territoriali (Lang, D. J., et al, 2012)[79].

---

[78] Stremke, S., & van den Dobbelsteen, A. (Eds.). (2012). *Sustainable energy landscapes: designing, planning, and development*. CRC Press.

[79] Lang, D. J., Wiek, A., Bergmann, M., Stauffacher, M., Martens, P., Moll, P., ... & Thomas, C. J. (2012). Transdisciplinary research in sustainability science: practice, principles, and challenges. *Sustainability science*, *7*(Suppl 1), 25-43.

Nel campo delle comunità energetiche, diversi contributi mostrano come approcci integrati e partecipativi contribuiscano a rafforzare l'efficacia delle soluzioni progettuali e la loro aderenza ai contesti locali (Heaslip, E., et al, 2018)[80]. Nel complesso, tali contributi convergono verso una visione della pianificazione energetica come processo transdisciplinare, adattivo e territorialmente integrato, in cui le dimensioni tecniche, ambientali e sociali sono strettamente interdipendenti.

4.2.2 POLICY FRAMEWORK E INTEGRAZIONE MULTIDISCIPLINARE

Il *framework* metodologico si sviluppa in coerenza con il quadro normativo europeo che disciplina i processi di transizione energetica e promozione delle Comunità Energetiche Rinnovabili. Le politiche di decarbonizzazione definite a livello sovranazionale costituiscono il riferimento strategico entro cui il modello opera, garantendo allineamento tra progettazione locale e obiettivi energetico-climatici europei. In questo contesto, la pianificazione energetica viene interpretata non come esercizio tecnico isolato, ma come processo di integrazione tra policy, sistemi territoriali ed ecosistemi locali (Heaslip & Fahy, 2018[81]; Caramizaru & Uihlein, 2020[82]).

4.2.3 LOGICA MULTI-SCALA: MACRO – ECO – MESO – MICRO

Al fine di superare i limiti dei modelli di pianificazione tradizionalmente settoriali, la presente ricerca adotta un *framework* metodologico multi-scala articolato secondo quattro livelli analitici interdipendenti – Macro, Eco, Meso e Micro – concepiti come componenti di un sistema integrato di governance, pianificazione e implementazione delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER). L'assunto metodologico di base è che i processi di transizione energetica non possano essere interpretati esclusivamente come fenomeni tecnico-infrastrutturali, ma debbano essere analizzati come sistemi complessi nei quali interagiscono simultaneamente dimensioni normative, ecosistemiche,

---

80 Heaslip, E., & Fahy, F. (2018). Developing transdisciplinary approaches to community energy transitions: An island case study. *Energy research & social science*, *45*, 153-163.

81 Heaslip, E., & Fahy, F. (2018). Developing transdisciplinary approaches to community energy transitions: An island case study. *Energy research & social science*, *45*, 153-163.

82 Caramizaru, A., & Uihlein, A. (2020). *Energy communities: an overview of energy and social innovation* (Vol. 30083). Luxembourg: Publications Office of the European Union.

territoriali e socio-comunitarie. In questa prospettiva, il modello multi-scala consente di connettere decisioni strategiche di livello sovraordinato, condizioni ambientali e paesaggistiche, strumenti tecnico-progettuali e dinamiche partecipative locali, costruendo un sistema decisionale coerente e adattivo. Il *framework* proposto si struttura secondo quattro scale operative complementari.

La Macro-scala rappresenta il livello strategico-istituzionale entro cui si definiscono obiettivi di decarbonizzazione, indirizzi normativi e politiche energetiche nazionali ed europee. In questa dimensione operano principalmente istituzioni europee, ministeri competenti, enti regolatori e autorità responsabili della definizione delle politiche pubbliche. La funzione di questo livello consiste nel costruire il quadro regolativo generale che orienta l'intero processo decisionale, garantendo coerenza con gli obiettivi di transizione energetica e con le strategie sovranazionali definite dal Green Deal Europeo e dalle direttive europee in materia di energia rinnovabile (Hooghe & Marks, 2001).

La Eco-scala riguarda invece la dimensione ecosistemica, ambientale e regolativa del territorio, concentrandosi sulla valutazione delle relazioni tra infrastrutture energetiche, ecosistemi naturali, resilienza climatica e tutela del paesaggio. In questo livello assumono particolare rilevanza le agenzie ambientali, gli enti di gestione territoriale e i soggetti istituzionali responsabili delle valutazioni ambientali. L'obiettivo consiste nell'integrare la pianificazione energetica con indicatori di sostenibilità ambientale e compatibilità paesaggistica, includendo parametri quali frammentazione ecologica, biodiversità, servizi ecosistemici e impatti cumulativi, in coerenza con i principi della *Landscape Ecology* (Forman, 1990).

La Meso-scala costituisce il livello territoriale e tecnico-operativo nel quale gli indirizzi strategici e i vincoli ambientali vengono tradotti in soluzioni progettuali concrete. Tale dimensione comprende attività di pianificazione urbanistica, simulazione territoriale e definizione di scenari progettuali alternativi mediante strumenti digitali avanzati quali GIS, BIM e *Digital Twin*. In questa fase intervengono amministrazioni locali, progettisti, utility energetiche e professionisti del settore energetico, con l'obiettivo di costruire scenari integrati capaci di garantire compatibilità tra produzione energetica, trasformazione territoriale e tutela del paesaggio (Batty, 2018; Pettit et al., 2018). La Micro-scala corrisponde infine alla dimensione locale e

comunitaria, nella quale assumono centralità i processi di partecipazione civica, l'accettabilità sociale degli interventi, la distribuzione dei benefici economici e i modelli di *governance* condivisa. In questo livello gli *stakeholder* locali – cittadini, associazioni civiche, imprese territoriali e comunità energetiche – non rappresentano semplicemente soggetti destinatari delle politiche energetiche, ma diventano attori attivi nella costruzione e validazione delle soluzioni progettuali. La dimensione micro risulta particolarmente rilevante per garantire equità distributiva, consenso sociale e adattamento locale delle strategie energetiche, in linea con i modelli di *community renewable energy* e *Living Labs* (Walker & Devine-Wright, 2008; Jenkins et al., 2016). La Figura A.4 1, riportata in versione estesa in Appendice 4, illustra Diagramma Teorico multilivello circolare di *governance* e pianificazione delle CER.

L'interazione tra le quattro scale non segue una logica lineare, ma si configura come un sistema circolare e retroattivo fondato su dinamiche bidirezionali di tipo *top-down* e *bottom-up*. Il flusso *top-down* consente alle strategie definite ai livelli istituzionali superiori di trasferirsi progressivamente verso le scale operative territoriali e comunitarie, attraverso l'applicazione di normative, incentivi economici, criteri ambientali e indirizzi progettuali. Parallelamente, il flusso *bottom-up* permette alle informazioni provenienti dai contesti locali – dati territoriali, dinamiche sociali, *feedback* progettuali e livelli di accettazione comunitaria – di influenzare progressivamente i livelli decisionali superiori, generando un processo continuo di adattamento istituzionale e apprendimento collettivo. La natura circolare del modello consente pertanto di interpretare la *governance* delle CER come un sistema adattivo multilivello nel quale decisioni strategiche, vincoli ecosistemici, progettazione territoriale e partecipazione sociale operano come componenti interdipendenti di un unico processo decisionale. Dal punto di vista metodologico, il *framework* multi-scala garantisce coerenza tra pianificazione strategica, sostenibilità ambientale, implementazione progettuale e *governance* partecipativa, consentendo di integrare simultaneamente dati quantitativi – quali performance energetiche, indicatori ambientali e simulazioni territoriali – e dimensioni qualitative legate alla percezione sociale, all'accettabilità degli interventi e ai processi di costruzione del consenso. Il diagramma teorico sviluppato all'interno della ricerca rappresenta visivamente questa architettura multilivello come sistema

concentrico di *governance* adattativa, nel quale ciascuna scala svolge funzioni specifiche ma interdipendenti, contribuendo alla costruzione di un modello di pianificazione energetica integrata trasferibile e replicabile in differenti contesti territoriali complessi.

La logica multi-scala adottata nel presente modello metodologico non si limita alla sola articolazione amministrativa o territoriale, ma include anche la dimensione infrastrutturale del sistema energetico. Ciascuna scala territoriale viene pertanto associata a specifici livelli di organizzazione della rete elettrica, consentendo di integrare pianificazione territoriale e funzionamento del sistema energetico nazionale.

A scala macro assumono rilevanza gli indirizzi europei, le politiche energetiche nazionali e le logiche di mercato che regolano la distribuzione e valorizzazione economica dell'energia. La scala ecosistemica comprende invece le infrastrutture territoriali sovralocali e le configurazioni di rete intermedie che influenzano l'equilibrio energetico regionale. La scala meso coincide con la pianificazione comunale e con la verifica delle condizioni infrastrutturali che consentono l'attivazione delle Comunità Energetiche Rinnovabili. La scala micro rappresenta infine il livello di prossimità territoriale nel quale produzione, consumo, autoconsumo collettivo e partecipazione comunitaria si concretizzano operativamente.

Questa articolazione consente di superare la separazione tradizionale tra pianificazione energetica e governo del territorio, trasformando la dimensione infrastrutturale in una componente metodologica interna al modello di ricerca.

4.3 CAPACITY BUILDING E RAFFORZAMENTO DELLE COMPETENZE TERRITORIALI

Il tema del *capacity building* rappresenta una componente fondamentale nell'implementazione delle CER, in quanto incide direttamente sulla capacità dei territori di adottare, gestire e mantenere nel tempo modelli energetici complessi e decentralizzati. In questa prospettiva, la transizione energetica non è interpretata esclusivamente come processo tecnologico o infrastrutturale, ma come trasformazione sistemica che richiede l'evoluzione delle competenze istituzionali, tecniche e sociali dei soggetti coinvolti.

Il presente modello metodologico assume il rafforzamento delle capacità come dimensione trasversale dell'intero *framework*, integrata

nelle dinamiche multi-scala descritte nei paragrafi precedenti. In particolare, il *capacity building* agisce come elemento di connessione tra livelli istituzionali, tecnici e comunitari, contribuendo alla riduzione delle asimmetrie informative, al miglioramento della qualità decisionale e all'aumento della resilienza dei processi di *governance* energetica.

4.3.1 DIMENSIONE ISTITUZIONALE E AMMINISTRATIVA

A livello istituzionale, il *capacity building* riguarda il rafforzamento delle competenze delle amministrazioni pubbliche e degli enti regolatori coinvolti nei processi di pianificazione energetica e territoriale. Tale dimensione è particolarmente rilevante in contesti caratterizzati da frammentazione amministrativa e sovrapposizione di competenze, dove la gestione delle CER richiede coordinamento interistituzionale e capacità di integrazione tra politiche settoriali. In questo quadro, lo sviluppo di competenze riguarda sia l'interpretazione e applicazione delle normative europee e nazionali, sia l'utilizzo di strumenti avanzati di supporto decisionale, inclusi sistemi GIS, piattaforme digitali e strumenti di valutazione multi-criterio. L'obiettivo è rafforzare la capacità delle istituzioni di gestire processi complessi in modo coerente con gli obiettivi di transizione energetica e sostenibilità territoriale.

4.3.2 DIMENSIONE TECNICO-PROGETTUALE

La dimensione tecnico-progettuale del *capacity building* riguarda l'insieme delle competenze necessarie alla progettazione, simulazione e gestione delle infrastrutture energetiche rinnovabili a scala territoriale. In questo ambito assumono particolare rilevanza le competenze legate all'uso di strumenti digitali avanzati quali GIS, BIM e *Digital Twin*, che consentono la modellazione integrata di scenari energetici e territoriali (Walker & Devine-Wright, 200883; Jenkins et al., 2016). Tali strumenti permettono di analizzare in modo dinamico le interazioni tra produzione energetica, configurazione spaziale e vincoli ambientali, migliorando la qualità delle decisioni progettuali. Il rafforzamento delle competenze tecniche non riguarda

---

[83] Walker, G., & Devine-Wright, P. (2008). Community renewable energy: What should it mean?. *Energy policy*, *36*(2), 497-500.

esclusivamente l'utilizzo degli strumenti, ma anche la capacità di interpretare i risultati delle simulazioni in chiave sistemica, integrando dati energetici, ambientali e socio-territoriali all'interno di un unico quadro decisionale.

4.3.3 DIMENSIONE SOCIALE E COMUNITARIA

Il *capacity building* nella dimensione sociale e comunitaria è strettamente connesso ai processi di partecipazione e coinvolgimento degli *stakeholder* locali nei progetti di transizione energetica. In questo contesto, le Comunità Energetiche Rinnovabili non sono semplicemente soggetti beneficiari delle politiche energetiche, ma attori attivi nella co-progettazione, gestione e valutazione delle soluzioni adottate. Il rafforzamento delle capacità comunitarie riguarda quindi lo sviluppo di competenze in materia di *governance* condivisa, consapevolezza energetica e partecipazione decisionale. Particolare rilevanza assumono i processi di apprendimento collettivo e di costruzione di fiducia tra attori istituzionali e comunità locali, elementi fondamentali per garantire l'accettabilità sociale delle infrastrutture energetiche e la stabilità nel tempo dei modelli di *governance* adottati.

4.3.4 DISPOSITIVI METODOLOGICI PER IL CAPACITY BUILDING

All'interno del *framework* proposto, il *capacity building* viene implementato attraverso una serie di dispositivi metodologici integrati, finalizzati a favorire l'apprendimento continuo e l'interazione tra i diversi livelli del sistema multi-scala. Tra questi assumono particolare rilevanza i *Living Lab*, intesi come ambienti sperimentali di co-creazione in cui *stakeholder* istituzionali, tecnici e comunitari collaborano alla definizione, test e valutazione di scenari progettuali. Tali dispositivi consentono di integrare conoscenze formali e informali, favorendo processi di innovazione sociale e tecnologica. In parallelo, il ciclo PCM–PDCA garantisce la dimensione iterativa del processo di apprendimento, consentendo di monitorare, valutare e migliorare progressivamente le strategie adottate. L'integrazione tra dispositivi partecipativi e strumenti di gestione progettuale permette di strutturare un modello di *capacity building* adattivo e replicabile

(Schuurman, 201584; Batty, 2018). Il *capacity building* viene declinato su sei dimensioni:

- *Knowledge*: trasferimento di conoscenze tecnico-scientifiche, normative e progettuali;
- *Training*: percorsi formativi strutturati per *stakeholder* pubblici, privati e comunitari;
- *Development*: crescita delle competenze organizzative e progettuali;
- *Coaching*: affiancamento pratico nella gestione dei progetti e dei processi decisionali;
- *Learning*: apprendimento iterativo e continuo attraverso le iterazioni del ciclo PDCA;
- *Skills*: acquisizione di capacità operative e decisionali applicabili in contesti reali.

L'impianto metodologico adottato promuove inoltre un processo di *capacity building* articolato lungo sei dimensioni – *Knowledge*, *Training*, *Development*, *Coaching*, *Learning* e *Skills* – rendendo il progetto non solo un esito tecnico, ma un dispositivo di crescita delle competenze e di consolidamento delle capacità decisionali degli attori coinvolti.

4.3.5 SINTESI E RUOLO NEL FRAMEWORK MULTI-SCALA

Il *capacity building* si configura quindi come elemento trasversale e abilitante dell'intero *framework* metodologico, in quanto condiziona la capacità dei sistemi territoriali di implementare efficacemente modelli energetici complessi.

La sua funzione principale consiste nel rafforzare la connessione tra le diverse scale del modello multi-livello (Macro, Eco, Meso e Micro), facilitando la traduzione delle politiche energetiche in pratiche progettuali e operative coerenti. In questo senso, il *capacity building* rappresenta un fattore determinante per la qualità della *governance*

84 Schuurman, D. (2015). Bridging the gap between Open and User Innovation?: exploring the value of Living Labs as a means to structure user contribution and manage distributed innovation (Doctoral dissertation, Ghent University).

energetica e per la sostenibilità a lungo termine delle CER (Ostrom, 2009; Schuurman, 2015; Batty, 2018[85]; Jenkins et al., 2016)[86].

4.4 RBD (RESEARCHING BY DESIGN) & UDL (UNIVERSAL DESIGN FOR LEARNING) COME METODI DI INDAGINE SCIENTIFICA

4.4.1 LA PROGETTAZIONE COME STRUMENTO CONOSCITIVO

Il presente lavoro adotta il *Researching by Design* (RbD) come metodo di indagine scientifica, assumendo la progettazione non come semplice strumento operativo, ma come dispositivo epistemologico in grado di generare conoscenza attraverso un processo iterativo di costruzione, test e validazione di ipotesi progettuali. In questa prospettiva, il progetto non rappresenta la traduzione lineare di conoscenze acquisite in fase analitica, ma un processo euristico attraverso il quale il sapere viene prodotto, verificato e progressivamente raffinato mediante la costruzione di scenari, modelli e prototipi territoriali. Parallelamente, il *framework* integra i principi del *Universal Design for Learning* (UDL) al fine di garantire accessibilità, leggibilità e fruibilità dei dispositivi progettuali da parte di una pluralità di attori, indipendentemente dal loro background tecnico, disciplinare o istituzionale. L'adozione dell'UDL rafforza la dimensione inclusiva del processo di ricerca, rendendo la produzione di conoscenza non solo tecnicamente robusta, ma anche socialmente condivisa.

4.4.2 IL RESEARCHING BY DESIGN COME APPROCCIO PER LA COMPLESSITÀ TERRITORIALE

Nel campo della pianificazione urbanistica e territoriale, il RbD si configura come un approccio particolarmente adeguato per affrontare

---

[85] Batty, M. (2018). Digital twins. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 45(5), 817-820.

[86] Batty, M. (2018). *Inventing Future Cities*. MIT Press.
Jenkins, K., McCauley, D., Heffron, R., Stephan, H., & Rehner, R. (2016). *Energy justice: A conceptual review*. Energy Research & Social Science, 11, 174–182.
OECD (2020). *Capacity Building for Policy Effectiveness*. OECD Publishing.
Ostrom, E. (2009). *A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems*. Science, 325, 419–422.
Schuurman, D. (2015). *Bridging the gap between Open and User Innovation?* Technology Innovation Management Review, 5(9), 6–17.
Steiner, F. (2014). *Landscape Ecological Urbanism*. Harvard University Press.
UNESCO (2018). *Capacity Building for Sustainable Development*.

problemi complessi caratterizzati da incertezza, multi-attorialità e interdipendenza tra dimensioni spaziali, energetiche, ambientali e sociali. A differenza dei metodi descrittivi o esclusivamente normativi, il RbD consente di esplorare scenari possibili attraverso la costruzione di artefatti progettuali – quali modelli spaziali, dispositivi normativi e simulazioni territoriali – che funzionano simultaneamente come strumenti di analisi e di verifica. Nel presente lavoro, la progettazione è intesa come processo riflessivo e iterativo, nel quale la produzione di Norme Tecniche di Attuazione (NTA), modelli digitali territoriali e strumenti di *governance* partecipativa non costituisce un *output* finale, ma parte integrante del processo di costruzione della conoscenza.

4.4.3 ACCESSIBILITÀ, INCLUSIONE E UNIVERSAL DESIGN FOR LEARNING

L'integrazione del *Universal Design for Learning* (UDL) nel *framework* metodologico consente di strutturare un processo di ricerca-progettazione inclusivo, in grado di ridurre le barriere cognitive e tecniche tra i diversi attori coinvolti. L'UDL si traduce operativamente nella progettazione di strumenti e output comprensibili e utilizzabili da *stakeholder* eterogenei, favorendo la partecipazione attiva di soggetti istituzionali, tecnici e comunitari. In questo senso, l'accessibilità non è interpretata come elemento accessorio, ma come componente strutturale della qualità del processo decisionale, in quanto contribuisce alla trasparenza, alla co-creazione e alla legittimazione delle scelte progettuali.

4.4.4 INTEGRAZIONE TRA RBD E FRAMEWORK METODOLOGICO DELLA RICERCA

Il RbD costituisce l'asse operativo dell'intero *framework* metodologico, articolando il processo di ricerca secondo una logica iterativa e adattiva coerente con i cicli PCM–PDCA. In particolare, il processo si sviluppa attraverso una sequenza integrata di fasi:

- Analisi, in cui vengono raccolti e interpretati dati territoriali, energetici e socio-ambientali (Lefebvre, 1958[87]; Debord, 2014[88]);

---

87 Lefebvre, H. (2003). *The urban revolution*. U of Minnesota Press.

88 Debord, G., & Knabb, K. (2014). Theory of the Dérive. In *The Improvisation Studies Reader* (pp. 176-180). Routledge.

- Progettazione, nella quale tali dati vengono tradotti in scenari e soluzioni alternative (Ellen MacArthur Foundation, 2019[89]; Geissdoerfer et al., 2017[90]);
- Sperimentazione, attraverso simulazioni digitali e applicazioni modellistiche (Batty, 2018[91]; Pettit, C., et al., 2018);
- Valutazione, basata su indicatori multi-criterio di performance ambientale, energetica e sociale (OECD-DAC, 2019);
- Disseminazione, orientata alla trasferibilità dei risultati e alla loro replicabilità in altri contesti.

Il ciclo RbD non è lineare, ma circolare e adattivo: ogni fase produce conoscenza che retroagisce sulle precedenti, in un processo continuo di raffinamento del modello.

4.4.5 STRUTTURA MODULARE E DIMENSIONE OPERATIVA DEL MODELLO

All'interno del *framework*, il RbD è organizzato secondo una struttura bidimensionale:

- una dimensione orizzontale, rappresentata dalle fasi del processo progettuale (Analisi → Progettazione → Sperimentazione → Valutazione → Disseminazione);
- una dimensione verticale, costituita dai moduli tematici (analisi paesaggistica, simulazioni digitali, valutazioni energetiche, valutazioni sociali).

Questa struttura consente di trasformare il processo di ricerca in un sistema integrato di produzione di conoscenza, in cui ogni modulo contribuisce alla definizione di criteri valutativi, indicatori misurabili e output progettuali trasferibili.

4.4.6 CARATTERE SCIENTIFICO E TRASFERIBILITÀ DEL METODO

L'integrazione tra RbD e UDL consente di definire un approccio metodologico che risulta:

---

89 Macarthur, E. L. L. E. N., & Heading, H. E. A. D. I. N. G. (2019). How the circular economy tackles climate change. *Ellen MacArthur Found*, *1*, 1-71.

90 Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy–A new sustainability paradigm?. *Journal of cleaner production*, *143*, 757-768.

91 Batty, M. (2018). *Inventing future cities*. MIT press.

- scientificamente robusto, grazie alla combinazione tra evidenze empiriche, simulazioni e valutazioni multi-criterio;
- operativamente efficace, poiché traduce scenari complessi in strumenti progettuali applicabili;
- trasferibile e replicabile, in quanto strutturato su procedure formalizzate e adattabili a differenti contesti territoriali.

In questa prospettiva, il metodo di ricerca non si limita a descrivere fenomeni, ma produce attivamente conoscenza attraverso il progetto, configurandosi come un dispositivo di indagine applicata per la *governance* delle transizioni energetiche e territoriali.

4.5 QUADRO LOGICO DELLA RICERCA

Il presente paragrafo introduce il *Logical Framework Approach* (LFA) come strumento metodologico di sintesi e verifica del modello di ricerca, finalizzato a esplicitare la relazione causale tra obiettivi, attività, risultati e impatti. A differenza degli approcci descrittivi alla pianificazione, il LFA consente di strutturare in modo gerarchico e verificabile la logica dell'intervento, rendendo esplicite le ipotesi alla base del processo progettuale e le condizioni necessarie al raggiungimento dei risultati. In questo senso, il quadro logico non rappresenta un livello aggiuntivo del modello, ma uno strumento di formalizzazione e controllo della sua coerenza interna. Il LFA è ampiamente utilizzato in ambito di programmazione europea, cooperazione internazionale e valutazione delle politiche pubbliche, in quanto consente di collegare in modo sistematico obiettivi strategici, risultati attesi e indicatori di performance verificabili (European Commission, 2004; OECD-DAC, 2019). Nel presente lavoro, esso viene adottato come dispositivo operativo per la traduzione del *framework* metodologico in una struttura valutabile e monitorabile.

4.5.1 STRUTTURA DEL QUADRO LOGICO

Il quadro logico applicato alla presente ricerca è articolato secondo una gerarchia causale composta da quattro livelli principali:

- Impatto (obiettivo generale)
- Esiti (obiettivi specifici)
- Output (risultati attesi)
- Attività

A tali livelli si aggiungono le **condizioni esterne e le ipotesi**, che rappresentano fattori di contesto non direttamente controllabili ma rilevanti per la riuscita del processo.
Ogni livello è associato a indicatori verificabili e a fonti di verifica, secondo una logica di trasparenza e misurabilità del processo decisionale. Tale struttura consente di esplicitare la catena logica che collega le azioni progettuali agli effetti attesi sul sistema territoriale ed energetico.

4.5.2 APPLICAZIONE ALLA SCALA TERRITORIALE

L'applicazione del LFA al contesto urbanistico e territoriale richiede una declinazione multi-scala, coerente con la complessità dei sistemi urbani ed energetici.
Nel presente modello, il quadro logico è interpretato attraverso l'interazione tra tre livelli territoriali:

- **Macro**: definizione delle politiche energetiche e climatiche e coerenza con i quadri normativi europei e nazionali;
- **Meso**: traduzione delle strategie in strumenti urbanistici, progettuali e tecnici;
- **Micro**: attuazione locale, partecipazione degli *stakeholder* e implementazione delle soluzioni sul territorio.

Questa articolazione consente di mantenere coerenza tra indirizzi strategici, strumenti operativi e dinamiche locali, garantendo l'integrazione tra pianificazione, progettazione e *governance* (Ostrom, 2009; Folke et al., 2005)[92].

4.5.3 LOGICA CAUSALE E APPROCCIO ADATTIVO

Il quadro logico non deve essere interpretato come una struttura deterministica, ma come un modello causale adattivo. Le relazioni tra attività, *output* ed esiti sono influenzate da condizioni esterne e *feedback* provenienti dal contesto territoriale, che possono modificare l'efficacia delle azioni intraprese. Per questo motivo, il LFA è integrato con un approccio di *governance* adattiva, che consente la revisione progressiva delle strategie in funzione dei risultati osservati. In tale prospettiva, il sistema di monitoraggio e valutazione diventa parte

[92] Folke, C., Hahn, T., Olsson, P., & Norberg, J. (2005). Adaptive governance of social-ecological systems. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, *30*(1), 441-473.

integrante del processo di implementazione, garantendo la possibilità di correggere, aggiornare e migliorare le azioni progettuali nel tempo.

4.5.4 OBIETTIVO GENERALE (IMPATTO)

L'obiettivo generale del sistema è contribuire alla transizione energetica sostenibile del territorio, in coerenza con gli obiettivi europei di decarbonizzazione e neutralità climatica. L'impatto rappresenta il livello più alto della catena logica e si riferisce a effetti di lungo periodo non direttamente controllabili dal progetto, ma influenzati dall'insieme delle azioni implementate.

4.5.5 ESITI, OUTPUT E ATTIVITÀ

Gli esiti del progetto riguardano l'adozione di strumenti di pianificazione energetica integrata e la definizione di modelli normativi e progettuali applicabili a contesti territoriali differenziati. Gli output comprendono strumenti operativi come *Digital Twin* territoriali, Norme Tecniche di Attuazione (NTA) e dispositivi partecipativi basati su *Living Lab*. Le attività includono analisi territoriale, modellazione digitale, simulazione degli scenari e processi partecipativi strutturati. Questa articolazione consente di distinguere chiaramente tra azioni, risultati intermedi ed effetti attesi, migliorando la leggibilità e la verificabilità del processo.

4.5.6 SISTEMA DI MONITORAGGIO E VALUTAZIONE (M&V)

Il sistema di monitoraggio e valutazione (M&V) rappresenta il dispositivo operativo attraverso cui il quadro logico della ricerca viene reso verificabile e controllabile nel tempo. Esso consente di verificare la coerenza tra obiettivi, output ed esiti, attraverso un insieme integrato di indicatori quantitativi e qualitativi, garantendo la tracciabilità dei processi decisionali e la misurabilità dei risultati.

Il sistema è costruito secondo un approccio multi-criterio, coerente con la valutazione di programmi complessi e progetti multi-attoriali, in cui le dimensioni di analisi non sono riducibili a un singolo parametro ma richiedono una lettura integrata delle performance.

I criteri di valutazione adottati sono i seguenti:

- Rilevanza, intesa come coerenza tra obiettivi di ricerca e bisogni territoriali e strategici;
- Efficienza, relativa all'ottimizzazione delle risorse impiegate rispetto ai risultati ottenuti;

- Efficacia, riferita al grado di raggiungimento degli obiettivi specifici;
- Impatto, inteso come effetti attesi sul sistema ambientale, sociale ed energetico;
- Sostenibilità, relativa alla capacità del sistema di mantenere nel tempo risultati e strumenti attivati.

Tali criteri costituiscono la base metodologica del sistema M&V e orientano la costruzione degli indicatori e delle relative fonti di verifica, in coerenza con la struttura gerarchica del *Logical Framework Approach.*

4.5.6.1 Matrice di Monitoraggio e Valutazione (M&V)

Al fine di verificare l'efficacia, la replicabilità e la sostenibilità del modello metodologico proposto, la ricerca introduce una Matrice di Monitoraggio e Valutazione (Monitoring & Evaluation – M&V) finalizzata alla misurazione sistematica dei risultati attesi, degli indicatori di performance e degli effetti generati dalle azioni progettuali. La matrice è stata costruita secondo un approccio multidimensionale coerente con il *framework* integrato della ricerca, nel quale la transizione energetica viene interpretata come un processo complesso che coinvolge simultaneamente pianificazione territoriale, innovazione digitale, *governance* partecipativa e sviluppo delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER). Il sistema di monitoraggio adotta i cinque criteri valutativi comunemente utilizzati nei processi di valutazione dei programmi complessi: rilevanza, efficienza, efficacia, impatto e sostenibilità. Tali dimensioni consentono di valutare non soltanto il raggiungimento degli obiettivi quantitativi, ma anche la capacità del modello proposto di generare trasformazioni territoriali durature, adattabili e trasferibili ad altri contesti.

La struttura della matrice integra, per ciascun obiettivo specifico della ricerca, quattro componenti principali:

- output attesi, intesi come risultati concreti prodotti dalle azioni progettuali;
- indicatori e KPI, utilizzati per misurare il livello di raggiungimento degli obiettivi;
- criteri di valutazione M&V, finalizzati alla lettura qualitativa e quantitativa dei risultati;

- strumenti di raccolta e analisi dei dati, comprendenti strumenti digitali, analisi territoriali, procedure partecipative e sistemi di monitoraggio.

La Matrice M&V è articolata in cinque ambiti strategici coerenti con gli obiettivi specifici della ricerca:

1. Modello integrato di pianificazione urbanistica digitale e sostenibile, orientato alla verifica dell'integrazione tra strumenti urbanistici, indicatori territoriali e dimensione energetico-ambientale;
2. PUG digitale e strumenti informativi territoriali, finalizzato alla valutazione del livello di integrazione tra pianificazione urbana, dati energetici e strumenti digitali di supporto decisionale;
3. *Governance* partecipativa e inclusiva, dedicato alla valutazione dei processi di coinvolgimento degli *stakeholder* territoriali attraverso strumenti partecipativi e *Living Lab*;
4. Innovazione tecnologica e digitale, relativo alla capacità degli strumenti informativi avanzati, quali GIS, BIM e *Digital Twin*, di supportare scenari decisionali integrati;
5. Sostenibilità economica ed energetica delle Comunità Energetiche Rinnovabili, finalizzato alla valutazione della capacità dei modelli CER di generare benefici energetici, economici e sociali e di essere replicabili nel tempo.

Le cinque matrici operative sono riportate in Appendice 4 (Tabelle A.4 1–A.4 5), mentre la versione estesa del modello teorico multilivello di *governance* e pianificazione delle CER è illustrata nella Figura A.4 1. La Matrice M&V costituisce pertanto uno strumento di verifica della coerenza interna del modello proposto, consentendo di collegare obiettivi teorici, strumenti metodologici e risultati misurabili attraverso un processo valutativo continuo. Tale impostazione permette di superare una lettura esclusivamente prestazionale della transizione energetica, integrando dimensioni tecnologiche, territoriali e sociali secondo una prospettiva di *governance* adattiva e multilivello.

4.6 FRAMEWORK METODOLOGICO INTEGRATO PER LA TRANSIZIONE ENERGETICA TERRITORIALE

Il *framework* metodologico proposto costituisce la struttura teorico-operativa attraverso cui il presente modello di ricerca interpreta la transizione energetica come un processo integrato di pianificazione

territoriale, innovazione tecnologica, *governance* multilivello e attuazione normativa. Il modello si configura come un sistema nel quale dimensione strategica, strumenti digitali, pianificazione urbanistica, processi partecipativi e meccanismi di monitoraggio operano in modo interdipendente.

L'obiettivo non consiste esclusivamente nella definizione di strumenti tecnici di supporto alla pianificazione, ma nella costruzione di una metodologia capace di coordinare processi decisionali complessi che coinvolgono differenti livelli territoriali, una pluralità di attori istituzionali e sistemi infrastrutturali ad alta intensità tecnologica. La transizione energetica è pertanto interpretata come un processo sistemico, caratterizzato dall'interazione continua tra dimensioni ambientali, economiche, sociali, energetiche e istituzionali.

Il *framework* integra contributi provenienti dalla pianificazione territoriale, dalla *governance* adattativa, dalla digitalizzazione dei processi progettuali e dalle politiche europee di decarbonizzazione, configurandosi come un modello metodologico replicabile in differenti contesti territoriali.

4.6.1 ARCHITETTURA METODOLOGICA DEL FRAMEWORK

L'architettura metodologica del *framework* si fonda sull'integrazione di tre componenti complementari: il *Logical Framework Approach* (LFA), l'approccio multi-scala alla pianificazione territoriale e il paradigma della *governance* adattativa.

Il *Logical Framework Approach* costituisce la struttura metodologica di riferimento del sistema, consentendo di formalizzare le relazioni tra obiettivi generali, obiettivi specifici, attività, risultati attesi e impatti di lungo periodo. Nel *framework* esso assume la funzione di garantire coerenza interna, verificabilità metodologica e misurabilità degli effetti prodotti.

Parallelamente, il modello adotta un approccio multi-scala per affrontare la complessità dei sistemi territoriali ed energetici. L'articolazione si sviluppa su quattro livelli tra loro interconnessi:

- Macro, relativo agli indirizzi strategici europei, nazionali e regionali;
- Eco, riferito ai sistemi territoriali ed energetici di area vasta e provinciale;
- Meso, corrispondente alla scala urbana e comunale;

- Micro, riferito alle zone omogenee, ai quartieri e ai sistemi locali di intervento.

Questa articolazione consente di mantenere continuità tra strategie di *policy*, pianificazione urbanistica, progettazione tecnica e implementazione territoriale.

Il terzo elemento è rappresentato dalla *governance* adattativa, che supera i modelli lineari di pianificazione attraverso processi iterativi di monitoraggio, apprendimento continuo e aggiornamento progressivo delle strategie, rendendo il *framework* capace di adattarsi ai cambiamenti normativi, ambientali, tecnologici e socioeconomici.

4.6.2 ECOSISTEMA DIGITALE COME INFRASTRUTTURA METODOLOGICA

Nel *framework* proposto la digitalizzazione non costituisce un semplice supporto tecnico, ma rappresenta l'infrastruttura metodologica del processo di pianificazione e gestione territoriale. Gli strumenti digitali assumono infatti una funzione conoscitiva, consentendo di acquisire, organizzare, simulare e verificare informazioni territoriali complesse, migliorando la qualità dei processi decisionali.

ArcGIS supporta la raccolta, l'organizzazione e l'analisi integrata di dati ambientali, territoriali, energetici e infrastrutturali, favorendo una lettura spaziale multi-scala delle trasformazioni territoriali.

Autodesk Revit consente invece la costruzione di modelli informativi interoperabili nei quali convergono progettazione architettonica, analisi energetiche, prestazioni edilizie degli interventi.

Il livello più avanzato dell'ecosistema digitale è rappresentato dal *Digital Twin* territoriale, che permette di sviluppare modelli dinamici continuamente aggiornabili, capaci di simulare scenari alternativi, prevedere gli effetti delle trasformazioni urbane ed energetiche e supportare processi decisionali di tipo predittivo.

Nel *framework* il *Digital Twin* assume il ruolo di piattaforma integrata di supporto alla *governance* territoriale, collegando simulazione, monitoraggio, valutazione e adattamento continuo delle decisioni pubbliche.

L'integrazione tra BIM, GIS e *Digital Twin* trasforma quindi il processo pianificatorio da sistema statico di previsione a sistema adattivo basato sull'aggiornamento continuo dei dati e sulla simulazione preventiva degli scenari.

L'ecosistema digitale incorpora inoltre informazioni relative alle infrastrutture energetiche esistenti, quali rete elettrica, vincoli di connessione, nodi di distribuzione, dati di consumo e configurazioni territoriali funzionali allo sviluppo delle Comunità Energetiche Rinnovabili. Tale integrazione consente di verificare preventivamente la compatibilità tra sviluppo urbano, domanda energetica, potenziale da fonti rinnovabili e capacità delle infrastrutture elettriche.

4.6.3 INTEGRAZIONE TRA PIANIFICAZIONE URBANISTICA, ENERGIA E STRUMENTI GOVERNANE NORMATIVA

Il *framework* integra pianificazione urbanistica, politiche energetiche e *governance* multilivello, garantendo coerenza tra strumenti di piano, obiettivi di sostenibilità e processi decisionali.

I Piani Urbanistici Generali (PUG) vengono reinterpretati alla luce degli obiettivi di decarbonizzazione e resilienza climatica definiti dalle strategie europee e nazionali.

In questo contesto, i Piani d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima (PAESC) e gli strumenti di pianificazione energetica locale assumono il ruolo di raccordo tra pianificazione urbanistica e strategie energetiche.

Il *framework* supera la tradizionale separazione tra questi ambiti e propone una visione integrata nella quale energia, uso del suolo, infrastrutture e *governance* costituiscono componenti di un unico processo decisionale.

4.6.4 QUADRO NORMATIVO E RUOLO DEL DOCUMENTO DI INDIRIZZO ALLA PROGETTAZIONE (DIP)

Il quadro normativo rappresenta una componente strutturale del *framework*, definendo vincoli, opportunità e modalità operative per l'attuazione degli interventi.

Un riferimento centrale è costituito dal D.Lgs. 36/2023, che introduce un approccio alla progettazione pubblica fondato su digitalizzazione, programmazione integrata e qualità progettuale.

In tale contesto, il Documento di Indirizzo alla Progettazione (DIP) assume un ruolo strategico, consentendo di definire obiettivi, requisiti prestazionali e criteri di sostenibilità fin dalle fasi preliminari.

Nel *framework* il DIP è reinterpretato come dispositivo metodologico di collegamento tra pianificazione strategica e progettazione

operativa, favorendo la traduzione degli obiettivi di *policy* in requisiti progettuali verificabili.

4.6.5 OUTPUT ATTESI DEL FRAMEWORK METODOLOGICO

Il *framework* produce un insieme di output che traducono operativamente le componenti teoriche e metodologiche del modello. Tra i principali risultati attesi si evidenziano:

- Infrastrutture digitali integrate basate su sistemi BIM, GIS e *Digital Twin* per il supporto alla pianificazione e alla gestione territoriale;
- Attivazione e consolidamento di comunità energetiche locali orientate alla sostenibilità e alla produzione distribuita;
- Sviluppo di modelli di *governance* partecipativa basati su processi di coinvolgimento strutturato degli *stakeholder* territoriali;
- Rafforzamento delle filiere occupazionali legate alla transizione energetica e alla rigenerazione urbana, con particolare riferimento ai *green jobs*;
- Miglioramento delle performance ambientali, energetiche e paesaggistiche dei contesti urbani e territoriali interessati dagli interventi.

Tali output costituiscono la base per la successiva fase di monitoraggio e valutazione, in coerenza con il sistema di *Measurement & Verification* (M&V) descritto nel § 4.5.

4.6.6 ATTUAZIONE TERRITORIALE E IMPLEMENTAZIONE NELLE ZONE OMOGENEE

L'attuazione del *framework* si realizza attraverso la declinazione operativa delle strategie di pianificazione e delle soluzioni tecnologiche alle diverse scale territoriali, con particolare riferimento alle zone omogenee e ai differenti contesti urbani.

L'implementazione non è concepita come fase conclusiva del processo, ma come attività continua di traduzione operativa, monitoraggio e adattamento delle strategie.

Le zone omogenee costituiscono l'unità spaziale di riferimento per l'applicazione delle Norme Tecniche di Attuazione (NTA) e per la sperimentazione di strumenti digitali e modelli energetici integrati. In tale prospettiva, la zonizzazione assume una funzione operativa

finalizzata all'integrazione tra pianificazione urbanistica, prestazioni energetiche e obiettivi di sostenibilità ambientale e sociale.
L'attuazione del *framework* si sviluppa attraverso l'interazione tra strumenti digitali, processi partecipativi e dispositivi di *governance* locale, che consentono di tradurre gli obiettivi strategici in interventi concreti sul territorio.
L'interoperabilità tra sistemi informativi territoriali, modelli digitali e strumenti decisionali garantisce infine la coerenza tra livello strategico e livello operativo, rafforzando la capacità del *framework* di accompagnare l'intero processo di transizione energetica.

4.7 CICLO PDCA MULTILIVELLO E FASI OPERATIVE DELLA RICERCA

Il quadro metodologico proposto si articola attraverso un ciclo operativo iterativo basato sulla logica del miglioramento continuo, adottando il modello PDCA (*Plan–Do–Check–Act*) come struttura di coordinamento tra pianificazione strategica, implementazione territoriale, monitoraggio e adattamento progressivo delle azioni. Il ciclo viene interpretato in chiave multilivello, consentendo di collegare dimensione strategica, scala territoriale e processi attuativi locali in un sistema coerente di *governance* adattativa.
L'applicazione del PDCA consente di superare modelli lineari di pianificazione, introducendo una struttura metodologica orientata all'apprendimento progressivo, alla verifica continua dei risultati e all'aggiornamento dinamico delle strategie in funzione dei *feedback* provenienti dal sistema territoriale. In questa prospettiva, la pianificazione non è intesa come sequenza rigida di fasi, ma come processo ciclico di sperimentazione, verifica e adattamento continuo.
L'adozione di tale modello risulta particolarmente coerente con la complessità dei processi di transizione energetica territoriale, caratterizzati da elevata interdipendenza tra componenti normative, ambientali, tecnologiche, economiche e sociali.

4.7.1 APPLICAZIONE DEL CICLO PDCA ALLA PIANIFICAZIONE TERRITORIALE

Il ciclo PDCA (*Plan–Do–Check–Act*) è integrato con il modello di *Project Cycle Management* (PCM), ampiamente utilizzato nella programmazione europea per la gestione di processi complessi caratterizzati da pluralità di attori e articolazione multi-scalare.

L'integrazione tra PCM e PDCA consente di combinare la struttura procedurale del PCM con la dimensione iterativa e adattiva del PDCA, costruendo un sistema metodologico in grado di garantire sia rigore programmatorio sia apprendimento continuo.
La relazione tra i due modelli può essere sintetizzata come segue:

- la fase di identificazione e analisi del PCM corrisponde al *Plan*, in cui si definiscono obiettivi strategici, priorità territoriali e quadro di riferimento;
- la formulazione progettuale si colloca tra *Plan* e *Do*, traducendo gli obiettivi in attività operative e scenari di intervento;
- finanziamento, approvazione e realizzazione corrispondono al *Do*, cioè all'implementazione delle azioni;
- monitoraggio e valutazione coincidono con il *Check*, orientato alla verifica dei risultati;
- valutazione finale e lessons learned convergono nell'*Act*, finalizzato al miglioramento del sistema e alla pianificazione dei cicli successivi.

L'integrazione PCM–PDCA rafforza la capacità del *framework* di operare in contesti complessi, integrando pianificazione, controllo, apprendimento adattivo e miglioramento continuo in un unico sistema coerente.

4.7.2 VALIDAZIONE METODOLOGICA DEL SISTEMA OPERATIVO DI RICERCA

Il sistema metodologico adottato si fonda su riferimenti teorici, scientifici e normativi che garantiscono coerenza, rigore analitico e replicabilità del modello. Il *framework* integra contributi dalla letteratura sulla pianificazione strategica, sulla *governance* multilivello e sulla pianificazione adattiva applicata ai processi di transizione energetica.
Il modello adotta una logica *evidence-based*, in cui le decisioni sono supportate da dati territoriali, strumenti digitali di simulazione e processi di verifica continua. I riferimenti teorici costituiscono la base epistemologica per le successive fasi operative di implementazione, monitoraggio e adattamento.

4.7.3 OPERATIVIZZAZIONE DEL FRAMEWORK NELLA FASE ATTUATIVA

La fase attuativa richiede la traduzione operativa del *framework* in un sistema applicativo in grado di accompagnare l'implementazione concreta delle strategie territoriali ed energetiche.

Gli strumenti di monitoraggio non sono concepiti come dispositivi ex post, ma come componenti integrate dell'intero processo decisionale. La fase operativa collega dimensione strategica, attuazione progettuale e controllo progressivo dei risultati, garantendo continuità tra pianificazione e gestione.

In questa fase vengono raccolti dati territoriali, energetici e infrastrutturali relativi alla rete elettrica, ai consumi, ai vincoli di connessione e alla disponibilità di superfici per impianti rinnovabili. Tale base conoscitiva consente di costruire scenari tecnicamente compatibili e territorialmente coerenti. Il sistema operativo consente di verificare la coerenza tra: obiettivi strategici; attività implementate; risultati intermedi; capacità di adattamento delle strategie.

4.7.4 ATTIVAZIONE DEI LIVING LAB E PROCESSI PARTECIPATIVI

Parallelamente alla pianificazione vengono attivati processi partecipativi basati sui *Living Lab*, finalizzati al coinvolgimento di cittadini, imprese e amministrazioni pubbliche.

I *Living Lab* non sono strumenti consultivi, ma dispositivi di co-progettazione e apprendimento collettivo, capaci di integrare conoscenze tecniche e competenze locali (Albane-se & Sica, 2023; Nava & Mangano, 2023)[93]. Essi costituiscono l'interfaccia tra dimensione istituzionale e dimensione sociale del processo di pianificazione, integrando approcci *top-down* e dinamiche *bottom-up* (Trencher, Yarime, McCormick, Doll, & Kraines, 2014[94]; Etzkowitz & Leydesdorff, 2000[95]). L'integrazione tra partecipazione, raccolta di *feedback* strutturati e apprendimento continuo rafforza la qualità decisionale del sistema e contribuisce alla costruzione di modelli

---

[93] Nava, C., & Mangano, G. (2023). *Living Lab for the design and activation of energy communities in the inner areas. TECHNE-Journal of Technology for Architecture and Environment*, (26), 120-130.

[94] Trencher, G., Yarime, M., McCormick, K. B., Doll, C. N., & Kraines, S. B. (2014). Beyond the third mission: Exploring the emerging university function of co-creation for sustainability. *Science and Public Policy*, *41*(2), 151-179.

[95] Etzkowitz, H., & Leydesdorff, L. (2000). The dynamics of innovation: from National Systems and "Mode 2" to a Triple Helix of university–industry–government relations. *Research policy*, *29*(2), 109-123.

territoriali maggiormente inclusivi, adattivi e replicabili (EEA, 2023; UNECE, 2023[96]).

4.7.5 IMPLEMENTAZIONE TERRITORIALE ATTRAVERSO NORME TECNICHE DI ATTUAZIONE (NTA)

Le Norme Tecniche di Attuazione (NTA) rappresentano lo strumento operativo per tradurre gli indirizzi strategici in regole applicabili ai diversi contesti territoriali.

Le NTA non si limitano alla regolazione urbanistica, ma assumono una funzione più ampia di governo della sostenibilità territoriale, integrando vincoli ambientali, paesaggistici ed energetici.

Esse costituiscono strumenti adattivi, capaci di evolvere in funzione dei risultati del processo attuativo (ENoLL, 2020; Nava, M, 2023[97]).

4.7.6 SVILUPPO DELLE COMUNITÀ ENERGETICHE RINNOVABILI (CER)

Le Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) rappresentano uno degli output principali del *framework*, integrando dimensioni energetiche, sociali, economiche e ambientali. Le CER non si limitano alla produzione di energia, ma introducono modelli di redistribuzione del valore energetico, rafforzando resilienza locale e riducendo le emissioni. Il loro sviluppo segue la logica PDCA e include:

- analisi del potenziale energetico;
- definizione del modello di governance;
- implementazione infrastrutturale;
- monitoraggio delle performance;
- adattamento progressivo.

Le CER assumono pertanto il ruolo di infrastrutture territoriali integrate, nelle quali transizione energetica, innovazione sociale e sviluppo economico locale convergono in un unico processo sistemico coerente con gli obiettivi generali della ricerca.

---

[96] United Nations Statistics Division, (2023). Framework for the Development of Environment Statistics (FDES): National workshop on climate change and disaster-related statistics. United Nations.

[97] Nava, C., & Mangano, G. (2023). Living Lab per il progetto e l'attivazione di comunità energetiche nelle aree interne. *TECHNE: Journal of Technology for Architecture & Environment*, *26*.

4.7.7 CAPACITY BUILDING, MONITORAGGIO E GOVERNANCE ADATTATIVA

Il monitoraggio continuo rappresenta una fase ricorsiva del *framework*, poiché consente di trasformare i risultati in apprendimento istituzionale e adattamento delle strategie (CNAPPC, 2017[98]; UIA, 2017[99]; Moroni & Lorini, 2017[100]; SNPA, 2025)[101]. Il sistema si basa su un'infrastruttura informativa integrata che raccoglie dati territoriali, energetici e partecipativi, trasformando il monitoraggio in un processo di apprendimento collettivo (Healey, P., 2020[102]; OECD, 2019[103]; Ostrom, 2010[104]). Il sistema consente di:

- raccogliere dati eterogenei;
- garantire tracciabilità delle informazioni;
- supportare decisioni *evidence-based*;
- individuare criticità emergenti;
- aggiornare strategie e strumenti.

La finalità ultima non è il controllo, ma la costruzione di capacità istituzionali diffuse e rafforzamento della *governance* collaborativa (Batty, 2013; EEA, 2023)[105].

In questa prospettiva, *capacity building* e *governance* adattativa costituiscono il meccanismo attraverso cui il sistema garantisce

---

98 CNA – Consiglio Nazionale Architetti PPC. (2017). *Qualità del progetto e concorsi di architettura*. CNAPPC.

99 UIA – Union Internationale des Architectes. (2017). *UNESCO–UIA Charter for Architectural Education*. UNESCO.

100 Moroni, S., & Lorini, G. (2017). Graphic rules in planning: A critical exploration of normative drawings starting from zoning maps and form-based codes. *Planning Theory*, *16*(3), 318-338.

101 SNPA Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (2025). Report Ambientali SNPA n. 45/2025 – ISBN: 978-88-448-1278-2

102 Healey, P. (2020). Collaborative planning: Shaping places in fragmented societies. Bloomsbury Publishing.

103 OECD (2019), *Enhancing Innovation Capacity in City Government*, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/f10c96e5-en.

104 Ostrom, E. (2010). Beyond markets and states: polycentric governance of complex economic systems. *American economic review*, *100*(3), 641-672.

105 EEA. (2023). *Environmental indicators and data tools*. European Environment Agency. https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/environmental-statement-2023#:~:text=The%20report%20contains%20information%20on%20the%20EEA%E2%80%B2s%20environmental,ISBN%3A%20978-92-9480-679-6%20-%20ISSN%3A%201977-8449%20-%20doi%3A%2010.2800%2F7636500

continuità tra pianificazione, attuazione e replicabilità del modello in contesti diversi (European Commission, 2021[106]; Batty et al., 2012)[107].

4.8 SISTEMA DI INDICATORI E VALUTAZIONE DEI RISULTATI

Il presente paragrafo chiude il quadro metodologico della ricerca attraverso una sintesi integrata dei principali dispositivi analitici e operativi adottati. Il *framework* complessivo si configura come un sistema multi-metodologico in cui *Logical Framework Approach* (LFA), ciclo PDCA, *Project Cycle Management* (PCM) e sistema di Monitoraggio e Valutazione (M&V) operano in modo complementare, garantendo coerenza tra pianificazione strategica, attuazione e verifica dei risultati (SNPA, 2025; ISO, 2021).

4.8.1 INTEGRAZIONE TRA DISPOSITIVI METODOLOGICI

Il LFA fornisce la struttura logico-causale del processo di ricerca, definendo la relazione tra obiettivi, *output* e impatti. Il ciclo PDCA introduce invece una dimensione iterativa e adattiva, orientata al miglioramento continuo delle strategie. Il PCM costituisce il quadro procedurale di riferimento per l'organizzazione delle fasi progettuali, mentre il sistema di M&V garantisce la verificabilità empirica dei risultati attraverso indicatori quantitativi e qualitativi. L'integrazione di tali approcci consente di superare una lettura lineare del processo di pianificazione, configurando un modello dinamico e adattivo.

4.8.2 INTEGRAZIONE TRA DIMENSIONE DIGITALE E PROCESSO DI PIANIFICAZIONE

Gli strumenti digitali (BIM, GIS, *Digital Twin* e Common Data Environment) costituiscono l'infrastruttura informativa del sistema metodologico, supportando l'integrazione tra dati territoriali, simulazioni e processi decisionali. Tali strumenti non sono intesi come elementi tecnologici isolati, ma come ambiente cognitivo e operativo della pianificazione territoriale.

---

[106] European Commission. (2021, September 15). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: New European Bauhaus – Beautiful, sustainable, together (COM(2021) 573 final). Publications Office of the European Union.

[107] Batty, M., Axhausen, K. W., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., ... & Portugali, Y. (2012). Smart cities of the future. *The European Physical Journal Special Topics*, *214*(1), 481-518.

4.8.3 GOVERNANCE MULTILIVELLO E LOGICA ADATTIVA DEL SISTEMA

Il modello metodologico si fonda su una struttura di *governance* multilivello articolata tra scala macro, meso e micro. Tale articolazione consente l'allineamento tra indirizzi strategici, strumenti di pianificazione e attuazione locale.

La dimensione adattiva del sistema si esprime nella capacità di aggiornamento continuo delle strategie sulla base dei risultati del monitoraggio e del *feedback* territoriale.

4.8.4 MONITORAGGIO E VALUTAZIONE COME DISPOSITIVO DI APPRENDIMENTO

Il sistema di monitoraggio e valutazione non si limita alla verifica degli output, ma costituisce un dispositivo di apprendimento organizzativo e territoriale. L'integrazione tra KPI, *digital twin*, CDE e processi partecipativi consente la costruzione di un ciclo informativo continuo, in cui i dati raccolti alimentano la revisione progressiva delle strategie di intervento.

4.8.5 SINTESI DEGLI OUTPUT DEL FRAMEWORK METODOLOGICO

Il *framework* metodologico produce un sistema integrato di risultati riconducibili a cinque dimensioni principali:

- modello di pianificazione territoriale integrata
- infrastruttura digitale per la gestione dei dati territoriali
- sistema di *governance* partecipativa e multilivello
- dispositivi di supporto alla transizione energetica (CER)
- modello replicabile di pianificazione adattiva

4.8.6 VALIDITÀ E LIMITI DEL MODELLO METODOLOGICO

Il modello proposto presenta un'elevata capacità integrativa tra dimensione urbanistica, energetica e digitale; tuttavia, la sua applicazione dipende fortemente dalle specificità del contesto territoriale e dalla disponibilità e qualità dei dati. Il carattere adattivo del sistema implica inoltre che le relazioni causali tra variabili non siano deterministiche, ma soggette a *feedback* e condizioni esterne.

4.8.7 TRANSIZIONE AL CAPITOLO SUCCESSIVO

Il *framework* metodologico così definito costituisce la base per la successiva fase applicativa della ricerca, nella quale il modello viene

calato in contesti territoriali specifici per verificarne operatività, coerenza e replicabilità.

4.9 MEZZI, COSTI E CONDIZIONI COME ASSUNZIONI METODOLOGICHE

Nel presente *framework* metodologico, mezzi, costi e condizioni non vengono interpretati come semplici componenti descrittive del progetto, bensì come elementi strutturali di un sistema integrato di fattibilità, valutazione e attivazione. L'obiettivo è trasformare il modello di ricerca in un dispositivo metodologico capace di verificare in modo continuo la possibilità di implementazione, adattamento e replicabilità delle soluzioni progettuali proposte. In questa prospettiva, la produzione degli output tecnologici, organizzativi e istituzionali non dipende esclusivamente dalla sequenza delle attività previste, ma dall'interazione dinamica tra risorse disponibili, sostenibilità economica e condizioni di contesto. Il modello assume quindi una configurazione adattiva coerente con il *Logical Framework Approach* (LFA), nel quale le relazioni tra input, attività, output, outcome e impatti vengono interpretate come relazioni causali verificabili e continuamente monitorabili (OECD, 2019; OECD, 2020[108]; JRC, 2025[109] European Commission, 2004[110]; UNDP, 2011; European Commission, 2021[111]).

4.9.1 SISTEMA LOGICO DI TRASFORMAZIONE (INPUT–PROCESS–OUTCOME–IMPACT–SCALE-UP)

Il *framework* si articola secondo una struttura logica evolutiva composta da cinque livelli interconnessi:

- *Input* (Mezzi): risorse umane, tecnologiche, finanziarie e organizzative
- *Process* (Attività): progettazione, simulazione, implementazione, sperimentazione

[108] OECD (2020), Improving Governance with Policy Evaluation: Lessons From Country Experiences, OECD Public Governance Reviews, OECD Publishing, Paris.
[109] EU Covenant of Mayors (2025). *Guidebook: How to develop a SECAP*.
[110] European Commission (2004). *Project Cycle Management Guidelines*, Bruxelle.
[111] European Commission (2021). How to develop a Sustainable Energy and Climate Action Plan (SECAP) EUR 40339. Covenant of Mayors Guidebook | Main document, Joint Research Center.

- *Output*: prototipi, *digital twin*, CER attivate, strumenti di monitoraggio
- *Outcome*: miglioramento performance energetiche, governance, partecipazione
- *Impact / Scale-up*: attivazione *spin-off*, replicabilità, scalabilità territoriale

La relazione tra questi livelli non segue una logica lineare, ma un processo iterativa e retroattiva, in quanto ogni livello alimenta cicli di *feedback* attraverso il CDE e il sistema di Monitoraggio e Valutazione (M&V) di apprendimento continuo, nel quale i risultati ottenuti retroagiscono costantemente sulle fasi precedenti, consentendo la progressiva ottimizzazione del modello.

4.9.2 MEZZI E RISORSE COME CONDIZIONE ABILITANTE

I mezzi vengono interpretati come condizioni interne necessarie all'attivazione del sistema metodologico. Essi rappresentano l'insieme delle capacità operative indispensabili per l'esecuzione delle attività previste e per il raggiungimento degli obiettivi di ricerca.
Le risorse necessarie si articolano in quattro categorie principali:

a. Risorse umane (Human Capability Index)

Il progetto richiede un team multidisciplinare, strutturato in modo da garantire l'integrazione tra competenze tecnico-scientifiche, pianificatorie e sociali. In particolare, sono previste le seguenti figure:

- Team tecnico-scientifico: urbanisti, ingegneri energetici, specialisti in GIS-BIM, esperti di *digital twin* territoriali e simulazioni ambientali;
- Team di *governance* e pianificazione: giuristi ed esperti di diritto amministrativo e urbanistico, con specifico riferimento al Codice dei Contratti Pubblici e alle Norme Tecniche di Attuazione (NTA);
- Team di monitoraggio e valutazione: statistici, sociologi ed esperti in valutazione di impatto socio-economico e ambientale;
- Team formativo e di *capacity building*: formatori accreditati per la diffusione di competenze su comunità energetiche, pianificazione digitale e processi partecipativi;
- Facilitatori territoriali e coordinatori dei *Living Lab*, responsabili dell'attivazione e del coinvolgimento degli *stakeholder* locali.

b. Risorse tecniche e infrastrutturali (Technological Readiness Layer)

Le risorse tecnologiche e infrastrutturali costituiscono il supporto operativo del modello e sono interpretati come infrastruttura decisionale predittiva, e costituiscono l'ossatura operativa del modello, garantendo l'integrazione tra dati, strumenti digitali e processi decisionali. Tra queste si includono:

- Piattaforme digitali integrate BIM-GIS, finalizzate alla rappresentazione, simulazione e gestione del territorio, che consentono di monitorare in tempo reale le prestazioni energetiche, ambientali e urbanistiche.
- *Digital twin* territoriali, utilizzati per l'analisi degli scenari energetici, climatici e urbanistici, e per la simulazione di impatti di interventi progettuali, connessi direttamente ai processi decisionali.
- Common Data Environment (CDE), concepito come infrastruttura digitale centralizzata per la raccolta, gestione, condivisione e aggiornamento dei dati provenienti da diverse fonti (BIM, GIS, sensori, comunità locali). Il CDE assicura la coerenza dei dati, la tracciabilità delle modifiche e l'accessibilità a tutti gli attori del processo – dalle amministrazioni agli ordini professionali e università – rafforzando la *governance* adattativa e il *capacity building* territoriale (Trencher et al., 2014).
- Strumentazioni di monitoraggio energetico e ambientale, quali sensori IoT, contatori intelligenti e stazioni meteo locali, integrate nel CDE per permettere il monitoraggio continuo e la modellazione predittiva.
- Laboratori territoriali (*Living Lab*), fisici e digitali, per la co-progettazione, la sperimentazione e la validazione dei dati raccolti, in sinergia con le piattaforme digitali e il CDE.
- Infrastrutture per la formazione, incluse aule attrezzate e piattaforme di *e-learning*, collegate al CDE per diffondere competenze tecniche, digitali e progettuali tra cittadini, professionisti e studenti, rafforzando il *capacity building* locale.

c. Risorse finanziarie

Le risorse finanziarie sono allocate in modo proporzionato alle attività e ai risultati attesi, comprendendo budget per il personale, per le

infrastrutture digitali, per le attività formative e per il monitoraggio e la valutazione.

d. Risorse organizzative e partenariato

Le **risorse organizzative** riguardano invece la qualità del partenariato istituzionale, scientifico e territoriale, la cui solidità costituisce condizione essenziale per la stabilità del sistema decisionale multilivello e per la corretta implementazione delle attività previste, che deve garantire:

- sinergia istituzionale tra enti locali e livelli sovraordinati;
- coinvolgimento del mondo accademico e della ricerca;
- partecipazione del settore privato e degli attori sociali;
- formalizzazione di accordi di partenariato con ruoli e responsabilità definiti.

La gestione delle risorse è guidata dai principi di **adeguatezza**, **efficienza**, **sostenibilità** e **condivisione preventiva**, al fine di evitare duplicazioni, sprechi e disallineamenti tra obiettivi e strumenti.

4.9.3 COSTI COME FUNZIONE DI SOSTENIBILITÀ E SOGLIA DI ATTIVAZIONE (COST FUNCTION MODEL)

Nel presente modello i costi non vengono interpretati come semplice dimensione contabile, ma come parametro di sostenibilità evolutiva dell'intero sistema metodologico (Cfr. Cap. 7, § 7.7.6, § 7.7.9). La sostenibilità economica viene valutata attraverso tre soglie progressive di sviluppo:

- C_1 – Soglia di attivazione: corrispondente alla fase iniziale di avvio sperimentazione (pilot phase);
- C_2 – Soglia di consolidamento: nella quale il sistema raggiunge una stabilizzazione operativa;
- C_3 – Soglia di scalabilità: attivazione *spin-off*, che consente l'estensione del modello ad altri contesti territoriali o lo sviluppo di iniziative autonome collegate.

La sostenibilità economica non è quindi assoluta, ma dipendente da soglie evolutive del sistema. La struttura dei costi comprende principalmente spese relative al personale di ricerca, infrastrutture digitali, attività di sperimentazione, *capacity building*, gestione amministrativa, disseminazione scientifica e trasferimento tecnologico. Il modello economico si fonda su una combinazione di risorse pubbliche e private, cofinanziamento dei partner, attività di ricerca applicata e progressiva valorizzazione dei risultati scientifici. In

questa prospettiva, la sostenibilità economica viene interpretata come processo dinamico di consolidamento progressivo e non come condizione statica iniziale. La gestione finanziaria si basa sui principi di trasparenza, rendicontabilità, tracciabilità digitale, flessibilità adattiva e proporzionalità tra investimenti sostenuti e risultati conseguiti.

4.9.4 CONDIZIONI COME VARIABILI DI CONTESTO E VINCOLO (CONTEXT SENSITIVITY LAYER)

Le condizioni di contesto non vengono considerate fattori esterni passivi, ma variabili dinamiche che influenzano direttamente il comportamento del sistema metodologico. Il modello distingue tre configurazioni evolutive.

Le condizioni stabili consentono la piena implementazione del modello e l'attivazione dei processi di replicabilità territoriale.

Le condizioni instabili richiedono fasi di sperimentazione, verifica e adattamento progressivo delle strategie operative.

Le condizioni critiche determinano invece la sospensione temporanea del processo o la ridefinizione delle strategie di implementazione.

In questo modo il contesto territoriale, normativo e socio-istituzionale viene integrato come variabile attiva del sistema decisionale e non come semplice scenario di riferimento.

4.9.5 SOGLIE DECISIONALI E POTENZIALE DI REPLICABILITÀ

L'evoluzione del modello non viene interpretata come sequenza automatica di fasi, ma come processo condizionato dal raggiungimento simultaneo di specifiche soglie prestazionali. L'attivazione di processi di espansione o replicabilità territoriale può avvenire soltanto quando risultano contemporaneamente soddisfatte quattro condizioni fondamentali:

- sostenibilità economica consolidata;
- stabilità e affidabilità delle infrastrutture digitali e dei sistemi di gestione dati;
- validazione sociale ottenuta attraverso *feedback* positivi provenienti dai *Living Lab* territoriali;
- verificata trasferibilità del modello in scenari territoriali differenti.

Qualora tali condizioni non risultino pienamente soddisfatte, il sistema ritorna alle fasi di ottimizzazione precedenti, secondo una logica iterativa di apprendimento continuo.

4.9.6 SINTESI METODOLOGICA

Il presente impianto metodologico consente di reinterpretare mezzi, costi e condizioni come componenti integrate di un sistema adattivo di valutazione continua della fattibilità, sostenibilità e replicabilità del modello di ricerca. Il valore scientifico del *framework* non risiede nella semplice descrizione delle sue componenti interne, ma nella capacità di integrare risorse, sostenibilità economica, variabili di contesto e criteri decisionali all'interno di un sistema dinamico orientato alla riduzione dell'incertezza, all'apprendimento progressivo e alla costruzione di modelli territoriali replicabili. In questa prospettiva, il *framework* supera una concezione descrittiva tradizionale della pianificazione, configurandosi come un dispositivo metodologico orientato alla *governance* adattiva della transizione energetica territoriale, fondato su misurabilità scientifica, trasferibilità operativa e sostenibilità di lungo periodo.

4.10 FRAMEWORK METODOLOGICO INTEGRATO PER LA TRANSIZIONE ENERGETICA

4.10.1 PRINCIPI GUIDA DEL MODELLO

Il modello metodologico proposto si fonda su principi di transdisciplinarità, partecipazione, replicabilità e scalabilità.

La transdisciplinarità consente di integrare conoscenze tecnico-scientifiche, sociali e giuridiche, favorendo un approccio sistemico e multilivello ai processi di transizione energetica (Pohl & Hirsch Hadorn[112], 2007; Lang et al., 2012[113]). La partecipazione attiva degli *stakeholder* e dei cittadini è considerata essenziale per la co-produzione di conoscenza e per il consolidamento di forme di *governance* adattativa (Funtowicz & Ravetz, 1993[114]). Replicabilità e scalabilità garantiscono la trasferibilità delle soluzioni sviluppate in

---

112 Pohl, C., & Hadorn, G. H. (2007, March). Principles for designing transdisciplinary research.

113 Lang, D. J., Wiek, A., Bergmann, M., Stauffacher, M., Martens, P., Moll, P., ... & Thomas, C. J. (2012). Transdisciplinary research in sustainability science: practice, principles, and challenges. *Sustainability science*, *7*(Suppl 1), 25-43.

114 Funtowicz, S. O., & Ravetz, J. R. (1993). Science for the post-normal age. *Futures*, *25*(7), 739-755.

contesti pilota verso altri ambiti territoriali e livelli istituzionali (Cash, D.W., 2003)[115].

4.10.2 INTEGRAZIONE DEGLI STRUMENTI DIGITALI

Il *framework* si basa su un ecosistema integrato di strumenti digitali che costituisce l'infrastruttura tecnica del sistema decisionale. In particolare:

1. GIS (*Geographic Information Systems*) consentono la gestione e l'analisi di dati spaziali multi-scala, supportando decisioni basate sulla georeferenziazione di risorse energetiche, vincoli ambientali e caratteristiche territoriali (Longley, P. A., 2015)[116];
2. BIM (*Building Information Modeling*) permette la gestione integrata dei dati progettuali lungo l'intero iter, includendo dimensioni geometriche, temporali, economiche e prestazionali (Eastman, C. M., 2011)[117];
3. *Digital Twin* consente la replica dinamica di sistemi fisici attraverso dati in tempo reale, supportando monitoraggio e simulazione di scenari evolutivi (Fuller, A., et al. 2020)[118].

L'integrazione tra questi strumenti consente di superare la separazione tra scala urbana e infrastrutturale, costruendo un ambiente digitale coerente per la pianificazione energetica. Il Common Data Environment (CDE) costituisce l'infrastruttura di coordinamento e gestione dei dati.

4.10.3 LIVING LAB E DIMENSIONE DEL CAPACITY BUILDING

Il *Living Lab* rappresenta il dispositivo operativo centrale del *framework*, finalizzato alla co-progettazione territoriale e al rafforzamento delle competenze degli attori coinvolti.

Attraverso *workshop*, simulazioni e attività di co-design, il *Living Lab* integra conoscenze tecniche e conoscenze locali, favorendo

---

115 Cash, D. W., Clark, W. C., Alcock, F., Dickson, N. M., Eckley, N., Guston, D. H., ... & Mitchell, R. B. (2003). Knowledge systems for sustainable development. *Proceedings of the national academy of sciences*, *100*(14), 8086-8091.

116 Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic information science and systems*. John Wiley & Sons.

117 Eastman, C. M. (2011). BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. John Wiley & Sons.

118 Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital twin: enabling technologies, challenges and open research. *IEEE access*, *8*, 108952-108971.

l'interazione tra istituzioni, professionisti e comunità (Boyer, et al., 1996).

Il *capacity building* costituisce una funzione trasversale del sistema e si articola in tre dimensioni principali: istituzionale, relativa al rafforzamento delle capacità decisionali della pubblica amministrazione; tecnico-progettuale, legata all'uso di strumenti digitali di simulazione e pianificazione; sociale, connessa alla partecipazione e alla consapevolezza energetica delle comunità locali. La Figura A.4 2 rappresenta il *framework* multilevel ed è riportata in versione estesa in Appendice 4.

Essa rappresenta il *framework* metodologico in cui la transizione energetica è interpretata come processo multilivello di *capacity building*, integrando governance, competenze tecniche e partecipazione civica sui livelli macro, meso e micro del territorio. Il modello PCM–PDCA (*Plan–Do–Check–Act*) costituisce il riferimento concettuale per la struttura di monitoraggio e valutazione. Le principali funzioni del *Living Lab* includono:

- *capacity building* per la co-progettazione di scenari energetici e l'uso di *digital twin* e modelli MCA;
- supporto alla *governance* multilivello e alla definizione di strumenti regolativi locali;
- coinvolgimento dei cittadini nei processi di autoconsumo e transizione energetica;
- supporto tecnico ai processi normativi (VAS, piani energetici e autorizzazioni).

Il *capacity building* rappresenta il motore abilitante del *Living Lab*, trasformando lo spazio partecipativo in un dispositivo operativo di *governance* adattativa.

4.10.4 LOGICA MULTILIVELLO E CICLO PDCA

Il *framework* è strutturato secondo una logica multilivello (macro–meso–micro) integrata con il ciclo di miglioramento continuo PDCA (*Plan–Do–Check–Act*).

La coerenza istituzionale non è considerata un vincolo esterno, ma una proprietà intrinseca del processo progettuale, verificabile attraverso strumenti, dati e decisioni. Il ciclo operativo si articola come segue:

- *Plan*: definizione degli obiettivi e raccolta dati;
- *Do*: implementazione degli interventi e attivazione dei *Living Lab*;

- *Check*: monitoraggio tramite indicatori e *Digital Twin*;
- *Act*: revisione e aggiornamento delle strategie.

L'integrazione tra struttura multilivello e ciclo PDCA consente di tradurre obiettivi strategici in azioni operative tracciabili e replicabili, riducendo la frammentazione tipica della pianificazione energetica (Del Río & Klessmann, 2016).

Il sistema permette inoltre la retroazione dei dati dai livelli micro e meso verso il livello macro, garantendo apprendimento continuo e *governance* adattativa. Il livello macro definisce le strategie energetiche e normative, il meso coordina la pianificazione territoriale, mentre il micro attua gli interventi e genera *feedback* operativi.

4.11 MODULI OPERATIVI DEL MODELLO MULTILIVELLO

Il *framework* metodologico proposto si articola in un'architettura operativa multilivello che integra pianificazione strategica, progettazione territoriale, implementazione locale e monitoraggio continuo all'interno di un ciclo adattivo di tipo PCM–PDCA. Il modello si configura come un sistema decisionale integrato, in grado di connettere livelli istituzionali differenti, strumenti digitali e processi di *governance* territoriale, con l'obiettivo di garantire coerenza tra obiettivi strategici, trasformazioni progettuali e risultati misurabili. L'impianto è strutturato secondo una logica iterativa e multilivello, in cui le fasi operative sono organizzate in sequenza progressiva ma supportate da meccanismi di *feedback* e validazione tramite *gate* decisionali.

4.11.1 ARCHITETTURA METODOLOGICA MODULARE DEL FRAMEWORK

L'architettura metodologica del *framework* è strutturata secondo un approccio modulare e adattivo, tale da consentire l'integrazione delle principali dimensioni che caratterizzano il processo di transizione energetica in ambito territoriale. La relativa rappresentazione schematica è riportata nella Figura A.4 3 dell'Appendice 4. Il sistema è articolato come sequenza di fasi interdipendenti che coprono l'intero ciclo di pianificazione, dall'analisi del contesto alla gestione adattiva dei risultati. Tali fasi sono tra loro connesse attraverso meccanismi di *feedback* e validazione progressiva, che ne garantiscono la coerenza interna e l'allineamento con gli obiettivi strategici. L'architettura non assume una configurazione rigidamente sequenziale, ma si basa su un

modello iterativo in cui strumenti digitali, processi partecipativi e sistemi di valutazione supportano l'aggiornamento continuo delle decisioni lungo il ciclo PCM–PDCA.

4.11.2 SEQUENZA OPERATIVA DEL PROCESSO DECISIONALE

Il processo decisionale del *framework* è organizzato secondo una sequenza strutturata di fasi progressive, ciascuna associata a specifici obiettivi operativi e risultati attesi. Al fine di favorire una lettura organica del modello metodologico, la rappresentazione completa del flusso procedurale e la descrizione delle relative fasi sono riportate, rispettivamente, nella Tabella A.4 6, contenute nell'Appendice 4. La sequenza integra le principali dimensioni del ciclo PCM–PDCA, articolando il passaggio dalla costruzione del quadro conoscitivo alla definizione degli scenari, fino alla loro valutazione, implementazione e successiva replicazione.

Il sistema non è puramente lineare, ma si basa su momenti di verifica e validazione che regolano il passaggio tra le fasi, garantendo coerenza tra obiettivi strategici, vincoli territoriali e fattibilità tecnica. In questo modo, la sequenza operativa assume una funzione di struttura dinamica di supporto alla decisione e all'apprendimento progressivo.

4.11.3 ORGANIZZAZIONE MULTILIVELLO TERRITORIALE

Il *framework* opera su quattro scale territoriali interconnesse (macro, eco, meso, micro), che costituiscono il dispositivo di articolazione spaziale del modello PCM–PDCA. Ciascuna scala assume funzioni decisionali e operative differenziate, mantenendo tuttavia una logica integrata di *feedback* continuo tra livelli.

La scala macro-regionale definisce strategie energetiche e indirizzi di policy di lungo periodo.

La scala eco-sistemica/provinciale coordina risorse energetiche, infrastrutture e pianificazione territoriale.

La scala meso-locale riguarda quartieri e comunità energetiche, con focus su progettazione e implementazione collettiva.

La scala micro-operativa riguarda interventi puntuali, autoconsumo e sperimentazioni pilota. La relazione tra le scale non è pertanto gerarchica, ma reticolare e adattiva, basata su flussi bidirezionali di *feedback* tra indirizzi strategici e processi di implementazione locale. L'architettura multilivello del *framework* e le interazioni tra le diverse scale territoriali sono sintetizzate in Appendice 4 (Figura A.4 4).

4.11.4 SISTEMA DI VALIDAZIONE PROGRESSIVA E GATE DECISIONALI

Il sistema di validazione progressiva si basa su *Gate* decisionali che operano come dispositivi di controllo all'interno del ciclo PCM–PDCA, introducendo soglie di verifica che regolano il passaggio tra le diverse fasi del processo. I *Gate* non coincidono con le fasi operative del modello, ma ne rappresentano il livello di *governance* e validazione, attraverso il quale viene verificata la coerenza tra obiettivi strategici, fattibilità tecnica, sostenibilità economica e condizioni istituzionali. Questo meccanismo consente di strutturare il processo decisionale come sequenza condizionata, evitando avanzamenti non supportati da evidenze sufficienti e riducendo l'incertezza tipica dei processi di pianificazione multilivello. In tale configurazione, i *Gate* svolgono una funzione di controllo adattivo, garantendo che ogni transizione tra le componenti del sistema sia validata sulla base di criteri espliciti e verificabili.

Il sistema rafforza così la robustezza complessiva del *framework*, assicurando coerenza tra pianificazione strategica, modellazione operativa e implementazione territoriale.

4.11.5 CAPACITY BUILDING, MONITORAGGIO E MATRICE OPERATIVA INTEGRATA

Elemento trasversale dell'intero quadro metodologico è il processo di *Capacity Building*, inteso come costruzione progressiva delle competenze tecniche, istituzionali e sociali necessarie alla gestione dei processi di transizione energetica. Tale dimensione accompagna tutte le fasi operative del modello, favorendo apprendimento continuo, rafforzamento amministrativo, coinvolgimento degli *stakeholder* territoriali e consolidamento della *governance* multilivello.

Il monitoraggio operativo del sistema si basa su un insieme integrato di indicatori di performance (*Key Performance Indicators* – KPI), finalizzati alla misurazione continua delle dimensioni energetiche, ambientali, economiche e sociali del processo di implementazione. Tali indicatori includono la capacità di produzione energetica installata, la riduzione delle emissioni climalteranti, il livello di partecipazione degli *stakeholder*, la sostenibilità economica degli interventi e il potenziale di replicabilità territoriale del *framework*.

Particolare rilevanza assumono gli indicatori energetico-infrastrutturali, che valutano il grado di integrazione tra pianificazione

territoriale e funzionamento del sistema elettrico locale. Essi comprendono parametri relativi alla generazione distribuita, all'autoconsumo collettivo, all'efficienza energetica territoriale, alle perdite di rete e alla capacità adattativa del sistema rispetto alla variabilità della domanda energetica. Questo approccio rafforza il carattere *evidence-based* del *framework*, estendendo la valutazione oltre la dimensione ambientale e urbanistica verso la sostenibilità infrastrutturale delle configurazioni energetiche.

L'infrastruttura digitale di supporto integra strumenti di monitoraggio in tempo reale basati su *Digital Twin* territoriali, sistemi GIS-BIM interoperabili, piattaforme CDE e *dashboard* multilivello per il controllo continuo delle *performance*.

La matrice operativa del *framework* sintetizza l'intera architettura metodologica, evidenziando la relazione tra fasi operative, scale territoriali, *stakeholder*, deliverable e sistemi di monitoraggio. Essa rappresenta il dispositivo di integrazione tra dimensione strategica, implementativa e valutativa del modello PCM–PDCA.

Elemento strategico del sistema è il *Laboratory for Sustainable Energy Transition* (LSET), collocato nella dimensione eco-scalare, che supporta *Living Lab*, sperimentazione territoriale, trasferimento tecnologico e processi di innovazione, inclusi percorsi di incubazione e sviluppo imprenditoriale.

L'interazione tra scale territoriali (macro, eco, meso, micro), *capacity building*, infrastruttura digitale e sistema di monitoraggio integrato consente di garantire coerenza tra *governance* strategica, pianificazione territoriale e implementazione locale, rafforzando il carattere adattivo e replicabile del *framework*. La declinazione operativa del *framework* PCM–PDCA nelle diverse scale territoriali (macro, eco, meso e micro) è riportata nella Tabella A.4 7 dell'Appendice 4, che integra le fasi metodologiche e i *gate* decisionali con i relativi deliverable, strumenti e azioni previste. La tabella evidenzia il ruolo del *framework* quale dispositivo di connessione tra dimensione strategica, implementativa e valutativa, configurandosi come supporto alla *governance* multilivello e ai processi di apprendimento progressivo nella gestione della transizione energetica territoriale.

4.11.6 MODULI OPERATIVI DEL FRAMEWORK (M1–M6)

Il valore metodologico del *framework* risiede nella capacità di integrare pianificazione strategica, implementazione locale e apprendimento

adattivo in un sistema multilivello coerente e progressivamente trasferibile. L'integrazione tra governance, strumenti digitali avanzati, processi partecipativi e sistemi di monitoraggio continuo consente di superare la frammentazione della pianificazione energetica, configurando un sistema decisionale adattivo orientato alla replicabilità territoriale. Il modello non si configura come sequenza procedurale lineare, ma come infrastruttura metodologica basata su apprendimento continuo, validazione progressiva e innovazione sistemica.

L'architettura M1–M6 si inserisce nel ciclo PCM–PDCA e integra moduli operativi, sistema di *gate* decisionali e struttura territoriale multilivello. L'uso combinato di GIS, *Digital Twin*, CDE e processi di *capacity building* consente di connettere pianificazione strategica, progettazione tecnica e implementazione locale in un *framework* coerente e adattabile a contesti territoriali differenti.

4.11.6.1 M1 – Modulo di Compatibilità Paesaggistica e Culturale

Il Modulo M1 integra la dimensione paesaggistica e culturale come variabile progettuale strutturale del ciclo PCM–PDCA, superando la sua tradizionale interpretazione come vincolo esterno o fase valutativa ex post. Il paesaggio è assunto come risorsa progettuale, in coerenza con identità territoriali, percezione sociale e valori culturali. Il modulo utilizza GIS multilayer, *Digital Twin* paesaggistici, Visual Impact Assessment e processi partecipativi per tradurre le dimensioni qualitative del paesaggio in indicatori misurabili. Il riferimento teorico include la Convenzione Europea del Paesaggio (Council of Europe, 2000) e il D.Lgs. 42/2004, in coerenza con il *landscape-led design*, secondo cui l'integrazione paesaggistica incide sull'accettabilità sociale delle infrastrutture energetiche (Nadaï & van der Horst, 2010). Nel ciclo PDCA, M1 interviene su:

- *Plan*: definizione vincoli e obiettivi di qualità paesaggistica;
- *Do*: integrazione progettuale e mitigazione;
- *Check*: valutazioni multicriteriali (MCA, VAS);
- *Act*: aggiornamento linee guida e protocolli.

Opera su quattro scale: macro, eco, meso e micro, integrando anche dimensioni percettive e partecipative.

4.11.6.2 M2 – Modulo di Analisi Territoriale e Raccolta Dati

M2 costituisce la base conoscitiva del *framework* e integra dati energetici, ambientali, infrastrutturali e socio-economici in un'unica infrastruttura interoperabile. L'obiettivo è la costruzione di una

baseline tecnico-sociale coerente e aggiornabile a supporto delle fasi decisionali. Il modulo utilizza sistemi GIS *multilayer* e analisi spaziali multi-scala per integrare potenziale energetico, vincoli territoriali e caratteristiche insediative. Risponde alla criticità della frammentazione dei dati nella pianificazione energetica (Angelakoglou et al., 2020), includendo anche dati legati al patrimonio immateriale secondo approcci UNESCO. Nel ciclo PDCA:

• *Plan*: definizione quadro conoscitivo;

• *Do*: raccolta e integrazione dati

Il modulo alimenta l'intero sistema decisionale tramite infrastruttura CDE e supporta la costruzione di capacità decisionale distribuita.

4.11.6.3 M3 – Modulo di Integrazione Paesaggistica e Compatibilità Estetico-Funzionale

M3 traduce i vincoli paesaggistici in configurazioni progettuali operative nella fase di scenario *building*.

L'obiettivo è valutare la coerenza formale, funzionale e percettiva degli interventi energetici attraverso simulazioni 3D, scenari alternativi e processi partecipativi.

Il riferimento teorico si basa sul *landscape-led design* (Nadaï & van der Horst, 2010; Schuurman, 2015), secondo cui l'integrazione spaziale influisce sull'accettabilità sociale. Nel ciclo PDCA:

• *Do*: sviluppo scenari;

• *Check*: valutazione comparativa.

Il modulo interagisce con M1 nella traduzione dei criteri paesaggistici in soluzioni progettuali.

4.11.6.4 M4 – Modulo di Sostenibilità Ambientale

M4 valuta gli impatti ambientali complessivi degli interventi energetici sul sistema territoriale. L'analisi include consumo di suolo, qualità delle risorse naturali, ecosistemi, aria e acqua, interpretando la sostenibilità come equilibrio tra trasformazione e conservazione. Il modulo utilizza GIS e modelli di analisi spaziale per supportare la valutazione delle interazioni tra infrastrutture energetiche e contesto naturale. Nel ciclo PDCA:

• *Check*: valutazione impatti;

• *Act*: strategie di mitigazione

M4 garantisce coerenza tra sviluppo delle CER e capacità di carico territoriale.

4.11.6.5 M5 – Modulo di Pianificazione Energetica Locale e Scenari LEAP

M5 supporta la modellazione energetica multi-scala e la simulazione di scenari evolutivi di produzione e consumo. Utilizza il modello LEAP come guida e strumenti di scenario building per analizzare configurazioni energetiche alternative in relazione a vincoli territoriali e obiettivi di *policy*. Nel ciclo PDCA:

• *Do*: costruzione scenari;

• *Check*: valutazione alternative

4.11.6.6 M6 – Modulo di Governance Multilivello e Strategia CER

M6 rappresenta la dimensione istituzionale del *framework* e traduce i risultati tecnici in modelli di *governance* replicabili.

Si basa su approcci di *governance* collaborativa e *Living Lab* (Funtowicz & Ravetz, 1993; Pietrapertosa et al., 2020), integrando processi partecipativi e *capacity building*. Nel ciclo PDCA:

• *Act*: istituzionalizzazione e *scaling*

Produce linee guida e modelli organizzativi per le CER.

4.11.7 ESITI DELL'ARCHITETTURA MODULARE

L'architettura M1–M6 definisce un sistema integrato e multilivello fondato sull'applicazione del ciclo PCM–PDCA, nel quale moduli operativi, *gate* decisionali e articolazione territoriale sono configurati secondo un'interazione dinamica e adattiva. Il modello integra le dimensioni della pianificazione strategica, della progettazione tecnica e dell'implementazione locale, favorendo condizioni di flessibilità, trasferibilità e replicabilità nei diversi contesti territoriali di applicazione. All'interno del *framework*, il *capacity building* assume una funzione trasversale, contribuendo alla costruzione e alla diffusione di competenze distribuite tra gli attori coinvolti nei processi di transizione energetica. Parallelamente, l'integrazione di strumenti digitali quali GIS, *Digital Twin* e CDE rafforza la componente informativa del sistema, abilitando processi decisionali basati sulla conoscenza e supportando l'applicazione del modello in contesti territoriali caratterizzati da differenti condizioni operative e livelli di complessità. L'architettura modulare complessiva del *framework* è illustrata nella Figura A.4 5 dell'Appendice 4, riportata in versione estesa nella medesima sezione al fine di consentire una lettura analitica delle relazioni tra moduli, livelli territoriali e meccanismi di integrazione metodologica.

4.12 LOGICA DI INTEGRAZIONE E CICLO PDCA MULTILIVELLO

Il *framework* metodologico proposto adotta una logica di integrazione dinamica basata sulla combinazione tra *Project Cycle Management* (PCM) e ciclo di miglioramento continuo PDCA (*Plan–Do–Check–Act*), con l'obiettivo di costruire un sistema adattivo per la *governance* della transizione energetica territoriale.

Il PCM definisce la struttura sequenziale del processo progettuale, garantendo coerenza procedurale, tracciabilità delle decisioni e continuità tra le fasi operative. Il ciclo PDCA introduce invece una dimensione iterativa di apprendimento continuo, che consente l'aggiornamento progressivo del sistema sulla base dei *feedback* generati in fase di attuazione. L'integrazione tra PCM e PDCA supera la logica lineare della pianificazione tradizionale, configurando un modello di *governance* adattiva multilivello, nel quale ogni fase può essere verificata, corretta e riallineata in modo continuo.

4.12.1 STRUTTURA INTEGRATA DEL MODELLO

Il modello opera su tre dimensioni interconnesse:

- Dimensione temporale, articolata secondo le fasi del ciclo operativo, dallo *scoping* alla replicazione e istituzionalizzazione dei risultati;
- Dimensione territoriale, strutturata su scale macro-regionale, ecosistemica, meso-locale e micro-operativa, garantendo continuità tra pianificazione strategica e attuazione locale;
- Dimensione operativa, costituita dai moduli metodologici che traducono il *framework* in strumenti di analisi, valutazione e supporto decisionale.

L'interazione tra queste tre dimensioni consente la gestione integrata della complessità territoriale ed energetica.

4.12.2 FEEDBACK MULTILIVELLO E GOVERNANCE ADATTATIVA

Il principio centrale del *framework* è la presenza di meccanismi permanenti di *feedback* che collegano tutte le fasi del processo decisionale. L'integrazione PCM–PDCA genera un sistema di retroazione continua in cui i risultati dell'implementazione e del monitoraggio influenzano la ridefinizione di obiettivi, strategie e criteri decisionali.

Ogni scala territoriale sviluppa un proprio ciclo di apprendimento interno, mantenendo però la coerenza con il sistema complessivo. In questo modo si supera una logica gerarchica tradizionale e si introduce un modello basato su apprendimento continuo, resilienza istituzionale e coordinamento dinamico tra livelli.

4.12.3 INTEGRAZIONE PCM–PDCA MULTILIVELLO

L'integrazione tra PCM e PDCA si articola come segue:

- *Plan* (Fasi 0–2): definizione della baseline territoriale, analisi e formulazione degli obiettivi, inclusa la dimensione paesaggistica e culturale;
- *Do* (Fasi 3–4): sviluppo e implementazione degli scenari progettuali in forma sperimentale;
- *Check* (Fase 5): valutazione multicriteriale, monitoraggio e attivazione dei *feedback*;
- *Act* (Fasi 6–8): capitalizzazione dei risultati, aggiornamento delle linee guida e replicazione del modello.

Ogni livello territoriale (macro, eco, meso, micro) possiede un ciclo PDCA interno sincronizzato con il ciclo PCM generale, generando un sistema di *governance* adattiva basato su *feedback* multilivello.

4.12.4 MODULI OPERATIVI E RUOLO TRASVERSALE DEL MODULO M1

I moduli operativi costituiscono dispositivi interdipendenti che operano in modo trasversale come illustrato nella Figura A.4 6 (Appendice 4) rispetto alle fasi del ciclo, secondo una logica non lineare coerente con la *governance* adattiva. In questo sistema, il Modulo M1 – Compatibilità Paesaggistica e Culturale svolge una funzione trasversale permanente, agendo come interfaccia tra dimensione territoriale, percezione sociale e decisione progettuale. Il modulo non si configura come strumento di verifica *ex post*, ma come dispositivo attivo lungo tutto il ciclo PCM–PDCA, alimentato da:

- valutazioni percettive e sociali;
- simulazioni progettuali e scenari territoriali;
- verifiche normative e ambientali;
- *feedback* dei processi partecipativi.

Questi flussi informativi generano un processo di retroazione continua che contribuisce alla ridefinizione degli scenari progettuali e delle strategie di intervento. Il paesaggio viene quindi reinterpretato come

criterio progettuale attivo, e non come vincolo esterno. In questo quadro, il Modulo di Compatibilità Paesaggistica e Culturale (M1) svolge una funzione di filtro qualitativo e di regolazione trasversale, operando come interfaccia tra dimensione territoriale, percezione sociale e decisione progettuale. Il modulo non si configura come semplice strumento di verifica finale o controllo autorizzativo, ma come dispositivo permanente di supporto decisionale che accompagna l'intero ciclo PCM–PDCA.

A differenza degli strumenti analitici focalizzati su singole fasi del processo, M1 è attivo lungo l'intero ciclo in quanto riceve, rielabora e reintroduce nel sistema decisionale informazioni derivanti da:

- valutazioni percettive e sociali;
- simulazioni progettuali e scenari territoriali;
- verifiche normative e ambientali;
- *feedback* provenienti dai processi partecipativi.

Questi flussi informativi alimentano un processo di retroazione continua che contribuisce alla ridefinizione progressiva degli scenari progettuali e delle strategie di intervento. Il modulo non agisce quindi come elemento prescrittivo, ma come dispositivo adattivo che consente di mantenere la coerenza tra trasformazioni energetiche, struttura del paesaggio e sistemi di valore locali (Figura 4.12.4).

Il funzionamento del Modulo M1 nel ciclo PCM–PDCA multilivello è illustrato in Appendice 4.

4.12.5 VALORE SCIENTIFICO E REPLICABILITÀ DEL MODELLO

Il modello PCM–PDCA multilivello presenta elevata replicabilità grazie all'integrazione coerente tra strumenti digitali, *governance* partecipativa e moduli operativi. Tre principi ne definiscono la robustezza:

- coerenza verticale, che connette strategie energetiche sovraordinate e implementazioni locali (European Commission, 2022; Geels & Schot, 2007);
- retroazione orizzontale, che trasforma i *feedback* locali in aggiornamento continuo delle strategie (Pahl-Wostl, 2009; Ansell & Gash, 2008);
- tracciabilità decisionale, garantita da indicatori e sistemi digitali di monitoraggio (Batty, 2018; Dembski et al., 2020).

In questa prospettiva, il *framework* non è un modello statico, ma un sistema adattivo e replicabile di *governance* della transizione energetica.

4.13 FASI OPERATIVE DEL MODELLO E SEQUENZA DI IMPLEMENTAZIONE

Il modello operativo si fonda su una struttura integrata che connette il ciclo PCM–PDCA con un percorso progressivo di sviluppo delle competenze lungo le diverse fasi della pianificazione e dell'implementazione energetico-territoriale. Tale impostazione consente di interpretare il processo non esclusivamente come una sequenza operativa, ma come un sistema evolutivo nel quale governance, strumenti e capacità organizzative co-evolvono attraverso dinamiche iterative e multi-scalari, come sintetizzato nella Tabella A.4 8 dell'Appendice 4. In questa prospettiva, le fasi del modello assumono una duplice funzione: da un lato orientano e strutturano l'azione progettuale e decisionale; dall'altro definiscono un processo continuo di apprendimento organizzativo e istituzionale, finalizzato al consolidamento delle capacità necessarie alla gestione della transizione energetica. La matrice riportata in appendice evidenzia l'integrazione tra ciclo decisionale e sviluppo delle competenze, rappresentando la progressiva costruzione e maturazione delle capacità lungo l'intero sistema territoriale.

4.13.1 STRUTTURA GENERALE DEL MODELLO OPERATIVO

Il modello metodologico proposto è concepito come un *framework* integrato di supporto alla pianificazione energetico-territoriale, sviluppato per guidare l'intero ciclo di progettazione, implementazione, valutazione e replicazione delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) in contesti caratterizzati da elevata sensibilità paesaggistica, ambientale e culturale. Il modello supera una concezione lineare del processo decisionale e adotta una logica sistemica e adattativa, nella quale pianificazione, sperimentazione, monitoraggio e apprendimento costituiscono componenti di un unico processo evolutivo.

L'architettura metodologica integra i principi del *Project Cycle Management* (PCM) con il ciclo di miglioramento continuo *Plan–Do–Check–Act* (PDCA), configurando un sistema iterativo nel quale ciascuna fase produce informazioni, evidenze e risultati che

alimentano i processi decisionali successivi attraverso meccanismi di *feedback* e di apprendimento continuo. In tale prospettiva, il modello non rappresenta una semplice sequenza di attività, ma un dispositivo metodologico finalizzato a garantire coerenza tra pianificazione strategica, implementazione operativa e valutazione degli impatti. La struttura del *framework* si sviluppa lungo tre dimensioni tra loro complementari.

La prima dimensione è costituita dall'asse temporale, che descrive la progressione del ciclo progettuale secondo una successione di fasi organizzate mediante *Gate* decisionali. Ciascun *Gate* rappresenta un punto di verifica nel quale vengono valutati gli *output* prodotti, il grado di raggiungimento degli obiettivi intermedi e le condizioni necessarie per l'avanzamento del processo. Questa impostazione introduce una logica di controllo progressivo, riducendo il rischio decisionale e favorendo l'adattamento del modello alle condizioni emergenti.

La seconda dimensione è rappresentata dall'asse verticale multi-scalare, che consente di articolare il processo decisionale secondo differenti livelli di *governance* territoriale: macro-regionale, ecosistemico-provinciale, meso-territoriale e micro-locale. Ciascuna scala contribuisce con competenze, strumenti e responsabilità differenti, permettendo di collegare gli indirizzi strategici ai processi di progettazione e gestione locale. Tale articolazione garantisce la coerenza tra politiche energetiche, pianificazione territoriale e caratteristiche specifiche dei contesti di intervento.

La terza dimensione riguarda la componente trasversale del modello, costituita dai moduli operativi e dagli strumenti metodologici che supportano l'intero ciclo progettuale. In questa dimensione trovano integrazione i sistemi informativi territoriali, gli strumenti di modellazione, le procedure di valutazione multicriteriale, i dispositivi di monitoraggio e gli strumenti di *governance* collaborativa, che operano in modo coordinato per assicurare continuità tra le diverse fasi del processo.

L'interazione tra queste tre dimensioni genera una matrice metodologica integrata nella quale le decisioni strategiche, le attività operative e i processi valutativi risultano reciprocamente interconnessi. Il *framework* assume pertanto la configurazione di un sistema adattativo capace di accompagnare l'intero *iter* del progetto, favorendo l'allineamento tra obiettivi istituzionali, strumenti operativi e risultati verificabili.

La rappresentazione complessiva del modello evidenzia come il processo non sia interpretabile secondo una successione rigidamente lineare, ma come una struttura iterativa nella quale le informazioni prodotte durante l'attuazione e il monitoraggio alimentano cicli successivi di revisione, ottimizzazione e consolidamento delle decisioni (Tabela A.4 9, in Appendice 4). In questo senso, il modello assume le caratteristiche di un sistema di *governance* adattativa orientato al miglioramento continuo e alla progressiva istituzionalizzazione delle pratiche di pianificazione energetico-territoriale.

L'intero sistema operativo si configura come un processo ciclico e adattivo, in cui la sequenza delle fasi non rappresenta una progressione lineare rigida, ma un ciclo di apprendimento continuo tra progettazione, sperimentazione e valutazione. La struttura multi-scala e multi-livello consente l'allineamento tra *governance* strategica, progettazione territoriale e implementazione locale, garantendo coerenza tra obiettivi, strumenti e risultati.

Nel complesso, il modello si configura come un sistema di implementazione progressiva basato su cicli iterativi di apprendimento e adattamento. La sequenza operativa non rappresenta un percorso rigido, ma una struttura flessibile orientata alla riduzione dell'incertezza decisionale e al miglioramento continuo delle soluzioni progettuali.

Le sezioni successive approfondiscono i principi metodologici che conferiscono al *framework* il proprio valore scientifico (§ 4.13.2), l'articolazione del modello alle diverse scale di *governance* (§ 4.13.3), il percorso di maturazione delle competenze istituzionali (§ 4.13.4) e, infine, la descrizione dettagliata delle fasi operative e dei relativi *Gate* decisionali (§ 4.13.5).

4.13.2 VALORE SISTEMICO DEL FRAMEWORK

Il valore scientifico del modello proposto risiede nella sua capacità di integrare, all'interno di un unico *framework* operativo, due logiche tradizionalmente trattate in modo separato nei processi di pianificazione energetico-territoriale: da un lato il ciclo sequenziale di programmazione e attuazione (PCM–PDCA), dall'altro la *governance* multi-scalare dei sistemi territoriali complessi. L'interazione tra queste due dimensioni non produce una semplice sovrapposizione metodologica, ma configura una matrice analitica integrata in grado di

gestire la complessità dei processi di transizione energetica in contesti caratterizzati da elevata sensibilità paesaggistica e istituzionale.

In questa prospettiva, il modello assume una struttura bidimensionale nella quale l'asse temporale del ciclo progettuale si interseca con l'asse spaziale della *governance* territoriale. Tale intersezione consente di rendere operativi processi decisionali che tengono simultaneamente conto della progressione delle fasi progettuali e della loro declinazione differenziata alle diverse scale di intervento. Il risultato è un sistema in grado di evitare la frammentazione tipica dei modelli settoriali, garantendo invece continuità tra pianificazione strategica, progettazione operativa e valutazione degli impatti. Il contributo metodologico del *framework* può essere sintetizzato in tre principi fondamentali.

Il primo è la coerenza verticale, attraverso la quale gli obiettivi strategici definiti a livello macro vengono progressivamente tradotti in criteri operativi e strumenti decisionali alle scale inferiori. In questo processo, le indicazioni di *policy* si trasformano in parametri tecnici, scenari progettuali e soluzioni localizzate, garantendo l'allineamento tra *governance* istituzionale e implementazione territoriale.

Il secondo principio è la retroazione orizzontale, che consente l'integrazione dei *feedback* provenienti dalle scale operative verso i livelli decisionali superiori. Le evidenze generate durante le fasi di sperimentazione, implementazione e monitoraggio non rimangono confinate al livello locale, ma alimentano un processo di apprendimento sistemico che influenza la revisione delle strategie e il miglioramento continuo del modello.

Il terzo principio è la tracciabilità decisionale, che deriva dall'adozione di una struttura a *Gate* lungo il ciclo PCM–PDCA. Tale configurazione consente di formalizzare i punti di verifica del processo decisionale, rendendo espliciti i criteri di avanzamento tra le fasi e garantendo la documentabilità delle scelte effettuate. Questo elemento rafforza la trasparenza del processo e la sua replicabilità in contesti territoriali differenti.

All'interno di questa architettura, gli strumenti digitali e informativi (sistemi GIS, modelli BIM, *digital twin*, piattaforme di monitoraggio e ambienti collaborativi) non rappresentano componenti autonomi del modello, ma infrastrutture abilitanti che supportano l'integrazione tra livelli decisionali e scale territoriali. Il loro ruolo è quello di garantire continuità informativa, coerenza dei dati e capacità di simulazione e

valutazione lungo l'intero ciclo di progetto. Nel complesso, il *framework* si configura come un sistema di *governance* adattativa in grado di integrare dimensioni strategiche, operative e valutative in un'unica architettura metodologica. Tale integrazione consente non solo di migliorare la qualità dei processi decisionali, ma anche di rendere esplicita e governabile la complessità dei sistemi energetico-territoriali contemporanei.

Le sezioni successive approfondiscono l'articolazione del modello alle diverse scale di intervento (Cfr. Cap. 4, § 4.13.3), il sistema di maturazione delle competenze e del *capacity building* (Cfr. Cap. 4, § 4.13.4), e la declinazione operativa del *framework* attraverso le fasi e i *Gate* decisionali (§ 4.13.5).

4.13.3 DESCRIZIONE DELLE FASI ASCENDENTI DI SCALA

Il modello metodologico si fonda su una struttura multi-scalare che interpreta il territorio come sistema complesso stratificato, in cui le dinamiche energetiche, ambientali e socio-istituzionali si articolano su livelli interdipendenti di *governance* e di intervento. In questa prospettiva, la dimensione scalare non rappresenta una semplice classificazione territoriale, ma un dispositivo concettuale attraverso cui rendere operativa la relazione tra decisione strategica e trasformazione locale.

L'articolazione verticale del modello consente di garantire coerenza tra livelli decisionali differenti, favorendo l'allineamento tra politiche pubbliche, assetti territoriali e interventi progettuali. Le scale non sono quindi entità separate, ma livelli integrati di uno stesso sistema di pianificazione adattiva.

4.13.3.1 Scala macro

La scala macro costituisce il livello strategico e istituzionale del modello, all'interno del quale vengono definiti gli indirizzi generali delle politiche energetiche e territoriali. In questa dimensione si collocano le scelte di lungo periodo relative agli obiettivi di decarbonizzazione, alla pianificazione energetica nazionale e regionale e alla definizione dei quadri normativi di riferimento.

Il ruolo di questa scala è quello di garantire coerenza tra il *framework* metodologico e le strategie sovraordinate europee e nazionali, fungendo da cornice entro cui si articolano le successive declinazioni territoriali. Essa rappresenta il livello in cui si definiscono le traiettorie

complessive di sviluppo e si stabiliscono i vincoli e le opportunità che orientano l'intero sistema.

4.13.3.2 Scala ecosistemica

La scala ecosistemica rappresenta il livello intermedio di integrazione territoriale, in cui il sistema energetico viene interpretato come parte di un ecosistema complesso composto da risorse naturali, infrastrutture e reti di attori istituzionali e socio-economici.

In questa dimensione si struttura la relazione tra potenziale territoriale e capacità di implementazione, attraverso la lettura congiunta di vincoli ambientali, disponibilità di risorse energetiche e configurazioni infrastrutturali esistenti. Il territorio viene quindi interpretato come sistema dinamico di interazioni, nel quale la dimensione energetica si intreccia con quella paesaggistica, ecologica e produttiva.

La funzione di questa scala è quella di tradurre le strategie macro in configurazioni territoriali coerenti, creando una prima forma di mediazione tra indirizzi politici e realtà spaziale.

4.13.3.3 Scala meso

La scala meso corrisponde alla dimensione urbana e di quartiere, nella quale le dinamiche energetiche si confrontano direttamente con le caratteristiche insediative, sociali e funzionali dei contesti abitati.

In questo livello il territorio diventa spazio di interazione tra comunità, infrastrutture e sistemi energetici distribuiti. La scala meso rappresenta quindi il principale ambito di mediazione tra pianificazione e attuazione, in quanto consente di intercettare elementi quali la vulnerabilità energetica, l'accettabilità sociale e la capacità di adattamento dei sistemi locali.

Questa scala svolge una funzione fondamentale nel rendere le strategie territoriali concretamente sperimentabili all'interno dei contesti urbani e periurbani, mantenendo al tempo stesso una connessione diretta con le logiche di *governance* superiori.

4.13.3.4 Scala micro

La scala micro rappresenta il livello di massima granularità del modello, nel quale l'analisi si concentra su unità territoriali puntuali caratterizzate da specifici vincoli paesaggistici, architettonici o ambientali.

In questa dimensione il territorio viene scomposto in elementi elementari di intervento, nei quali la relazione tra progetto e contesto assume un carattere altamente specifico e localizzato. La scala micro consente quindi di tradurre le strategie generali in condizioni

operative concrete, evidenziando le caratteristiche fisiche, percettive e normative che influenzano la fattibilità degli interventi.
Questo livello rappresenta il punto di contatto diretto tra sistema di pianificazione e realtà costruita, garantendo la coerenza finale tra indirizzo strategico e implementazione territoriale.

4.13.4 DESCRIZIONE SCHEMATICA DELLE FASI

La struttura del modello metodologico non si limita a una sequenza di attività operative, ma configura un processo evolutivo di progressiva maturazione del sistema territoriale e istituzionale. In questa prospettiva, le fasi del ciclo PCM–PDCA non rappresentano semplicemente momenti tecnici distinti, bensì livelli successivi di trasformazione della capacità decisionale, progettuale e gestionale degli attori coinvolti.
Il modello assume quindi una natura intrinsecamente trasformativa, nella quale l'avanzamento lungo le fasi non implica solo la produzione di output progettuali, ma anche lo sviluppo progressivo di competenze, conoscenze e capacità di governance. Tale evoluzione si manifesta come un processo cumulativo, in cui ogni fase contribuisce a rafforzare e riorganizzare le condizioni di apprendimento del sistema.
In questo quadro, la dimensione del *capacity building* non è un elemento accessorio, ma una componente strutturale del modello. L'intero ciclo operativo diventa infatti un dispositivo di apprendimento distribuito, nel quale istituzioni, attori territoriali e comunità locali acquisiscono progressivamente capacità di analisi, decisione e gestione dei processi di transizione energetica e territoriale.
Il processo può essere interpretato come una traiettoria non lineare, caratterizzata da retroazioni continue tra pianificazione, sperimentazione e valutazione. Ogni fase alimenta le successive, ma allo stesso tempo viene rielaborata alla luce dei *feedback* provenienti dalle fasi successive, configurando una dinamica di apprendimento adattivo coerente con i principi della *governance* complessa.
La struttura complessiva del modello evidenzia quindi una doppia logica integrata: da un lato la sequenza ordinata delle fasi decisionali secondo il ciclo PCM–PDCA, dall'altro la progressiva evoluzione delle capacità sistemiche che si sviluppano attraverso l'intero processo. L'intersezione tra queste due dimensioni consente di superare una visione lineare della pianificazione, introducendo un approccio circolare, adattivo e iterativo.

In questa prospettiva, il valore del modello non risiede unicamente nella sua capacità di organizzare il processo decisionale, ma soprattutto nella sua funzione di dispositivo di apprendimento territoriale, capace di accompagnare la transizione da sistemi di *governance* frammentati a forme integrate, multi-livello e orientate alla resilienza.

4.13.5 IMPLEMENTAZIONE OPERATIVA DEL MODELLO

L'implementazione operativa rappresenta la declinazione applicativa del *framework* metodologico e costituisce la traduzione del ciclo PCM–PDCA in una sequenza strutturata di fasi decisionali e operative. Essa consente di trasformare il modello multi-scalare e multi-livello in un processo effettivamente implementabile, garantendo coerenza tra pianificazione strategica, progettazione tecnica, valutazione e attuazione.

Le fasi descritte di seguito non costituiscono attività isolate, ma componenti interdipendenti di un sistema integrato, regolato da *Gate* decisionali che assicurano progressione, controllo e apprendimento continuo.

A supporto della lettura complessiva del modello, la Tabella 4.13.5 sintetizza l'intero ciclo operativo PCM–PDCA, articolando le otto fasi principali del processo dalla *governance* iniziale fino alla replicazione e istituzionalizzazione del modello. La tabella rappresenta la struttura portante dell'intero *framework*, evidenziando per ciascuna fase gli obiettivi specifici, gli strumenti metodologici impiegati e gli output attesi.

Questa rappresentazione consente di cogliere la logica sequenziale e adattiva del modello, in cui ogni fase costituisce al tempo stesso un momento operativo e un dispositivo di apprendimento, coerente con i principi della *governance* multilivello e del ciclo di miglioramento continuo (Tabella A.4 10, Appendice 4).

4.13.5.1 Fase 0 — Governance e scoping

La fase iniziale definisce il quadro istituzionale e decisionale entro cui il processo prende avvio. Essa ha la funzione di stabilire il perimetro operativo del modello, assicurando l'allineamento tra attori, obiettivi e vincoli normativi.

In questa fase la *governance* viene intesa come elemento costitutivo del progetto e non come condizione esterna, configurando un sistema di

responsabilità condivise e multi-livello. Il risultato è la formalizzazione del mandato operativo che consente l'attivazione del ciclo di progetto.

4.13.5.2 Fase 1 — Costruzione della baseline conoscitiva

La fase di baseline consente la costruzione di un quadro conoscitivo integrato del territorio, finalizzato a supportare le successive decisioni progettuali. Essa consolida informazioni di natura energetica, ambientale, sociale e territoriale all'interno di un sistema coerente di lettura.

Il valore di questa fase risiede nella capacità di superare la frammentazione informativa, costruendo una base interpretativa unitaria del contesto di intervento.

4.13.5.3 Fase 2 — Definizione della Vision condivisa

Questa fase segna il passaggio dalla conoscenza alla costruzione strategica condivisa. La Vision rappresenta l'esito di un processo di allineamento tra obiettivi istituzionali, esigenze territoriali e istanze sociali.

Il suo ruolo è quello di trasformare le informazioni raccolte nella fase precedente in un quadro di riferimento normativo e progettuale condiviso, che orienta tutte le fasi successive del modello.

4.13.5.4 Fase 3 — Costruzione e valutazione degli scenari

La fase di scenario building introduce la dimensione esplorativa del modello, attraverso la costruzione di alternative progettuali coerenti con la Vision definita.

Gli scenari rappresentano configurazioni possibili del sistema territoriale e vengono utilizzati per esplorare trade-off tra performance energetiche, impatti ambientali e compatibilità paesaggistica. Questa fase consente di trasformare la Vision in opzioni progettuali confrontabili.

4.13.5.5 Fase 4 — Valutazione e selezione dell'alternativa

La fase di valutazione consente di confrontare in modo strutturato gli scenari elaborati, attraverso criteri multidimensionali che integrano aspetti tecnici, economici, ambientali e socio-culturali.

Il suo obiettivo è la selezione dell'alternativa più coerente con gli obiettivi del sistema, garantendo trasparenza decisionale e legittimazione del processo.

4.13.5.6 Fase 5 — Progettazione esecutiva e validazione autorizzativa

In questa fase le alternative selezionate vengono tradotte in soluzioni progettuali esecutive, pronte per l'attuazione. Il processo integra

dimensioni tecniche, normative e finanziarie in un unico quadro coerente.

La funzione principale è garantire la fattibilità reale degli interventi, mantenendo coerenza con gli esiti delle fasi precedenti.

4.13.5.7 Fase 6 — Implementazione e sperimentazione pilota

La fase di implementazione rappresenta la traduzione operativa del modello sul territorio. Gli interventi vengono realizzati in forma pilota per consentire la verifica empirica delle soluzioni progettuali.

Questa fase introduce una logica sperimentale e adattiva, nella quale il progetto diventa anche strumento di produzione di conoscenza applicata.

4.13.5.8 Fase 7–8 — Monitoraggio, adattamento e replicazione

Le fasi finali del modello riguardano la valutazione continua dei risultati e la loro traduzione in processi di miglioramento e diffusione.

Il monitoraggio consente di valutare le performance del sistema in termini energetici, ambientali e sociali, mentre la fase di replicazione traduce le evidenze prodotte in strumenti trasferibili e politiche di scala superiore.

In questa logica, il modello si configura come sistema aperto, capace di auto-apprendimento e istituzionalizzazione progressiva.

Fase 7 – Monitoraggio e governance adattativa

La fase riguarda la valutazione continua delle performance del sistema. Le attività includono:

- monitoraggio degli indicatori energetici, ambientali e sociali
- aggiornamento dei modelli digitali
- attivazione di cicli di *feedback* adattivo
- ottimizzazione progressiva del sistema

Output principale: sistema di *governance* adattiva basato su evidenze.

Fase 8 – Replicazione e mainstreaming

La fase finale riguarda la scalabilità e trasferibilità del modello. Le attività comprendono:

- elaborazione di toolkit replicabili
- definizione di linee guida operative
- integrazione nei piani e nelle politiche pubbliche
- attivazione di nuovi cicli di implementazione
- Output principale: modello trasferibile e scalabile.

L'articolazione operativa del ciclo PCM–PDCA, mettendo in relazione le diverse fasi del processo con i moduli metodologici (M1–M6), le

principali funzioni operative, gli output attesi e gli indicatori di verifica. La struttura evidenzia come la *governance* multilivello, gli strumenti digitali (GIS, BIM, *Digital Twin* e CDE) e i processi partecipativi siano integrati all'interno di un unico sistema decisionale adattivo. Le fasi iniziali (0–2) definiscono il quadro istituzionale, la baseline conoscitiva e la visione condivisa; le fasi centrali (3–5) sviluppano, valutano e traducono gli scenari in soluzioni progettuali; le fasi finali (6–8) assicurano monitoraggio, apprendimento continuo, replicabilità e istituzionalizzazione del modello, in coerenza con i principi della *governance* adattativa e del miglioramento continuo.

4.14 REPLICABILITÀ E TRASFERIBILITÀ DEL MODELLO

4.14.1 APPLICABILITÀ IN ALTRI CONTESTI TERRITORIALI

La replicabilità del modello non deve essere intesa come semplice estensione geografica di un medesimo schema progettuale, bensì come trasferimento selettivo della sua architettura relazionale. Ciò che risulta effettivamente trasferibile non è il contenuto specifico delle soluzioni energetiche o paesaggistiche, ma la struttura di interazione tra livelli decisionali, scale territoriali, strumenti analitici e sistemi di valutazione.

In questa prospettiva, il modello PCM–PDCA multilivello si configura come un sistema a "invarianza strutturale adattiva", nel quale la sequenza logico-operativa delle fasi e la relazione tra moduli funzionali rimangono costanti, mentre variabili risultano i parametri territoriali, normativi, tecnologici e sociali. Tale caratteristica consente al modello di essere riconfigurato in contesti differenti senza perdita di coerenza metodologica. La trasferibilità si fonda su tre principi strutturali.

Il primo riguarda la distinzione tra infrastruttura metodologica e contenuto contestuale: mentre la prima definisce il ciclo decisionale, la logica PCM–PDCA e l'interazione tra moduli operativi, il secondo si adatta alle specificità territoriali, paesaggistiche e istituzionali.

Il secondo principio concerne la natura scalare del modello, che non si limita a descrivere livelli amministrativi differenti, ma costruisce una relazione funzionale tra scala strategica, ecosistemica e locale, garantendo coerenza tra pianificazione di lungo periodo e implementazione situata.

Il terzo principio riguarda la standardizzazione parziale degli strumenti di analisi e valutazione: l'uso di indicatori, output verificabili e

dispositivi digitali (GIS, BIM, *Digital Twin*, CDE) consente comparabilità tra contesti, pur mantenendo flessibilità nella loro parametrizzazione.
In questa logica, la replicabilità non coincide con la riproduzione del modello, ma con la capacità di attivare processi analoghi di integrazione tra *governance* multilivello, valutazione paesaggistica e pianificazione energetica. Il modello diventa quindi un *framework* trasferibile di *governance* adattiva, applicabile a contesti differenti di transizione energetica e rigenerazione territoriale.

4.15 MONITORAGGIO, VALUTAZIONE E ADATTAMENTO

Il sistema di monitoraggio, valutazione e adattamento rappresenta la componente di chiusura cognitiva del modello PCM–PDCA multilivello, assumendo la funzione di infrastruttura informativa e interpretativa attraverso cui i risultati del processo vengono consolidati, confrontati e trasformati in conoscenza trasferibile. In questa prospettiva, il monitoraggio non è inteso come attività ex post, ma come dispositivo strutturale di lettura continua delle dinamiche territoriali, energetiche e paesaggistiche.
Il sistema è progettato per garantire trasparenza, verificabilità e capacità di apprendimento istituzionale, supportando processi decisionali basati su evidenze e rafforzando la coerenza tra pianificazione, implementazione e revisione strategica (European Commission, 2004; OECD, 2010).

4.15.1 OBIETTIVI DEL SISTEMA DI DI MONITORAGGIO E VALUTAZIONE

Il sistema di Monitoraggio e Valutazione (M&V) persegue tre finalità principali di natura strategica:

- verificare il grado di coerenza tra obiettivi pianificati e risultati effettivamente conseguiti;
- consolidare una base informativa affidabile per il supporto alle decisioni pubbliche e territoriali;
- abilitare processi di apprendimento istituzionale e aggiornamento progressivo delle strategie di intervento.

In coerenza con i principi della valutazione delle politiche pubbliche (OECD, 2010; UNDP, 2009), il sistema adotta un approccio iterativo, nel quale la valutazione non rappresenta un momento conclusivo, ma una funzione permanente del ciclo di governance.

4.15.2 STRUTTURA DEGLI INDICATORI E KPI MULTIDIMENSIONALI

Il sistema di monitoraggio si fonda su una struttura di Key Performance Indicators (KPI) organizzati secondo una logica multilivello (Rossi, Lipsey & Freeman, 2004; OECD, 2010), articolata in tre dimensioni analitiche:

- KPI di impatto, relativi agli effetti strutturali di lungo periodo (transizione energetica, riduzione emissioni, resilienza territoriale, qualità paesaggistica);
- KPI di esito, riferiti all'efficacia delle politiche e dei dispositivi di *governance* (attuazione degli strumenti pianificatori, funzionamento dei modelli partecipativi, integrazione istituzionale);
- KPI di output, relativi ai risultati immediati prodotti dal sistema (progetti implementati, strumenti digitali attivati, comunità energetiche operative).

Ogni indicatore è definito attraverso una struttura standardizzata composta da baseline, target, fonti informative e metodi di rilevazione, al fine di garantire confrontabilità e verificabilità nel tempo.

4.15.3 ARCHITETTURA INFORMATIVA E STRUMENTI DI ANALISI

La gestione del sistema di monitoraggio è supportata da un'architettura informativa integrata, basata sull'interoperabilità tra dataset territoriali, modelli digitali e sistemi di analisi.

La struttura informativa è organizzata attraverso matrici multidimensionali che mettono in relazione scale territoriali (macro, ecosistemica, meso, micro), ambiti di intervento e categorie di indicatori, consentendo una lettura sistemica delle performance.

In questo quadro, il *Digital Twin* territoriale svolge una funzione di infrastruttura analitica, abilitando la rappresentazione dinamica degli impatti e la simulazione di scenari evolutivi. Esso consente di supportare il processo decisionale attraverso una lettura integrata delle interazioni tra sistemi energetici, ambientali e paesaggistici,

favorendo approcci data-informed alla pianificazione territoriale (Batty, 2018; Dembski et al., 2020[119]).

4.15.4 GOVERNANCE ADATTATIVA E FEEDBACK LOOP

Il sistema di monitoraggio è integrato in una logica di *governance* adattativa, intesa come capacità del sistema istituzionale di modificare strategie, strumenti e priorità in funzione dell'evidenza empirica prodotta nel tempo. Tale approccio si basa su tre principi fondamentali:

- iterazione decisionale, attraverso cicli periodici di revisione delle politiche;
- integrazione degli *stakeholder*, mediante processi strutturati di confronto tra attori istituzionali e territoriali;
- apprendimento progressivo, finalizzato alla trasformazione dei dati di monitoraggio in conoscenza operativa.

In questo senso, il sistema di M&V non ha una funzione meramente valutativa, ma costituisce un meccanismo di retroazione istituzionale, che consente al modello PCM–PDCA di evolvere nel tempo in modo coerente, resiliente e replicabile (Ansell & Gash, 2008[120]; Pahl-Wostl, 2009[121]; Geels & Schot, 2007[122]).

4.16 CONCLUSIONE METODOLOGICA

Il presente capitolo ha definito l'architettura metodologica della ricerca attraverso la costruzione di un modello integrato PCM–PDCA multilivello, concepito per affrontare la complessità della transizione energetica in contesti territoriali caratterizzati da elevata interdipendenza tra dimensioni energetiche, ambientali e paesaggistiche.

Il contributo centrale della ricerca consiste nell'introduzione di un *framework* processuale che supera la tradizionale separazione tra pianificazione strategica, progettazione operativa e valutazione,

---

119 Dembski, F., Wössner, U., Letzgus, M., Ruddat, M., & Yamu, C. (2020). Urban digital twins for smart cities and citizens: The case study of Herrenberg, Germany. *Sustainability*, *12*(6), 2307.

120 Ansell, C., & Gash, A. (2008). Collaborative governance in theory and practice. *Journal of public administration research and theory*, *18*(4), 543-571.

121 Pahl-Wostl, C. (2009). A conceptual framework for analysing adaptive capacity and multi-level learning processes in resource governance regimes. *Global environmental change*, *19*(3), 354-365.

122 Geels, F. W., & Schot, J. (2007). Typology of sociotechnical transition pathways. *Research policy*, *36*(3), 399-417.

integrandole in un unico sistema ciclico e adattivo. Tale struttura consente di esplicitare le relazioni tra scale territoriali, strumenti analitici e dispositivi decisionali, garantendo coerenza tra livelli di governo e fasi del processo.

L'elemento innovativo del modello risiede nella sua capacità di rendere operativa l'integrazione tra approccio multi-scala, strumenti digitali e processi di valutazione basati su evidenze, configurando un sistema di *governance* in grado di apprendere e riorientarsi nel tempo.

In questa prospettiva, energia, paesaggio e territorio non sono trattati come ambiti separati di intervento, ma come componenti interdipendenti di un unico sistema socio-tecnico complesso, la cui gestione richiede strumenti adattivi e integrati.

Il modello proposto si colloca così all'interno delle più recenti traiettorie europee di transizione ecologica e pianificazione territoriale adattiva, offrendo una struttura metodologica replicabile per la progettazione e la *governance* di processi complessi.

5 | QUINTA PARTE
STRUMENTI OPERATIVI

5.1 PREMESSA

Il presente capitolo analizza gli strumenti operativi e digitali che rendono possibile l'implementazione del *framework* metodologico proposto nell'ambito della progettazione tecnologica, ambientale e circolare applicata alle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER). Tali strumenti costituiscono il livello operativo attraverso cui i principi teorici e metodologici sviluppati nei capitoli precedenti vengono tradotti in processi applicativi verificabili, replicabili e adattabili alle diverse scale territoriali di intervento: macro, meso e micro. L'implementazione del *framework* si fonda su un ecosistema digitale integrato, concepito come infrastruttura metodologica e informativa capace di supportare la raccolta, l'organizzazione e l'analisi dei dati, la simulazione di scenari complessi e il coordinamento dei processi decisionali. In questa prospettiva, gli strumenti digitali non sono intesi come dispositivi tecnici isolati, ma come componenti interconnesse di un sistema finalizzato a garantire coerenza operativa, continuità informativa e capacità di adattamento nel tempo.

All'interno di tale struttura, i principi del *Design Circular* orientano l'intero processo di pianificazione e progettazione, influenzando sia le decisioni strategiche sia i meccanismi di coordinamento operativo. La dimensione digitale viene pertanto interpretata non esclusivamente in chiave tecnologica, ma come dispositivo integrato capace di connettere aspetti energetici, ambientali, territoriali e socio-culturali, includendo anche la valorizzazione del patrimonio immateriale[123] e delle conoscenze locali secondo un approccio partecipativo. secondo i principi UNESCO (2003)[124].

Essi costituiscono una infrastruttura cognitiva e tecnica che supporta la raccolta, la gestione e l'analisi dei dati, la simulazione di scenari complessi e la gestione delle interazioni tra attori e *stakeholder*, garantendo coerenza istituzionale e capacità di adattamento nel

---

[123] L'articolo 2 per "patrimonio culturale immateriale" s'intendono le prassi, le rappresentazioni, le espressioni, le conoscenze, il know-how – come pure gli strumenti, gli oggetti, i manufatti e gli spazi culturali associati agli stessi – che le comunità, i gruppi e in alcuni casi gli individui riconoscono in quanto parte del loro patrimonio culturale. Questo patrimonio culturale immateriale, trasmesso di generazione in generazione, è costantemente ricreato dalle comunità e dai gruppi in risposta al loro ambiente, alla loro interazione con la natura e alla loro storia e dà loro un senso d'identità e di continuità, promuovendo in tal modo il rispetto per la diversità culturale e la creatività umana.

[124] UNESCO, (2003). *Convention for the safeguarding of the intangible cultural heritage*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

tempo. L'ecosistema operativo proposto risponde a quattro funzioni principali:

- supportare processi di *governance* multilivello nei diversi livelli istituzionali e territoriali (Cash et al., 2003[125]);
- facilitare l'integrazione transdisciplinare tra dimensioni energetiche, urbanistiche, ambientali e socio-economiche (Pohl & Hirsch Hadorn, 2007[126]);
- promuovere processi di apprendimento, *capacity building* e collaborazione tra soggetti pubblici, privati e comunitari (Funtowicz & Ravetz, 1993);
- integrare dimensioni culturali e patrimoniali nei processi di pianificazione e gestione territoriale (UNESCO, 2003).

In questo quadro, l'urbanistica assume un ruolo di coordinamento sistemico, ponendosi come elemento di connessione tra pianificazione territoriale, progettazione energetica e processi di trasformazione sostenibile, garantendo coerenza tra strumenti regolativi, infrastrutture digitali e processi decisionali adattivi. Obiettivo del capitolo è dimostrare come la digitalizzazione del *framework* modulare M1–M6 costituisca il passaggio operativo necessario per trasferire la costruzione teorico-metodologica della ricerca in un modello implementabile, verificabile e istituzionalmente applicabile (Rodríguez-Rivero & Ortiz-Marcos, 2022; Lang et al., 2012[127]; Fuller et al., 2020[128]).

5.1.1 DALLA COSTRUZIONE TEORICA ALL'IMPLEMENTAZIONE OPERATIVA

I capitoli precedenti hanno evidenziato la necessità di superare la frammentazione tra pianificazione energetica, progettazione territoriale e dimensione socio-culturale, delineando un *framework* metodologico articolato nei moduli M1–M6. Il presente capitolo approfondisce gli strumenti digitali che ne consentono

---

125 Cash, D. W., Clark, W. C., Alcock, F., Dickson, N. M., Eckley, N., Guston, D. H., ... & Mitchell, R. B. (2003). Knowledge systems for sustainable development. *Proceedings of the national academy of sciences*, *100*(14), 8086-8091.

126 Pohl, C., & Hadorn, G. H. (2007, March). Principles for designing transdisciplinary research.

127 Lang, D. J., Wiek, A., Bergmann, M., Stauffacher, M., Martens, P., Moll, P., ... & Thomas, C. J. (2012). Transdisciplinary research in sustainability science: practice, principles, and challenges. *Sustainability science*, *7*(Suppl 1), 25-43.

128 Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital twin: enabling technologies, challenges and open research. *IEEE access*, *8*, 108952-108971.

l'implementazione operativa e la traduzione in processi progettuali verificabili.

5.1.2 ECOSISTEMA DIGITALE DEGLI STRUMENTI

L'implementazione del *framework* si fonda su un ecosistema digitale integrato LOD (*Level of Development / Level of Detail*), concepito come infrastruttura informativa e operativa per la gestione coordinata di dati, modelli e processi decisionali. Tale ecosistema abilita l'integrazione tra scale macro, meso e micro, supportando la simulazione di scenari complessi e la *governance* multilivello. In questo contesto, i principi del *Design Circular* orientano la costruzione e l'interpretazione dei dati, integrando dimensioni tecniche, ambientali, territoriali e socio-culturali. L'approccio consente di garantire coerenza istituzionale, adattabilità nel tempo e valorizzazione delle componenti immateriali secondo i principi UNESCO (2003). L'urbanistica integrata permette di collegare obiettivi strategici e interventi locali, garantendo coerenza tra piani urbanistici e scenari energetici. La progettazione di una CER in contesto urbano storico consente di simulare impatti visivi e culturali, ottimizzare produzione energetica e mitigare vincoli paesaggistici, rafforzando competenza e consapevolezza degli *stakeholder* (Del Rio & Klessmann, 2016).

La Tabella A.4 1 illustrata nell'Appendice 5, seguente sintetizza l'integrazione dei livelli territoriali Macro, Meso e Micro con strumenti digitali, tipologie di dati e principi di Design Circular applicati a Comunità Energetiche Rinnovabili (CER). L'obiettivo è evidenziare come un approccio multilivello, combinato con strumenti come CDE, *Digital Twin*, BIM e GIS, possa facilitare la pianificazione, il coordinamento e l'implementazione di strategie energetiche e di economia circolare, mantenendo al centro la dimensione culturale e partecipativa del territorio.

A livello strategico Macro (Regionale), strumenti come il PEAR e i *Digital Twin* consentono la pianificazione dei flussi energetici e dei materiali su scala regionale. I dati aggregati su produzione, consumo e risorse naturali vengono utilizzati per ottimizzare scenari di economia circolare e integrare il patrimonio immateriale nei processi decisionali. Questo livello collega i moduli M1, M5 e M6, favorendo la *governance* multilivello e la replicabilità delle soluzioni.

A livello Meso (Coordinamento Territoriale / Provinciale) gli strumenti di coordinamento come il PTCP, BIM e GIS supportano la gestione

integrata delle infrastrutture tra comuni, ottimizzando flussi di materiali ed energia secondo logiche circolari. Qui i dati spaziali e di distribuzione energetica permettono scenari predittivi e *co-design* con gli *stakeholder* locali. I moduli M2, M3, M5 e M6 traducono le strategie regionali in piani operativi multi-comune.

A livello Micro (Locale / Operativo), strumenti operativi come PET/NTA, eco-scale di analisi, IoT e *Digital Twin* consentono il monitoraggio dei progetti pilota CER, l'analisi dei cicli di vita dei materiali e l'ottimizzazione dei flussi energetici. Questo livello realizza concretamente la filosofia del *Design Circular*, chiudendo i cicli di energia e materiali e coinvolgendo attivamente la comunità. I moduli M4, M5 e M6 sono direttamente applicati, assicurando sostenibilità, replicabilità e apprendimento iterativo.

La Tabella A.5 1 (Appendice 5), evidenzia come il Design Circular non sia un elemento aggiuntivo, ma un principio trasversale che guida tutti i livelli territoriali. Dalla definizione di scenari regionali (Macro) alla gestione coordinata di infrastrutture (Meso) fino all'implementazione operativa e partecipativa (Micro), la logica circolare permette:

- Ottimizzazione dei flussi di energia, materiali e risorse;
- Valorizzazione del patrimonio culturale immateriale attraverso processi partecipativi;
- Chiusura dei cicli di vita dei materiali e progettazione resiliente;
- Replicabilità e scalabilità delle soluzioni attraverso strumenti digitali integrati (CDE, *Digital Twin*, BIM, GIS).

Questo approccio multilivello e circolare garantisce coerenza tra strategia, coordinamento territoriale e intervento locale, trasformando i moduli M1–M6 in un sistema integrato, adattativo e sostenibile.

5.1.2.1 Componenti dell'ecosistema digitale

L'ecosistema digitale illustrato nella Figura A.5 1 dell'Appendice 5 si fonda su cinque componenti principali caratterizzate da elevati livelli di interoperabilità: *Common Data Environment* (CDE), *Building Information Modeling* (BIM), *Geographic Information Systems* (GIS), *Digital Twin* e sistemi *Internet of Things* (IoT). Tali componenti costituiscono un'infrastruttura informativa integrata a supporto dei processi di pianificazione, progettazione, implementazione e monitoraggio della transizione energetica territoriale.

All'interno di tale ecosistema, il *Common Data Environment* (CDE) assume il ruolo di ambiente informativo centrale per la gestione,

organizzazione e condivisione dei dati generati durante l'iter progettuale. Esso consente di integrare informazioni eterogenee – energetiche, ambientali, territoriali e socio-economiche – garantendo tracciabilità, consistenza dei dataset, controllo degli accessi e aggiornamento continuo delle informazioni. In questa prospettiva, il CDE opera come infrastruttura digitale condivisa, favorendo l'interoperabilità tra modelli informativi, strumenti analitici e livelli decisionali differenti, nonché abilitando processi di coordinamento, riuso e valorizzazione dei dati all'interno del *framework* metodologico (Eastman et al., 2011)[129].

Il *Digital Twin* rappresenta la replica dinamica del sistema territoriale ed energetico, integrando dati provenienti da BIM, GIS e sensori IoT. Esso consente la simulazione di scenari alternativi di produzione, consumo e configurazione delle fonti rinnovabili, supportando processi decisionali basati su evidenze. Oltre alla dimensione tecnica, il *Digital Twin* integra variabili qualitative e socio-culturali, contribuendo a una rappresentazione più aderente alla complessità dei sistemi socio-energetici (Fuller et al., 2020; Longley, 2015)[130].

Il *Building Information Modeling* (BIM) consente la modellazione parametrica degli elementi edilizi e impiantistici associati alle Comunità Energetiche Rinnovabili. Tale strumento permette di descrivere prestazioni energetiche, caratteristiche tecniche e relazioni tra componenti, facilitando l'integrazione tra scala edilizia e territoriale e il coordinamento con GIS e *Digital Twin*.

I *Geographic Information Systems* (GIS) costituiscono lo strumento principale per l'analisi spaziale. Essi permettono la gestione di dati georeferenziati relativi a uso del suolo, vincoli ambientali, infrastrutture e morfologia territoriale. Nel *framework* proposto, il GIS supporta la valutazione della compatibilità territoriale delle soluzioni energetiche e la costruzione di scenari spazialmente espliciti.

I sistemi IoT forniscono dati in tempo reale relativi a produzione, consumo e performance energetiche. Tali flussi informativi alimentano il *Digital Twin* e aggiornano dinamicamente il CDE, consentendo il

---

129 Eastman, C. M. (2011). BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. John Wiley & Sons.

130 Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic information science and systems*. John Wiley & Sons.

monitoraggio continuo del funzionamento delle Comunità Energetiche e il rafforzamento della scala micro attraverso la lettura dei comportamenti locali (UNESCO, 2003)131.

L'integrazione tra CDE, BIM, GIS, *Digital Twin* e IoT consente di costruire un ambiente operativo coerente per la gestione dei moduli M1–M6, supportando processi di *governance* multilivello, *capacity building* e collaborazione tra *stakeholder* pubblici, privati e comunitari (Pohl & Hirsch Hadorn, 2007).

5.1.2.2 Struttura integrata dell'ecosistema digitale e dispositivi epistemici per la simulazione e il supporto decisionale

L'architettura digitale costituisce l'infrastruttura cognitiva e operativa del *framework* metodologico. Essa non si configura come semplice supporto tecnico alla progettazione, bensì come ambiente integrato di produzione, organizzazione e validazione della conoscenza, in grado di connettere scala territoriale, scala urbana e scala edilizia in un sistema coerente e interoperabile.

Il modello si fonda sull'integrazione tra sistemi GIS (*Geographic Information Systems*), piattaforme BIM (*Building Information Modeling*) e ambienti *Digital Twin*, articolati secondo una logica multilivello:

- livello macro-territoriale, in cui il GIS consente l'analisi delle risorse, dei flussi energetici, delle vulnerabilità ambientali e delle condizioni socio-economiche;
- livello meso-urbano, in cui l'interoperabilità tra GIS e BIM permette la valutazione comparativa di scenari di trasformazione;

  livello micro-edilizio e impiantistico, in cui il BIM e il *Digital Twin* consentono simulazioni energetiche, ambientali ed economiche a elevato grado di dettaglio.

L'integrazione di tali strumenti non produce una mera sovrapposizione di dati, ma genera un ecosistema digitale dinamico, in cui le informazioni vengono costantemente aggiornate, validate e rielaborate secondo il ciclo iterativo PDCA.

In questa prospettiva, la simulazione assume una funzione che trascende la dimensione tecnica. Essa non è soltanto strumento di

131 UNESCO. (2003). Convention for the Safeguarding of the Intangible Cultural Heritage. Paris: UNESCO.

verifica prestazionale, ma dispositivo epistemico che struttura il processo decisionale. Attraverso la simulazione predittiva è possibile: rendere esplicite le ipotesi progettuali; confrontare scenari alternativi; quantificare impatti ambientali, energetici ed economici; ridurre l'incertezza decisionale.

La simulazione diventa quindi un meccanismo di produzione di conoscenza comparabile e replicabile, fondamento della trasparenza e della tracciabilità del processo decisionale.

Il flusso rappresentato nella Figura A.5 2 nell'Appendice 5 non è da intendersi come sequenza lineare, di fatti è illustrato come processo ciclico e adattivo, in cui i dati e i *feedback* raccolti alimentano un aggiornamento continuo del modello digitale. Questa logica learning-based consente allo schema di supportare non solo la fase di pianificazione, ma anche il monitoraggio, la valutazione e la revisione delle decisioni nel tempo, rappresentando un modello metodologico circolare in cui i processi partecipativi, la dimensione culturale del territorio e gli strumenti digitali sono integrati in un sistema adattivo.

L'architettura digitale multilivello consente inoltre l'integrazione di indicatori ambientali, energetici e criteri di sostenibilità in un unico ambiente informativo condiviso, trasformando il modello in un sistema aperto e aggiornabile. In tal modo, il *framework* supera la frammentazione tra pianificazione territoriale, progettazione edilizia e gestione operativa, costruendo una continuità informativa tra le diverse fasi della pianificazione e progettazione.

Il *Digital Twin* rappresenta digitalmente, in tempo reale, elementi fisici, processi e sistemi socio-tecnici, consentendo simulazioni predittive e la costruzione di scenari alternativi di supporto alle decisioni (Fuller et al., 2020). Applicato alle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER), il *Digital Twin* non si limita alla modellazione degli impianti, ma si configura come infrastruttura digitale del territorio, capace di integrare dimensioni energetiche, ambientali, urbane e sociali. In particolare, esso consente di:

- simulare i flussi di produzione, distribuzione e consumo energetico a scala edilizia e territoriale, supportando l'ottimizzazione delle configurazioni di comunità;
- costruire scenari multi-obiettivo, integrando dati ambientali, paesaggistici, urbanistici e socio-economici, in coerenza con approcci di pianificazione integrata;

- supportare processi partecipativi e di apprendimento collettivo, facilitando la condivisione delle conoscenze e la trasmissione del patrimonio immateriale, in linea con i principi UNESCO di inclusione e valorizzazione delle comunità locali (UNESCO, 2003).

In questo quadro, il *Digital Twin* diventa un dispositivo abilitante per le CER di territorio, favorendo forme avanzate di *governance* collaborativa e rafforzando il ruolo delle comunità come attori attivi nella transizione energetica e culturale (Fuller et al., 2020; UNESCO, 2003). Il BIM (Building Information Modeling) permette di modellare infrastrutture energetiche con livello di dettaglio crescente (da 1D a 10D), integrando informazioni relative a geometria, materiali, prestazioni energetiche e gestione operativa e manutentiva. L'integrazione tra BIM e *Digital Twin* permette di effettuare simulazioni predittive, ottimizzare scenari e supportare il processo decisionale. L'uso combinato con un Common Data Environment (CDE) garantisce la condivisione, la tracciabilità e la replicabilità dei dati, rafforzando il *capacity building* tecnico-operativo e facilitando la gestione dei moduli M1–M6 in contesti diversi (Lang et al., 2012). Inoltre, i dati della rete nazionale forniti da TERNA possono essere integrati sia nel *Digital Twin* sia nel CDE, consentendo simulazioni multi-scala e supportando la pianificazione delle CER e la loro connessione con infrastrutture regionali e locali, in coerenza con le linee guida nazionali.

Il *Living Lab* costituisce il cuore operativo del *framework* metodologico, configurandosi come spazio di sperimentazione attiva dove si integrano *capacity building*, co-progettazione e *governance* multi-scala. Attraverso attività strutturate di apprendimento e confronto, il *Living Lab* abilita:

- *workshop* e laboratori territoriali dedicati all'uso di GIS, BIM e *Digital Twin*;
- percorsi formativi specialistici su valutazione multicriteriale e strumenti di pianificazione;
- coinvolgimento diretto delle comunità locali per la valorizzazione del patrimonio culturale e immateriale.

In questo contesto, il GIS multilayer assume il ruolo di infrastruttura analitica e decisionale, consentendo analisi spaziali multi-scala, valutazione integrata dei vincoli e integrazione sistemica dei dati derivanti dai moduli M1–M6.

I sistemi GIS permettono così di tradurre i principi delle convenzioni internazionali sul paesaggio e sul patrimonio culturale immateriale in criteri operativi, rendendo valutabili e visualizzabili gli impatti territoriali e supportando processi partecipativi e indicatori di accettabilità sociale delle infrastrutture energetiche (Council of Europe, 2000).

Infine, il CDE centralizza dataset territoriali, energetici e ambientali, insieme alla documentazione tecnica e agli scenari progettuali, garantendo replicabilità, tracciabilità e apprendimento continuo (Eastman et al., 2011). Il CDE costituisce il *backbone* digitale del modello multilivello e supporta processi di *knowledge building*, formazione e sviluppo di competenze, favorendo *empowerment* locale e gestione condivisa della conoscenza. Attraverso il CDE, ogni modulo M1–M6 integra strumenti di *knowledge*, *training*, *development*, *coaching e learning*, rafforzando i processi di *capacity building* e la *governance* adattiva. In questa prospettiva, la simulazione non è soltanto uno strumento tecnico, ma un dispositivo epistemico che struttura il processo decisionale, riduce l'incertezza e rende comparabili scenari alternativi.

5.1.3 ARCHITETTURA INFORMATICA DEL FRAMEWORK

5.1.3.1 Interoperabilità e flussi informativi

Nel *framework* proposto, l'interoperabilità e la gestione dei flussi informativi costituiscono condizioni abilitanti fondamentali per l'integrazione tra pianificazione energetica, progettazione territoriale e dimensione socio-culturale. L'ecosistema digitale descritto nei paragrafi precedenti si fonda infatti su una struttura informativa distribuita e multilivello, nella quale dati eterogenei – energetici, territoriali, ambientali, paesaggistici e sociali – devono poter essere condivisi, interpretati e riutilizzati in modo coerente tra diversi strumenti, scale e attori.

In tale contesto, la pianificazione energetico-circolare viene interpretata come un sistema learning-based, in cui la conoscenza non è statica ma si costruisce attraverso cicli continui di aggiornamento tra livelli decisionali macro, meso e micro. Questo approccio consente di superare modelli lineari e gerarchici della pianificazione, introducendo una logica adattiva fondata sull'interazione continua tra strategia e operatività.

5.1.3.2 Flussi informativi bidirezionali

Il *framework* adotta un modello di flussi informativi bidirezionali, in cui le dinamiche *top-down* e *bottom-up* operano in modo complementare e interdipendente.

Da un lato, il flusso *top-down* trasferisce linee guida strategiche, obiettivi normativi e criteri di riferimento – quali i Piani Energetici Ambientali Regionali (PEAR), gli standard regolativi e i principi di economia circolare – verso le scale di progettazione meso e micro, rappresentate da strumenti come PTCP e PET/NTA. Questo livello ha la funzione di garantire coerenza sistemica, orientando le scelte progettuali verso obiettivi di sostenibilità energetica, ambientale e territoriale definiti a scala superiore.

Dall'altro lato, il flusso *bottom-up* consente l'integrazione dei dati generati dalle applicazioni locali e dai sistemi operativi reali, come comunità energetiche rinnovabili, micro-reti, interventi edilizi e infrastrutturali. I dati derivanti da monitoraggi, performance energetiche e criticità operative vengono reimmessi nei livelli superiori, contribuendo all'aggiornamento dei modelli, alla calibrazione delle simulazioni e alla revisione delle strategie macro. Nel dettaglio, il sistema di flussi informativi bidirezionali consente:

- *Top-down*: trasferimento di linee guida macro (PEAR), obiettivi climatici, scenari energetici e criteri di economia circolare verso la pianificazione meso (PTCP) e micro (PET/NTA), garantendo coerenza tra strategie e progetto.
- *Bottom-up*: integrazione di *feedback* provenienti dalle applicazioni locali e dai moduli operativi M1–M6, che alimentano l'aggiornamento dei modelli strategici attraverso dati reali su consumi, prestazioni, cicli di vita dei materiali e impatti ambientali.

La struttura illustrata in Figura A.5 3 nell'Appendice 5, introduce un cambio di paradigma nella pianificazione energetica: da sistema prescrittivo e statico a sistema dinamico, adattivo e orientato all'apprendimento continuo.

Il territorio non è più interpretato come semplice destinatario di politiche, ma come sistema generativo di conoscenza, in grado di produrre informazioni operative utili alla revisione delle strategie. In questo senso, la bidirezionalità dei flussi rafforza la capacità del sistema di adattarsi alle trasformazioni socio-tecniche e ambientali, aumentando resilienza, replicabilità e qualità delle decisioni.

5.1.3.3 Interoperabilità tecnica e semantica

L'efficacia dei flussi informativi dipende in modo sostanziale dal grado di interoperabilità del sistema digitale, intesa non solo come compatibilità tecnica tra piattaforme, ma come integrazione strutturata tra dati, significati e modelli interpretativi. Nel *framework* proposto, l'interoperabilità è articolata su due livelli complementari: interoperabilità tecnica e interoperabilità semantica.

L'interoperabilità tecnica riguarda la capacità dei sistemi digitali di scambiare dati in modo coerente senza perdita di informazione. Essa si basa sull'utilizzo di *standard* condivisi e formati aperti, quali IFC, CityGML e GeoJSON, che consentono l'integrazione tra BIM, GIS e *Digital Twin*.

Questo livello garantisce la trasferibilità delle informazioni geometriche, spaziali e infrastrutturali, permettendo la continuità dei dati tra piattaforme eterogenee.

L'interoperabilità semantica opera invece a un livello più profondo, relativo alla condivisione del significato dei dati tra sistemi differenti. Essa consente che attributi tecnici ed energetici – come "potenza nominale PV [kW]", "efficienza del modulo [%]" o "capacità di accumulo [kWh]" – siano interpretati in modo coerente da tutti gli strumenti coinvolti nel processo.

Questa dimensione è fondamentale per garantire:

- coerenza nelle simulazioni energetiche;
- confrontabilità tra micro-zone;
- aggiornamento dinamico dei modelli;
- replicabilità delle configurazioni progettuali;
- applicazione contestualizzata delle NTA energetico-circolari.

In questo senso, l'interoperabilità semantica diventa la condizione abilitante per l'integrazione tra discipline diverse, consentendo di collegare dati quantitativi (misurazioni fisiche, energetiche e ambientali) e dati qualitativi (conoscenze locali, pratiche d'uso e processi partecipativi).

Micro-zone energetiche e integrazione dei livelli di interoperabilità

All'interno del *framework*, ogni micro-zona energetica rappresenta un'unità funzionale del sistema territoriale ed energetico, caratterizzata da specifici parametri prestazionali, vincoli territoriali e componenti socio-culturali. In questo contesto, l'interoperabilità tecnica e semantica consente di:

- integrare dati provenienti da BIM, GIS e *Digital Twin*;

- garantire la coerenza tra rappresentazioni spaziali e modelli energetici;
- supportare la simulazione e la valutazione comparativa tra micro-zone;
- assicurare la trasferibilità e replicabilità dei modelli progettuali.

Le micro-zone diventano così dispositivi operativi attraverso cui la pianificazione energetico-circolare può essere declinata in modo contestualizzato, adattando regole, soglie prestazionali e criteri progettuali alle specificità territoriali, paesaggistiche e culturali.

Dimensione semantica, *governance* e integrazione culturale

L'interoperabilità semantica assume un ruolo particolarmente rilevante nel garantire l'integrazione tra dimensione tecnica e dimensione culturale della pianificazione. Essa permette infatti di includere nel sistema informativo anche elementi non strettamente quantitativi, come pratiche sociali, conoscenze locali e forme di partecipazione. In questo quadro, il territorio è interpretato non solo come spazio fisico, ma come sistema complesso di risorse materiali e immateriali, in cui la dimensione culturale diventa parte integrante dei processi decisionali. Le micro-zone energetiche possono così essere classificate anche in funzione della loro valenza sociale, culturale o funzionale (produttiva, solidale, religiosa, comunitaria), introducendo un ulteriore livello di *governance* trasversale. Questo approccio consente di:

- rafforzare la partecipazione degli *stakeholder*;
- integrare conoscenze locali nei modelli digitali;
- migliorare l'accettabilità sociale degli interventi;
- garantire coerenza con vincoli paesaggistici e normativi (HAI, ICOMOS, Codice del Paesaggio, TIAD, CAM).

Integrazione con strumenti digitali e *governance* multilivello

L'integrazione tra interoperabilità tecnica e semantica, strumenti digitali e micro-zone energetiche consente di costruire un sistema di *governance* multilivello coerente e adattivo. Attraverso il dialogo tra BIM, GIS, *Digital Twin* e Common Data Environment (CDE), è possibile:

- garantire la continuità informativa tra scala macro, meso e micro;
- integrare dati eterogenei in un unico ambiente interoperabile;
- supportare simulazioni predittive e analisi multi-scala;
- assicurare l'aggiornamento continuo dei modelli decisionali.

5.1.4 RESEARCH BY DESIGN COME MATRICE OPERATIVA DELLA GOVERNANCE URBANA TRASFORMATIVA

Nel quadro metodologico della presente ricerca, il *Research by Design* (RbD) si configura come paradigma epistemologico e operativo che supera la tradizionale separazione tra produzione teorica e applicazione progettuale. Il progetto non è inteso come esito derivato della conoscenza, bensì come dispositivo generativo di conoscenza stessa, attraverso processi iterativi di simulazione, verifica e adattamento (Groat & Wang, 2013; Koskinen et al., 2011).

In questa prospettiva, il RbD interpreta la progettazione come processo cognitivo situato, nel quale dati, modelli e scenari territoriali vengono continuamente rielaborati, producendo conoscenza operativa direttamente applicabile ai processi decisionali. Il valore epistemologico del paradigma risiede quindi nella capacità di trasformare l'intervento progettuale in un sistema di apprendimento continuo, in cui la conoscenza non precede l'azione, ma emerge dall'interazione tra analisi, simulazione e progetto.

All'interno del *framework* M1–M6, il *Research by Design* costituisce la matrice metodologica trasversale che integra i moduli in un sistema non lineare, ma circolare e adattivo. In tale configurazione, i moduli non rappresentano fasi sequenziali, bensì componenti interdipendenti di un processo iterativo fondato su *feedback* continui.

Il RbD consente di collegare produzione di conoscenza, modellazione digitale e *governance* multilivello, trasformando il *framework* in un ambiente operativo di sperimentazione controllata. Ogni modulo contribuisce alla generazione e alla validazione di scenari progettuali, che vengono successivamente rielaborati attraverso cicli di aggiornamento progressivo.

In questo senso, il RbD funge da struttura di integrazione tra dimensione strategica, operativa e valutativa del sistema, garantendo coerenza tra obiettivi di pianificazione e implementazione territoriale.

L'operatività del *Research by Design* si concretizza attraverso l'ecosistema digitale integrato costituito da CDE, BIM-GIS, *Digital Twin* e sistemi IoT, che costituiscono l'infrastruttura informativa del *framework*.

A scala macro-territoriale, il *Digital Twin* e il CDE supportano la simulazione di scenari energetici e ambientali, consentendo la valutazione di politiche di transizione e strategie di economia circolare in coerenza con strumenti di pianificazione regionale.

A scala meso-territoriale, l'integrazione tra GIS, BIM e CDE consente la gestione coordinata delle infrastrutture e delle micro-zone energetiche, favorendo l'armonizzazione tra pianificazione urbanistica, configurazioni energetiche e vincoli ambientali.
A scala micro-locale, i sistemi IoT e i modelli *Digital Twin* localizzati permettono il monitoraggio continuo delle performance delle CER, abilitando la verifica dinamica degli indicatori energetici, ambientali e sociali.
Il *Research by Design* si configura nella Figura A.5 4 nell'Appendice 5, all'interno del *framework*, come dispositivo metodologico di integrazione tra progettazione, simulazione e governance. Tale approccio consente di superare la separazione tra analisi e intervento, trasformando ogni processo progettuale in un ciclo continuo di produzione e validazione della conoscenza. In questa prospettiva, il *framework* M1–M6 viene interpretato come sistema adattivo e iterativo, nel quale la progettazione non rappresenta una fase conclusiva, ma un processo evolutivo supportato da *feedback* digitali e verifiche multilivello. Il *Research by Design* costituisce quindi il principio ordinatore dell'intero sistema, garantendo coerenza tra dimensione epistemologica, strumenti digitali e processi decisionali, e configurando la *governance* urbana come processo trasformativo, verificabile e replicabile.

5.2 FRAMEWORK METODOLOGICO INTEGRATO PER LA TRANSIZIONE ENERGETICA: DEFINIZIONE EPISTEMOLOGICA E SISTEMICA

5.2.1 FONDAMENTI EPISTEMOLOGICI DEL FRAMEWORK

Il *framework* si fonda su un impianto epistemologico riconducibile alla teoria dei sistemi complessi adattivi e agli approcci post-lineari alla pianificazione. In tale prospettiva, la conoscenza non è intesa come un output stabile, ma come un processo emergente, costruito attraverso cicli iterativi di osservazione, modellazione e retroazione. La produzione conoscitiva avviene all'interno di un sistema aperto, in cui l'interazione tra attori istituzionali, comunità locali e sistemi tecnico-informativi genera forme ibride di conoscenza, integrate tra dimensione quantitativa e qualitativa. Ne deriva un superamento della razionalità tecnico-prescrittiva a favore di una razionalità riflessiva e

adattiva, capace di incorporare incertezza, variabilità contestuale e pluralità dei valori.

In questo quadro, la pianificazione assume natura performativa: non descrive soltanto il reale, ma contribuisce attivamente alla sua trasformazione attraverso processi di simulazione, apprendimento e ricalibrazione continua.

5.2.2 PRINCIPI STRUTTURANTI DEL MODELLO

Il *framework* è regolato da quattro principi strutturanti che ne definiscono la coerenza interna e la capacità evolutiva.

Il primo principio è la transdisciplinarità, intesa come integrazione non gerarchica tra saperi tecnici, ambientali, energetici e socio-culturali, finalizzata alla costruzione di una conoscenza situata e contestualmente valida.

Il secondo principio è l'adattività, che esprime la capacità del sistema di modificare le proprie configurazioni in risposta a variazioni ambientali, sociali e prestazionali, attraverso meccanismi di *feedback* continuo.

Il terzo principio è la scalabilità, che consente l'applicazione del *framework* a differenti livelli territoriali (macro, meso e micro), garantendo coerenza tra strategie regionali, pianificazione intermedia e interventi locali.

Il quarto principio è l'iteratività, che introduce una logica ciclica e incrementale della pianificazione, in cui ogni ciclo decisionale produce aggiornamenti progressivi del sistema conoscitivo e normativo.

Tali principi definiscono un modello di *governance* non deterministico, ma evolutivo, in cui la stabilità del sistema è garantita dalla capacità di apprendimento piuttosto che dalla rigidità delle regole (Lang et al., 2012[132]; Pohl & Hirsch Hadorn, 2007[133]).

5.2.3 GOVERNANCE MULTILIVELLO E CICLO ADATTIVO PDCA

La struttura di *governance* del *framework* si basa su un modello multilivello coerente con le differenti scale decisionali della pianificazione energetico-territoriale. Tale impostazione integra livelli

---

[132] Lang, D. J., Wiek, A., Bergmann, M., Stauffacher, M., Martens, P., Moll, P., ... & Thomas, C. J. (2012). Transdisciplinary research in sustainability science: practice, principles, and challenges. *Sustainability science*, *7*(Suppl 1), 25-43.

[133] Pohl, C., & Hadorn, G. H. (2007, March). Principles for designing transdisciplinary research.

istituzionali e operativi eterogenei, garantendo il coordinamento tra strategie sovralocali e processi di attuazione locale (Cash et al., 2003). L'articolazione macro–meso–micro viene resa operativa attraverso il ciclo adattivo PDCA (*Plan–Do–Check–Act*), che costituisce il dispositivo di regolazione dinamica del sistema.

In questa prospettiva, la fase di *Plan* definisce obiettivi strategici, scenari di trasformazione e attività di *capacity building*, integrando processi di *governance* e raccolta strutturata dei dati. La fase di *Do* traduce tali obiettivi in interventi progettuali, sperimentazioni territoriali e attivazione delle CER. La fase di *Check* è dedicata al monitoraggio delle prestazioni attraverso KPI, sistemi *Digital Twin* e strumenti di valutazione *ex-post*. Infine, la fase di *Act* consente la revisione delle strategie, l'aggiornamento dei modelli decisionali e l'adattamento delle regole operative in funzione dei *feedback* territoriali.

Questo ciclo consente di trasformare la *governance* da struttura statica a processo adattivo e incrementale, nel quale la regolazione emerge dall'interazione continua tra dati, decisioni e retroazioni territoriali. In tal senso, il sistema di *governance* si configura come un meccanismo evolutivo, capace di apprendere dalle trasformazioni in atto e di aggiornare progressivamente le proprie configurazioni operative e strategiche.

5.2.4 ARCHITETTURA LOGICO-FUNZIONALE DEL SISTEMA

Il *framework* si configura come un'architettura logico-funzionale articolata su tre livelli interdipendenti.

Il primo livello è quello informativo, relativo alla raccolta e strutturazione dei dati eterogenei provenienti dal territorio, comprendenti informazioni energetiche, ambientali, infrastrutturali e socio-culturali.

Il secondo livello è quello interpretativo e modellistico, in cui i dati vengono integrati in strutture coerenti di rappresentazione e utilizzati per la costruzione di scenari evolutivi e simulazioni multi-dimensionali.

Il terzo livello è quello decisionale e normativo, nel quale le evidenze prodotte alimentano la definizione di criteri progettuali, soglie prestazionali e dispositivi regolativi.

L'interazione tra questi livelli non è sequenziale, ma circolare: i risultati del livello decisionale retroagiscono sui livelli informativo e

interpretativo, generando un processo continuo di aggiornamento e ricalibrazione del sistema.

5.2.5 TRADUZIONE NORMATIVA E ADATTIVITÀ REGOLATIVA

All'interno del *framework*, la dimensione normativa assume un carattere non prescrittivo, ma adattivo e scenario-*based*. Le norme non sono intese come vincoli statici, bensì come dispositivi evolutivi capaci di incorporare evidenze empiriche, simulazioni e *feedback* territoriali.
In particolare, le NTA vengono reinterpretate come strumenti di regolazione dinamica, nei quali le soglie prestazionali possono essere aggiornate in funzione delle condizioni contestuali e delle performance effettive del sistema.
Questo approccio consente di superare la dicotomia tra pianificazione e implementazione, integrando la dimensione normativa all'interno del ciclo di apprendimento continuo del *framework*. La regolazione diventa così un processo emergente, basato sulla convergenza tra dati, modelli e pratiche territoriali.

5.2.6 SINTESI SISTEMICA DEL MODELLO

Nel suo insieme, il *framework* metodologico integrato si configura come un sistema socio-tecnico adattivo, fondato sull'interazione continua tra conoscenza, progettazione e regolazione. La sua struttura consente di:

- integrare dimensioni disciplinari eterogenee in un unico ambiente epistemico;
- garantire coerenza tra scale territoriali differenti;
- supportare processi decisionali basati su evidenze e simulazioni;
- assicurare capacità di apprendimento e aggiornamento continuo.

Ne deriva un modello di pianificazione energetico-circolare in cui la *governance* non è un dispositivo esterno al sistema territoriale, ma una proprietà emergente delle sue interazioni interne. Tale configurazione rende il *framework* replicabile, scalabile e adattivo, capace di operare

in contesti territoriali differenti pur mantenendo coerenza metodologica e robustezza operativa (Campisi, B., et al, 2017)[134].

5.3 APPROCCIO INTEGRATO CDE E DIGITAL TWIN PER LA GOVERNANCE MULTILIVELLO

5.3.1 KPI SMART E INDICATORI DI GOVERNANCE

La metodologia proposta si basa su un ecosistema digitale integrato finalizzato alla gestione multilivello dei dati, alla tracciabilità dei processi decisionali e al supporto di modelli predittivi per la pianificazione energetico-territoriale.

In tale architettura, il CDE costituisce l'infrastruttura informativa centrale, in cui dati territoriali, documentazione tecnica e output di scenario vengono organizzati secondo logiche interoperabili, garantendo coerenza, accessibilità e tracciabilità lungo l'intero ciclo decisionale (Eastman et al., 2011).

Il *Digital Twin* rappresenta invece la dimensione dinamica del sistema, integrando dati statici e real-time per la simulazione del comportamento del territorio e delle infrastrutture. Tale componente abilita analisi predittive, valutazioni multi-scenario e supporto alla gestione operativa adattiva (Fuller et al., 2020).

In questo contesto, BIM e GIS operano come livelli complementari di modellazione: il primo orientato alla rappresentazione prestazionale e progettuale degli oggetti, il secondo alla dimensione spaziale e territoriale, consentendo l'integrazione tra vincoli urbanistici, paesaggistici e ambientali (Longley, 2015). All'interno del *framework*, la definizione degli indicatori SMART rappresenta il dispositivo operativo di controllo della performance dei moduli M1–M6. Tali indicatori sono progettati secondo criteri di:

- Specificità rispetto alle dimensioni energetiche, ambientali, paesaggistiche e sociali;
- Misurabilità attraverso dataset strutturati e standardizzati;
- Raggiungibilità rispetto agli obiettivi di piano (PAESC e strumenti regionali);

---

[134] Campisi, B., Drigo, S., & Presotto, A. (2017). L'approccio sistemico per la gestione energetica: il caso del Comune di Udine. *SERIE DI ARTICOLI DI RICERCA DEAMS*, *5*.

- Rilevanza rispetto ai processi decisionali;
- Temporalità definita lungo l'*iter* del progetto.

I KPI vengono alimentati in modo continuo attraverso il CDE e aggiornati tramite il *Digital Twin*, consentendo una lettura dinamica delle performance nei diversi moduli del *framework*. Costituiscono il ponte tra modello digitale e *governance* operativa.

Essi sono strutturati in tre livelli funzionali:

- KPI di sistema (efficienza energetica, copertura FER, autoconsumo CER);
- KPI ambientali (emissioni evitate, uso suolo);
- KPI socio-territoriali (partecipazione alle CER, accettabilità sociale, valorizzazione patrimonio).

Tali indicatori sono generati e aggiornati attraverso l'integrazione tra CDE e *Digital Twin*, e costituiscono la base informativa per i moduli M1–M6.

L'integrazione tra infrastruttura digitale e *framework* M1–M6 consente di associare indicatori SMART ai diversi livelli decisionali del sistema, rendendo osservabili e misurabili le performance chiave: efficienza energetica (M2), coerenza territoriale e paesaggistica (M3) e dinamiche partecipative delle CER (M5). Tale struttura abilita inoltre processi collaborativi e interdisciplinari e facilita il trasferimento di conoscenza tra attori istituzionali e territoriali (Pohl & Hirsch Hadorn, 2007).

Parallelamente, il sistema digitale consente di incorporare dimensioni culturali e immateriali nella valutazione degli scenari progettuali, in coerenza con i principi UNESCO per la gestione del patrimonio culturale (UNESCO, 2003).

Nel complesso, l'approccio descritto costituisce l'infrastruttura informativa e metodologica per l'implementazione coerente delle Norme Tecniche di Attuazione (NTA), che traducono gli output analitici e simulativi del sistema digitale in criteri normativi e prestazionali applicabili ai processi di pianificazione territoriale.

5.3.2 INDICATORI ENERGETICI, AMBIENTALI, PAESAGGISTICI E SOCIALI

5.3.2.1 Tipologie di dati

Il sistema di indicatori costituisce la struttura quantitativa di supporto ai KPI SMART introdotti nel paragrafo precedente, consentendo la misurazione delle performance associate ai diversi moduli del *framework* M1–M6. In tale prospettiva, gli indicatori sono organizzati

secondo un approccio multidimensionale finalizzato alla valutazione integrata delle performance energetiche, ambientali, paesaggistiche e socio-culturali dei sistemi territoriali.

La dimensione energetica comprende indicatori relativi alla produzione, al consumo, all'autoconsumo collettivo e alla resilienza dei sistemi energetici locali, con particolare riferimento alle CER. Tali indicatori consentono di valutare il livello di autonomia energetica locale e l'efficienza complessiva dei sistemi distribuiti.

La dimensione ambientale include metriche relative alle emissioni climalteranti, all'efficienza nell'uso delle risorse, alla resilienza ecosistemica e all'integrazione architettonica delle FER, consentendo di misurare la sostenibilità complessiva degli interventi territoriali.

La dimensione paesaggistica è definita attraverso indicatori di compatibilità territoriale, impatto visivo, coerenza morfologica e integrazione estetico-funzionale delle infrastrutture energetiche nel contesto urbano e periurbano.

La dimensione sociale e culturale integra indicatori relativi al grado di partecipazione comunitaria, all'accettabilità sociale degli interventi, ai processi collaborativi locali e alla salvaguardia del patrimonio culturale materiale e immateriale.

L'insieme di tali indicatori viene strutturato in forma interoperabile e integrato nei modelli digitali del *framework*, consentendo valutazioni dinamiche, comparabili e replicabili. Questo sistema supporta processi decisionali data-driven e garantisce coerenza tra simulazioni progettuali, scenari operativi e processi di *governance* multilivello (Eastman et al., 2011; Fuller et al., 2020).

L'integrazione delle dimensioni territoriali e culturali risulta inoltre coerente con i principi internazionali di gestione sostenibile del patrimonio, in particolare con le linee guida UNESCO orientate alla tutela integrata dei valori materiali e immateriali (UNESCO, 2003).

5.3.2.2 Sistemi di acquisizione dati

Il sistema di acquisizione dati rappresenta l'infrastruttura operativa attraverso cui il *framework* raccoglie, aggiorna e organizza le informazioni necessarie al monitoraggio continuo delle performance territoriali, energetiche, ambientali e sociali.

I dispositivi i (IoT) costituiscono il primo livello di raccolta dati e consentono la rilevazione in tempo reale di parametri quali produzione e consumo energetico, qualità dell'aria, condizioni microclimatiche, traffico urbano e variabili prestazionali delle infrastrutture

energetiche. Tali sistemi comprendono *smart meters*, sensori ambientali, sistemi di monitoraggio edilizio e dispositivi distribuiti per il controllo continuo delle reti locali.

La raccolta continua dei dati consente l'identificazione precoce di anomalie operative, supporta strategie di manutenzione predittiva e permette la costruzione di scenari simulativi di tipo *what-if*, finalizzati alla valutazione preventiva di alternative progettuali e strategie di intervento.

L'integrazione tra piattaforme GIS e BIM permette di connettere la dimensione territoriale con quella progettuale, consentendo una rappresentazione coerente delle infrastrutture, delle reti energetiche e dei vincoli spaziali presenti nei diversi contesti territoriali.

In questo ecosistema digitale, il CDE svolge la funzione di ambiente centralizzato di gestione delle informazioni, garantendo interoperabilità, versionamento, tracciabilità e accesso condiviso ai dati da parte dei diversi *stakeholder* coinvolti.

Parallelamente, il *Digital Twin* costituisce il livello dinamico del sistema, integrando dati statici e dati real-time per simulare in modo continuo il comportamento del territorio e delle infrastrutture, aggiornando costantemente i parametri associati ai KPI *smart* definiti nei moduli M1–M6.

L'interazione tra sensori IoT, GIS, BIM, CDE e *Digital Twin* consente quindi la costruzione di modelli predittivi avanzati capaci di supportare decisioni operative, ottimizzare l'allocazione delle risorse energetiche e adattare progressivamente le strategie territoriali sulla base dei dati osservati.

L'intero sistema di acquisizione dati costituisce pertanto l'infrastruttura abilitante della *governance* energetico-territoriale, garantendo continuità informativa, interoperabilità sistemica e supporto decisionale avanzato lungo tutto il ciclo di pianificazione, implementazione e gestione.

5.3.2.3 Standardizzazione e qualità dei dati

La standardizzazione dei dati costituisce un requisito essenziale per garantire coerenza, interoperabilità e affidabilità all'interno dell'ecosistema digitale integrato che supporta il *framework* metodologico.

In un sistema caratterizzato da fonti eterogenee – quali sensori IoT, piattaforme GIS e BIM, sistemi di telemetria, database territoriali e archivi storici – la definizione di strutture dati condivise, ontologie

comuni e protocolli di interoperabilità consente di uniformare i dataset e garantirne la piena integrazione all'interno del CDE.

La standardizzazione assicura continuità semantica tra strumenti differenti, permette la confrontabilità dei dataset e abilita simulazioni predittive fondate su informazioni coerenti e strutturate.

All'interno del *framework* M1–M6, questo processo assume un ruolo strutturale poiché garantisce che i dati utilizzati nei diversi moduli risultino interoperabili, verificabili e riutilizzabili lungo l'intero processo decisionale.

La qualità dei dati diventa quindi una condizione preliminare per assicurare replicabilità metodologica, affidabilità scientifica delle simulazioni e scalabilità delle analisi territoriali ed energetiche (Eastman et al., 2011).

5.3.2.4 Verifica, validazione e qualità dei dati per simulazioni e monitoraggio

Accanto alla standardizzazione, i processi di verifica e validazione rappresentano un livello essenziale per garantire l'affidabilità scientifica del sistema informativo digitale e la robustezza delle simulazioni predittive.

Tali processi comprendono attività di controllo qualità dei dataset, verifica di coerenza spaziale e semantica tra modelli GIS, BIM e *Digital Twin*, nonché aggiornamento iterativo delle informazioni sulla base dei *feedback* generati dai moduli operativi del *framework* M1–M6 (Schuurman, 2015).

La validazione incrociata tra diverse fonti informative consente di individuare anomalie, ridurre l'incertezza dei dati e rafforzare la qualità delle simulazioni territoriali ed energetiche, migliorando la capacità predittiva dell'intero sistema.

In questo quadro, il CDE assume la funzione di ambiente unificato di archiviazione, validazione e gestione dei dati verificati, garantendo tracciabilità, *versioning* e controllo continuo delle modifiche durante il progetto.

L'integrazione tra processi di verifica, infrastrutture digitali e monitoraggio continuo consente di assicurare che le analisi successive e le simulazioni di scenario siano fondate su dataset aggiornati, coerenti e scientificamente affidabili, rafforzando la qualità complessiva del supporto decisionale.

Il processo di validazione alimenta inoltre un ciclo continuo di miglioramento secondo la logica PDCA, consentendo l'aggiornamento

iterativo dei moduli M1–M6 e l'adattamento progressivo delle strategie territoriali sulla base delle evidenze empiriche raccolte nel tempo.

5.3.3 INTEGRAZIONE CON DIGITAL TWIN E PIATTAFORME GIS-BIM PER MONITORAGGIO IN TEMPO REALE

L'integrazione tra i moduli del *framework* M1–M6 e le infrastrutture digitali avanzate – in particolare *Digital Twin*, sistemi GIS-BIM e *Common Data Environment* (CDE) – consente l'implementazione di un sistema di monitoraggio continuo e multi-scala delle prestazioni energetiche, ambientali, territoriali e socio-culturali.

In tale architettura, il CDE costituisce il livello di interoperabilità informativa, garantendo gestione centralizzata, coerenza semantica e tracciabilità dei dataset provenienti da fonti eterogenee. Il *Digital Twin* rappresenta invece la componente dinamica del sistema, permettendo l'aggiornamento continuo dei modelli digitali sulla base di dati provenienti da sensori IoT, modelli BIM e *layer* territoriali GIS.

Questo ecosistema digitale consente la concreta operativizzazione dei KPI SMART (Cfr. Cap. 5 § 5.3.1), trasformando gli indicatori da semplici metriche teoriche in parametri misurabili, monitorabili e aggiornabili lungo il sistema territoriale. La struttura *smart* viene integrata operativamente secondo una logica funzionale coerente con il *framework* metodologico:

- *Specific* (S) → associazione di ogni indicatore a domini specifici del sistema territoriale (energia, ambiente, paesaggio, patrimonio culturale);
- *Measurable* (M) → acquisizione continua di dati quantitativi mediante sensori IoT, modelli BIM e database territoriali GIS;
- *Achievable* (A) → definizione di soglie operative coerenti con vincoli tecnico-territoriali e parametri normativi;
- *Relevant* (R) → allineamento diretto con gli obiettivi strategici definiti nei moduli M1–M6 e nei piani energetici territoriali;
- *Time-bound* (T) → monitoraggio continuo e valutazione temporale dinamica supportata dal *Digital Twin*.

L'interoperabilità tra BIM, GIS e *Digital Twin* consente inoltre di monitorare simultaneamente differenti dimensioni del sistema: performance energetiche (M2), compatibilità territoriale e paesaggistica (M3), nonché livelli di partecipazione e accettabilità sociale (M5).

Ne deriva un *framework* adattivo *data-driven* nel quale il monitoraggio in tempo reale non svolge una funzione meramente osservativa, ma alimenta processi iterativi di aggiornamento continuo, consentendo la revisione delle strategie, la ricalibrazione dei modelli predittivi e l'evoluzione dinamica del sistema decisionale (M6).

5.3.4 DASHBOARD E STRUMENTI DI VISUALIZZAZIONE DEI DATI PER STAKEHOLDER E POLICY MAKERS

Le dashboard rappresentano l'interfaccia operativa dell'ecosistema digitale integrato, consentendo la trasformazione di dataset complessi in informazioni sintetiche, interpretabili e direttamente utilizzabili nei processi decisionali da parte di *stakeholder* istituzionali, operatori tecnici e comunità locali.

L'architettura informativa si basa sulla convergenza di dati provenienti da sensori IoT, piattaforme GIS-BIM e *Digital Twin*, integrati all'interno del *Common Data Environment* (CDE), che garantisce standardizzazione, interoperabilità e aggiornamento continuo dei flussi informativi.

All'interno di questo sistema, le dashboard costituiscono il principale strumento di rappresentazione operativa dei KPI SMART introdotti nel Paragrafo 5.3.1, traducendo gli indicatori multidimensionali in cruscotti dinamici finalizzati al monitoraggio delle prestazioni territoriali.

In particolare, il sistema di visualizzazione consente la rappresentazione integrata di quattro dimensioni principali:

- Energetica: produzione locale, autoconsumo, resilienza delle Comunità Energetiche Rinnovabili;
- Ambientale: emissioni, uso efficiente delle risorse e indicatori ecologici di sistema;
- Territoriale e paesaggistica: compatibilità urbanistica, vincoli territoriali, trasformazioni spaziali;
- Sociale e culturale: livelli di partecipazione, accettabilità pubblica e valorizzazione del patrimonio immateriale.

Le funzionalità di visualizzazione comprendono mappe tematiche multilivello, indicatori sintetici di performance, simulazioni comparative e scenari predittivi *what-if*, consentendo la valutazione comparata di alternative progettuali e supportando processi decisionali basati su evidenze quantitative.

Dal punto di vista metodologico, tali strumenti costituiscono il principale meccanismo di retroazione del *framework*, in quanto

permettono di collegare la fase di monitoraggio continuo al modulo M6, alimentando il ciclo iterativo di verifica, apprendimento e aggiornamento delle strategie secondo logiche *Plan–Do–Check–Act* (PDCA).

L'interattività delle dashboard consente inoltre di differenziare i livelli informativi in funzione delle diverse categorie di *stakeholder*, rafforzando trasparenza, partecipazione e capacità di co-decisione all'interno dei processi di *governance* multilivello.

In questa prospettiva, il sistema di visualizzazione non rappresenta un semplice strumento di *reporting*, ma un dispositivo di supporto decisionale dinamico, capace di integrare dimensioni energetiche, ambientali, territoriali e socio-culturali in un ambiente informativo unico, interoperabile e continuamente aggiornabile.

5.4 APPLICAZIONE OPERATIVA DEL FRAMEWORK METODOLOGICO INTEGRATO

Il presente paragrafo definisce l'architettura operativa attraverso cui il *framework* metodologico integrato può essere implementato come sistema multilivello per la pianificazione, gestione e *governance* di sistemi energetici territoriali complessi, con particolare riferimento alle CER e ai contesti caratterizzati da elevata sensibilità paesaggistica, culturale e ambientale.

L'obiettivo non consiste nella validazione empirica del *framework*, già definito nei capitoli precedenti, bensì nella formalizzazione del suo funzionamento operativo, individuando le componenti metodologiche, tecnologiche e regolative necessarie alla sua futura implementazione applicativa.

L'architettura del *framework* si articola lungo sei dimensioni funzionali interconnesse:

1. Attivazione coordinata dei moduli metodologici M1–M6;
2. Modellazione predittiva multi-scala mediante *Digital Twin*, BIM e GIS;
3. Integrazione degli scenari energetici tramite piattaforme di simulazione avanzata;
4. Sistema multidimensionale di valutazione delle performance territoriali;
5. Traduzione regolativa mediante Norme Tecniche di Attuazione (NTA);

6. Strutturazione di meccanismi di *governance* multilivello e processi adattivi.

L'insieme di tali componenti definisce un'infrastruttura metodologica integrata capace di supportare processi decisionali complessi, scenari predittivi e futuri modelli di implementazione territoriale replicabili.

5.4.1 ATTIVAZIONE INTEGRATA DEI MODULI M1–M6

L'operatività del *framework* si basa sull'attivazione coordinata dei sei moduli metodologici M1–M6, concepiti non come una sequenza lineare di fasi indipendenti, ma come una matrice sistemica interdipendente nella quale ciascun modulo contribuisce alla costruzione progressiva del processo decisionale. All'interno di questa struttura funzionale:

- M1 definisce il quadro conoscitivo territoriale e i vincoli paesaggistici, ambientali e culturali;
- M2 costruisce la baseline energetico-territoriale attraverso sistemi GIS e analisi spaziali;
- M3 integra criteri di compatibilità territoriale, qualità progettuale e *governance* decisionale;
- M4 sviluppa la progettazione tecnico-operativa e la definizione dei parametri prestazionali;
- M5 elabora scenari energetici alternativi mediante strumenti previsionali e modelli di simulazione;
- M6 gestisce monitoraggio, *feedback* adattivo e aggiornamento iterativo del sistema.

L'interazione tra i moduli consente di trasformare dati territoriali, energetici e regolativi in processi decisionali coerenti operanti simultaneamente su scala macro, meso e micro, rendendo il *framework* applicabile a sistemi territoriali complessi e multi-attore.

5.4.2 MODELLAZIONE PREDITTIVA E SIMULAZIONI MULTI-SCALA

La dimensione operativa del *framework* è supportata dall'integrazione tra *Digital Twin*, BIM e GIS, che costituiscono l'infrastruttura digitale necessaria alla modellazione multi-scala dei sistemi territoriali ed energetici.

Tale integrazione consente di costruire scenari previsionali finalizzati a: simulare produzione, distribuzione e consumo energetico locale; valutare differenti configurazioni di CER; verificare compatibilità territoriale, vincoli urbanistici e condizioni ambientali; e sviluppare scenari comparativi multi-obiettivo a supporto delle decisioni.

La modellazione predittiva assume quindi una funzione strategica, trasformando il sistema digitale in uno strumento di supporto decisionale capace di confrontare alternative progettuali e anticipare effetti futuri derivanti da differenti configurazioni territoriali ed energetiche.

5.4.3 INTEGRAZIONE DEGLI SCENARI ENERGETICI CON LEAP

La dimensione energetica del *framework* viene rafforzata attraverso l'integrazione con piattaforme di simulazione avanzata quali *LEAP* (*Long-range Energy Alternatives Planning*), finalizzate alla costruzione di scenari previsionali di medio-lungo periodo.

L'integrazione con LEAP consente di: analizzare scenari futuri di domanda e produzione energetica; valutare livelli di resilienza e autosufficienza energetica locale; confrontare differenti strategie territoriali e configurazioni tecnologiche; e supportare decisioni basate su scenari energetici predittivi quantitativamente strutturati.

Questo livello di simulazione collega la dimensione operativa locale con la pianificazione strategica territoriale, rafforzando la capacità del *framework* di operare simultaneamente su scale differenti.

5.4.4 SISTEMA MULTIDIMENSIONALE DI VALUTAZIONE DELLE PERFORMANCE

Il *framework* integra un sistema multidimensionale di valutazione finalizzato alla misurazione comparativa delle performance territoriali attraverso indicatori quantitativi e qualitativi coerenti con i KPI SMART definiti nel Paragrafo 5.3.

Il sistema di valutazione considera simultaneamente diverse dimensioni analitiche: performance energetiche del sistema territoriale; efficienza operativa delle infrastrutture energetiche; impatti ambientali derivanti dalle trasformazioni territoriali; effetti sociali e livelli di partecipazione comunitaria; valore territoriale e compatibilità culturale e paesaggistica; e sostenibilità economica complessiva degli interventi.

L'integrazione dei dati all'interno del Digital Twin e del *Common Data Environment* consente di garantire aggiornamento continuo, coerenza informativa e supporto alla costruzione di scenari decisionali comparabili.

L'obiettivo del sistema di valutazione non consiste esclusivamente nella misurazione delle performance tecniche, ma nella costruzione di

un quadro decisionale integrato capace di considerare simultaneamente dimensioni economiche, territoriali, energetiche e socio-culturali.

5.4.5 TRADUZIONE NORMATIVA: NTA COME DISPOSITIVO SISTEMICO

Nel presente *framework*, le NTA non sono interpretate come un insieme statico di prescrizioni regolative, ma come un'architettura regolativa adattiva, in grado di mediare tra il *framework* metodologico M1–M6 e la sua applicazione operativa nelle CER.

Tale architettura costituisce un dispositivo di traduzione tra dimensione normativa, dati territoriali e modelli digitali, integrando sistemi GIS-BIM, *Digital Twin* e CDE in un unico ambiente decisionale multilivello.

Il sistema NTA opera come infrastruttura di coordinamento regolativo, attraverso la quale principi strategici, indicatori KPI *SMART* e scenari simulativi vengono tradotti in criteri operativi verificabili e aggiornabili nel tempo.

L'architettura si articola in tre livelli interdipendenti – strategico, operativo e adattivo – intesi non come sezioni normative separate, ma come logiche funzionali integrate di un unico sistema regolativo dinamico. La struttura delle NTA si organizza secondo tre livelli funzionali complementari:

- livello strategico, finalizzato all'allineamento con obiettivi energetici, territoriali e pianificatori;
- livello operativo, orientato alla definizione di parametri tecnici, vincoli progettuali e criteri prestazionali;
- livello adattivo, dedicato all'aggiornamento continuo delle prescrizioni sulla base dei dati di monitoraggio e dei *feedback* provenienti dal sistema digitale.

Le NTA assumono quindi il ruolo di interfaccia normativa dinamica del *framework*, consentendo la traduzione del sistema metodologico in protocolli operativi replicabili e adattabili a differenti contesti territoriali.

5.4.5.1 Livello Strategico

Il livello strategico delle Norme Tecniche di Attuazione (NTA) definisce l'insieme dei principi guida che orientano la pianificazione, la progettazione e la gestione delle CER all'interno del *framework* M1–M6. Tale livello non ha funzione prescrittiva in senso operativo, ma

configura una struttura normativa adattiva, in grado di garantire coerenza tra obiettivi energetici, vincoli territoriali e valori culturali.
In questa prospettiva, le NTA operano come dispositivo di traduzione tra *governance* multilivello, ecosistema digitale (CDE–*Digital Twin*–GIS/BIM) e sistemi decisionali basati su KPI SMART, assicurando la connessione tra dimensione strategica e implementazione operativa.
I principi fondanti del livello strategico sono articolati come segue:
1. *Circular Design* e approccio rigenerativo
Le NTA incorporano principi di economia circolare orientati alla riduzione del consumo di risorse, alla progettazione per il riuso e alla massimizzazione della resilienza infrastrutturale. Tale principio integra logiche dei sistemi energetici e infrastrutturali, includendo manutenzione predittiva e gestione del valore residuo.
2. Multi-scalabilità territoriale
Il *framework* assume la coesistenza strutturata delle scale macro, meso e micro come principio ordinatore. Le NTA garantiscono coerenza tra pianificazione regionale, coordinamento intercomunale e implementazione locale, rendendo il sistema replicabile e adattivo in contesti territoriali eterogenei.
3. Integrazione paesaggistica e culturale
Le infrastrutture energetiche sono valutate in relazione alla compatibilità con il contesto storico, paesaggistico e identitario. Tale principio è reso operativo attraverso indicatori spaziali, visuali e culturali integrati nei sistemi GIS e *Digital Twin*, in coerenza con i moduli M1–M3.
4. *Governance* multilivello e tracciabilità decisionale
Le NTA definiscono un quadro di riferimento per la gestione integrata tra attori pubblici, privati e comunitari, assicurando trasparenza, interoperabilità dei dati e tracciabilità delle decisioni attraverso il CDE.
5. Pianificazione adattiva *data-driven*
Il livello strategico integra logiche di monitoraggio continuo e aggiornamento iterativo basate su *Digital Twin*, GIS-BIM e KPI SMART (Cfr. Cap. 5, § 5.3.1). Le strategie non sono statiche ma soggette a revisione ciclica secondo logiche PDCA, in funzione dell'evoluzione dei dati operativi e degli scenari simulati.
In questo quadro, il livello strategico delle NTA si configura come modulo generativo del sistema regolativo, non come insieme descrittivo di principi, ma come infrastruttura normativa adattiva che connette pianificazione territoriale, progettazione energetica e

governance digitale. Tale struttura abilita replicabilità, scalabilità e integrazione con sistemi di supporto decisionale basati su dati.

5.4.5.2 Livello Operativo: Criteri Applicativi Verificabili

Il livello operativo delle NTA rappresenta la fase di traduzione applicativa dei principi strategici del *framework* M1–M6 in criteri territoriali verificabili, simulabili e progressivamente aggiornabili. In questa fase, le norme assumono una natura operativa ibrida, in cui la dimensione regolativa si integra con modelli digitali (GIS, BIM, *Digital Twin*) e sistemi informativi territoriali (CDE), abilitando una lettura dinamica del territorio.

5.4.5.2.1 Criteri di localizzazione

I criteri di localizzazione definiscono le condizioni territoriali, infrastrutturali e ambientali necessarie per garantire la compatibilità tecnico-funzionale e normativa delle CER. Essi costituiscono il primo livello operativo di traduzione delle NTA strategiche in regole verificabili e parametriche, integrate all'interno dell'ecosistema digitale basato su GIS, BIM, *Digital Twin* e *Common Data Environment* (CDE).

Il processo di localizzazione si articola secondo una logica multi-scala e data-driven, basata su due livelli gerarchici di analisi: zone omogenee e sotto-zone micro-territoriali.

1. Zone omogenee (scala macro – LOD 100–200)

Le zone omogenee rappresentano unità territoriali aggregate definite attraverso vincoli urbanistici, paesaggistici e ambientali di livello sovra-locale. Esse includono:

- vincoli urbanistici e pianificatori (PRG, PTCP, strumenti regionali);
- aree sottoposte a tutela paesaggistica e culturale;
- vincoli ambientali e idrogeologici;
- sistemi infrastrutturali e reti energetiche esistenti.

A questo livello, l'analisi ha funzione prevalentemente strategico-selettiva, finalizzata all'identificazione delle aree potenzialmente idonee all'insediamento delle CER.

La rappresentazione avviene in ambiente GIS integrato con *Digital Twin*, consentendo la costruzione di *layer* tematici di compatibilità territoriale e la prima valutazione multicriterio delle opportunità localizzative.

2. Sotto-zone micro-territoriali (scala operativa – LOD 300–350)

Le zone omogenee vengono ulteriormente disaggregate in sotto-zone micro-territoriali, nelle quali i criteri diventano quantitativi, misurabili e simulabili. I parametri di analisi includono:

- capacità di connessione alla rete elettrica; potenziale energetico locale (solare, eolico, ecc.);
- condizioni morfologiche e microclimatiche;
- interferenze con infrastrutture esistenti; sensibilità paesaggistica e ambientale;
- compatibilità con usi del suolo e funzioni urbane.

A questo livello, i criteri NTA vengono tradotti in indicatori operativi integrati nel *Digital Twin*, consentendo simulazioni predittive e valutazioni scenario-*based*.

La modellazione è supportata da integrazione GIS–BIM, che consente di passare da una rappresentazione territoriale statica a una rappresentazione dinamica e interrogabile.

3. Integrazione digitale e trasformazione in sistema decisionale

L'integrazione tra criteri normativi e infrastruttura digitale consente la trasformazione del processo di localizzazione in un sistema decisionale *data-driven*, basato su KPI spaziali e prestazionali. In particolare, il sistema consente di:

- generare mappe multilivello di idoneità territoriale (*suitability mapping*);
- valutare interferenze tra vincoli, infrastrutture e potenziale energetico;
- confrontare scenari alternativi di localizzazione in logica multi-criterio;
- aggiornare dinamicamente le valutazioni tramite *Digital Twin* (LOD 400–500).

4. Output operativo del sistema

Il risultato del processo non è una semplice classificazione territoriale, ma un modello decisionale replicabile, che produce:

- aree idonee prioritarie per l'insediamento CER;
- ranking multicriterio delle micro-zone;
- dataset interoperabili per il CDE;
- basi informative per simulazioni energetiche e *governance* multilivello.

5.4.5.2.2 Criteri paesaggistici

I criteri paesaggistici definiscono il livello valutativo del *framework* dedicato all'inserimento delle CER in contesti caratterizzati da valori storici, culturali e identitari. Essi costituiscono un modulo di valutazione integrata basato su regole (*rule-based system*), che traduce i principi ICOMOS, la metodologia HIA e il Codice dei Beni Culturali in parametri digitali interoperabili all'interno del Digital Twin territoriale. In questa prospettiva, la valutazione paesaggistica non è un processo descrittivo, ma un sistema computazionale di supporto decisionale, integrato con GIS-BIM e CDE, e direttamente collegato ai KPI SMART (§ 5.3.1). Dove la valutazione paesaggistica non è un'analisi descrittiva, ma un processo regolativo simulativo, integrato nel ciclo decisionale del sistema NTA.

1. Quadro metodologico integrato

Il sistema si fonda sull'integrazione di tre livelli normativi e analitici:

- ICOMOS *Cultural Landscape approach*, per la definizione del paesaggio come sistema dinamico socio-culturale;
- *Heritage Impact Assessment* (HIA), come metodologia e struttura valutativa iterativa degli impatti;
- Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio, come quadro normativo di vincoli e compatibilità.

Questi riferimenti non sono trattati come layer descrittivi, ma come insieme di regole operative tradotte in variabili digitali misurabili.

2. Digitalizzazione della valutazione paesaggistica

La metodologia HIA viene reinterpretata come processo computazionale integrato nel *Digital Twin*, articolato in fasi operative automatizzabili:

- identificazione dei valori patrimoniali (*asset mapping* GIS);
- analisi delle interferenze (*spatial overlay* e *buffer analysis*);
- valutazione dell'impatto (indicatori visivi e morfologici);
- simulazione di mitigazione (scenario "*what-if*").

Il sistema consente la trasformazione della HIA da documento statico a modulo dinamico di simulazione e valutazione continua, aggiornato in tempo reale tramite dati GIS-BIM e CDE.

3. Parametrizzazione dei criteri paesaggistici

I criteri qualitativi vengono tradotti in indicatori quantitativi integrati nel *Digital Twin*:

- visibilità e impatto percettivo → *viewshed analysis* e % area visibile;
- alterazione morfologica → variazione *skyline* e profili 3D;
- compatibilità culturale → indice di coerenza paesaggistica;
- impatto cumulativo → scenari multi-infrastruttura.

Tali indicatori sono direttamente interoperabili con i KPI SMART del sistema di *governance* (Cap. 5.3, § 5.3.1), garantendo coerenza tra valutazione paesaggistica e monitoraggio continuo.

4. Matrice paesaggistica integrata (HIA–Digital Twin–KPI)

La matrice paesaggistica integrata HIA–*Digital Twin*–KPI costituisce il dispositivo metodologico attraverso cui il *framework* traduce i principi della valutazione paesaggistica in un sistema operativo di supporto decisionale. Essa definisce la relazione tra le diverse fasi dell'*Heritage Impact Assessment* (HIA), le variabili territoriali rilevanti, gli strumenti digitali di analisi e simulazione e gli indicatori quantitativi utilizzati per la verifica della compatibilità degli interventi energetici.

L'integrazione tra HIA e *Digital Twin* territoriale consente di superare una concezione statica della valutazione dell'impatto paesaggistico, introducendo un approccio dinamico basato sulla simulazione degli scenari, sulla comparazione delle alternative progettuali e sul monitoraggio continuo degli effetti prodotti sul territorio. In tale prospettiva, i KPI paesaggistici assumono una funzione di collegamento tra la fase preventiva di valutazione, la progettazione delle misure di mitigazione e la successiva fase di verifica adattativa.

La matrice definisce pertanto un sistema di passaggio tra conoscenza, valutazione e decisione, nel quale i valori patrimoniali, le caratteristiche percettive e le trasformazioni morfologiche vengono convertiti in parametri misurabili e integrati nel ciclo di *governance* del quadro metodologico. Tale configurazione permette di incorporare la dimensione paesaggistica all'interno dei processi decisionali energetici, garantendo coerenza tra criteri di localizzazione, strategie progettuali, monitoraggio delle prestazioni e aggiornamento degli strumenti regolativi.

La struttura completa della matrice operativa HIA–*Digital Twin*–KPI è riportata nella Tabella A.5.2 dell'Appendice 5.

5. Output sistemico

L'integrazione tra approccio ICOMOS, HIA e *Digital Twin* consente la trasformazione della valutazione paesaggistica in un modulo decisionale replicabile e scalabile, in cui:

- la tutela diventa misurabile;
- la progettazione diventa simulabile;
- la compatibilità diventa verificabile;
- la valutazione diventa continua (*real-time*).

5.4.5.2.3 Criteri energetici

I criteri energetici costituiscono il modulo operativo del NTA Engine dedicato alla gestione della performance energetica delle CER, traducendo la dimensione energetica in variabili misurabili, simulabili e aggiornabili in tempo reale all'interno dell'ecosistema *Digital Twin*–GIS–BIM–CDE.

A differenza di una valutazione statica, il sistema energetico è qui interpretato come processo dinamico multi-scala, in cui produzione, consumo e distribuzione sono continuamente ricalibrati sulla base di dati operativi e scenari predittivi.

1. Bilancio energetico territoriale (*Energy Balance Layer*)

Il primo livello riguarda la costruzione del bilancio energetico locale, che mette in relazione:

- domanda energetica (residenziale, produttiva, pubblica)
- capacità di generazione da fonti rinnovabili
- perdite di rete e inefficienze infrastrutturali
- capacità di accumulo e flessibilità del sistema

Questo livello costituisce la base quantitativa del modulo energetico e viene aggiornato in continuo tramite dati IoT e CDE.

2. Simulazione scenari multi-temporali (*Predictive Layer*)

L'integrazione con modelli come LEAP consente la costruzione di scenari energetici previsionali, articolati su orizzonti temporali differenziati. Il sistema permette di:

- confrontare configurazioni alternative di CER
- simulare variazioni climatiche e di domanda
- valutare strategie di accumulo e distribuzione
- analizzare resilienza e autosufficienza energetica

In questo livello il criterio energetico diventa variabile predittiva del Digital Twin, non semplice indicatore *ex post*.

3. KPI energetici (*Performance Layer*)

I KPI energetici rappresentano la traduzione operativa del sistema di monitoraggio del NTA Engine e sono direttamente integrati con la struttura KPI SMART (§ 5.3.1). Gli indicatori includono:

- tasso di autoconsumo locale
- copertura del fabbisogno energetico
- produzione per unità di superficie
- resilienza del sistema a picchi di domanda
- stabilità energetica in scenari di stress

Tali indicatori sono continuamente aggiornati tramite il *Digital Twin*, che li trasforma in metriche dinamiche *time-dependent*.

4. Integrazione digitale e controllo adattivo

Il collegamento con il *Digital Twin* consente la trasformazione del sistema energetico in una infrastruttura simulativa continua, in cui:

- i dati energetici vengono aggiornati in tempo reale
- le prestazioni sono confrontabili tra scenari alternativi
- le strategie possono essere ricalibrate iterativamente
- gli output alimentano il ciclo PDCA del sistema NTA

5. Output del modulo energetico

Il sistema produce:

- bilanci energetici territoriali dinamici
- scenari energetici comparativi (LEAP-*based*)
- KPI energetici integrati nel CDE
- input diretti per moduli paesaggistici e di *governance* (M3–M6)

5.4.5.2.4 Criteri di circular design

Il *circular design* costituisce il modulo operativo del NTA Engine dedicato alla gestione delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER), in cui materiali, energia e informazione sono trattati come flussi integrati all'interno di un sistema digitale chiuso e continuamente aggiornato.

In questa prospettiva, il *circular design* non rappresenta un approccio progettuale statico, ma un sistema decisionale iterativo e data-driven, integrato con *Digital Twin*, GIS-BIM e *Common Data Environment* (CDE), finalizzato all'ottimizzazione continua delle prestazioni

ambientali, energetiche e territoriali (Stahel, 2019[135]; Kirchherr et al., 2017[136]). I criteri fondamentali comprendono:

1. Selezione di materiali e tecnologie: il sistema definisce criteri di selezione basati su:

- materiali a basso impatto ambientale
- componenti riciclabili, riutilizzabili o rigenerabili
- tecnologie modulari e aggiornabili
- riduzione dell'energia incorporata (*embodied energy*)

Tali parametri sono formalizzati come vincoli progettuali digitali, verificabili nel *Digital Twin*.

2. Strategie di riuso e riciclo (Closed-loop Material System): le CER sono modellate come sistemi a ciclo chiuso, in cui:

- i componenti sono progettati per disassemblaggio e riuso
- i flussi materiali sono tracciati nel CDE
- la fase di fine vita diventa *input* per nuovi cicli progettuali

Questo consente la trasformazione del sistema infrastrutturale in una struttura rigenerativa replicabile (Ellen MacArthur Foundation, 2020).

3. Manutenzione predittiva e monitoraggio digitale (*Operational Feedback Layer*): l'integrazione tra IoT, GIS-BIM e *Digital Twin* abilita:

- monitoraggio strutturale e energetico in tempo reale
- manutenzione predittiva basata su anomalie e *trend*
- aggiornamento continuo dei parametri prestazionali

In questo livello, il sistema passa da logica reattiva a logica predittivo-adattiva.

4. *Loop* decisionale continuo (*Adaptive Optimization Layer*): e informazioni generate alimentano un ciclo di ottimizzazione continuo basato su KPI multidimensionali (energia, ambiente, paesaggio, sociale). Il sistema implementa una logica: *progettazione → monitoraggio → valutazione → aggiornamento → riprogettazione*; coerente con il ciclo PDCA e con la *governance* multilivello del *framework* M1–M6 (Fuller et al., 2020; Funtowicz & Ravetz, 1993).

---

135 Stahel, W. R. (2019). *The circular economy: A user's guide*. Routledge.

136 Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, conservation and recycling*, *127*, 221-232.

5. Integrazione energetica e paesaggistica (*Hybrid Constraint Layer*). Le scelte progettuali vengono valutate simultaneamente rispetto a:

- performance energetiche
- compatibilità paesaggistica (ICOMOS, HIA)
- coerenza culturale e territoriale

Questo garantisce che l'ottimizzazione energetica non sia indipendente, ma vincolata a criteri territoriali e culturali integrati nel *Digital Twin* (ICOMOS, 2011; HIA Guidelines, 2019).

6. *Output* sistemico del modulo *circular design*

L'applicazione del modulo produce:

- riduzione del consumo di risorse e rifiuti
- estensione infrastrutturale
- tracciabilità completa dei materiali nel CDE
- aggiornamento continuo dei KPI ambientali ed energetici
- interoperabilità con i moduli M1–M6 del *framework*

Il *circular design*, all'interno del NTA Engine, non è quindi un principio progettuale autonomo, ma un sottosistema computazionale di gestione, che trasforma la progettazione delle CER in un processo adattivo, tracciabile e continuamente ottimizzato attraverso infrastrutture digitali integrate.

5.4.5.2.5 Criteri di monitoraggio

Il monitoraggio costituisce il principale collegamento operativo tra la progettazione delle CER e il sistema delle NTA energetico-circolari, trasformando i dati raccolti in strumenti decisionali dinamici e adattivi. I criteri di monitoraggio si fondano su tre assi principali:

1. KPI multidimensionali

Vengono definiti indicatori di performance energetici, ambientali, sociali e culturali, in grado di misurare in maniera quantitativa e qualitativa l'efficienza delle infrastrutture, la sostenibilità dei processi e la compatibilità con il contesto territoriale e culturale (Fuller et al., 2020[137]; UNESCO, 2003).

2. Monitoraggio in tempo reale

[137] Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Gemello digitale: tecnologie abilitanti, sfide e ricerca aperta. *Accesso IEEE*, *8*, 108952-108971.

L'integrazione di sensori IoT, GIS-BIM e *Digital Twin* consente la raccolta continua di dati sul consumo e produzione energetica, sulle condizioni ambientali, sugli impatti paesaggistici e sulle dinamiche di fruizione sociale. Questa infrastruttura abilita il rilevamento precoce di anomalie operative, l'anticipazione delle criticità e l'ottimizzazione della manutenzione predittiva.

3. Aggiornamento iterativo e *governance* adattiva

I dati raccolti alimentano un ciclo PDCA (*Plan–Do–Check–Act*), garantendo un aggiornamento continuo delle decisioni progettuali e delle strategie di gestione. Il *Common Data Environment* (CDE) assicura centralizzazione, verifica e accessibilità dei dati per tutti gli *stakeholder* pubblici, privati e comunitari, garantendo trasparenza, tracciabilità e coerenza multilivello (Funtowicz & Ravetz, 1993).

L'applicazione sistematica di questi criteri consente di trasformare il sistema delle NTA energetico-circolari da dispositivo regolativo statico a infrastruttura operativa dinamica, integrata con GIS, *Digital Twin*, LEAP e sensori IoT.

Ne deriva un passaggio da principi teorici a decisioni operative verificabili, garantendo che le CER siano tecnicamente efficienti, ambientalmente sostenibili, culturalmente compatibili e gestite secondo un modello di *governance* multilivello adattivo e replicabile (Funtowicz & Ravetz, 1993[138]).

5.4.5.3 Livello Adattivo

Il livello adattivo rappresenta la componente evolutiva del sistema delle NTA energetico-circolari, in grado di garantire resilienza, continuità operativa e miglioramento progressivo delle CER.

A differenza del livello operativo, che definisce criteri applicativi verificabili e staticamente implementabili, il livello adattivo introduce una logica dinamica basata su *feedback*, apprendimento e aggiornamento iterativo, trasformando il sistema normativo in una struttura responsiva rispetto all'evoluzione territoriale, tecnologica e regolativa.

---

138 Funtowicz, S. O., & Ravetz, J. R. (1993). Science for the post-normal age. *Futures*, *25*(7), 739-755.

5.4.5.3.1 Meccanismi di aggiornamento basati su PDCA

Il ciclo *Plan–Do–Check–Act* (PDCA) costituisce il dispositivo metodologico centrale del livello adattivo e struttura il processo di evoluzione continua del sistema.

1. *Plan* – Pianificazione

Definizione degli obiettivi strategici e operativi del sistema delle NTA energetico-circolari, integrando criteri di localizzazione, paesaggio, energia, *circular design* e monitoraggio. In questa fase vengono definiti KPI e soglie prestazionali delle micro-zone energetiche come riferimento valutativo.

2. *Do* – Attuazione

Implementazione delle regole operative nel contesto reale attraverso sensori IoT, piattaforme GIS-BIM e *Digital Twin*. Il sistema diventa osservabile e misurabile in tempo reale, consentendo l'acquisizione continua di dati territoriali, energetici e ambientali.

3. *Check* – Verifica e analisi

Confronto tra performance attese e risultati osservati mediante dashboard multilivello e strumenti di data visualization. La valutazione integra KPI energetici, ambientali, sociali e culturali, in coerenza con il Codice del Paesaggio (D.Lgs. 42/2004), il Codice dell'Ambiente (D.Lgs. 152/2006; D.Lgs. 153/2024) e le linee guida ICOMOS.

4. *Act* – Correzione e ottimizzazione

Aggiornamento iterativo del sistema delle NTA energetico-circolari, includendo revisione dei criteri di localizzazione, adeguamento dei sistemi energetici, interventi di mitigazione paesaggistica e ottimizzazione delle strategie di *circular design*.

5.4.5.3.2 Integrazione con il framework digitale

Il livello adattivo si fonda sull'integrazione tra *Common Data Environment* (CDE), *Digital Twin* e GIS-BIM, abilitando un processo continuo di aggiornamento, simulazione e validazione dei dati. Questo consente di:

- effettuare simulazioni what-if su scenari normativi, progettuali e di mercato;
- monitorare in tempo reale le prestazioni delle CER su più dimensioni;
- attivare modelli predittivi per anticipare criticità e ottimizzare la gestione;
- garantire tracciabilità completa delle modifiche e delle revisioni del sistema normativo.

In questo contesto, le micro-zone energetiche diventano laboratori territoriali adattivi, nei quali le CER operano come unità integrate tra dimensione infrastrutturale, energetica e socio-territoriale.

5.4.5.3.3 Feedback dai criteri operativi

Il livello adattivo si alimenta direttamente dai cinque domini operativi del sistema:

- Localizzazione: aggiornamento delle mappe di idoneità in funzione di nuove infrastrutture, vincoli o trasformazioni territoriali;
- Paesaggio: revisione dinamica delle analisi di visibilità e compatibilità culturale secondo approcci ICOMOS e HIA;
- Energia: aggiornamento dei bilanci energetici e dei modelli predittivi (LEAP) in base a variazioni di produzione e consumo;
- *Circular design*: ottimizzazione continua dei cicli di riuso, riciclo e manutenzione predittiva;
- Monitoraggio: ridefinizione dei KPI e dei sistemi di acquisizione dati per migliorare accuratezza e coerenza con obiettivi PAESC/SECAP.

Questo meccanismo trasforma il sistema delle NTA energetico-circolari in un *framework* evolutivo, capace di adattarsi a cambiamenti contestuali, innovazioni tecnologiche e *feedback* sociali.

5.4.5.3.4 Governance multilivello e apprendimento organizzativo

Il livello adattivo garantisce coerenza con la *governance* multilivello articolata su tre scale:

- Macro-livello: indirizzi strategici regionali e politiche energetiche sovraordinate;
- Meso-livello: coordinamento intercomunale e gestione delle reti CER;
- Micro-livello: implementazione locale, monitoraggio in tempo reale e partecipazione comunitaria.

L'integrazione tra CDE e *Digital Twin* abilita processi di knowledge management e apprendimento organizzativo continuo, trasformando ogni CER in un laboratorio territoriale permanente.

In questo quadro, le micro-zone energetiche costituiscono unità adattive replicabili, nelle quali convergono dimensioni energetiche, paesaggistiche e socio-culturali.

Il livello adattivo rappresenta la componente strutturale della resilienza del sistema delle NTA energetico-circolari. Attraverso il ciclo

PDCA, l'integrazione digitale e il *feedback* continuo dai criteri operativi, il sistema evolve da struttura normativa statica a infrastruttura adattiva di *governance* territoriale, garantendo:

- decisioni informate e verificabili;
- replicabilità metodologica su diverse scale;
- coerenza dinamica tra obiettivi strategici, operativi e culturali.

5.4.5.3.5 INTEGRAZIONE CON IL NTA ENGINE (LAYER COMPUTAZIONALE)

Nel presente *framework*, il livello adattivo è implementato attraverso un'infrastruttura computazionale denominata NTA Engine, che funge da layer operativo di esecuzione delle Norme Tecniche di Attuazione energetico-circolari.

Il NTA Engine non costituisce un sistema normativo autonomo, ma un ambiente di traduzione digitale delle NTA, in grado di orchestrare:

- l'aggiornamento dinamico dei KPI;
- l'integrazione tra *Digital Twin*, GIS-BIM e CDE;
- l'elaborazione di scenari "*what-if*";
- l'attivazione del ciclo PDCA in modalità semi-automatica.

In questa configurazione, il NTA Engine opera come sistema di decision support rule-based, in cui i principi normativi vengono convertiti in regole computazionali verificabili e aggiornabili in tempo reale.

Il livello adattivo del *framework* coincide quindi con la dimensione evolutiva del sistema NTA, mentre il NTA Engine rappresenta la sua interfaccia computazionale operativa.

5.4.6 GOVERNANCE MULTILIVELLO NEI CASI PILOTA

La *governance* multilivello rappresenta l'estensione operativa del paradigma del *Research by Design* (RbD) all'interno del sistema delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER), configurandosi come dispositivo di traduzione tra matrici epistemologiche, sistemi digitali e processi decisionali territoriali. In coerenza con la struttura RbD (§ 5.1.4), la *governance* non è intesa come livello autonomo, ma come meccanismo di orchestrazione multi-scala dei dati, delle decisioni e delle simulazioni progettuali, integrato con *Digital Twin*, GIS-BIM e CDE.

Il sistema opera attraverso tre livelli funzionali, corrispondenti alla declinazione territoriale del RbD:

5..4.6.1 Macro-livello (regional governance / policy integration layer)

Il livello macro traduce gli indirizzi strategici regionali e nazionali (PAESC/SECAP, politiche energetiche e ambientali) in frame normativi e scenari simulabili.

In coerenza con il RbD, il *Digital Twin* regionale e il CDE operano come infrastrutture di simulazione per:

- valutare scenari di economia circolare energetica;
- verificare la coerenza tra pianificazione e capacità territoriale;
- generare input per la definizione delle NTA energetico-circolari.

5.4.6.2 Meso-livello (territorial orchestration layer)

Il livello meso costituisce il punto di connessione tra pianificazione e progetto, traducendo le logiche RbD in coordinamento tra micro-zone energetiche e zone omogenee (A–F).

Attraverso l'integrazione GIS–BIM–CDE:

- si armonizzano le NTA tra contesti territoriali differenti;
- si ottimizzano flussi energetici, infrastrutturali e paesaggistici;
- si attivano simulazioni comparative tra scenari progettuali CER.

Questo livello rappresenta la dimensione di coerenza sistemica del progetto come ricerca (RbD).

5.4.6.3 Micro-livello (local / situated execution layer)

Il livello micro costituisce l'unità operativa del sistema RbD applicato, dove le CER sono trattate come configurazioni territoriali simulate di sperimentazione progettuale. Qui convergono:

- sensori IoT e sistemi di monitoraggio energetico;
- strumenti eco-scale e moduli NTA locali;
- *feedback* diretto delle comunità e degli *stakeholder*.

Le micro-zone energetiche diventano così dispositivi di produzione continua di conoscenza progettuale, coerenti con la logica iterativa del RbD.

5.4.6.4 Ruolo del modulo M6 nel sistema RbD–NTA

Il modulo M6 si configura come interfaccia di sintesi tra progetto, *governance* e simulazione, operando come nodo di integrazione tra:

- simulazione tecnica (*Digital Twin* e GIS-BIM),
- processo decisionale multilivello,
- validazione sociale e culturale degli interventi.

- In questo quadro, la *governance* non è più un livello descrittivo, ma un meccanismo di attivazione del ciclo RbD, dove ogni decisione territoriale genera nuova conoscenza progettuale.

La funzione sistemica nelle configurazioni CER modellate all'interno del *framework*, la *governance* multilivello rappresenta la manifestazione situata del sistema RbD applicato alle NTA energetico-circolari, garantendo:

- coerenza tra scala strategica, meso e micro;
- integrazione tra dati, progetto e decisione;
- adattività continua tramite *Digital Twin* e CDE;
- trasferibilità e replicabilità delle configurazioni CER.

In questo senso, le CER non sono semplici infrastrutture energetiche, ma unità simulate di ricerca progettuale territoriale, in cui il RbD si realizza come processo operativo continuo.

5.4.7 VERIFICA DELLA FUNZIONALITÀ DEL FRAMEWORK

L'analisi dei casi pilota consente di verificare la capacità del *framework* di operare come sistema integrato di regolazione territoriale, in cui componenti tecniche, ambientali e culturali risultano simultaneamente considerati e resi interoperabili.

In particolare, l'applicazione evidenzia che il *framework*:

- integra in modo strutturale dimensione energetica, paesaggistica e socio-culturale;
- garantisce continuità tra livello strategico e attuazione locale; abilita valutazioni multi-criteriali comparabili tra differenti configurazioni territoriali;
- traduce principi teorici in criteri normativi operativi e verificabili;

  implementa una *governance* multilivello adattiva basata su *feedback* continuo tra macro, meso e micro-livelli.

La declinazione delle NTA per zone omogenee e micro-zone consente inoltre di trasformare ogni caso studio in un'unità di sperimentazione controllata, nella quale le differenze paesaggistiche, infrastrutturali e culturali non rappresentano variabilità residuali, ma parametri attivi del sistema decisionale.

In questa prospettiva, le Comunità Energetiche Rinnovabili non si configurano più come singole infrastrutture energetiche, ma come dispositivi territoriali complessi, capaci di attivare processi circolari di produzione, gestione e *governance* dell'energia, con effetti misurabili

in termini di resilienza energetica, coesione sociale e valorizzazione del patrimonio paesaggistico e culturale.

5.5 STRUMENTO DI ZONIZZAZIONE ENERGETICA MULTI-SCALA

Lo strumento di zonizzazione energetica multi-scala costituisce il dispositivo operativo centrale del *framework* metodologico, finalizzato alla traduzione spaziale, regolativa e prestazionale degli obiettivi di transizione energetica all'interno del territorio.

Esso introduce una struttura gerarchica integrata che connette tre livelli principali:

- livello strategico (zone energetiche di mercato),
- livello operativo (micro-zone energetiche),
- livello regolativo-urbanistico (zone omogenee A–F e strumenti NTA).

La finalità dello strumento non è la sola classificazione del territorio, ma la costruzione di un sistema adattivo di *governance* energetico-territoriale basato su dati, prestazioni e simulazione, in quanto consente di tradurre la complessità territoriale in unità analitiche e progettuali coerenti con la struttura multilivello del sistema (macro–meso–micro). In tale prospettiva, la zonizzazione non è intesa come semplice classificazione geografica, ma come infrastruttura cognitiva e regolativa attraverso cui si rende possibile l'integrazione tra dati energetici, configurazioni spaziali e dispositivi normativi (NTA).

Il sistema di zonizzazione opera come interfaccia tra gli strumenti digitali (GIS, BIM, *Digital Twin* e CDE) e i moduli operativi M1–M6, consentendo una lettura dinamica del territorio basata su criteri prestazionali, morfologici, socio-culturali ed energetici. Tale struttura permette di superare la tradizionale segmentazione amministrativa, introducendo una logica funzionale fondata su micro-zone energetiche adattive e verificabili nel tempo.

In questo quadro, la zonizzazione assume una valenza eminentemente adattiva e *learning-based*, in quanto alimentata da flussi informativi bidirezionali e continuamente aggiornata attraverso il *Digital Twin* di microzona. Le soglie prestazionali, i vincoli e le opportunità non sono quindi definiti in modo statico, ma derivano da processi iterativi di simulazione, monitoraggio e retroazione.

5.5.1 ZONA ENERGETICA DI MERCATO: DEFINIZIONE E FUNZIONE SISTEMICA

Le zone energetiche di mercato rappresentano il livello macro della strutturazione del sistema energetico territoriale e costituiscono l'unità di riferimento per la pianificazione strategica della produzione, distribuzione e bilanciamento energetico.

Esse definiscono ambiti territoriali caratterizzati da coerenza infrastrutturale e funzionale rispetto alla rete energetica nazionale e regionale, fungendo da interfaccia tra politiche energetiche sovraordinate e sistemi locali.

All'interno di tale livello, la pianificazione si basa su indicatori aggregati di domanda, offerta, capacità di generazione e infrastrutture di rete, costituendo il quadro entro cui si sviluppa la successiva articolazione micro-territoriale.

Le zone di mercato rappresentano quindi la struttura di controllo sistemico, mentre la loro efficacia operativa dipende dalla capacità di disaggregazione in unità più granulari.

5.5.2 ARTICOLAZIONE IN MICRO-ZONE ENERGETICHE

Le micro-zone energetiche costituiscono l'unità spaziale e funzionale minima del sistema e rappresentano il livello operativo attraverso cui le dinamiche energetiche vengono rese misurabili, simulabili e regolabili. Esse derivano dalla disaggregazione delle zone energetiche di mercato e costituiscono il punto di intersezione tra sistema energetico, pianificazione urbanistica e *governance* territoriale (Tabella A.5 3, Appendice 5). La loro definizione si basa su un'infrastruttura integrata GIS–BIM–*Digital Twin*, che consente la stratificazione multilivello di dati energetici, infrastrutturali, ambientali e socio-territoriali. Le micro-zone rappresentano:

- l'unità operativa della regolazione energetica locale;
- il livello di applicazione delle Norme Tecniche di Attuazione energetico-circolari (NTA-EC);
- il nodo di integrazione delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER);
- l'ambiente di simulazione per scenari predittivi e analisi multi-scala.

Il sistema micro-zonale introduce un principio di adattività normativa, secondo cui i parametri prestazionali non sono uniformi, ma

differenziati in funzione delle caratteristiche territoriali e aggiornabili mediante cicli iterativi di monitoraggio e valutazione.

Le CER, all'interno delle micro-zone, assumono un ruolo di dispositivo trasversale di *governance* territoriale. La loro implementazione è coerente con il Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio (D.Lgs. 42/2004), il Codice dell'Ambiente (D.Lgs. 152/2006, e successive modifiche) e le linee guida ICOMOS.

In questo senso, la micro-zonizzazione consente di garantire la compatibilità tra transizione energetica, tutela paesaggistica e valorizzazione del patrimonio culturale, attraverso un approccio contestuale e non standardizzato.

Struttura tipologica delle micro-zone

La relazione tra micro-zone e CER viene operazionalizzata attraverso una classificazione funzionale dei contesti territoriali, che consente di adattare le configurazioni energetiche alle differenti condizioni urbane, rurali e produttive.

Governance multilivello e replicabilità

Le micro-zone costituiscono il livello di connessione tra pianificazione urbanistica, mercato energetico e *governance* territoriale. L'integrazione con strumenti digitali quali *Digital Twin* e *Common Data Environment* (CDE) consente il monitoraggio continuo delle prestazioni energetiche e ambientali, garantendo trasparenza, tracciabilità e supporto decisionale. In questo quadro, le CER non sono elementi isolati ma componenti strutturali del sistema territoriale, la cui configurazione può essere adattata alle specificità locali pur mantenendo coerenza metodologica e normativa. Questo consente la replicabilità del modello su scala nazionale, senza perdita di adattività contestuale.

L'integrazione tra micro-zone energetiche, CER e strumenti digitali consente di costruire un sistema multilivello in grado di connettere progettazione, regolazione e monitoraggio. Le micro-zone diventano così unità operative di un sistema adattivo, nel quale la transizione energetica è integrata con la tutela del patrimonio e la *governance* territoriale.

5.5.2.1 Micro-zone energetiche come unità operative del mercato energetico locale

Le micro-zone energetiche costituiscono l'unità operativa minima del mercato energetico locale e rappresentano il livello in cui i flussi energetici vengono analizzati e regolati in forma disaggregata.

Esse consentono la traduzione operativa delle dinamiche macro in configurazioni territoriali controllabili, abilitando la gestione integrata di produzione, consumo, accumulo e scambio energetico.
Ogni micro-zona è definita da un profilo prestazionale multidimensionale basato su:

- bilancio energetico locale (domanda/offerta),
- potenziale di generazione da fonti rinnovabili,
- capacità di accumulo e flessibilità del sistema,
- livello di interconnessione intra- e inter-zonale,
- grado di integrazione con le CER.

Le micro-zone non coincidono con unità amministrative, ma con unità funzionali del sistema energetico territoriale, progettate per garantire interoperabilità all'interno della medesima zona di mercato. In questo senso, esse costituiscono il livello di regolazione fine del sistema energetico, supportato da infrastrutture digitali (*Digital Twin*) e sistemi informativi territoriali (CDE), che ne consentono simulazione e controllo dinamico.

5.5.2.2 Integrazione con zone urbanistiche omogenee (A–F)

Le micro-zone energetiche si integrano con il sistema delle zone urbanistiche omogenee (A–F), senza modificarne la struttura normativa, ma introducendo un layer prestazionale energetico-infrastrutturale. Questa integrazione consente di trasformare la zonizzazione urbanistica in una struttura adattiva, nella quale la dimensione energetica diventa parametro esplicito di regolazione territoriale. In tale quadro, la classificazione A–F viene reinterpretata come matrice prestazionale:

- Zona A – Centri storici: micro-zone orientate alla riduzione della domanda energetica e all'integrazione altamente discreta delle FER, con massima priorità alla compatibilità paesaggistica e alla tutela del patrimonio.
- Zona B – Tessuto consolidato: micro-zone per efficientamento energetico diffuso, retrofit edilizio e integrazione progressiva nelle CER.
- Zona C – Aree di espansione: micro-zone per progettazione energetica preventiva e autoconsumo collettivo.
- Zona D – Aree produttive: micro-zone ad alta intensità energetica, orientate alla gestione dei carichi, produzione rinnovabile e servizi energetici locali.

- Zona E – Aree agricole: micro-zone per produzione distribuita da fonti rinnovabili e integrazione con modelli di economia circolare territoriale.
- Zona F – Servizi e attrezzature: micro-zone strategiche per stabilizzazione dei carichi, accumulo e resilienza energetica urbana.

Questa struttura consente di tradurre la classificazione urbanistica tradizionale in una zonizzazione energetica prestazionale, senza introdurre nuove categorie normative, ma reinterpretando quelle esistenti in chiave energetico-circolare (Tabella A.5 4, Appendice 5). Le Norme Tecniche di Attuazione (NTA) vengono così declinate in forma adattiva, attraverso soglie prestazionali differenziate per micro-zona, garantendo coerenza tra pianificazione urbanistica, obiettivi energetici e vincoli ambientali.

La formalizzazione delle sotto-articolazioni (A1–F2) permette inoltre di raffinare ulteriormente il livello di intervento, garantendo la calibrazione puntuale delle NTA senza introdurre nuove categorie urbanistiche, ma operando esclusivamente per decomposizione funzionale del sistema esistente.

In tale prospettiva, il sistema micro-zone–zone A–F costituisce un dispositivo integrato di pianificazione energetico-urbanistica, in grado di connettere regolazione, progetto e monitoraggio attraverso una struttura coerente con approcci data-driven e con logiche di *governance* multilivello.

5.5.2.3 Matrice prestazionale multidimensionale per la regolazione adattiva delle micro-zone

La semplice articolazione del territorio in micro-zone energetiche non risulta, di per sé, sufficiente a garantire l'effettiva operatività del modello multi-scala proposto. Affinché la zonizzazione energetica possa tradursi in uno strumento di pianificazione realmente adattivo, è necessario introdurre un sistema di valutazione multidimensionale capace di differenziare criteri progettuali, requisiti prestazionali e dispositivi regolativi in funzione delle specificità territoriali.

In questa prospettiva, il *framework* metodologico sviluppato nella ricerca supera definitivamente i modelli di pianificazione energetica uniforme, tradizionalmente basati su criteri generalizzati e scarsamente sensibili alle differenze morfologiche, ambientali, socio-economiche e culturali dei territori. Ogni micro-zona energetica viene invece interpretata come un sistema territoriale complesso, all'interno

del quale le strategie di transizione energetica devono essere calibrate attraverso parametri differenziati e continuamente aggiornabili.

A tale scopo viene introdotta una matrice prestazionale multidimensionale che costituisce il principale dispositivo di supporto alla definizione delle Norme Tecniche di Attuazione energetico-circolari (NTA-EC). La matrice consente di integrare simultaneamente variabili energetiche, ambientali, paesaggistiche, architettoniche, economiche, sociali e regolative, trasformando obiettivi strategici generali in parametri misurabili, verificabili e territorialmente adattabili. L'approccio adottato permette di costruire un sistema regolativo dinamico, nel quale i criteri progettuali non vengono applicati in maniera standardizzata, ma modulati in relazione alle caratteristiche specifiche di ciascuna micro-zona, garantendo elevati livelli di adattività normativa, replicabilità metodologica e coerenza con gli obiettivi complessivi di sostenibilità territoriale (Tabella A.5 5, Appendice 5).

La matrice prestazionale definisce i principali domini di valutazione utilizzati per governare l'implementazione territoriale del *framework*. Per ciascun dominio vengono individuati specifici indicatori quantitativi e qualitativi (KPI), finalizzati al monitoraggio continuo delle prestazioni energetiche, ambientali e sociali, nonché alla simulazione predittiva mediante strumenti digitali integrati quali *Digital Twin*, GIS, BIM e CDE.

L'integrazione di tali criteri consente di costruire un sistema decisionale evidence-based, nel quale la *governance* territoriale non si limita all'applicazione di prescrizioni statiche, ma evolve attraverso cicli continui di verifica, monitoraggio e aggiornamento adattivo (Tabella A.5 6, Appendice 5).

La traduzione della matrice multidimensionale all'interno delle differenti zone urbanistiche omogenee consente di articolare ulteriormente il sistema in sottozone energetiche prestazionali, nelle quali le strategie energetico-circolari vengono calibrate sulla base delle specificità morfologiche, funzionali e normative locali.

In tale configurazione, la micro-zonizzazione energetica non rappresenta esclusivamente uno strumento di classificazione territoriale, ma assume la funzione di dispositivo regolativo avanzato, capace di collegare pianificazione urbanistica, *governance* energetica, tutela del patrimonio culturale e sviluppo locale. Ogni micro-zona diviene pertanto un laboratorio territoriale permanente, all'interno del

quale la transizione energetica viene governata attraverso processi adattivi, monitorabili e replicabili, garantendo coerenza tra obiettivi nazionali di decarbonizzazione e specificità locali.

5.5.3 CONNESSIONE CON PAESC / SECAP

La zonizzazione energetica multi-scala costituisce il dispositivo metodologico attraverso cui gli obiettivi definiti nei processi di pianificazione climatica locale, in particolare nel quadro del PAESC (*Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima*) e del SECAP (*Sustainable Energy and Climate Action Plan*), vengono tradotti in configurazioni territoriali operative, verificabili e adattabili (Carrillo, et al., 2014).

All'interno del *framework* proposto, il superamento di una lettura omogenea del territorio rappresenta una condizione necessaria affinché le strategie di mitigazione e adattamento possano essere implementate in modo coerente con le differenze morfologiche, energetiche, socio-economiche e paesaggistiche che caratterizzano i sistemi locali. In tale prospettiva, la suddivisione del territorio in micro-zone energetiche consente di trasformare la pianificazione climatica da strumento strategico-programmatico a dispositivo operativo territorializzato, capace di localizzare gli interventi in funzione delle specificità contestuali e di supportare l'applicazione differenziata delle Norme Tecniche di Attuazione energetico-circolari (NTA-EC).

L'integrazione tra zonizzazione energetica e strumenti PAESC/SECAP permette di reinterpretare le quattro fasi operative del ciclo di pianificazione climatica secondo una logica multi-scala e adattiva. La fase di attivazione non si limita all'assunzione di un impegno politico-istituzionale, ma coincide con la costruzione del quadro conoscitivo territoriale attraverso l'identificazione delle micro-zone energetiche, consentendo di individuare vulnerabilità energetiche, sensibilità ambientali, criticità infrastrutturali e potenzialità di sviluppo locale.

La fase di pianificazione strategica viene rafforzata attraverso l'introduzione di modelli predittivi capaci di simulare differenti scenari energetici e climatici. In questa fase, le micro-zone costituiscono l'unità territoriale di riferimento attraverso cui definire strategie di retrofit edilizio, integrazione delle fonti energetiche rinnovabili, sistemi di accumulo, modelli di autoconsumo collettivo e configurazioni operative delle CER. L'integrazione con ambienti di

simulazione basati su *Digital Twin* consente inoltre la costruzione di scenari what-if, rendendo possibile la valutazione preventiva degli effetti energetici, ambientali ed economici prima della fase attuativa.

Nella fase di attuazione, il *framework* metodologico consente di adattare gli interventi alle caratteristiche specifiche di ciascuna micro-zona, superando modelli standardizzati di implementazione. La granularità territoriale introdotta dalla zonizzazione energetica permette infatti di modulare gli interventi in funzione delle condizioni locali, ottimizzando contemporaneamente performance energetica, compatibilità paesaggistica, accettabilità sociale e sostenibilità economica.

La fase di monitoraggio, verifica e adattamento viene reinterpretata secondo la logica del ciclo iterativo PDCA, già assunto come principio strutturale del *framework* metodologico. In questa fase, la raccolta continua di dati energetici, ambientali, economici e sociali consente di monitorare in tempo reale le prestazioni delle micro-zone attraverso sistemi di KPI multilivello, rendendo possibile l'aggiornamento progressivo delle NTA-EC e la revisione dinamica delle strategie di intervento.

Elemento abilitante di questo processo è l'integrazione tra micro-*Digital Twin* territoriali e CDE, che costituisce l'infrastruttura digitale di supporto alla *governance* multilivello. Tale architettura garantisce interoperabilità, tracciabilità e trasparenza dei flussi informativi tra amministrazioni pubbliche, operatori energetici, *stakeholder* territoriali e comunità locali, consentendo un allineamento continuo tra pianificazione locale, programmazione regionale, indirizzi nazionali e direttive europee, in particolare nel quadro della European Union Energy Efficiency Directive (EED) e della direttiva Renewable Energy Directive II (RED II).

L'approccio multi-scala sviluppato dalla ricerca consente quindi di trasformare il PAESC/SECAP da strumento prevalentemente programmatico a sistema operativo dinamico, in cui la pianificazione climatica viene continuamente aggiornata attraverso processi di monitoraggio, simulazione e adattamento. Le micro-zone energetiche assumono, in questo quadro, il ruolo di unità territoriali permanenti di apprendimento e sperimentazione, capaci di supportare processi decisionali *evidence-based* e di rendere la transizione energetica un processo progressivamente adattivo, replicabile e governabile nel lungo periodo.

5.5.4 INTERAZIONE CON GLI STRUMENTI URBANISTICI

La zonizzazione energetica multi-scala proposta dalla ricerca non si configura come uno strumento sostitutivo della pianificazione urbanistica vigente, bensì come un livello regolativo complementare, finalizzato a integrare la dimensione energetica all'interno dei dispositivi ordinari di governo del territorio. L'impianto metodologico sviluppato assume infatti che i tradizionali strumenti urbanistici comunali – quali Piano Regolatore Generale (PRG), Piano di Governo del Territorio (PGT), Piano Strutturale Comunale (PSC), Piano Urbanistico Comunale (PUC) e relativi strumenti attuativi – non siano stati originariamente concepiti per governare in modo sistemico i processi di transizione energetica distribuita, rendendo necessaria l'introduzione di un layer pianificatorio aggiuntivo specificamente orientato alla gestione dei flussi energetici territoriali.

In questa prospettiva, la micro-zonizzazione energetica opera come sistema di sovrapposizione funzionale alla pianificazione esistente, mantenendo la coerenza con l'assetto normativo vigente ma introducendo una nuova dimensione analitica capace di connettere assetti urbanistici, sistemi infrastrutturali, configurazioni energetiche locali e processi di *governance* comunitaria. La relazione tra pianificazione urbanistica e pianificazione energetica non viene quindi interpretata in termini di semplice coordinamento tra strumenti settoriali, ma come processo di integrazione sistemica tra disciplina territoriale, regolazione energetica e gestione adattiva delle trasformazioni urbane.

All'interno di tale architettura metodologica, le micro-zone energetiche costituiscono l'unità territoriale attraverso cui tradurre gli obiettivi strategici della transizione energetica in prescrizioni operative localizzate, rendendo possibile l'introduzione di *Norme Tecniche di Attuazione energetico-circolari* (NTA-EC) capaci di affiancare le tradizionali norme urbanistiche. Tali disposizioni normative consentono di introdurre parametri prestazionali differenziati in funzione delle caratteristiche morfologiche, ambientali, energetiche, paesaggistiche e socio-economiche di ciascun contesto territoriale, superando l'applicazione uniforme di regole generaliste che caratterizza gran parte della pianificazione energetica contemporanea.

L'integrazione tra micro-zonizzazione energetica e strumenti urbanistici consente inoltre di stabilire una continuità operativa tra

pianificazione generale, pianificazione di settore e regolazione attuativa. In tale configurazione, i piani energetici regionali, gli strumenti di programmazione climatica locale, i regolamenti edilizi comunali e le strategie territoriali sovraordinate vengono progressivamente riconnessi all'interno di un sistema multilivello in cui la dimensione energetica non rappresenta più una componente separata della pianificazione, ma un elemento strutturale del processo decisionale territoriale.

Dal punto di vista metodologico, questa integrazione apre alla possibilità di sviluppare modelli di pianificazione proattiva basati su ambienti digitali interoperabili, nei quali simulazioni predittive dei flussi energetici, scenari di autoconsumo collettivo e configurazioni dinamiche delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) vengono incorporati direttamente nei processi di valutazione urbanistica e ambientale. Tale approccio consente di anticipare gli effetti delle trasformazioni territoriali, riducendo il carattere reattivo che tradizionalmente caratterizza gli strumenti di pianificazione locale.

In questo quadro, l'integrazione tra micro-zone energetiche, pianificazione urbanistica e *framework* normativo costituisce il presupposto tecnico-operativo necessario per l'adozione di modelli avanzati di *governance* adattiva supportati da infrastrutture digitali interoperabili. Le micro-zone cessano di essere semplici articolazioni territoriali di analisi e assumono il ruolo di laboratori territoriali permanenti, all'interno dei quali strategie di mitigazione climatica, efficienza energetica, tutela del paesaggio e partecipazione comunitaria possono essere continuamente simulate, monitorate e adattate nel tempo.

Su tale base teorica si sviluppa il *framework* operativo successivamente articolato nei moduli metodologici M1–M6, che costituiscono la traduzione applicativa del modello proposto. L'integrazione tra sistemi di *Digital Twin*, ambienti *Building Information Modeling* (BIM), piattaforme GIS e *Common Data Environment* (CDE) consente infatti di trasformare la pianificazione energetica da processo statico di programmazione a sistema dinamico di simulazione, monitoraggio e supporto decisionale in tempo reale.

La relazione tra zonizzazione energetica e moduli operativi definisce quindi un ecosistema metodologico integrato nel quale la granularità territoriale delle micro-zone viene connessa a strumenti digitali avanzati per la gestione dei dati, la valutazione delle performance, la

partecipazione degli *stakeholder* e la *governance* multilivello. In tale configurazione, ogni intervento territoriale non risponde esclusivamente a requisiti tecnici o normativi, ma si inserisce all'interno di un sistema adattivo più ampio, orientato a coniugare sostenibilità energetica, coesione sociale, resilienza territoriale e tutela del patrimonio culturale e paesaggistico.

La continuità tra pianificazione urbanistica, regolazione energetica e implementazione operativa consente quindi di ridefinire la transizione energetica non come processo settoriale, ma come infrastruttura permanente di trasformazione territoriale. Le micro-zone energetiche diventano così nodi funzionali di un sistema predittivo, dinamico e replicabile, capace di garantire coerenza tra politiche pubbliche, strumenti normativi e *governance* territoriale adattiva.

5.6 STRUMENTO NORMATIVO-OPERATIVO

Il *framework* metodologico sviluppato nei capitoli precedenti trova nel presente capitolo la propria traduzione in uno strumento normativo-operativo finalizzato a dimostrare la concreta implementabilità del modello all'interno dei procedimenti ordinari di pianificazione energetica, regolazione territoriale e valutazione ambientale. L'obiettivo non consiste nella definizione di nuovi strumenti pianificatori o nell'introduzione di ulteriori livelli regolativi, bensì nella costruzione di un dispositivo metodologico capace di rendere maggiormente coerenti, interoperabili e verificabili procedure già esistenti, rafforzandone la capacità attuativa.

In questa prospettiva, il *framework* modulare articolato nei componenti M1–M6 si configura come struttura meta-procedurale di supporto all'implementazione delle politiche energetiche territoriali, operando trasversalmente rispetto ai principali strumenti normativi già previsti dall'ordinamento vigente. In particolare, il modello interagisce con dispositivi consolidati quali i PEAR, i processi di Valutazione Ambientale Strategica (VAS), le procedure di Valutazione di Impatto Ambientale (VIA), i processi di pianificazione climatica locale definiti attraverso il PAESC e l'apparato regolativo costituito dalle Norme Tecniche di Attuazione urbanistica.

Il posizionamento del *framework* rispetto a tali strumenti non deve essere interpretato come introduzione di una nuova procedura autonoma, ma come architettura metodologica di coordinamento finalizzata a ridurre la frammentazione che caratterizza

frequentemente i processi di implementazione delle politiche energetiche locali. La ricerca assume infatti che uno dei principali limiti dei modelli attualmente adottati risieda nella separazione tra dimensione strategica, regolazione normativa, valutazione ambientale e implementazione progettuale, determinando una ridotta capacità trasformativa delle politiche pubbliche.

Dal punto di vista giuridico-procedurale, il riferimento normativo principale è costituito dal *Decreto Legislativo* 152/2006, che definisce la procedura di Valutazione Ambientale Strategica come processo orientato all'integrazione delle componenti ambientali, alla valutazione comparativa delle alternative progettuali e al monitoraggio degli effetti generati nel medio e lungo periodo. Il *framework* metodologico proposto si colloca pienamente all'interno di tale impostazione, fornendo una struttura modulare capace di rendere espliciti, tracciabili e verificabili i passaggi decisionali che collegano produzione di conoscenza, costruzione strategica, implementazione progettuale e monitoraggio adattivo.

All'interno di questa lettura sistemica, il PAESC non viene interpretato come semplice piano tecnico-settoriale finalizzato alla riduzione delle emissioni, ma come programma complesso di policy territoriale caratterizzato da una dimensione simultaneamente strategica, regolativa, valutativa e operativa. Il *framework* opera pertanto nello spazio intermedio che collega pianificazione, progettazione, regolazione normativa e monitoraggio continuo, consentendo di trasformare strumenti prevalentemente programmatici in sistemi concretamente implementabili attraverso processi di *governance* multilivello supportati da infrastrutture digitali interoperabili.

L'elemento di innovazione introdotto dalla ricerca consiste dunque nella costruzione di un dispositivo capace di tradurre obiettivi energetici, criteri ambientali, parametri normativi e vincoli territoriali in configurazioni operative adattive, rendendo la transizione energetica non un processo esclusivamente tecnico, ma una componente strutturale del governo del territorio.

5.6.1 RUOLO DELLE NTA NEL FRAMEWORK: NTA ENERGETICO-CIRCOLARE

All'interno del *framework* metodologico, le *Norme Tecniche di Attuazione energetico-circolari* (NTA-EC) costituiscono il principale dispositivo di traduzione normativa del modello teorico sviluppato

dalla ricerca. Esse assumono una funzione centrale poiché consentono di trasformare simulazioni energetiche, valutazioni multi-criteriali, indicatori di performance e processi di analisi territoriale in prescrizioni regolative verificabili, territorialmente contestualizzate e adattabili alle caratteristiche specifiche di ciascun ambito di intervento.

Diversamente dalle tradizionali NTA urbanistica, generalmente caratterizzate da una struttura prescrittiva statica, le NTA-EC operano come dispositivo regolativo adattivo, capace di integrare simultaneamente dimensione energetica, sostenibilità ambientale, tutela paesaggistica, patrimonio culturale e *governance* territoriale. In questa configurazione, esse costituiscono il punto di convergenza tra politiche energetiche europee e nazionali, pianificazione urbanistica locale, progettazione tecnica dei sistemi energetici distribuiti e gestione operativa delle Comunità Energetiche Rinnovabili Comunità Energetiche Rinnovabili (CER).

Questo approccio consente di superare la tradizionale separazione tra pianificazione energetica e disciplina territoriale, garantendo che energia, ambiente, paesaggio, patrimonio culturale e sviluppo locale vengano trattati come componenti integrate di un medesimo sistema decisionale. Il *framework* mantiene coerenza con il quadro normativo nazionale, in particolare con il *D.Lgs. 42/2004* (*Codice dei beni culturali e del paesaggio*) e il *D.Lgs. 152/2006* (*Codice dell'Ambiente*), assicurando contemporaneamente allineamento con le linee guida elaborate da ICOMOS ICOMOS in materia di tutela e valorizzazione del patrimonio culturale.

Le NTA-EC operano come layer regolativo trasversale direttamente applicato alle micro-zone energetiche, consentendo di differenziare criteri prestazionali, soglie operative e parametri progettuali in funzione delle specificità territoriali e delle caratteristiche delle diverse zone urbanistiche omogenee (A–F). Tale adattività normativa costituisce uno degli elementi centrali del *framework*, poiché consente di evitare l'applicazione uniforme di regole generaliste, introducendo un sistema regolativo sensibile al contesto territoriale.

In questo processo assume particolare rilevanza l'*Heritage Assessment Index* (HAI), derivato dalle metodologie sviluppate in ambito ICOMOS e introdotto all'interno del *framework* come strumento di integrazione tra pianificazione energetica e tutela del patrimonio culturale. L'HAI consente di valutare in maniera sistemica l'impatto delle infrastrutture

energetiche sul patrimonio storico, sugli spazi urbani di pregio, sui paesaggi culturali e sugli ecosistemi territoriali, fornendo un indice sintetico capace di misurare simultaneamente rischio, compatibilità e opportunità progettuale.

Applicato alle micro-zone energetiche, l'HAI produce una mappatura integrata dei vincoli culturali, architettonici, ambientali e paesaggistici, rendendo possibile la definizione di scenari progettuali differenziati. In tale configurazione, le piattaforme digitali interoperabili basate su GIS, BIM, *Digital Twin* e *Common Data Environment* (CDE) costituiscono l'infrastruttura tecnica attraverso cui energia, ambiente, patrimonio culturale e regolazione normativa vengono integrati in uno spazio decisionale condiviso e continuamente aggiornabile.

Questo sistema consente di modulare le soluzioni progettuali in funzione delle caratteristiche specifiche delle diverse micro-zone territoriali. Nei contesti storici ad alta sensibilità culturale, come le zone A, il *framework* privilegia soluzioni tecnologicamente discrete e altamente integrate nel tessuto architettonico esistente; nelle aree produttive, agricole o periurbane, quali le zone D ed E, possono invece essere adottate configurazioni energetiche maggiormente intensive, mantenendo comunque coerenza con i principi di sostenibilità ambientale e tutela territoriale.

L'integrazione tra NTA-EC, HAI e Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) consente quindi di trasformare il sistema normativo da apparato prescrittivo statico a infrastruttura adattiva di governo territoriale. In tale prospettiva, la regolazione non si limita a disciplinare gli interventi, ma diviene uno strumento dinamico capace di accompagnare la transizione energetica garantendo simultaneamente efficienza energetica, coesione sociale, tutela paesaggistica e valorizzazione del patrimonio materiale e immateriale.

5.6.2. IL FRAMEWORK M1–M6 COME STRUTTURA DI INNESTO NEL CICLO DI VITA DEL PAESC

5.6.2.1. Il ciclo del PAESC come processo articolato

Il PAESC (Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima) costituisce uno strumento di pianificazione strategica locale finalizzato alla mitigazione e all'adattamento ai cambiamenti climatici, strutturato secondo le linee guida del *Covenant of Mayors for Climate & Energy* in un ciclo articolato e iterativo.

Nel presente *framework*, tale ciclo viene reinterpretato come processo adattivo e multilivello, in cui le fasi non sono sequenziali in senso rigido ma integrate attraverso il sistema modulare M1–M6 e la piattaforma abilitante M0 (*Capacity Building* HUB), responsabile del coordinamento degli *stakeholder* e del rafforzamento delle capacità amministrative e tecniche locali. Questo assetto consente la transizione da un PAESC come documento statico a un sistema dinamico di *governance* territoriale basato su micro-zone energetiche e CER.

La prima fase riguarda l'analisi del contesto e la costruzione della *Baseline Emission Inventory* (BEI). Essa comprende la raccolta e sistematizzazione di dati energetici, infrastrutturali, ambientali e socio-territoriali, inclusi vincoli paesaggistici e culturali. L'integrazione di *Digital Twin* e *Common Data Environment* (CDE) consente la strutturazione di una base dati interoperabile e aggiornabile in tempo reale. In tale fase, il modulo M1 svolge la funzione di inquadramento territoriale e valutazione della compatibilità delle micro-zone, con particolare attenzione ai contesti fragili (centri storici, borghi, aree interne).

La seconda fase riguarda la definizione degli obiettivi strategici, in cui gli impegni europei e nazionali vengono tradotti in target locali misurabili (riduzione emissioni, incremento FER, efficienza energetica). I moduli M2 e M3 supportano la costruzione di scenari energetici alternativi e simulazioni "what-if", integrando dimensioni energetiche, urbanistiche e socio-culturali. In questa fase le CER assumono funzione di dispositivo di attuazione multilivello, con effetti su coesione sociale, partecipazione e capacità di *governance* locale.

La terza fase concerne la pianificazione delle azioni e delle misure. Gli interventi vengono declinati operativamente all'interno delle micro-zone secondo la classificazione territoriale A–F, includendo retrofit energetico, integrazione FER, mobilità sostenibile e modelli di economia circolare. Il modulo M4 valuta la fattibilità tecnica, economica e ambientale degli interventi, garantendo coerenza con vincoli paesaggistici, architettonici e normativi e introducendo un principio di modulazione territoriale differenziata.

La quarta fase riguarda il coinvolgimento degli *stakeholder* e la *governance* partecipativa. Attraverso strumenti digitali e processi deliberativi, vengono integrati attori pubblici, privati e comunitari. Le CER assumono qui una funzione di interfaccia socio-tecnica,

connettendo mercato energetico, patrimonio culturale e comunità locali, e rafforzando la *governance* multilivello.

La quinta fase è relativa all'implementazione e al finanziamento degli interventi. Il modulo M5 supporta l'attuazione operativa dei progetti, garantendo integrazione con strumenti urbanistici, normative locali e strategie regionali. Le micro-zone energetiche diventano unità operative di implementazione, capaci di adattare le soluzioni ai vincoli e alle opportunità territoriali.

La sesta fase riguarda il monitoraggio, il *reporting* e l'aggiornamento del piano. Il modulo M6 abilita il ciclo di apprendimento continuo attraverso la raccolta e l'analisi di KPI energetici, ambientali e sociali. Questo consente l'aggiornamento iterativo delle strategie e la loro adattabilità a evoluzioni normative, tecnologiche e territoriali.

5.6.2.2. Innesto dei moduli M1–M6 nelle fasi del PAESC

L'innesto dei moduli M1–M6 nel ciclo del PAESC/SECAP consente di trasformare il piano da strumento prescrittivo a infrastruttura operativa adattiva, capace di integrare analisi, progettazione, implementazione e monitoraggio in un unico *framework* coerente.

In questa configurazione, ogni modulo assume una funzione specifica e non ridondante lungo il ciclo decisionale:

- M1 – Fase conoscitiva: struttura la base informativa del piano attraverso l'integrazione di dati energetici, territoriali e paesaggistici, garantendo la classificazione delle micro-zone e la valutazione delle sensibilità locali.
- M2–M3 – Fase strategica: supportano la costruzione di scenari alternativi e la definizione degli obiettivi climatici ed energetici, integrando vincoli urbanistici e potenzialità delle CER.
- M4 – Fase di programmazione: introduce una valutazione multi-criteriale delle azioni, verificando coerenza tecnica, sostenibilità economica e compatibilità ambientale e culturale.
- M5 – Fase attuativa: governa la realizzazione degli interventi e delle configurazioni CER, assicurando coerenza tra progetto, normativa e contesto territoriale.
- M6 – Fase di monitoraggio: garantisce il ciclo di *feedback* continuo attraverso indicatori prestazionali, aggiornamento dei modelli e revisione adattiva delle strategie.
- M0 – Layer trasversale: abilita governance, coordinamento e *capacity building*, assicurando coerenza tra livelli istituzionali e attori territoriali.

Questo innesto determina tre trasformazioni strutturali del PAESC:

1. Da documento a processo: il piano diventa un sistema operativo continuo.
2. Da standardizzazione a adattività territoriale: le micro-zone introducono differenziazione normativa e progettuale.
3. Da pianificazione lineare a ciclo integrato: i dati locali alimentano costantemente le decisioni strategiche.

Ne deriva una configurazione in cui le micro-zone energetiche non sono semplici unità descrittive, ma dispositivi operativi di traduzione tra strategia, progetto e governance, mentre le CER diventano infrastrutture socio-tecniche integrate nel ciclo.

Il passaggio da un modello di PAESC/SECAP lineare e prevalentemente documentale a un approccio integrato e ciclico basato sul *framework* M0–M6. L'innesto dei moduli, coordinati dal *Capacity Building* HUB (M0), consente di rendere il piano adattivo, partecipativo e territorialmente differenziato, grazie all'integrazione di micro-zone energetiche, CER e strumenti digitali (*Digital Twin* e CDE). Il modello evidenzia il passaggio da una logica di pianificazione statica a una struttura operativa orientata all'attuazione e al monitoraggio continuo.

5.6.3. FRAMEWORK M1–M6 E VALUTAZIONE AMBIENTALE STRATEGICA

5.6.3.1. Framework M1–M6 e Valutazione Ambientale Strategica

Il *framework* metodologico M1–M6 non si configura come procedura autonoma di Valutazione Ambientale Strategica (VAS), bensì come dispositivo metodologico di supporto, integrazione e sistematizzazione dei contenuti della VAS, in grado di rafforzarne la continuità logica, la coerenza valutativa e la replicabilità operativa lungo l'intero ciclo della pianificazione energetico-territoriale.

In tale prospettiva, il modulo M0 – *Capacity Building* HUB svolge una funzione trasversale di governance, coordinamento e abilitazione degli *stakeholder* pubblici e privati, assicurando l'allineamento tra livelli decisionali, tecnici e comunitari, in coerenza con le direttive europee in materia di energia e clima e con i principi di tutela del patrimonio culturale e paesaggistico.

All'interno dell'architettura VAS, i moduli M1–M6 si collocano in corrispondenza funzionale con le principali fasi procedurali:

- Screening e Scoping (M1): supporto alla delimitazione delle micro-zone energetiche e alla ricognizione dei vincoli

ambientali, paesaggistici e culturali, con costruzione del quadro conoscitivo territoriale integrato.

- Definizione di obiettivi e alternative (M2–M3): elaborazione di scenari energetico-territoriali multi-alternativa, coerenti con gli obiettivi del PAESC/SECAP e con le funzioni socio-spaziali delle micro-zone.
- Valutazione degli effetti ambientali (M4): analisi di fattibilità tecnica, economica e ambientale delle opzioni progettuali, con integrazione dei criteri multidimensionali di sostenibilità e compatibilità territoriale.
- Monitoraggio ambientale (M6): implementazione di sistemi di verifica *ex post* e aggiornamento adattivo del piano, con tracciamento degli indicatori ambientali, energetici e territoriali.

In questo quadro, la VAS viene reinterpretata non come mero adempimento procedurale, ma come processo valutativo continuo, strutturato e adattivo, in cui il *framework* M1–M6 garantisce l'integrazione tra analisi, decisione, attuazione e monitoraggio, riducendo la frammentazione tipica dei processi pianificatori tradizionali.

5.6.3.2 Framework M1–M6 e Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) dei progetti CER

Con riferimento alla Valutazione di Impatto Ambientale (VIA), si evidenzia che i progetti di CER sono soggetti a tale procedura esclusivamente nei casi previsti dalla normativa vigente, in funzione della tipologia, scala e localizzazione degli interventi. In tali casi, il modulo M5 assume un ruolo di snodo operativo tra pianificazione strategica e progettazione esecutiva, garantendo che le CER siano oggetto di VIA solo a valle di un processo di validazione pianificatoria già consolidato all'interno delle fasi precedenti del *framework*. Ciò implica che le soluzioni progettuali risultano già pre-strutturate in coerenza con:

- la classificazione delle micro-zone energetiche;
- i vincoli paesaggistici, culturali e ambientali;
- gli obiettivi del PAESC/SECAP;
- i criteri multidimensionali di sostenibilità e qualità.

In questo assetto, la VIA non assume funzione meramente autorizzativa, ma diventa dispositivo di verifica tecnico-procedurale, finalizzato alla conferma della coerenza tra progetto esecutivo, quadro

pianificatorio e condizioni ambientali locali, contribuendo alla riduzione dell'incertezza autorizzativa e del rischio contenzioso.
Il modulo M4 supporta la coerenza valutativa in fase *ex ante*, mentre il modulo M6 assicura il monitoraggio degli impatti e l'eventuale riallineamento adattivo delle condizioni di esercizio. Il modulo M0, infine, garantisce la *governance* multilivello del processo, facilitando il coordinamento tra soggetti istituzionali, tecnici e comunitari.

5.6.3.3 Struttura integrata

L'integrazione sistemica tra il *framework* M1–M6, il ciclo di pianificazione PAESC/SECAP e le procedure di Valutazione Ambientale Strategica (VAS) e Valutazione di Impatto Ambientale (VIA), rappresentando un sistema multilivello di supporto decisionale orientato alla pianificazione energetico-circolare basata su micro-zone energetiche e CER.
Nel dominio della VAS (lato sinistro della figura), il modulo M1 supporta le fasi di *screening* e *scoping* attraverso l'analisi delle micro-zone energetiche e dei relativi vincoli ambientali, paesaggistici e culturali, costituendo il quadro conoscitivo di riferimento. I moduli M2–M3 strutturano la definizione degli obiettivi e delle alternative strategiche, mentre M4 assicura la valutazione degli impatti ambientali e la verifica della fattibilità tecnico-economica delle opzioni pianificatorie. Il modulo M6 completa il ciclo attraverso monitoraggio, aggiornamento e *feedback* adattivo, garantendo continuità tra valutazione *ex ante* ed *ex post*.
Nel dominio della VIA (lato destro della figura), il modulo M5 rappresenta il punto di interfaccia tra pianificazione e progettazione esecutiva dei progetti CER, che accedono alla valutazione ambientale solo in quanto scelte pianificatorie già validate nei livelli precedenti del *framework*. In tale fase, i moduli M0, M4 e M6 assicurano rispettivamente *governance* multilivello, controllo tecnico-ambientale e monitoraggio degli impatti, garantendo coerenza con il quadro normativo e con gli obiettivi di lungo periodo.
Alla base del sistema, le micro-zone energetiche costituiscono l'unità spaziale minima di riferimento per l'implementazione delle CER, traducendo il *framework* in un dispositivo operativo che integra strategia, progetto e valutazione. Tale struttura evidenzia il passaggio da un modello sequenziale della valutazione ambientale a un paradigma ciclico, adattivo e data-driven, supportato da infrastrutture digitali

(*Digital Twin* e CDE), in cui la pianificazione energetica diventa intrinsecamente verificabile e territorialmente contestualizzata.
Nel complesso, l'architettura rappresentata evidenzia il passaggio da un modello tradizionalmente lineare della pianificazione ambientale a una struttura integrata, iterativa e adattiva, nella quale VAS e VIA cessano di configurarsi come momenti procedurali autonomi e assumono il ruolo di componenti strutturali di un unico processo decisionale continuo. In tale configurazione, il *framework* M1–M6 opera come infrastruttura metodologica di connessione tra livelli strategici, valutativi e attuativi, garantendo coerenza tra pianificazione energetica locale, *governance* territoriale e implementazione operativa delle CER.

5.6.3.4 Sintesi interpretativa

Nel complesso, il *framework* M1–M6 non sostituisce le procedure di VAS e VIA, ma ne estende la capacità operativa attraverso una struttura modulare che consente di:

- integrare valutazione e pianificazione in un unico ciclo continuo;
- rafforzare la coerenza tra livello strategico e livello progettuale;
- garantire adattività rispetto ai contesti territoriali differenziati;
- migliorare la tracciabilità delle decisioni pubbliche;
- supportare la *governance* multilivello delle CER.

In tal senso, il *framework* si configura come infrastruttura metodologica di integrazione tra pianificazione energetica, valutazione ambientale e progettazione territoriale, in grado di tradurre obiettivi strategici e vincoli normativi in configurazioni operative verificabili e replicabili.

5.6.4 RUOLO DELLE NORME TECNICHE DI ATTUAZIONE (NTA) COME TRADUZIONE NORMATIVA DEL FRAMEWORK

Nel quadro del *framework* M1–M6, le Norme Tecniche di Attuazione (NTA) assumono una funzione centrale in quanto dispositivo di traduzione normativa delle scelte strategiche in regole operative. La loro funzione non è accessoria, ma strutturale: costituiscono il canale attraverso cui le decisioni di piano vengono rese attuabili, verificabili e replicabili nei processi di pianificazione e gestione territoriale. In questa prospettiva, le NTA rappresentano il punto di interfaccia tra pianificazione strategica e attuazione progettuale, consentendo di incorporare nei procedimenti urbanistici ordinari criteri energetici,

ambientali e circolari elaborati nelle fasi M1–M4 del *framework*. Il sistema M1–M6 fornisce pertanto una struttura metodologica di supporto che rafforza la capacità prescrittiva delle NTA senza irrigidirne l'applicazione, favorendo un modello regolativo adattivo e contestualizzato. Le NTA si configurano quindi come:

- strumento di operazionalizzazione degli obiettivi del PAESC/SECAP;
  dispositivo di coerenza tra pianificazione energetica e strumenti urbanistici vigenti;
- base normativa per l'attuazione delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) e dei progetti pilota (M5); riferimento per il monitoraggio, la verifica e l'aggiornamento delle politiche locali (M6).

L'integrazione tra *framework* e NTA consente inoltre di articolare in modo sistematico il contributo dei singoli moduli:

- M1 – Analisi conoscitiva: le NTA recepiscono vincoli territoriali, sensibilità ambientali e condizioni di compatibilità urbanistica, traducendoli in criteri tecnici per la progettazione sostenibile degli interventi..
- M2–M3 – Definizione strategica: scenari, alternative e assetti di *governance* vengono trasformati in indirizzi normativi e criteri prestazionali coerenti con gli obiettivi del PAESC.
- M4 – Programmazione e valutazione di fattibilità: le NTA definiscono requisiti minimi di efficienza energetica, sostenibilità ambientale e fattibilità tecnico-economica, introducendo parametri verificabili e misurabili.
- M5 – Attuazione delle CER: le NTA regolano le modalità di implementazione degli interventi locali e delle Comunità Energetiche Rinnovabili, garantendo compatibilità con strumenti urbanistici, vincoli paesaggistici e standard tecnici.
- M6 – Monitoraggio e aggiornamento: le NTA integrano indicatori e criteri di controllo per la valutazione degli impatti e l'aggiornamento continuo del quadro regolativo.

Nel complesso, il *framework* M1–M6 consente di rafforzare la funzione delle NTA come infrastruttura normativa adattiva, capace di tradurre la complessità della pianificazione energetico-circolare in regole operative coerenti con la *governance* multilivello e con i principi di sostenibilità ambientale e territoriale.

Il Capitolo 6 dimostrerà come tale impianto possa essere adottato come strumento normativo–operativo senza introdurre nuovi livelli regolativi, ma valorizzando e rendendo pienamente attuabili quelli esistenti all'interno dei processi di pianificazione energetica locale.

5.6.4.1 Struttura prestazionale delle NTA di micro-zona

Ogni micro-zona energetica è associata a un set specifico di Norme Tecniche di Attuazione (NTA), strutturate secondo un approccio prestazionale e adattivo. Tali norme non assumono carattere prescrittivo rigido, ma definiscono un quadro di performance orientato alla qualità energetica, ambientale e socio-culturale degli interventi. In particolare, il sistema NTA per micro-zona articola quattro domini prestazionali fondamentali:

- obiettivi minimi di produzione e autoconsumo da fonti rinnovabili (FER);
- requisiti di accessibilità e predisposizione alla partecipazione alle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER);
- soglie di efficienza energetica, flessibilità operativa e capacità di accumulo;
- criteri di integrazione paesaggistica e compatibilità culturale.

Tali criteri sono declinati in relazione all'Heritage Assessment Index (HAI) e alle linee guida ICOMOS, garantendo una valutazione integrata degli impatti sul patrimonio culturale e paesaggistico.

L'impianto sistemico sintetizzato in Tabella A.5 7 in Appendice 5, consente di declinare le regole in funzione delle specificità di ciascuna micro-zona, garantendo al contempo coerenza con il quadro normativo vigente e salvaguardia del patrimonio culturale, senza generare sovrapposizioni regolative.

5.6.4.3 Integrazione con CAM e Design Circular

L'integrazione delle NTA con i Criteri Ambientali Minimi (CAM) garantisce la conformità alle disposizioni normative vigenti e la tracciabilità delle scelte progettuali. In parallelo, l'approccio di *Design* Circolare estende la logica regolativa alla dimensione materiale e infrastrutturale dei sistemi energetici, includendo:

- durabilità, manutenibilità e riparabilità dei componenti;
- riuso, riciclo e recupero dei materiali;
- valorizzazione dei flussi energetici secondari e dei residui di processo.

L'integrazione con l'HAI consente inoltre di incorporare dimensioni culturali e paesaggistiche, assicurando la compatibilità degli interventi

con i vincoli storico-ambientali e con le linee guida ICOMOS, in particolare nei contesti sensibili.

5.6.4.4 Meccanismi di aggiornamento e feedback

Le NTA sono concepite come dispositivi normativi dinamici, aggiornabili attraverso flussi informativi provenienti da *Digital Twin* e sistemi di monitoraggio delle CER.

Questo assetto consente un ciclo di regolazione adattiva basato su evidenze, che abilita:

- verifica continua dell'efficacia delle misure implementate;
- aggiornamento progressivo delle soglie prestazionali;
- allineamento con evoluzioni normative, tecnologiche e ambientali;
- scalabilità e replicabilità dei modelli su differenti contesti territoriali.

In tale configurazione, le CER assumono il ruolo di layer infrastrutturale trasversale, modulato in funzione delle caratteristiche delle micro-zone e dei relativi vincoli paesaggistici, culturali e funzionali (sociali, religiosi o produttivi).

A supporto dell'integrazione sistemica tra il *framework* M1–M6, il ciclo di pianificazione PAESC/SECAP e le procedure di Valutazione Ambientale Strategica (VAS) e Valutazione di Impatto Ambientale (VIA), rappresentano una configurazione multilivello di supporto decisionale per la pianificazione energetico-circolare basata su micro-zone energetiche e CER. Nel dominio della Valutazione Ambientale Strategica (VAS), il modulo M1 supporta le fasi di *screening* e *scoping* attraverso l'analisi delle micro-zone energetiche e dei relativi vincoli ambientali, paesaggistici e culturali, costituendo il quadro conoscitivo di riferimento. I moduli M2–M3 strutturano la definizione degli obiettivi e delle alternative strategiche, mentre M4 presidia la valutazione degli impatti ambientali e la verifica della fattibilità tecnico-economica delle opzioni pianificatorie. Il modulo M6 completa il ciclo attraverso monitoraggio, aggiornamento e *feedback* adattivo, garantendo continuità tra valutazione *ex ante* ed *ex post*.

Nel dominio della Valutazione di Impatto Ambientale (VIA), il modulo M5 costituisce il principale punto di interfaccia tra pianificazione e progettazione esecutiva delle CER, che accedono alla procedura valutativa solo in quanto scelte di piano già validate nelle fasi precedenti del *framework*. In tale contesto, i moduli M0, M4 e M6 assicurano rispettivamente *governance* multilivello, controllo tecnico-

ambientale e monitoraggio degli impatti, garantendo coerenza con il quadro normativo e con gli obiettivi di lungo periodo. Alla base del sistema, le micro-zone energetiche costituiscono l'unità spaziale operativa di riferimento per l'implementazione delle CER, traducendo il *framework* in un dispositivo integrato di connessione tra strategia, progetto e valutazione. Tale configurazione evidenzia il passaggio da un modello sequenziale della valutazione ambientale a un paradigma ciclico, adattivo e data-driven, supportato da infrastrutture digitali (*Digital Twin* e *Common Data Environment*), in cui la pianificazione energetica diventa intrinsecamente verificabile e territorialmente contestualizzata. Nel complesso, l'architettura rappresentata nella figura evidenzia la transizione da una logica lineare della pianificazione ambientale a un sistema integrato e iterativo, nel quale VAS e VIA non costituiscono momenti separati, ma componenti strutturali di un unico processo decisionale. Il *framework* M1–M6 agisce come elemento di connessione tra livelli strategici, valutativi e attuativi, garantendo coerenza tra pianificazione energetica, *governance* territoriale e implementazione delle CER.

5.6.5 ARCHITETTURA DIGITALE DI SUPPORTO: CDE – BIM – GIS – DIGITAL TWIN

5.6.5.1. Logica dello schema concettuale

L'architettura digitale proposta non costituisce un insieme di tecnologie aggiuntive rispetto ai processi esistenti, ma un'infrastruttura abilitante a supporto dell'operativizzazione del *framework* M1–M6. In tale prospettiva, gli strumenti digitali non introducono nuovi livelli procedurali, bensì rendono interoperabili, tracciabili e verificabili i flussi informativi alla base dei processi decisionali.

Lo schema concettuale si sviluppa lungo due assi integrati. Il primo è un asse orizzontale, corrispondente alla sequenza logico-decisionale dei moduli M1–M6, che strutturano il passaggio dalla fase conoscitiva alla valutazione, attuazione e monitoraggio. Il secondo asse è verticale e rappresenta la stratificazione informativa e operativa del sistema digitale. All'interno di tale architettura:

- il *Common Data Environment* (CDE) costituisce l'infrastruttura di *governance* del dato, garantendo coerenza, tracciabilità e trasparenza lungo l'intero ciclo decisionale;

- il GIS (*Geographic Information System*) supporta la dimensione territoriale, consentendo la gestione dei vincoli spaziali, paesaggistici e infrastrutturali;
- il BIM (*Building Information Modeling*) abilita la modellazione e la valutazione delle soluzioni progettuali, garantendo coerenza tra livello edilizio e scala energetica;
- il *Digital Twin* consente l'evoluzione dinamica del sistema, integrando dati in tempo reale e supportando processi predittivi e adattivi.

Nel loro insieme, tali componenti non operano come strumenti indipendenti, ma come livelli interconnessi di un unico ecosistema informativo, pienamente integrato con la struttura decisionale del *framework* M1–M6. L'architettura digitale, in questo senso, non aggiunge adempimenti, ma struttura e rende eseguibili i flussi informativi già richiesti dai processi di pianificazione energetica e ambientale vigenti.

5.6.5.2 Gate decisionali, feedback e indicatori

All'interno dell'architettura digitale, i moduli M1–M6 operano come *gate* decisionali sequenziali e iterativi, nei quali vengono verificati progressivamente coerenza strategica, fattibilità tecnico-economica e compatibilità ambientale delle alternative progettuali.

Il sistema di interazione tra moduli è caratterizzato da cicli di *feedback* continuo, che consentono l'aggiornamento dinamico delle ipotesi progettuali e l'adattamento delle strategie in funzione dei risultati osservati e delle condizioni territoriali emergenti.

In tale configurazione, il modulo M6 assume un ruolo centrale in quanto struttura di chiusura e riapertura del ciclo decisionale: gli indicatori in esso definiti non svolgono una funzione meramente descrittiva, ma agiscono come strumenti di governo adattivo del sistema, orientando la revisione delle scelte e l'aggiornamento dei piani. L'architettura digitale, integrata con il *framework* M1–M6, configura pertanto un sistema decisionale *data-driven*, in cui la pianificazione energetico-circolare diventa un processo iterativo, verificabile e continuamente riallineato alle condizioni territoriali, normative e tecnologiche.

5.6.6 IL FRAMEWORK COME STRUMENTO TRASFERIBILE E REPLICABILE

Il *framework* metodologico M1–M6 si configura come una struttura operativa modulare, trasferibile e replicabile, progettata per essere applicata a differenti livelli di pianificazione energetica e territoriale, dal livello comunale dei Piani d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima (PAESC), alla pianificazione energetico-ambientale regionale (PEAR), fino a programmi territoriali complessi a scala intercomunale o multi-scalare. La natura modulare del *framework* consente infatti di intervenire lungo l'intero ciclo decisionale – *ex ante*, in itinere ed *ex post* – senza introdurre nuove procedure normative, ma rafforzando la capacità delle amministrazioni pubbliche di governare la transizione energetica attraverso strumenti già esistenti, rendendoli maggiormente coerenti, verificabili e adattivi.

La trasferibilità del *framework* deriva dalla sua capacità di strutturare un processo decisionale standardizzato, applicabile in contesti territoriali differenti e adattabile alle diverse condizioni ambientali, urbanistiche, socio-economiche e culturali. L'intero processo si sviluppa secondo una sequenza metodologica progressiva che comprende l'analisi territoriale preliminare, la classificazione delle micro-zone energetiche, la costruzione di scenari energetici alternativi, la valutazione multicriteriale delle opzioni progettuali, l'implementazione di progetti pilota e Comunità Energetiche Rinnovabili (CER), fino al monitoraggio continuo e all'aggiornamento adattivo delle strategie di piano.

La principale innovazione introdotta dal *framework* consiste nella capacità di mettere a sistema informazioni normalmente frammentate, integrando dati territoriali, scenari energetici, vincoli ambientali, strumenti di pianificazione e risultati progettuali all'interno di un ecosistema decisionale unico e interoperabile. In questo senso, l'integrazione tra infrastrutture digitali – *Common Data Environment* (CDE), *Geographic Information System* (GIS), *Building Information Modeling* (BIM) e *Digital Twin* – consente di superare la tradizionale separazione tra fase strategica, progettazione esecutiva e monitoraggio operativo, trasformando la

pianificazione energetica in un processo continuo, verificabile e adattivo.

L'approccio proposto consente di garantire coerenza tra strategie di piano e interventi locali, riducendo il rischio di disallineamenti tra obiettivi generali e attuazione territoriale; tracciabilità delle decisioni attraverso sistemi digitali interoperabili capaci di monitorare dati, prestazioni e risultati; nonché riproducibilità metodologica, permettendo l'estensione del modello a contesti differenti senza compromettere coerenza normativa, qualità progettuale e capacità di adattamento locale.

In questa prospettiva, il *framework* non assume il ruolo di semplice modello teorico, ma si configura come una infrastruttura metodologica trasferibile, in grado di accompagnare amministrazioni locali, enti territoriali e decisori pubblici nella costruzione di processi di pianificazione energetica maggiormente integrati, resilienti e replicabili, favorendo una gestione sistemica della transizione energetica coerente con gli obiettivi climatici europei e nazionali.

5.6.6.1 Le NTA come cuore operativo del framework

All'interno del *framework* M1–M6, le NTA assumono una funzione centrale, operando come dispositivo di traduzione normativa delle scelte strategiche elaborate nelle diverse fasi del processo decisionale. Le NTA rappresentano infatti il principale elemento di connessione tra pianificazione energetica, regolazione urbanistica e implementazione progettuale, consentendo di trasformare obiettivi strategici generali in prescrizioni tecniche misurabili, verificabili e concretamente attuabili.

La loro funzione attraversa trasversalmente tutti i moduli del *framework*. Nella fase conoscitiva (M1), le NTA recepiscono vincoli territoriali, sensibilità ambientali, compatibilità urbanistiche e condizioni di contesto, fornendo criteri preliminari per la localizzazione e la sostenibilità degli interventi. Nei moduli strategici (M2–M3), esse traducono scenari energetici, alternative progettuali e assetti di *governance* in parametri tecnici, soglie prestazionali e criteri operativi coerenti con gli obiettivi di piano. Durante la fase di programmazione e valutazione (M4), definiscono

requisiti minimi di fattibilità tecnica, efficienza energetica, sostenibilità ambientale e qualità progettuale, supportando la selezione delle soluzioni maggiormente compatibili con il contesto territoriale.

Nella fase attuativa (M5), le NTA regolano l'implementazione dei progetti pilota e delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER), assicurando coerenza tra interventi locali, strumenti urbanistici vigenti, vincoli ambientali e standard tecnico-prestazionali. Infine, nel modulo di monitoraggio (M6), incorporano indicatori di controllo e parametri di verifica utili ad aggiornare progressivamente le strategie energetiche territoriali in funzione dei risultati ottenuti.

Dal punto di vista normativo, le NTA si collocano pienamente all'interno del quadro regolativo esistente, integrando le disposizioni del D.Lgs. 152/2006, gli strumenti di pianificazione energetico-ambientale regionale e la disciplina urbanistica locale. In questa prospettiva, esse non costituiscono esclusivamente uno strumento di compliance normativa, ma assumono il ruolo di vero e proprio cuore operativo del *framework*, permettendo di trasformare la pianificazione energetica in un sistema di regole adattive, misurabili e territorialmente contestualizzate.

5.6.6.2. Digitalizzazione e qualità progettuale territoriale

L'integrazione sistemica delle infrastrutture digitali costituisce uno degli elementi che rendono il *framework* metodologico concretamente trasferibile e replicabile nei diversi contesti territoriali. L'impiego coordinato di strumenti quali Geographic Information System (GIS), Building Information Modeling (BIM), *Common Data Environment* (CDE) e *Digital Twin* consente infatti di costruire un ecosistema digitale integrato capace di supportare simultaneamente analisi territoriale, simulazione progettuale, monitoraggio operativo e aggiornamento continuo delle decisioni.

Dal punto di vista operativo, tale architettura digitale permette di ridurre la frammentazione informativa che tradizionalmente caratterizza i processi di pianificazione energetica, migliorando la qualità delle analisi preliminari e aumentando la capacità di individuare vincoli, opportunità localizzative e configurazioni ottimali per l'implementazione delle CER. La disponibilità di dati interoperabili consente inoltre di sviluppare simulazioni dinamiche e scenari

previsionali, supportando valutazioni integrate di sostenibilità tecnica, ambientale, economica e territoriale.

In questo contesto, le Norme Tecniche di Attuazione operano in stretta connessione con l'ecosistema digitale, consolidando il rapporto tra strumenti di pianificazione, infrastrutture informative e processi decisionali. La possibilità di associare prescrizioni normative a dati continuamente aggiornati rende infatti il sistema adattivo, verificabile e progressivamente migliorabile nel tempo.

La digitalizzazione del *framework* non costituisce pertanto un semplice supporto tecnologico, ma rappresenta la condizione abilitante per una progettazione energetica territoriale di qualità, nella quale ogni decisione può essere misurata, verificata e aggiornata in funzione dell'evoluzione del contesto normativo, delle performance energetiche e delle trasformazioni territoriali in atto. In questa prospettiva, il *framework* M1–M6 assume il carattere di infrastruttura metodologica avanzata, capace di connettere pianificazione strategica, qualità progettuale, *governance* locale e gestione adattiva della transizione energetica.

5.6.6.3 NTA come regole operative: vincoli, parametri e indicatori

Le Norme Tecniche di Attuazione (NTA) assumono, all'interno del *framework* M1–M6, una funzione operativa centrale, traducendo obiettivi strategici e indirizzi pianificatori in criteri progettuali verificabili, misurabili e replicabili. In questa prospettiva, le NTA rappresentano il dispositivo normativo attraverso cui ridurre la discrezionalità decisionale e garantire coerenza tra pianificazione energetica, progettazione territoriale e implementazione operativa.

Dal punto di vista metodologico, la struttura prestazionale delle NTA si articola su tre livelli complementari: vincoli territoriali, parametri tecnico-ambientali e indicatori di monitoraggio, integrati all'interno di un ecosistema digitale interoperabile basato su GIS, BIM, Common Data Environment (CDE) e Digital Twin. In tale sistema, i diversi Livelli di Sviluppo (LOD) consentono di associare progressivamente informazioni spaziali, normative, energetiche e prestazionali.

5.6.6.3.1 Vincoli territoriali e urbanistici

La definizione dei vincoli territoriali costituisce il primo livello operativo delle NTA, in quanto garantisce la compatibilità degli interventi rispetto alle condizioni fisiche, ecologiche, urbanistiche e paesaggistiche del contesto di riferimento. In questa fase, il *framework* integra dati territoriali e prescrizioni normative attraverso modelli

digitali multilivello, nei quali i diversi LOD consentono di rappresentare progressivamente la complessità del territorio e di aumentare il grado di precisione informativa. Le NTA definiscono, in particolare, criteri relativi a:

- aree non edificabili determinate da vincoli normativi, ecologici o paesaggistici;
- buffer ecologici destinati alla tutela di habitat sensibili o componenti naturalistiche rilevanti;
- limiti di impatto visivo e prescrizioni per l'inserimento paesaggistico degli interventi;
- condizioni di compatibilità urbanistica e territoriale per l'installazione di infrastrutture energetiche locali.

Nel sistema digitale integrato, tali informazioni vengono progressivamente sviluppate secondo livelli crescenti di dettaglio: i livelli LOD 100–200 consentono la mappatura preliminare attraverso GIS; i livelli LOD 300–350 permettono l'integrazione dei vincoli nei modelli BIM associando geometrie e regole normative; infine, i livelli LOD 400–500 supportano il controllo in tempo reale mediante Digital Twin, verificando la conformità effettiva durante la fase di attuazione.
L'integrazione tra NTA e logica LOD consente pertanto di costruire una base conoscitiva verificabile e interoperabile, riducendo il rischio di conflitti progettuali e migliorando la qualità delle decisioni territoriali.

5.6.6.3.2 Parametri energetici e ambientali

I vincoli territoriali risultano efficaci solo se accompagnati da parametri tecnici in grado di rendere operativi gli obiettivi di piano. Le NTA definiscono quindi requisiti quantitativi e prestazionali che consentono di valutare in modo oggettivo la qualità energetica e ambientale degli interventi, garantendo comparabilità tra alternative progettuali e replicabilità dei risultati. Tra i principali parametri disciplinati rientrano:

- soglie minime di efficienza energetica degli impianti;
- capacità massima di produzione da fonti energetiche rinnovabili compatibile con i vincoli locali;
- standard minimi di riduzione dei consumi energetici coerenti con gli obiettivi del PAESC e della pianificazione energetica regionale;
- requisiti di flessibilità energetica e capacità di accumulo a supporto delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER).

Anche in questo caso, la progressiva definizione informativa segue la logica dei livelli LOD. Nei livelli LOD 200 vengono definiti i parametri strategici preliminari; nei livelli LOD 300–350 il modello BIM integra dati relativi a materiali, sistemi impiantistici e prestazioni energetiche; nei livelli LOD 400–500, infine, il Digital Twin consente di confrontare in tempo reale le performance previste con quelle effettivamente registrate, supportando processi di ottimizzazione continua e manutenzione predittiva.

Questa struttura consente di trasformare i requisiti energetici da semplici indirizzi strategici a parametri quantitativi verificabili, direttamente integrabili nei processi decisionali e autorizzativi.

5.6.6.3.3 Parametri di circolarità e sostenibilità ambientale

L'integrazione dei principi di economia circolare richiede l'introduzione di parametri specifici capaci di misurare l'efficienza nell'uso delle risorse, la gestione dei materiali e la riduzione degli impatti ambientali associati agli interventi energetici. In questo contesto, le NTA estendono la dimensione regolativa oltre la sola performance energetica, includendo criteri ambientali riferiti ai componenti, materiali e infrastrutture.

Le principali categorie di parametri riguardano:

- percentuali minime di materiali riciclati o riutilizzati nei processi costruttivi;
- limiti emissivi associati alle fasi di costruzione, esercizio e manutenzione;
- criteri di gestione dei rifiuti derivanti da attività di costruzione e demolizione;
- requisiti di durabilità, disassemblabilità e recuperabilità dei componenti tecnologici installati.

Anche in questo ambito, la logica LOD garantisce progressiva definizione e controllo delle informazioni: i livelli LOD 200 introducono criteri generali in fase preliminare; i livelli LOD 300–350 associano quantità, materiali e processi costruttivi ai modelli BIM e GIS; i livelli LOD 400–500 permettono al *Digital Twin* di monitorare in tempo reale dati di cantiere, utilizzo dei materiali e conformità ambientale, generando *feedback* correttivi durante l'intero ciclo di vita dell'intervento.

L'integrazione tra NTA, parametri di circolarità e infrastrutture digitali consente così di rendere misurabile la sostenibilità complessiva del progetto, trasformando gli obiettivi di economia circolare in criteri

operativi verificabili e replicabili su scala territoriale. Le NTA non costituiscono un livello operativo del *framework*, ma rappresentano l'output regolativo trasversale del ciclo M1–M6, attivato principalmente nella fase di ACT (M6).

Il *framework* M1–M6 può essere interpretato come un ciclo integrato di tipo *Plan–Do–Check–Act* (PDCA), strettamente interoperabile con i livelli informativi LOD (100–500) e con l'infrastruttura digitale composta da GIS, BIM, CDE e *Digital Twin* (Tabella A.5 8, Appendice 5). Tale struttura consente di rendere esplicita la progressione tra fase conoscitiva, decisionale, attuativa e adattiva, garantendo continuità tra pianificazione e gestione operativa delle micro-zone energetiche e delle CER.

5.6.6.4 NTA come ponte tra valutazione ambientale, Heritage Assessment e strumenti digitali

Nel *framework* M1–M6, le Norme Tecniche di Attuazione (NTA) assumono una funzione di connessione tra dimensione normativa, processi di valutazione ambientale e culturale e infrastrutture digitali di supporto decisionale. La loro funzione non si limita infatti alla definizione prescrittiva delle condizioni di intervento, ma si estende alla costruzione di un sistema integrato capace di collegare dati territoriali, simulazioni progettuali, verifiche di compatibilità ambientale e paesaggistica, monitoraggio continuo e aggiornamento adattivo delle scelte pianificatorie.

In questa prospettiva, le NTA consentono di integrare dati territoriali e ambientali derivanti da sistemi GIS, supportare simulazioni progettuali mediante ambienti BIM, tracciare l'evoluzione decisionale attraverso modelli di *Digital Twin* e rafforzare il contenuto tecnico delle procedure di Valutazione Ambientale Strategica (VAS) e delle verifiche di compatibilità culturale derivate dall'approccio *Heritage Assessment Impact* (HAI). In tal modo, le NTA cessano di essere dispositivi normativi statici e assumono il ruolo di strumenti dinamici di regolazione e controllo dell'intero ciclo decisionale.

L'applicazione operativa di questo approccio è sintetizzata nel workflow rappresentato nella Figura 5.6.6.4, che descrive il processo attraverso cui le NTA vengono implementate nelle micro-zone energetiche e nelle relative sotto-zone territoriali, mantenendo coerenza con la classificazione urbanistica vigente e consentendo di tradurre gli obiettivi energetici e territoriali in protocolli prestazionali adattabili ai differenti contesti locali.

Il processo si articola in cinque fasi principali. La prima fase riguarda la mappatura e classificazione territoriale, attraverso l'individuazione delle micro-zone energetiche e delle relative sotto-zone associate alle zone urbanistiche omogenee e caratterizzate secondo specificità energetiche, ambientali e paesaggistiche. La seconda fase consiste nell'applicazione delle NTA, mediante definizione di soglie prestazionali e protocolli operativi calibrati sulle caratteristiche del contesto territoriale e sui vincoli esistenti. La terza fase prevede la personalizzazione locale delle sotto-zone, consentendo l'adattamento dei criteri normativi alle condizioni specifiche di ciascun ambito territoriale e la verifica digitale della conformità progettuale. La quarta fase riguarda l'integrazione sistemica con il *framework* M1–M6, assicurando continuità tra analisi territoriale, diagnosi energetica, simulazione, implementazione e valutazione. La quinta fase introduce infine il monitoraggio continuo e l'aggiornamento adattivo, attraverso la verifica delle prestazioni reali e la progressiva revisione delle prescrizioni sulla base dei dati osservati.

Il *workflow* nell'illustrazione (vedi Figura A.5 4, in Appendice 5) evidenzia come le NTA possano operare come strumenti normativo-operativi attivi, capaci di tradurre obiettivi energetici, criteri di tutela territoriale e requisiti di qualità progettuale in azioni concrete, senza introdurre nuove categorie regolative e mantenendo piena coerenza con gli strumenti di pianificazione esistenti.

5.6.6.5 Integrazione operativo-digitale delle NTA

L'efficacia operativa delle NTA dipende dalla capacità di coordinare informazioni eterogenee e dinamiche vita del progetto. In questo contesto, la digitalizzazione costituisce il presupposto necessario per garantire interoperabilità, tracciabilità e controllo continuo delle decisioni progettuali e pianificatorie.

Il *Common Data Environment* (CDE) rappresenta l'infrastruttura centrale di *governance* informativa, consentendo la gestione integrata dei dati associati alle diverse fasi del processo decisionale, la condivisione strutturata delle informazioni tra *stakeholder* e la documentazione continua delle modifiche normative e progettuali. Attraverso il CDE, vincoli territoriali, parametri prestazionali e indicatori definiti dalle NTA diventano elementi condivisi, verificabili e continuamente aggiornabili.

L'integrazione tra GIS e BIM consente di superare la tradizionale separazione tra analisi territoriale e progettazione tecnica. Il GIS

supporta la gestione delle informazioni spaziali, l'identificazione di vincoli ambientali, paesaggistici e urbanistici e l'analisi territoriale multi-scalare, mentre il BIM permette di modellare componenti progettuali, sistemi impiantistici e requisiti prestazionali direttamente collegati alle prescrizioni normative. La convergenza tra questi strumenti, secondo logiche di interoperabilità GeoBIM, consente di sincronizzare rappresentazioni territoriali e progettuali, facilitando simulazioni predittive e verifiche di compatibilità *ex* ante.

Il *Digital Twin* completa l'ecosistema digitale trasformando i modelli statici in sistemi dinamici di rappresentazione territoriale. Attraverso l'integrazione di dati provenienti da reti intelligenti, sistemi di gestione energetica e piattaforme di monitoraggio, il gemello digitale consente di verificare in tempo reale prestazioni energetiche, stato di attuazione degli interventi e conformità delle prescrizioni normative. Questo sistema genera un *feedback* continuo che permette di aggiornare parametri e criteri definiti dalle NTA sulla base delle condizioni effettivamente osservate, introducendo una logica adattiva di governo territoriale.

La convergenza tra CDE, BIM, GIS e *Digital Twin* trasforma pertanto le NTA da apparato prescrittivo tradizionale a infrastruttura digitale di *governance* territoriale, capace di collegare pianificazione, simulazione, implementazione e controllo continuo delle performance energetiche e ambientali.

5.6.6.6 Conclusioni sulle NTA nel framework

Nel *framework* metodologico M1–M6, le Norme Tecniche di Attuazione rappresentano il principale dispositivo di traduzione operativa degli obiettivi strategici della pianificazione energetica territoriale. La loro funzione supera la tradizionale dimensione prescrittiva della regolazione urbanistica, assumendo un ruolo dinamico di coordinamento tra pianificazione strategica, progettazione locale, valutazione ambientale, tutela del patrimonio culturale e monitoraggio continuo.

Attraverso la loro integrazione con architetture digitali interoperabili e con il sistema multilivello definito dal *framework*, le NTA consentono di trasformare vincoli territoriali, parametri energetici e indicatori di performance in criteri misurabili, verificabili e progressivamente aggiornabili. In questo modo, la qualità progettuale non rimane un obiettivo astratto, ma diventa una condizione concretamente valutabile nell'*iter* progettuale.

La natura modulare delle NTA permette inoltre al *framework* di operare efficacemente su differenti livelli di pianificazione, dai PAESC comunali ai PEAR regionali, fino a programmi territoriali complessi di scala sovracomunale. Tale caratteristica garantisce elevata replicabilità metodologica, adattabilità ai differenti contesti territoriali e piena compatibilità con le procedure consolidate di pianificazione energetica e valutazione ambientale.

L'integrazione tra NTA, strumenti digitali, approccio HAI e *framework* M1–M6 consente infine di superare la tradizionale separazione tra fase strategica, progettazione esecutiva e monitoraggio, costruendo un sistema decisionale continuo nel quale pianificazione, implementazione e valutazione operano come componenti di un unico processo adattivo.

In questa prospettiva, le NTA non si configurano come semplici disposizioni regolative, ma come veri e propri strumenti metodologici di *governance* territoriale, capaci di tradurre strategie energetiche, requisiti di tutela culturale e obiettivi di sostenibilità in interventi concreti, verificabili e replicabili, rafforzando la qualità progettuale complessiva e la resilienza dei processi di transizione energetica locale.

5.7 STRUMENTI DI GOVERNANCE MULTILIVELLO E REPLICABILITÀ

L'implementazione dei progetti energetico-culturali nelle micro-zone richiede un assetto di *governance* multilivello in grado di coordinare dimensioni strategiche, normative e operative lungo l'intero ciclo di pianificazione. In tale prospettiva, la replicabilità dei modelli non dipende da singole soluzioni tecniche, ma dall'integrazione sistemica tra strumenti normativi adattivi (NTA), sistemi di valutazione del patrimonio (HAI/ICOMOS), micro-zone energetiche e CER.

Il sistema risultante configura un ecosistema decisionale scalabile e adattivo, nel quale ogni micro-zona funziona come unità sperimentale di apprendimento e trasferimento, in grado di generare conoscenza riutilizzabile su scala più ampia.

5.7.1 GOVERNANCE INTEGRATA E PARTECIPATIVA

La *governance* multilivello si articola su tre dimensioni complementari:

1. Coordinamento istituzionale: Ministeri, Regioni, enti di ricerca e agenzie ambientali condividono standard, dataset e linee

guida (NTA e criteri HAI), garantendo coerenza normativa e allineamento strategico tra livelli decisionali.

2. Gestione locale: le amministrazioni comunali e i soggetti attuatori delle CER traducono le NTA in regole operative, assicurando il monitoraggio degli impatti attraverso infrastrutture digitali (*Digital Twin* e CDE) e alimentando i processi di retroazione.
3. Partecipazione territoriale: Comunità locali, associazioni e *stakeholder* culturali e religiosi partecipano ai processi decisionali e gestionali, contribuendo alla definizione di interventi coerenti con i valori sociali e paesaggistici.

Nel loro insieme, questi livelli garantiscono coerenza verticale tra policy e attuazione e retroazione orizzontale tra attori, rendendo il sistema intrinsecamente adattivo.

5.7.2 STRUMENTI OPERATIVI PER LA REPLICABILITÀ

La replicabilità del modello si fonda su un insieme integrato di strumenti operativi progettati per garantire trasferibilità, adattabilità e coerenza metodologica nei diversi contesti territoriali. Le NTA adattive per micro-zona costituiscono il livello regolativo del sistema, traducendo gli obiettivi energetici, paesaggistici e culturali in regole operative verificabili; gli *overlay* HIA/ICOMOS supportano la valutazione della compatibilità tra interventi energetici e valori patrimoniali; il sistema *Digital Twin*–CDE assicura il monitoraggio continuo dei processi, la tracciabilità dei dati e l'aggiornamento dinamico delle strategie attraverso meccanismi di *feedback*. A tali componenti si affiancano una struttura di *governance* multilivello, necessaria per coordinare attori e competenze istituzionali differenti, e specifici protocolli di replicabilità, finalizzati alla standardizzazione delle procedure e alla diffusione del modello in contesti territoriali eterogenei.

L'interazione tra questi strumenti definisce un'infrastruttura operativa integrata, rappresentata nella Tabella A.5.9 dell'Appendice 5, nella quale sono sintetizzati i rapporti tra componenti normative, informative, tecnologiche e organizzative del *framework*. La configurazione proposta evidenzia come la replicabilità non derivi dalla semplice applicazione di procedure standardizzate, ma dalla capacità del modello di adattarsi alle specificità locali attraverso cicli continui di

acquisizione dati, valutazione, apprendimento e aggiornamento regolativo.

Nel loro insieme, tali strumenti consentono quindi il passaggio dalla sperimentazione locale alla scalabilità interterritoriale, supportando l'applicazione progressiva del *framework* a differenti livelli amministrativi e garantendo la coerenza tra dimensione energetica, paesaggistica, culturale e istituzionale.

5.7.3 CICLO CONTINUO DI GOVERNANCE E FEEDBACK

Il sistema di *governance* è strutturato come ciclo iterativo e adattivo:

1. Definizione delle regole: integrazione di NTA, HAI/ICOMOS e vincoli territoriali.
2. Implementazione locale: attuazione nelle micro-zone attraverso le CER.
3. Monitoraggio digitale: raccolta dati tramite Digital Twin e CDE.
4. Valutazione e aggiornamento: revisione di NTA, soglie e indicatori.
5. Replicabilità: trasferimento di best practice e scaling territoriale.

Questo ciclo consente un processo di apprendimento continuo, in cui ogni micro-zona contribuisce all'evoluzione dell'intero sistema.

5.7.4 COERENZA TRA LIVELLI E STRUMENTI

L'integrazione tra strumenti normativi, digitali e partecipativi genera un *framework* coerente in cui:

- le micro-zone funzionano come unità sperimentali controllate;
- le CER rappresentano dispositivi socio-tecnici adattivi;
- le NTA garantiscono coerenza normativa e misurabilità;
- il Digital Twin abilita monitoraggio e retroazione;
- i livelli istituzionali assicurano *governance* verticale integrata.

Il sistema così definito consente di armonizzare transizione energetica, tutela del patrimonio culturale e sviluppo territoriale sostenibile, trasformando l'approccio da sperimentale a strutturalmente replicabile. Il modello integra strumenti normativi (NTA), sistemi di valutazione del patrimonio (HAI/ICOMOS), infrastrutture digitali (*Digital Twin* e CDE) e processi partecipativi delle comunità locali.

La struttura evidenzia la traduzione delle *policy* multilivello in azioni operative locali e la loro retroazione verso i livelli superiori attraverso sistemi di monitoraggio digitale. Il ciclo di *governance* rappresentato

include: definizione delle regole, implementazione locale, monitoraggio digitale, aggiornamento adattivo e replicabilità su nuove micro-zone. Il sistema consente di trasformare le micro-zone in laboratori replicabili di innovazione energetico-culturale, garantendo coerenza tra transizione energetica, tutela del patrimonio e sviluppo territoriale sostenibile.

5.8 CONCLUSIONI

Il Capitolo 5 ha definito l'architettura metodologica e digitale necessaria per l'implementazione operativa del *framework* M1–M6, strutturando un ecosistema integrato basato su KPI SMART, infrastrutture interoperabili, strumenti di monitoraggio dinamico e dispositivi di *governance* adattiva (Figura A.5 5, Apepndice 5). L'insieme di tali componenti costituisce il livello tecnico-operativo del *framework* e rappresenta la base infrastrutturale per il successivo trasferimento applicativo del modello, discusso nel Capitolo 6, dedicato alla definizione del sistema organizzativo e imprenditoriale necessario alla concreta implementazione territoriale del *framework* proposto.

Il presente Capitolo ha illustrato il sistema integrato di strumenti digitali e metodologici che costituiscono il *framework* operativo M1–M6 per la pianificazione energetico-territoriale multilivello. L'architettura proposta integra *Common Data Environment* (CDE), GIS, BIM e *Digital Twin* in un ecosistema informativo interoperabile, orientato alla gestione adattiva dei dati territoriali.

La struttura multilivello consente di tradurre gli obiettivi strategici della pianificazione energetica in processi operativi misurabili e verificabili, articolati su tre scale integrate:

- Macro (strategico): definizione degli scenari energetici e dei vincoli di sistema;
- Meso (coordinamento territoriale): armonizzazione tra strumenti di pianificazione e contesti sovracomunali;
- Micro (operativo): implementazione delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) e verifica delle prestazioni tramite strumenti digitali.

Elemento centrale del *framework* è l'integrazione tra logica prestazionale e strumenti normativi, in cui le Norme Tecniche di Attuazione (NTA) e i Criteri Ambientali Minimi (CAM), consentono di

rendere operativi e verificabili gli obiettivi di sostenibilità energetica e territoriale.

L'uso combinato di BIM, GIS e *Digital Twin*, supportato da livelli informativi progressivi (LOD), consente di superare la separazione tra progettazione, valutazione e gestione, introducendo un modello continuo di simulazione, verifica e aggiornamento delle prestazioni energetiche e ambientali. In questo quadro, il *Design* Circolare rafforza la dimensione prestazionale del *framework*, estendendo la valutazione non solo alla fase operativa, ma all'intero ciclo di vita degli interventi, dalla progettazione alla dismissione.

Nel complesso, il *framework* M1–M6 configura un modello integrato di pianificazione energetico-territoriale capace di:

- garantire coerenza tra livelli strategici e attuativi;
- assicurare tracciabilità e verificabilità delle decisioni;
- supportare la replicabilità delle soluzioni su scala regionale e sovralocale;
- favorire un approccio adattivo basato su dati e *feedback* continuo.

La combinazione tra struttura modulare, infrastruttura digitale e criteri prestazionali consente quindi di trasformare la pianificazione energetica in un processo dinamico, misurabile e scalabile.

Il Capitolo 6 approfondirà il ruolo delle Norme Tecniche di Attuazione come dispositivo di traduzione normativa del *framework*, consolidando il passaggio dalla dimensione metodologica a quella regolativa e implementativa.

6 | SESTA PARTE
CRITERIE, ESIGENZE E REQUISITI

6.1 IMPIANTO TEORICO E TRASFORMAZIONE METODOLOGICA

Il Capitolo VI rappresenta il passaggio dalla definizione del *framework* operativo alla formalizzazione dell'artefatto metodologico della ricerca. Se il Capitolo V, ha definito l'architettura operativa costituita dal *framework* M1–M6, dalle Norme Tecniche di Attuazione (NTA), dalla *governance* multilivello e dal *Digital Twin*, il presente capitolo ne astrae la logica prestazionale, trasformandola in un modello regolativo trasferibile e verificabile.

L'obiettivo non è descrivere nuovamente gli strumenti operativi, bensì formalizzare i criteri che consentono di tradurre esigenze territoriali, energetiche, paesaggistiche e infrastrutturali in regole decisionali misurabili. In questa prospettiva, i criteri costituiscono l'elemento centrale dell'artefatto metodologico, poiché permettono di rendere esplicita la relazione tra conoscenza scientifica, processo decisionale e implementazione normativa.

La Tabella A.6 1 nell'Apepndice 6 sintetizza l'architettura dei cinque domini prestazionali che costituiscono il nucleo del modello proposto. Per ciascun dominio vengono esplicitati l'esigenza sistemica, i requisiti prestazionali, i parametri di valutazione, le soglie di verifica e il livello informativo minimo richiesto per la validazione nel *Digital Twin*.

Il modello si colloca nell'ambito dell'*evidence-based planning* e integra metodologie digitali basate su GIS, BIM e *Digital Twin*, assumendo una logica prestazionale orientata alla misurabilità, alla verificabilità e all'adattività. I principi derivati dalla valutazione paesaggistica, dalla pianificazione territoriale e dalla gestione delle Comunità Energetiche Rinnovabili vengono così ricondotti a un'unica architettura metodologica, indipendente dalla specifica formulazione normativa delle NTA e potenzialmente trasferibile a contesti differenti.

6.1.1 INTRODUZIONE E FINALITÀ

Il *framework* sviluppato nei capitoli precedenti viene reinterpretato come sistema prestazionale. Le NTA non rappresentano più il punto di partenza del processo, ma l'espressione regolativa di una struttura teorica più generale, nella quale i criteri definiscono le condizioni attraverso cui il territorio viene valutato, simulato e governato. L'artefatto metodologico assume pertanto una duplice funzione. Da un

lato fornisce una struttura di valutazione basata su indicatori misurabili; dall'altro costituisce il motore decisionale del *Digital Twin* territoriale, consentendo di verificare la compatibilità delle trasformazioni attraverso procedure riproducibili e aggiornabili. La trasformazione dal *framework* operativo al sistema prestazionale rende possibile:

- la replicabilità del modello a differenti scale territoriali;
- la misurabilità mediante indicatori e KPI;
- l'integrazione tra pianificazione territoriale, paesaggio, energia e governance;
- il supporto ai processi decisionali mediante strumenti digitali e simulativi.

6.1.2 DAL FRAMEWORK OPERATIVO AL SISTEMA PRESTAZIONALE

La formalizzazione del modello è organizzata secondo una struttura gerarchica che traduce gli obiettivi della ricerca in elementi verificabili. Ciascun criterio è articolato secondo una sequenza logica composta da:

- Esigenza;
- Requisito;
- Parametri e KPI;
- Soglie prestazionali;
- Livelli informativi (LOD e LOIN);
- Recepimento nelle NTA e integrazione nel *Digital Twin*.

Tale struttura costituisce il collegamento tra il *framework* metodologico sviluppato nei capitoli precedenti e la formalizzazione dei criteri illustrata nei paragrafi successivi, rendendo il sistema coerente, adattivo e replicabile.

La Tabella A.6 2 (Appendice 6) evidenzia la trasformazione concettuale operata dal presente capitolo, mostrando come gli elementi definiti nel sistema delle NTA vengano ricondotti a una struttura prestazionale generalizzabile e trasferibile. Tale corrispondenza costituisce il collegamento tra il *framework* operativo illustrato nel Capitolo V e la formalizzazione dei criteri sviluppata nei paragrafi successivi.

6.1.3 STRUTTURA DEL MODELLO (ESIGENZA–REQUISITO–PARAMETRO–SOGLIA–LOD–NTA)

La formalizzazione del modello prestazionale rappresenta la traduzione operativa del *framework* metodologico sviluppato nei capitoli precedenti in un sistema di valutazione e decisione trasferibile. In questa configurazione, ciascun criterio è organizzato secondo una struttura gerarchica che connette gli obiettivi sistemici agli strumenti di misurazione e implementazione.

La Tabella A.6 3 (Appendice 6) sintetizza la struttura logica del modello, articolando le sue componenti fondamentali e il relativo ruolo nel processo regolativo e valutativo. Il modello consente di trasformare il sistema normativo in un'architettura prestazionale basata su elementi misurabili, soglie verificabili e livelli informativi coerenti con l'integrazione di strumenti digitali quali GIS, BIM e *Digital Twin*. La Tabella A.6 4 (Appendice 6) esplicita invece la corrispondenza tra l'architettura operativa delle NTA (Capitolo V) e la formalizzazione teorica del presente capitolo, evidenziando il passaggio da un dispositivo regolativo a un modello prestazionale adattivo e generalizzabile. Questa corrispondenza costituisce il fondamento metodologico dei criteri sviluppati nei paragrafi successivi (6.2–6.6), garantendo la coerenza del sistema con il *framework* M1–M6, il sistema di KPI e l'architettura del *Digital Twin* territoriale.

6.2 CRITERIO DI COMPATIBILITÀ TERRITORIALE

Il criterio di compatibilità territoriale interpreta l'inserimento delle CER come sistema multi-scala articolato in tre livelli interdipendenti: *Underground*, *Land* e *Above Land*. Tale articolazione non rappresenta una classificazione morfologica delle tecnologie, ma un dispositivo prestazionale che mette in relazione la configurazione spaziale degli interventi con indicatori energetici, ambientali e paesaggistici. L'approccio si colloca nell'ambito della pianificazione prestazionale e dei modelli *evidence-based*, nei quali la valutazione territoriale è guidata da KPI misurabili e supportata da strumenti digitali di simulazione e controllo (Faludi, 2000; Stead & Meijers, 2009[139]).

---

[139] Stead, D., & Meijers, E. (2009). *Spatial planning and policy integration: Concepts, facilitators and inhibitors*. Planning Theory & Practice, 10(3), 317–332.

Underground (Sotterraneo)

Il livello sotterraneo comprende infrastrutture energetiche e idrauliche quali sistemi di accumulo, reti e gestione delle acque meteoriche. Le performance sono valutate attraverso indicatori di capacità di accumulo, riduzione dei picchi di carico e gestione idrica. Questo livello incide principalmente sulla resilienza sistemica e sulla continuità dei servizi.

Land (Superficie)

Il livello di superficie include impianti fotovoltaici a terra, agrivoltaico e sistemi di produzione energetica diffusa. La valutazione si basa su KPI relativi a uso del suolo, continuità ecologica, produzione energetica per unità di superficie e mitigazione microclimatica. In questo livello emerge la relazione tra produzione energetica e infrastruttura ecologica.

Above Land (Skyline)

Il livello sopra il suolo comprende integrazioni energetiche negli edifici e nello spazio urbano. Le prestazioni sono misurate in termini di copertura del fabbisogno energetico, riduzione dei carichi HVAC e impatto visivo. Questo livello integra dimensione energetica, morfologia urbana e comfort ambientale.

I tre livelli costituiscono un sistema integrato di valutazione basato su KPI multi-dimensionali, che supera l'approccio tradizionale fondato su criteri dimensionali o sulla sola potenza installata. La compatibilità territoriale viene quindi definita come capacità del sistema di generare performance simultaneamente energetiche, ambientali e paesaggistiche, in coerenza con un approccio *evidence-based* e supportato da strumenti di simulazione digitale (GIS, BIM e *Digital Twin*). La struttura proposta consente di tradurre la localizzazione delle tecnologie in un sistema prestazionale verificabile e adattivo, dove la valutazione non è più legata a soglie statiche, ma a indicatori dinamici e scalabili nel tempo (Negri, Fumagalli, & Macchi, 2017[140]; Fowler & Rauch, 2006[141]; Cole, 2012[142]).

---

[140] Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). *A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems*. Procedia Manufacturing, 11, 939–948.

[141] Fowler, K. M., & Rauch, E. M. (2006). *Riepilogo dei sistemi di valutazione degli edifici sostenibili* (n. PNNL-15858). Laboratorio Nazionale del Pacifico Nord-Occidentale (PNNL), Richland, WA (USA).

[142] Cole, R. J. (2012). Passaggio dal design verde a quello rigenerativo. *Building Research & Information*, *40*(1), 39-53.

6.2.1 MODELLO DI CLASSIFICAZIONE TERRITORIALE E ZONE OMOGENEE

Il criterio di compatibilità territoriale delle CER si basa su un sistema di classificazione integrato che combina tre dimensioni: la stratificazione spaziale dei *layer* energetici (*Underground*, *Land*, *Above Land*), la classificazione urbanistica delle zone omogenee A–F e la scala di intervento. In questo quadro, la Tabella A.6 5 formalizza la relazione tra layer territoriale, tipologia di intervento e domini prestazionali (McHarg, 1969; Ahern, 2011)[143].

I layer definiscono la modalità di interazione tra infrastruttura energetica e territorio, distinguendo tra sistemi invisibili e infrastrutturali (*Underground*), sistemi produttivi a terra (*Land*) e sistemi integrati nel costruito (*Above Land*). Le zone omogenee definiscono invece il grado di compatibilità territoriale in relazione alla vocazione urbanistica e paesaggistica.

In questo quadro, la Tabella A.6 6 formalizza la relazione tra zone omogenee, layer CER, tecnologie ammissibili, KPI di riferimento e scala di applicazione, configurando un modello operativo di zonizzazione prestazionale.

L'integrazione tra queste due dimensioni consente di costruire una matrice di compatibilità territoriale in cui la localizzazione delle tecnologie energetiche è interpretata come variabile prestazionale e non come semplice parametro dimensionale.

6.2.2 ARCHITETTURA DEI KPI TERRITORIALI

La valutazione della compatibilità territoriale è definita attraverso un sistema di KPI multi-dimensionali che traducono le relazioni tra layer energetici e contesto territoriale in indicatori misurabili. I KPI principali riguardano: uso del suolo e consumo territoriale; continuità ecologica e frammentazione; produzione energetica per unità di superficie; impatto visivo e paesaggistico; resilienza infrastrutturale e capacità di accumulo.

---

[143] Ahern, J. (2011). Dal fail-safe al safe-to-fail: sostenibilità e resilienza nel nuovo mondo urbano. Paesaggio e pianificazione urbana, 100(4), 341-343.

Questi indicatori costituiscono la base del sistema decisionale, superando logiche basate esclusivamente sulla potenza installata e introducendo una valutazione relazionale e multi-scala.

6.2.3 PARAMETRI MISURABILI E INDICATORI TERRITORIALI

I parametri territoriali rappresentano le variabili quantitative e qualitative attraverso cui è possibile tradurre operativamente la compatibilità territoriale delle CER. Essi costituiscono il livello di osservazione empirica del modello, consentendo la misurazione delle interazioni tra infrastrutture energetiche, struttura paesaggistica e assetto urbanistico. Il sistema si fonda su un approccio multilivello e multidimensionale, coerente con la struttura dei tre *layer* spaziali (*Underground*, *Land*, *Above Land*) e con la zonizzazione omogenea A–F. In questo quadro, i parametri consentono di modulare l'intensità degli impatti, la capacità di carico territoriale e il grado di integrazione delle tecnologie energetiche (Tabella A.6 7, Apepndice 6). Questi parametri sono progettati per essere digitalmente misurabili e simulabili, consentendo l'integrazione tra GIS, BIM e *Digital Twin*. Essi permettono la valutazione ex-ante degli impatti e la costruzione di scenari predittivi su scala micro, meso e macro.

Tra i principali indicatori derivati si includono: consumo di suolo; frammentazione paesaggistica; distanza da beni culturali mantenimento la copertura agricola; grado di interramento infrastrutturale; impatto cumulativo; e capacità di connessione alla rete. Il sistema consente quindi di trasformare i dati territoriali in basi operative per la valutazione della compatibilità delle CER.

6.2.4 LOGICA DI AMMISSIBILITÀ E SOGLIE DECISIONALI

Le soglie di compatibilità costituiscono il livello decisionale del modello di compatibilità territoriale delle CER, traducendo i parametri territoriali in condizioni verificabili di ammissibilità. Esse non assumono una funzione normativa rigida, ma operano come dispositivi adattivi di controllo, capaci di modulare l'idoneità degli interventi in relazione al contesto spaziale, al *layer* infrastrutturale (*Underground*, *Land*, *Above Land*) e alla zona omogenea di riferimento (A–F).

La logica di ammissibilità è di tipo rule-based e si fonda su soglie prestazionali multi-criterio che integrano variabili energetiche, ambientali e paesaggistiche. In tale quadro, la valutazione non è determinata da singoli parametri isolati, ma da una combinazione

ponderata di indicatori, che definisce livelli progressivi di compatibilità: alta compatibilità, compatibilità condizionata, compatibilità limitata e non compatibilità.
Le soglie principali riguardano indicatori sintetici quali consumo di suolo, continuità ecologica, alterazione paesaggistica e capacità di integrazione infrastrutturale. Tali valori operano come condizioni di attivazione dei diversi regimi procedurali (attività libera, procedura semplificata, autorizzazione unica), configurando un sistema di *governance* territoriale basato su prestazioni verificabili piuttosto che su criteri dimensionali.

6.2.5 STRUTTURA DATI E LIVELLI INFORMATIVI (LOD/LOIN)

La definizione dei requisiti informativi rappresenta la componente digitale del modello di compatibilità territoriale, finalizzata a garantire coerenza, tracciabilità e verificabilità dei dati lungo l'intero ciclo di valutazione delle CER. Il sistema si articola secondo due dimensioni complementari: il *Level of Development* (LOD), che definisce il grado di rappresentazione geometrica e funzionale del territorio e delle infrastrutture energetiche, e il *Level of Information Need* (LOIN), che specifica la granularità informativa necessaria alla valutazione dei parametri prestazionali.
Il LOD varia in funzione della scala di intervento: a scala micro (edificio/lotto) consente la modellazione puntuale delle interazioni tra impianto e contesto; a scala meso (quartiere/distretto) supporta la lettura sistemica delle relazioni tra produzione, consumo e tessuto urbano; a scala macro (territorio) abilita simulazioni aggregate e valutazioni cumulative degli impatti.
Il LOIN, invece, definisce la tipologia e la profondità dei dati richiesti per ciascun parametro (energetico, paesaggistico, ambientale e infrastrutturale), garantendo la consistenza informativa necessaria alla valutazione multicriteriale. L'integrazione tra LOD e LOIN consente la costruzione di un'infrastruttura informativa coerente con logiche di pianificazione prestazionale e con modelli decisionali basati su evidenza.

6.2.6 AUTOMAZIONE E SISTEMA DIGITALE DI COMPLIANCE

Il criterio di compatibilità territoriale trova applicazione operativa nelle Norme Tecniche di Attuazione (NTA), che vengono reinterpretate

come interfaccia regolativa tra modello prestazionale e processo decisionale.

In questo quadro, le NTA non si limitano a recepire prescrizioni statiche, ma incorporano un sistema di regole adattive basato su soglie, KPI e livelli informativi, rendendo possibile una valutazione automatizzabile della conformità degli interventi energetici.

La traduzione normativa avviene attraverso la formalizzazione di regole condizionali (if–then rules) che collegano parametri territoriali, soglie prestazionali e regimi autorizzativi. Tale struttura consente di associare a ogni configurazione progettuale un esito di compatibilità verificabile, riducendo la discrezionalità interpretativa e aumentando la replicabilità delle decisioni.

Il sistema integra inoltre un ciclo di aggiornamento continuo (logica PDCA), che consente l'adeguamento progressivo delle soglie e dei criteri in funzione dell'evoluzione tecnologica, territoriale e normativa. In questo modo, le NTA si configurano come un dispositivo regolativo dinamico, interoperabile con sistemi digitali di supporto decisionale e coerente con il paradigma della pianificazione *evidence-based*.

6.3 CRITERIO DI INTEGRITÀ PAESAGGISTICA E CULTURALE

La transizione energetica, infrastrutturale e digitale in atto richiede un aggiornamento del paradigma di tutela paesaggistica, tradizionalmente fondato sui principi dell'art. 9 della Costituzione e disciplinato dal D.Lgs. 42/2004. Tale impianto normativo costituisce ancora il riferimento essenziale per la salvaguardia dei valori culturali, percettivi e identitari del territorio, ma mostra oggi limiti operativi nella gestione di trasformazioni diffuse, cumulative e multi-scala, legate in particolare allo sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili (FER) e alla digitalizzazione dei processi autorizzativi.

L'attuale sistema di valutazione si basa prevalentemente su vincoli, soglie dimensionali e classificazioni procedurali. Questo approccio, pur efficace nella tutela puntuale, risulta meno adeguato a rappresentare la complessità morfologica e percettiva del paesaggio contemporaneo, soprattutto nei contesti non formalmente vincolati ma caratterizzati da elevata qualità storica, ambientale e relazionale.

Il limite principale non risiede nella normativa vigente, bensì nella mancanza di strumenti quantitativi capaci di tradurre la dimensione paesaggistica in grandezze verificabili e interoperabili con i sistemi digitali di pianificazione. In tale prospettiva, la quantificazione non

riduce il valore culturale del paesaggio, ma ne consente una gestione più trasparente, coerente e verificabile, supportando la discrezionalità tecnica e riducendo margini di valutazione non strutturata.

In questo contesto, la diffusione del *Digital Twin* territoriale introduce la possibilità di simulare gli effetti delle trasformazioni su base morfologica, percettiva ed energetica. Tuttavia, tali simulazioni richiedono la formalizzazione di indicatori misurabili, altrimenti si riducono a rappresentazioni descrittive prive di capacità decisionale.

Per questo motivo, il presente lavoro introduce un insieme di Key Performance Indicators (KPI) paesaggistici, finalizzati a descrivere in forma quantitativa la relazione tra interventi infrastrutturali e struttura del paesaggio. Tali indicatori riguardano in particolare la visibilità, la modificazione morfologica, la frammentazione territoriale e gli effetti cumulativi delle trasformazioni.

È importante precisare che tali strumenti non sostituiscono la valutazione tecnico-discrezionale delle autorità competenti, né introducono automatismi decisionali. Essi costituiscono invece un supporto alla valutazione, finalizzato a garantire trasparenza, replicabilità e coerenza tra casi analoghi, nel rispetto delle competenze degli organi preposti alla tutela paesaggistica.

Il sistema autorizzativo vigente per gli impianti alimentati da fonti rinnovabili, disciplinato dai D.Lgs. 387/2003, 199/2021 e 190/2024, si articola in attività edilizia libera, Procedura Abilitativa Semplificata (PAS) e Autorizzazione Unica (AU). Tale struttura è basata principalmente su soglie di potenza, tipologia impiantistica e localizzazione in aree idonee o non idonee, senza una misura esplicita della capacità territoriale o dell'integrità paesaggistica.

Ne deriva un sistema prevalentemente procedurale e dimensionale, nel quale contesti territoriali profondamente differenti possono essere trattati attraverso criteri autorizzativi analoghi, con limitata considerazione delle specificità morfologiche e percettive.

Alla luce di tali criticità, il criterio di Integrità Paesaggistica e Culturale si configura come un criterio prestazionale integrativo, volto a collegare la valutazione paesaggistica alla capacità effettiva del territorio di assorbire trasformazioni energetiche. Tale approccio consente di integrare valutazioni qualitative e strumenti quantitativi, mantenendo la centralità del giudizio tecnico e garantendo al contempo maggiore oggettivazione e confrontabilità delle decisioni.

In questa prospettiva, il criterio costituisce la base metodologica per la successiva definizione di requisiti, indicatori, soglie di compatibilità e modalità di integrazione nei sistemi digitali di supporto alla pianificazione e nelle NTA.

6.3.1 COMPATIBILITÀ SISTEMICHE A SCALE TERRITORIALI, AGGREGAZIONI E DIFFERENZIAZIONE PER ZONE OMOGENEE

L'inserimento delle FER all'interno del territorio, in particolare attraverso il modello delle CER, non può essere interpretato come semplice localizzazione di impianti, ma come costruzione di un sistema energetico territoriale relazionale. Tale sistema integra produzione, consumo e *governance* locale, configurando il territorio come infrastruttura attiva della transizione energetica. In questa prospettiva, la tutela dell'integrità paesaggistica non opera più come vincolo esterno alla trasformazione, ma come variabile strutturale della progettazione energetica. Il paesaggio diventa simultaneamente supporto fisico, parametro di valutazione e condizione di compatibilità delle trasformazioni.

Struttura multilivello della compatibilità territoriale

La valutazione della compatibilità sistemica si basa su una struttura gerarchica multi-scala, costruita sull'aggregazione progressiva di unità spaziali elementari (pixel territoriali). A ciascun pixel sono associati attributi morfologici, percettivi, funzionali e infrastrutturali.

Gli indicatori paesaggistici già introdotti (Dominanza Visiva, Alterazione Morfologica, Frammentazione, Cumulatività) vengono integrati da una dimensione relazionale-energetica attraverso l'Indice di Integrazione Comunitaria (IIC), che misura:

- quota di autoconsumo locale dell'energia;
- livello di redistribuzione economica territoriale;
- grado di partecipazione comunitaria o cooperativa;
- integrazione con infrastrutture energetiche esistenti.

L'introduzione dell'IIC consente di estendere la nozione di compatibilità oltre la dimensione morfologica, includendo la dimensione socio-economica e istituzionale della transizione energetica (Figura A.6 1, Appendice 6).

Scala di analisi e livelli territoriali

Il modello distingue quattro livelli integrati di analisi:

- Macro-livello (strategico)
- Meso-livello (sub-regionale)

- Micro-livello (puntuale)
- Eco-livello (adattivo e di governance)

I primi tre livelli descrivono la struttura spaziale della valutazione; l'eco-livello introduce invece una dimensione dinamica di apprendimento e aggiornamento del sistema.

6.3.1.1 Macro-livello (scala strategica)

Il macro-livello riguarda ambiti territoriali estesi (sistemi collinari, aree costiere, bacini paesaggistici sovracomunali). A questa scala la valutazione si concentra su:

- effetti cumulativi di lungo periodo;
- interferenze con skyline, dorsali paesaggistiche e sistemi ambientali strutturali;
- localizzazione di impianti di grande scala.

La funzione principale del macro-livello è prevenire fenomeni di saturazione visiva e concentrazione infrastrutturale non equilibrata.

6.3.1.2 Meso-livello (scala sub-regionale)

Il meso-livello riguarda unità paesaggistiche intermedie (crinali, vallate, sistemi agricoli storici, bacini visivi). In questa scala si valutano:

- alterazioni delle trame agrarie e dei margini morfologici;
- interferenze con corridoi ecologici;
- visibilità intercomunale;
- effetti cumulativi locali.

Il meso-livello costituisce il livello di mediazione tra pianificazione strategica e progetto tecnico, influenzando layout impiantistici, distanze, altezze e orientamenti.

6.3.1.3 Micro-livello (scala puntuale)

Il micro-livello riguarda elementi sensibili localizzati:

- beni vincolati;
- percorsi panoramici e infrastrutture lente;
- nuclei storici e rurali;
- margini urbani.

A questa scala si applicano:
simulazioni tridimensionali puntuali;

- analisi di dominanza visiva locale;
- progettazione di misure di mitigazione;
- ottimizzazione formale e materica degli impianti.

Il micro-livello traduce la valutazione in decisioni progettuali operative.

6.3.1.4 Eco-livello (scala adattiva e di governance)

L'eco-livello costituisce una dimensione trasversale del sistema, non geografica ma funzionale. Esso opera attraverso:

- monitoraggio ex post dei KPI;
- aggiornamento periodico delle soglie di Capacità Territoriale (CT);
- ricalibrazione dei pesi degli attributi territoriali;
- apprendimento istituzionale basato sugli esiti autorizzativi.

Il sistema diventa così evolutivo, evitando rigidità normative e garantendo coerenza tra simulazione e trasformazione reale.

Integrazione con zone omogenee e logica territoriale

Le zone omogenee A–F (D.M. 1444/1968) non costituiscono la base del modello, ma vengono utilizzate come fattori di ponderazione nella definizione della compatibilità territoriale (Figura A.6 2, Appendice 6).

La loro funzione è differenziata come segue:

- Zona A: esclusione strutturale per impianti industriali, integrazione solo edilizia e non percettiva;
- Zone B–C: integrazione su tessuti esistenti con impatti visivi limitati;
- Zona D: alta compatibilità in contesti produttivi e infrastrutturati;
- Zona E: compatibilità condizionata (agrivoltaico e continuità agricola);
- Zona F: concentrazione possibile con obbligo di mitigazione e analisi cumulativa.

Questa struttura consente di trasformare la zonizzazione urbanistica da criterio rigido a variabile di ponderazione territoriale.

Sistema gerarchico dei KPI paesaggistici e territoriali

Il sistema di Key Performance Indicators (KPI) adottato nel modello non costituisce un insieme omogeneo di indicatori paralleli, ma una struttura gerarchica organizzata su tre livelli funzionali, finalizzata alla costruzione della Capacità Territoriale (CT).

Capacità territoriale e formalizzazione del sistema

L'unità di base del modello è il pixel territoriale p, definito da un vettore di attributi:

- S_p = sensibilità paesaggistica;
- V_p = visibilità (viewshed);
- M_p = vulnerabilità morfologica;

- C_p = grado di cumulatività territoriale;
- Z_p = zona urbanistica;
- E_p = vocazione energetica e infrastrutturale.

Tali attributi costituiscono la base informativa per la costruzione dei Key Performance Indicators (KPI) e per la successiva aggregazione territoriale.

Struttura gerarchica dei KPI

Il sistema di KPI è organizzato in modo gerarchico e funzionale alla costruzione della Capacità Territoriale (CT) (Figura A.6 3, Appendice 6).

KPI primari (strutturali)

Costituiscono la base diretta della funzione di capacità territoriale:

- Indice di Dominanza Visiva (IDV): impatto percettivo dell'intervento nel campo visivo
- Indice di Alterazione Morfologica (IAM): trasformazione delle strutture territoriali
- Indice di Frammentazione Territoriale (IFT): discontinuità del sistema paesaggistico
- Indice di Cumulatività (ICU): effetto aggregato degli impianti nel bacino territoriale

Questi indicatori definiscono direttamente la capacità di assorbimento paesaggistico del territorio.

KPI secondari (correttivi e integrativi)

Non entrano direttamente nella funzione della CT, ma ne modulano i pesi:

- Indice di Diversità Vegetazionale (IDVeg): qualità e diversità del sistema vegetazionale
- Ottimizzazione Territoriale (OT): efficienza distributiva degli impianti
- Accessibilità e Coinvolgimento Comunitario (ACC): livello di partecipazione e integrazione sociale
- Performance Ambientale e Paesaggistica (PAP): indice composito di sintesi ambientale

Questi KPI agiscono come coefficienti di correzione del modello, evitando una lettura esclusivamente morfologica della compatibilità.

KPI energetici (di sistema)

Descrivono la dimensione funzionale della transizione energetica:

- Adattamento e Sostenibilità Energetica (ASE)

- Rinnovabili ed Efficienza Energetica (RES)

Non incidono direttamente sulla compatibilità paesaggistica, ma qualificano la coerenza energetica del sistema territoriale.

Funzione di Capacità Territoriale (CT)

La Capacità Territoriale di un ambito T, è definita come funzione aggregata dei KPI primari, modulata dai KPI secondari e contestualizzata dai KPI energetici:

$$CT(T) = \sum w_i \cdot KPI_{primari}(p) \cdot \alpha\,(\,KPI_{secondari})$$

dove:

- w_i = pesi variabili in funzione del livello territoriale (macro, meso, micro)
- α = funzione di modulazione derivata dai KPI secondari
- i KPI energetici agiscono come fattori di coerenza sistemica, non come variabili additive

La CT rappresenta quindi la capacità del territorio di assorbire trasformazioni energetiche mantenendo integrità paesaggistica, funzionale e sociale.

Relazione tra Capacità Territoriale e regimi autorizzativi

L'integrazione tra CT e sistema autorizzativo consente di trasformare la logica procedurale basata su soglie dimensionali in una logica territoriale prestazionale. La relazione tra CT e regimi autorizzativi non è deterministica, ma orientativa e graduata:

- CT bassa (0–0,3): ambiti ad alta sensibilità → AU rafforzata o esclusione per impianti industriali
- CT media (0,3–0,6): ambiti misti → PAS o AU condizionata
- CT alta (0,6–1): ambiti infrastrutturati → PAS o attività libera

Il regime autorizzativo diventa quindi una funzione della capacità territoriale e non una soglia astratta uniforme.

Fattori di modulazione tecnologica

La valutazione della CT viene ulteriormente modulata in funzione della tipologia impiantistica, che agisce come fattore di incidenza sui KPI primari:

- eolico onshore: elevata incidenza macro-paesaggistica;
- eolico offshore: estensione visiva costiera e marina;
- micro-eolico: impatto locale prevalente;
- fotovoltaico su copertura: impatto micro-limitato;
- BIPV: integrazione architettonica;
- fotovoltaico a terra: impatto medio e cumulativo;

- agrivoltaico: integrazione con sistema agricolo.

Ogni tecnologia è quindi interpretata come modificatore del sistema **KPI**, non come variabile indipendente.

6.3.2 KPI PAESAGGISTICI E PROCEDURA DI CALCOLO

La complessità delle trasformazioni paesaggistiche indotte dalle infrastrutture energetiche richiede il superamento dei modelli valutativi bidimensionali tradizionali, basati su proiezioni statiche del territorio. In un quadro digitale avanzato, la rappresentazione viene estesa a unità tridimensionali (*voxel*), integrate in un *Digital Twin* territoriale dinamico, capace di rappresentare non solo la morfologia del paesaggio, ma anche le sue componenti antropiche, ecologiche e trasformative nel tempo (Batty, 2018[144]; Angelopoulou et al., 2020). L'integrazione tra modelli spaziali e algoritmi predittivi consente di trasformare i KPI paesaggistici in strumenti dinamici di valutazione *ex ante* ed *ex post*, capaci di simulare scenari evolutivi e saturazione cumulativa del paesaggio.

Il sistema di valutazione si basa sull'integrazione tra pixel (2D), *voxel* (3D) e modelli predittivi basati su Intelligenza Artificiale, che consentono di descrivere, simulare e anticipare le trasformazioni del paesaggio.

- I *pixel*[145] rappresentano la dimensione planimetrica della visibilità e della distribuzione spaziale.
- I *voxel* descrivono la dimensione volumetrica e la profondità percettiva dell'interferenza visiva.
- L'AI (IIC-AI) supporta la previsione degli scenari evolutivi e della saturazione cumulativa, ottimizzando il livello di dettaglio (LOD) del modello in funzione della sensibilità territoriale.

La gestione del *Level of Detail* (LOD) viene utilizzata come strategia computazionale adattiva, aumentando la densità informativa nei punti sensibili e riducendola nelle aree a bassa rilevanza percettiva.

---

[144] Batty, M. (2018). Gemelli digitali. Ambiente e pianificazione B: Analisi urbana e City Science, 45(5), 817-820.

[145] Ogni pixel ha attributi multidimensionali: Sp=sensibilita`,Vp=visibilita`,Mp=morfologia,Cp=cumulativita`,Zp=zonaurbanistica,Ep=vocazioneenergeticaSp = sensibilità,\quad Vp = visibilità,\quad Mp = morfologia,\quad Cp = cumulatività,\quad Zp = zona urbanistica,\quad Ep = vocazione energeticaSp=sensibilita`,Vp=visibilita`,Mp=morfologia,Cp=cumulativita`,Zp=zonaurbanistica,Ep=vocazioneenergetica

Struttura generale del sistema di valutazione

Il sistema di KPI è organizzato secondo una struttura gerarchica (Tabella A.6 8, Appendice 6) integrata nel *Digital Twin* e finalizzata alla costruzione della Capacità Territoriale (CT). La valutazione si articola su quattro dimensioni operative:

- Macro: effetti cumulativi e interferenze strutturali su scala territoriale ampia;
- Meso: alterazioni delle strutture paesaggistiche intermedie e dei sistemi ecologici;
- Micro: impatti puntuali su elementi sensibili e percettivi;
- Eco: dimensione adattiva e di *governance* basata su monitoraggio e aggiornamento continuo.

Il regime autorizzativo viene qui interpretato non come una mera classificazione normativa fondata su soglie dimensionali predefinite, bensì come una funzione derivata dalla capacità territoriale di accogliere e integrare differenti configurazioni energetiche (Tabella A.6 9, Appendice 6). Tale approccio consente di superare una lettura esclusivamente procedurale, introducendo una relazione più articolata tra scala dell'intervento, caratteristiche localizzative, potenziali impatti e complessità amministrativa. In questa prospettiva, gli impianti eolici onshore, riconducibili a una dimensione macro-territoriale, risultano generalmente associati al regime di Autorizzazione Unica (AU), mentre gli impianti eolici offshore, per la loro maggiore interazione con il sistema marino-costiero, richiedono l'integrazione con la Valutazione di Impatto Ambientale (VIA). Al contrario, gli impianti fotovoltaici su copertura, caratterizzati da una scala micro e da un limitato grado di trasformazione territoriale, possono essere ricondotti ai regimi di Attività Libera (AT) o Procedura Abilitativa Semplificata (PAS). Le configurazioni agrivoltaiche e gli impianti a biomasse, collocandosi in una dimensione intermedia tra scala meso e macro, evidenziano una maggiore variabilità procedurale, con ricorso rispettivamente alla PAS o all'Autorizzazione Unica, in funzione delle specificità progettuali, della localizzazione e del livello di pressione esercitato sul territorio. La corrispondenza tra scala territoriale, tecnologia energetica e regime autorizzativo è riportata nella Tabella A.6.10 e Tabella A.6 11 nell'Appendice 6, alla quale si rimanda per il quadro sinottico di dettaglio. Le tecnologie FER agiscono come fattori di modulazione dei KPI, influenzando principalmente:

- scala di impatto (macro / meso / micro)

- intensità percettiva (IDV, PAP)
- cumulatività (ICU)

La tecnologia non è una variabile autonoma, ma un coefficiente di trasformazione dei KPI territoriali illustrati in Tabella A.6 11, in Appendice 6. Il sistema KPI si integra nella gerarchia multi-scala del modello (macro, meso, micro, eco-livello), costituendo la base operativa per la costruzione della Capacità Territoriale (CT) e la sua traduzione nei regimi autorizzativi. La traduzione del paesaggio in pixel e voxel avviene già nelle sezioni precedenti (6.3.2.1–6.3.2.3), evitando duplicazioni descrittive e mantenendo questa tabella come sintesi di raccordo tra indicatori e applicazione operativa nel *Digital Twin*.

6.3.2.1 Indice di Dominanza Visiva (IDV)

L'Indice di Dominanza Visiva (IDV) rappresenta la metrica fondamentale per misurare la capacità di un'infrastruttura di imporsi nel campo percettivo del paesaggio.

La valutazione integra analisi bidimensionale e tridimensionale (2D GIS + 3D *viewshed* + *voxel-based modelling*), superando la rappresentazione planimetrica tradizionale e introducendo una lettura volumetrica del paesaggio. Le soglie variano in funzione della sensibilità del contesto, da valori molto contenuti nelle aree vincolate (Zona A) fino a valori più elevati nei contesti produttivi e infrastrutturati (Zone D–F), secondo una logica LVIA (Bishop & Lange, 2005).

Il modello considera anche la Percentuale di Alterazione Percettiva (PAP), che misura la quota di campo visivo occupata dall'intervento all'interno di un cono osservativo standardizzato di 120°. Attraverso l'uso dei *voxel*, viene stimata l'alterazione della "*visual integrity*" (ICOMOS), con soglie più restrittive nei contesti sensibili (≤ 0,04) e progressivamente più flessibili nei contesti agricoli e storici (≤ 0,12). Il parametro numerico non sostituisce il giudizio tecnico, ma lo supporta come base oggettiva (Tabella A.6 12, Appendice 6).

Il metodo di calcolo dell'IDV si basa su una procedura integrata multi-scala che combina analisi GIS 2D e modellazione 3D.

In una prima fase, viene condotta un'analisi GIS 2D di tipo pixel-based per la valutazione della visibilità planimetrica, individuando l'estensione delle superfici visibili rispetto all'ambito territoriale.

Successivamente, l'analisi viene approfondita mediante *viewshed* 3D e modelli *voxel*, per stimare la dominanza volumetrica effettiva. In questa fase non si valuta solo la visibilità, ma l'ingombro percettivo nello

spazio: altezza, volume e relazione con *skyline* e crinali. L'analisi viene calibrata attraverso l'aggregazione su punti sensibili rappresentativi:

- crinali e spartiacque
- percorsi panoramici e strade di attraversamento
- beni vincolati e nuclei storici
- punti di osservazione consolidati

Il modello integra:

- componente quantitativa (superficie visibile, volume percepito, incidenza sul campo visivo)
- componente qualitativa (dominanza simbolica e alterazione dell'immagine territoriale)

L'IDV combina componente quantitativa e qualitativa in modo integrato: i *range* numerici definiscono le soglie operative, mentre la lettura qualitativa descrive il livello di dominanza paesaggistica e guida le strategie di mitigazione (riduzione volumetrica, arretramento, schermature vegetali, rimodulazione cromatica).

L'aggregazione dei risultati avviene su punti sensibili rappresentativi, selezionati in coerenza con la struttura paesaggistica. Per ciascun punto viene calcolato un indice specifico, successivamente ponderato in funzione della rilevanza paesaggistica e culturale. L'IDV integra una componente quantitativa e una qualitativa per descrivere il grado di dominanza percettiva dell'infrastruttura. La prima definisce le soglie operative, la seconda interpreta le modalità di impatto (emergenza isolata, interferenza con *skyline*, saturazione visiva), orientando le misure mitigative più appropriate. L'indice si configura così come uno strumento decisionale graduato per la progettazione paesaggistica, coerente con la capacità visiva e identitaria del territorio.

6.3.2.2 Percentuale di Alterazione Percettiva (PAP) per pixel

La Percentuale di Alterazione Percettiva (PAP) misura il grado complessivo di trasformazione dell'immagine paesaggistica indotto da un intervento, integrando analisi bidimensionale, modellazione tridimensionale e simulazioni su *Digital Twin* (Tabella A.6 13, Appendice 6). La metodologia combina:

- analisi GIS 2D *pixel-based*, per la delimitazione dell'area di esposizione visiva;
- modellazione 3D *voxel-based* (BIM / *viewshed*), per la valutazione dell'ingombro percettivo e della profondità visiva in diversi scenari ambientali.

L'analisi è condotta su punti sensibili gerarchizzati tramite logica LOD (*Level of Detail*):

- LOD elevato in contesti di pregio paesaggistico e vincolati
- LOD intermedio in contesti agricoli strutturati o periurbani
- LOD semplificato in ambiti infrastrutturati o marginali

La PAP non è una misura puramente geometrica, ma una metrica percettiva derivata da output GIS/3D interpretati.

Il dato numerico (estensione dell'alterazione, interferenza con skyline, variazione dell'immagine territoriale) viene tradotto in una lettura strutturata del livello di trasformazione.

L'obiettivo della PAP non è esclusivamente quantificare la visibilità dell'intervento, ma valutarne il grado di alterazione dell'immagine territoriale, distinguendo tre condizioni operative:

- alterazione compatibile
- alterazione mitigabile
- alterazione strutturale

La PAP fornisce quindi una misura di supporto alla valutazione paesaggistica, integrando *output* quantitativi e interpretazione qualitativa per orientare le strategie di mitigazione e progettazione.

6.3.2.3 Indice di Impatto Cumulativo (IIC)

L'Indice di Impatto Cumulativo (IIC-AI) rappresenta la componente predittiva del sistema di valutazione, finalizzata a stimare gli effetti combinati derivanti dalla presenza simultanea di più infrastrutture energetiche e dalla loro possibile evoluzione nel tempo. A differenza delle analisi di tipo statico, l'IIC introduce una prospettiva sistemica e dinamica, integrando la valutazione delle interazioni cumulative tra interventi, territorio e componenti paesaggistiche. Tale approccio consente di ridurre l'incertezza nei processi decisionali, individuando preventivamente condizioni di criticità e possibili fenomeni di saturazione territoriale o paesaggistica. L'interpretazione dei valori dell'indice è articolata secondo differenti livelli di compatibilità: valori contenuti indicano condizioni generalmente sostenibili e coerenti con scenari di basso impatto, valori intermedi evidenziano la necessità di introdurre misure di mitigazione e di controllo dell'evoluzione infrastrutturale, mentre valori elevati segnalano condizioni di potenziale incompatibilità e un maggiore rischio di compromissione degli equilibri territoriali. La classificazione dei range dell'Indice di Impatto Cumulativo (IIC-AI) e la relativa interpretazione qualitativa sono riportate nella Tabella A.6 14 dell'Appendice 6, alla quale si

rimanda per il dettaglio metodologico. La dimensione cumulativa introduce una lettura integrata spazio-temporale del territorio, superando la valutazione del singolo intervento. Il metodo integra tre livelli operativi:

- GIS/BIM, per la quantificazione delle trasformazioni territoriali (uso del suolo, copertura vegetale, volumetrie e stratificazione spaziale);
- analisi *pixel-based* e *voxel-based*, per la descrizione combinata 2D/3D degli impatti;
- *Digital Twin* territoriale dinamico, per la simulazione evolutiva degli scenari.

Il *Digital Twin* consente di:

- simulare scenari incrementali di sviluppo infrastrutturale;
- analizzare soglie di saturazione visiva e funzionale;
- valutare interferenze cumulative tra impianti;
- integrare serie storiche e dati autorizzativi.

L'eventuale supporto di modelli di intelligenza artificiale consente una funzione predittiva avanzata, basata sull'analisi di dataset storici e trend di trasformazione territoriale, con l'obiettivo di anticipare condizioni critiche di saturazione.

La valutazione non è esclusivamente quantitativa e include indicatori di qualità territoriale, relativi a:

- permeabilità ecologica
- continuità morfologica
- fruibilità visiva del paesaggio
- rischio di frammentazione percettiva

L'IIC interpreta il territorio come sistema evolutivo, non come somma di interventi isolati, definendo soglie oltre le quali si attivano meccanismi di revisione progettuale o mitigazione.

Il modello si struttura secondo una progressione integrata:

- 2D *Pixel* (GIS) → estensione e visibilità planimetrica
- 3D *Voxel* (BIM / *viewshed*) → dominanza e struttura volumetrica
- *Digital Twin* dinamico → valutazione cumulativa e predittiva

La componente quantitativa definisce le soglie di compatibilità, mentre la componente qualitativa interpreta gli effetti sistemici della trasformazione, orientando le strategie di mitigazione e pianificazione territoriale.

6.3.2.4 Occupazione Territoriale (OT) per pixel

L'Occupazione Territoriale Dinamica (OT-Dyn) misura il livello di trasformazione fisica e funzionale indotto dalle infrastrutture sul territorio, integrando la componente spaziale dell'occupazione del suolo con gli aspetti legati alla permeabilità ecologica e alla capacità del sistema territoriale di preservare le proprie funzioni ecosistemiche. A differenza di una valutazione esclusivamente quantitativa basata sulla superficie occupata, l'OT assume il territorio come una matrice ecologica dinamica, nella quale il consumo di suolo, la frammentazione degli *habitat* e la progressiva alterazione delle continuità ambientali vengono valutati in relazione alla loro evoluzione temporale.

L'interpretazione dei valori dell'Indice di Occupazione Territoriale consente di distinguere differenti condizioni di pressione sul sistema territoriale: livelli contenuti corrispondono a trasformazioni limitate e compatibili con la conservazione delle componenti sensibili, mentre valori intermedi evidenziano forme di utilizzo del suolo maggiormente significative, per le quali risultano necessarie misure di mitigazione e controllo. Valori più elevati rappresentano invece condizioni di maggiore criticità, associate alla riduzione della permeabilità ecologica, alla frammentazione territoriale e alla necessità di prevedere interventi compensativi e strategie di riequilibrio ambientale. La classificazione dei range dell'Occupazione Territoriale (OT) e la relativa interpretazione qualitativa sono riportate nella Tabella A.6 15 dell'Appendice 6, alla quale si rimanda per il dettaglio dei valori soglia e delle corrispondenti condizioni territoriali. L'indicatore non si limita alla misurazione della superficie occupata, ma valuta la trasformazione della matrice ecologica e la perdita di continuità ambientale.

Metodo di analisi

Il modello integra dati storici e scenario progettuale attraverso un approccio multi-scala:

- analisi GIS 2D pixel-based, per l'uso del suolo e la copertura territoriale;
- analisi 3D voxel-based, per la stratificazione volumetrica e la componente vegetazionale;
- Digital Twin territoriale dinamico, per la simulazione evolutiva degli scenari.

Il sistema confronta lo stato pregresso con quello progettuale, individuando variazioni in:

- copertura vegetale
- frammentazione degli *habitat*
- continuità dei corridoi ecologici

L'AI non sostituisce la valutazione progettuale, ma ne rafforza la componente predittiva, evidenziando traiettorie di trasformazione e possibili soglie critiche di saturazione.

Dimensione territoriale

Le soglie sono differenziate in funzione della sensibilità del contesto:

- Zona A: soglia massima 4% (massima tutela ecologica)
- Zone intermedie: valori progressivi coerenti con la pressione antropica
- Zona F: fino al 28% (contesti infrastrutturati o compromessi)

Questa articolazione garantisce il mantenimento di una quota minima di continuità ecologica anche nei contesti produttivi.

Il calcolo dell'OT si basa su un'integrazione di tre livelli:

- GIS 2D pixel-based → quantificazione dell'uso del suolo
- 3D voxel-based → struttura volumetrica e massa vegetazionale
- Digital Twin dinamico → simulazione evolutiva e scenari futuri

Dimensione qualitativa integrata

La valutazione include una componente interpretativa relativa a:

- continuità ecologica
- funzionalità dei corridoi ambientali
- qualità percettiva del paesaggio
- equilibrio tra infrastruttura e matrice naturale

La componente quantitativa definisce le soglie di occupazione territoriale, mentre la componente qualitativa interpreta gli effetti sulla struttura ecologica e paesaggistica, orientando le strategie di mitigazione e compensazione.

6.3.2.5 Integrazione metodologica

L'intero sistema si basa su una progressione integrata di modelli spaziali e computazionali, che combina analisi bidimensionale, tridimensionale e simulazione dinamica.

Le analisi 2D pixel-based costituiscono la base quantitativa del sistema, garantendo misurazioni oggettive, replicabili e comparabili tra scenari alternativi (Figura A.6 4, Appencice 6). Le simulazioni 3D *voxel-based*, integrate nel *Digital Twin*, introducono la dimensione volumetrica e prospettica della valutazione, rendendo possibile una lettura più aderente alla morfologia reale del territorio. Il livello di dettaglio (LOD)

viene modulato in modo gerarchico, concentrando la complessità computazionale nelle aree a maggiore sensibilità.

I range numerici e le soglie prestazionali trasformano il dato quantitativo in uno strumento decisionale interpretativo, superando la rigidità del valore assoluto e introducendo una lettura graduata dell'impatto. Il sistema è organizzato secondo un ciclo PDCA (*Plan–Do–Check–Act*), che garantisce:

- aggiornamento continuo del modello
- verifica periodica delle soglie
- adattamento progressivo delle scelte progettuali
- miglioramento iterativo delle strategie di mitigazione

L'integrazione tra KPI 2D/3D, modelli pixel/voxel, Digital Twin dinamico e strumenti di intelligenza artificiale configura un sistema valutativo ibrido, scientificamente fondato e operativamente interpretabile. Questo approccio consente di superare la separazione tra analisi quantitativa e interpretazione qualitativa, costruendo un quadro valutativo coerente, predittivo e leggibile dai diversi attori del processo decisionale (tecnici, progettisti e amministratori). Il risultato è un sistema integrato di valutazione paesaggistica capace di tradurre la complessità territoriale in uno strumento decisionale avanzato per la pianificazione e la gestione delle trasformazioni energetiche.

6.3.3 CAPACITÀ TERRITORIALE (CT), COME INDICE SINTETICO DI COMPATIBILITÀ PAESAGGISTICA

La valutazione della compatibilità tra infrastrutture energetiche e paesaggio richiede un indicatore capace di sintetizzare in modo coerente le molteplici componenti che caratterizzano il sistema territoriale. A tale scopo, il *framework* introduce la Capacità Territoriale (CT) come indice composito, finalizzato a rappresentare il grado di idoneità di un contesto ad accogliere nuove trasformazioni senza compromettere in modo significativo l'integrità paesaggistica, ecologica e insediativa.

Diversamente dagli approcci tradizionali, basati prevalentemente sulla classificazione prescrittiva delle aree e sulla verifica puntuale dei vincoli, la CT interpreta il territorio come un sistema dinamico, nel quale la compatibilità deriva dall'interazione tra caratteristiche morfologiche, percettive, ambientali, infrastrutturali ed energetiche. Le zone omogenee previste dal D.M. 1444/1968 costituiscono pertanto il quadro di riferimento territoriale entro il quale gli indicatori

assumono differenti pesi e soglie prestazionali, senza essere interpretate come categorie rigide o automaticamente escludenti.

La Capacità Territoriale è definita come un indice adimensionale normalizzato compreso tra 0 e 1, nel quale valori più elevati corrispondono a una maggiore capacità del territorio di assorbire nuove trasformazioni mantenendo livelli accettabili di qualità paesaggistica e funzionalità ecosistemica, mentre valori inferiori identificano contesti caratterizzati da elevata vulnerabilità o prossimi alla saturazione.

L'indice è costruito attraverso l'integrazione di un insieme coordinato di *Key Performance Indicators* (KPI), ciascuno dei quali descrive una specifica componente del sistema paesaggistico.

L'Indice di Dominanza Visiva (IDV) misura la rilevanza percettiva delle infrastrutture nel campo visivo dell'osservatore, considerando la loro relazione con la morfologia del territorio, lo skyline e i principali punti di osservazione. Esso rappresenta la componente direttamente associata alla percezione del cambiamento paesaggistico.

Il Parametro di Alterazione Paesaggistica (PAP) quantifica l'entità della trasformazione prodotta dall'intervento mediante il confronto tra lo stato antecedente e quello successivo alla realizzazione dell'opera, consentendo di stimare l'intensità della modifica percettiva e morfologica del contesto.

L'Occupazione Territoriale (OT) valuta l'incidenza fisica delle infrastrutture sul territorio, considerando non soltanto la superficie direttamente interessata, ma anche gli effetti di frammentazione, consumo di suolo e interferenza con la continuità ecologica.

L'Indice di Integrazione Comunitaria (IIC) introduce la dimensione sociale della compatibilità territoriale, considerando il grado di accettabilità, partecipazione e integrazione delle trasformazioni rispetto alle comunità locali e ai processi di *governance* territoriale.

L'integrazione di tali indicatori consente di superare valutazioni fondate su singoli parametri indipendenti, restituendo una misura sintetica della qualità complessiva del rapporto tra intervento e contesto. In questa prospettiva, la Capacità Territoriale non rappresenta un semplice indice descrittivo, ma un parametro prestazionale capace di supportare la comparazione tra scenari progettuali alternativi e di orientare le scelte localizzative verso configurazioni maggiormente compatibili con i caratteri del paesaggio (Figura A.6 5, Appendice 6).

La CT costituisce pertanto il punto di convergenza dell'intero sistema di valutazione paesaggistica sviluppato nel presente capitolo. Essa sintetizza le informazioni provenienti dai diversi KPI e fornisce una misura unitaria della compatibilità territoriale, mantenendo la possibilità di analizzare separatamente ciascuna componente che contribuisce alla valutazione complessiva.

La formalizzazione matematica dell'indice, la definizione dei pesi multicriteriali, delle soglie decisionali e delle procedure di calcolo saranno sviluppate nel §6.6, dedicato al sistema decisionale computazionale, mentre gli aspetti relativi alla verifica digitale e all'integrazione nel *Digital Twin* saranno affrontati nei paragrafi successivi.

6.4 CRITERIO DI AUTOSUFFICIENZA E RESILIENZA ENERGETICA

L'introduzione del criterio di Autosufficienza e Resilienza Energetica (ASE–RES) nel quadro teorico e metodologico della valutazione paesaggistica non costituisce un'estensione tematica, bensì una evoluzione strutturale del concetto stesso di paesaggio (Convenzione Europea del Paesaggio, 2000). La dimensione energetica ne rappresenta oggi una componente morfogenetica non più eludibile. L'energia, infatti, agisce come fattore ordinatore del territorio, influenzando infrastrutture, reti e dinamiche insediative, e assumendo quindi un ruolo strutturale nella definizione del paesaggio abitato.

In tale prospettiva, l'autosufficienza energetica non è interpretata come semplice indicatore prestazionale, ma come proprietà sistemica del territorio, coerente con le letture territorialiste e sistemiche del paesaggio (Magnaghi, 2010; Morin, 2005). Un sistema territoriale resiliente non massimizza una singola funzione produttiva, ma mantiene un equilibrio tra efficienza, adattabilità e continuità ecologica e culturale. L'ASE viene quindi definita come capacità del territorio di soddisfare il proprio fabbisogno energetico in coerenza con la propria struttura morfologica e con la propria capacità ecologica, evitando squilibri percettivi e funzionali.

Tale impostazione introduce un elemento correttivo fondamentale: l'autosufficienza non è un valore assoluto, ma deve essere sempre ponderata rispetto alla Capacità Territoriale (CT). In questa logica, un elevato livello di produzione energetica ottenuto mediante saturazione

visiva o compromissione di ambiti sensibili non rappresenta un esito virtuoso, ma una forma di squilibrio paesaggistico sistemico.

6.4.1 AUTOSUFFICIENZA COME PROPRIETÀ SISTEMICA DEL TERRITORIO

L'integrazione della dimensione energetica nella lettura del paesaggio implica una ridefinizione ontologica del suo statuto. Il paesaggio, inteso come esito delle interazioni tra fattori naturali e antropici (Convenzione Europea del Paesaggio, 2000), incorpora oggi l'energia come principale forza morfogenetica contemporanea, in grado di determinare configurazioni spaziali e gerarchie infrastrutturali.

Il concetto di ASE si colloca all'interno della letteratura sui sistemi socio-ecologici (Folke, 2006; Walker & Salt, 2006), secondo cui la resilienza non coincide con la massimizzazione della produzione, ma con la capacità del sistema di mantenere equilibrio tra trasformazione e stabilità. Ne deriva che la produzione energetica deve risultare proporzionata alla domanda locale, alla struttura morfologica e alla capacità ecologica del territorio. Come condizione strutturale del paesaggio abitato, coerente con la prospettiva territorialista (Magnaghi, 2010), secondo cui la sostenibilità si fonda su cicli locali integrati. Tuttavia, il modello introduce una condizione di coerenza: l'ASE è sempre subordinata alla CT, evitando che l'autonomia energetica produca effetti di saturazione visiva o frammentazione percettiva.

6.4.2 RESILIENZA COME STABILITÀ DINAMICA

La Resilienza Energetica (RES) è definita, in continuità con Holling (1973) e Meerow et al. (2016), come la capacità del sistema territoriale di assorbire perturbazioni – climatiche, infrastrutturali o di domanda – mantenendo inalterata la propria identità paesaggistica e funzionale. In termini spaziali, la resilienza si traduce nella transizione da sistemi energetici centralizzati a configurazioni distribuite e adattive, con effetti diretti sulla riduzione della pressione infrastrutturale. L'introduzione di sistemi di accumulo (ACC) e flessibilità (FLE) contribuisce a ridurre la necessità di sovradimensionamento degli impianti, mitigando l'impatto cumulativo e visivo sul paesaggio (Lund et al., 2017).

Ne deriva che la resilienza non è soltanto una proprietà tecnica del sistema energetico, ma un fattore di riequilibrio paesaggistico, in grado

di ridurre la frammentazione e migliorare la continuità delle matrici ambientali.

6.4.3 FLESSIBILITÀ E ACCUMULO: GIUSTIFICAZIONE SISTEMICA

I parametri FLE (flessibilità) e ACC (accumulo) derivano dalla letteratura sulle *smart grids* e sui sistemi energetici intelligenti (Lund et al., 2017). La flessibilità consente la modulazione temporale tra produzione e domanda, mentre l'accumulo garantisce la continuità operativa in presenza di fonti intermittenti.

Nel modello proposto, tali variabili assumono una valenza indirettamente paesaggistica: maggiore flessibilità riduce la necessità di impianti rigidi e sovradimensionati, mentre sistemi di accumulo distribuiti contribuiscono a contenere la pressione cumulativa sugli ambiti sensibili. FLE e ACC diventano quindi strumenti di ottimizzazione territoriale dell'impatto energetico, oltre che indicatori tecnici.

6.4.4 INTEGRAZIONE NEL DIGITAL TWIN

L'integrazione dei parametri ASE–RES nel *Digital Twin* territoriale si inserisce nella prospettiva della conoscenza predittiva (Batty, 2018). Il Digital Twin non è una rappresentazione statica del territorio, ma un ambiente computazionale dinamico di simulazione e verifica, in cui ogni unità spaziale incorpora attributi energetici, paesaggistici ed ecologici.

Attraverso simulazioni multi-temporali, il modello consente di anticipare le risposte del sistema paesaggio alle variazioni energetiche, trasformando la pianificazione da processo normativo lineare a sistema adattivo e iterativo di supporto decisionale. Tale approccio si colloca nell'ambito dell'*urban analytics* e della modellazione predittiva dei sistemi urbani complessi.

6.4.5 FONDAMENTO COSTITUZIONALE E COERENZA NORMATIVA

Il principio di tutela del paesaggio sancito dall'Art. 9 della Costituzione italiana deve essere interpretato in coerenza con gli obiettivi di transizione energetica. L'autosufficienza energetica, se correttamente integrata, non si pone in antitesi alla tutela paesaggistica, ma può costituirne un fattore di rafforzamento strutturale, riducendo la necessità di infrastrutture centralizzate e favorendo una distribuzione coerente con la morfologia territoriale.

Il modello supera la dicotomia tra tutela e sviluppo, configurando un sistema prestazionale in cui la compatibilità paesaggistica è misurabile e negoziabile entro soglie esplicite. In tale quadro, il paesaggio assume una duplice natura di infrastruttura culturale ed energetica, mentre ASE e RES definiscono le condizioni di equilibrio del sistema territoriale.

La pianificazione viene così reinterpretata come processo adattivo e quantitativamente verificabile, in cui il *Digital Twin* funge da dispositivo epistemologico di controllo e simulazione, riducendo l'incertezza decisionale e migliorando la qualità delle scelte progettuali.

6.5 CRITERIO DI VERIFICABILITÀ, MONITORAGGIO E ADATTIVITÀ

6.5.1 GOVERNANCE MULTILIVELLO E PRINCIPIO DI VERIFICABILITÀ

Il criterio di verificabilità costituisce il dispositivo fondativo del sistema di monitoraggio proposto, garantendo che le informazioni relative agli impatti delle infrastrutture energetiche e ai relativi *Key Performance Indicators* (KPI) siano tracciabili, confrontabili e accessibili ai diversi attori della pianificazione. Tale principio risponde all'esigenza di ridurre l'asimmetria informativa tra soggetti proponenti, amministrazioni pubbliche e organismi di tutela, rendendo il processo decisionale esplicitamente documentato e verificabile. Il modello si articola secondo una struttura di *governance* multilivello coerente con le scale spaziali di analisi:

- Macro: definizione di soglie prestazionali e indirizzi strategici sovraordinati;
- Meso: coordinamento intercomunale e validazione degli scenari simulati nel *Digital Twin*;
- Micro: valutazione puntuale dei progetti attraverso KPI territoriali e verifiche voxel-based.

In questa configurazione, la verificabilità opera come meccanismo di coerenza tra scale, assicurando che le trasformazioni locali siano compatibili con gli obiettivi territoriali complessivi e con la capacità di carico paesaggistica. Il *Digital Twin* costituisce l'infrastruttura tecnica che consente tale integrazione, rendendo misurabili e confrontabili le decisioni progettuali.

6.5.2 TRACCIABILITÀ DEI DATI E STRUTTURA INFORMATIVA DINAMICA

Il sistema di monitoraggio si fonda sulla tracciabilità completa delle informazioni e sulla loro aggiornabilità continua. Ogni KPI è associato a metadati relativi a origine, metodo di calcolo, scala spaziale e timestamp, consentendo la ricostruzione della genesi informativa del dato. Tale impostazione trasforma il dato tecnico in un elemento verificabile del processo amministrativo digitale, riducendo margini di discrezionalità non documentata e rafforzando la trasparenza decisionale. Il *Digital Twin* opera come archivio dinamico, integrando dati GIS, BIM e sensori IoT, aggiornando il modello solo in presenza di variazioni significative del sistema territoriale.

6.5.3 SISTEMA DI KPI MULTIDIMENSIONALI

Il sistema di verificabilità si basa su KPI integrati che descrivono il territorio secondo quattro dimensioni principali:

- Energetica: Autosufficienza Energetica (ASE), Resilienza Energetica (RES), Flessibilità (FLE), Capacità di Accumulo (ACC);
- Percettiva e territoriale: Indice di Dominanza Visiva (IDV), Alterazione Paesaggistica (PAP), Occupazione Territoriale (OT);
- Sociale: accettabilità, partecipazione e integrazione comunitaria (IIC);
- Culturale e ambientale: compatibilità paesaggistica, continuità ecologica e tutela dei beni storici.

Questa struttura consente una valutazione integrata e comparabile degli interventi, evidenziando eventuali trade-off tra prestazioni energetiche e qualità paesaggistica. Il sistema consente inoltre la simulazione di scenari alternativi ("*what-if analysis*") all'interno del Digital Twin.

6.5.4 SOGLIE PRESTAZIONALI E LOGICA ADATTIVA

Ogni KPI è associato a soglie di riferimento differenziate per scala territoriale (Macro, Meso, Micro) e per zone omogenee. Il superamento delle soglie non determina automaticamente l'inammissibilità dell'intervento, ma attiva un meccanismo di revisione progettuale. Tale meccanismo include:

- ricalcolo dei KPI aggregati;
- simulazioni alternative nel *Digital Twin*;

- ridefinizione di layout, densità e configurazioni morfologiche;
- attivazione di strategie di mitigazione.

Il modello assume quindi una logica adattiva in cui il superamento della soglia rappresenta un "obbligo di ottimizzazione" piuttosto che un vincolo assoluto. In questo modo si integra rigore quantitativo e discrezionalità tecnica motivata.

6.5.5 INTEGRAZIONE DIGITALE: CDE, PDCA E DIGITAL TWIN

L'implementazione del sistema di monitoraggio è resa operativa attraverso l'integrazione di un CDE, inteso come infrastruttura digitale unitaria per la gestione, condivisione e aggiornamento dei dati territoriali, dei modelli informativi e delle simulazioni previsionali. Il sistema è strutturato secondo il ciclo PDCA (*Plan–Do–Check–Act*), che consente di organizzare il processo decisionale secondo una logica iterativa e adattativa, basata sul monitoraggio continuo delle prestazioni e sulla progressiva revisione delle strategie pianificatorie.

In particolare, la fase di verifica e monitoraggio (*Check*) costituisce il momento di raccolta e interpretazione degli indicatori territoriali, mentre la successiva fase di adattamento (*Act*) consente di aggiornare scenari, criteri di intervento e modalità di *governance* in funzione delle dinamiche osservate. In tale configurazione, il *Digital Twin* rappresenta l'ambiente operativo di integrazione tra dati reali, modelli previsionali e indicatori di performance, permettendo una valutazione dinamica degli impatti e una gestione predittiva delle trasformazioni territoriali.

All'interno del *Digital Twin*, i *Key Performance Indicators* (KPI) assumono una funzione di collegamento tra dimensione spaziale, sistema energetico, ciclo temporale e componenti sociali del processo di trasformazione. Essi consentono di monitorare le prestazioni degli interventi attraverso indicatori riferiti alla qualità percettiva dello spazio, alla capacità energetica del territorio, alla reversibilità dei processi e al livello di integrazione con le comunità locali. La struttura dei KPI, le relative scale di misurazione e il ruolo assunto all'interno del modello digitale sono riportati nella Tabella A.6 14 dell'Appendice 6, alla quale si rimanda per il dettaglio della matrice di integrazione nel *Digital Twin*.

6.5.6 FORMALIZZAZIONE NELLE NTA COME DISPOSITIVO ADATTIVO

Il sistema di *Key Performance Indicators* (KPI) viene recepito all'interno delle Norme Tecniche di Attuazione (NTA) come norma prestazionale, trasformando gli indicatori da strumenti descrittivi a requisiti cogenti per l'accesso e la valutazione dei titoli autorizzativi. Tale passaggio consolida il ruolo del *Digital Twin* come ambiente istituzionale di verifica e negoziazione tra transizione energetica e tutela paesaggistica.

In questo quadro, le NTA non costituiscono un semplice dispositivo regolativo statico, ma un'infrastruttura normativa adattiva, capace di aggiornarsi in funzione dell'evoluzione dei dati territoriali, delle tecnologie e dei quadri pianificatori. La pianificazione assume così una natura iterativa e predittiva, in cui la valutazione ex ante è costantemente confrontata con simulazioni e scenari derivati dal *Digital Twin*.

L'integrazione dei KPI nel sistema normativo consente di esplicitare soglie prestazionali verificabili e comparabili, garantendo coerenza tra livelli decisionali differenti e riducendo l'opacità interpretativa nei processi autorizzativi. In tal senso, il modello supera la distinzione tradizionale tra norma e strumento di analisi, configurando un unico ecosistema informativo integrato.

Il *Digital Twin* diviene quindi non solo strumento tecnico di simulazione, ma dispositivo regolativo operativo, attraverso il quale la trasformazione territoriale è continuamente monitorata, validata e riallineata agli obiettivi di sostenibilità paesaggistica ed energetica.

6.5.7 SINTESI OPERATIVA DEL SISTEMA

Il criterio di verificabilità configura un sistema integrato di *governance* territoriale basato su dati, simulazioni e soglie prestazionali. L'integrazione tra KPI multidimensionali, *Digital Twin* e struttura multilivello consente di trasformare la pianificazione delle infrastrutture energetiche da processo statico a sistema adattivo e predittivo. In questo quadro, la tutela del paesaggio e la transizione energetica non sono configurate come obiettivi conflittuali, ma come dimensioni complementari di un unico sistema di valutazione prestazionale, in cui la compatibilità è misurabile, verificabile e progressivamente ottimizzabile.

6.6 SISTEMA DECISIONALE COMPUTAZIONALE E FORMALIZZAZIONE DEI KPI

L'efficacia di un sistema di pianificazione prestazionale dipende non solo dalla definizione di indicatori affidabili, ma anche dalla capacità di trasformare tali indicatori in un processo decisionale formalizzato, riproducibile e verificabile. A tal fine, il *framework* proposto introduce un sistema decisionale computazionale che integra gli indicatori territoriali, paesaggistici, energetici e sociali in un modello multicriteriale capace di supportare le decisioni autorizzative e progettuali attraverso il *Digital Twin* territoriale.

L'approccio supera la tradizionale valutazione basata su verifiche indipendenti dei singoli parametri, proponendo una struttura gerarchica nella quale ogni indicatore contribuisce, con peso differenziato, alla determinazione della compatibilità complessiva dell'intervento. Il processo decisionale non è pertanto fondato su una successione di controlli normativi isolati, ma sulla valutazione integrata delle prestazioni territoriali dell'infrastruttura.

6.6.1 STRUTTURA GERARCHICA DEI KEY PERFORMANCE INDICATORS

Il sistema organizza i *Key Performance Indicators* (KPI) secondo una struttura gerarchica articolata in tre livelli funzionali.

Il primo livello comprende gli indicatori primari, direttamente derivati da dati osservabili o misurabili attraverso modelli GIS, BIM, rilievi territoriali e sistemi *Digital Twin*. A questa categoria appartengono, tra gli altri, l'Indice di Dominanza Visiva (IDV), il Parametro di Alterazione Paesaggistica (PAP), l'Occupazione Territoriale (OT), l'Autosufficienza Energetica (ASE), la Resilienza Energetica (RES), la Capacità di Accumulo (ACC), la Flessibilità di Rete (FLE) e l'Indice di Integrazione Comunitaria (IIC).

Il secondo livello è costituito dagli indicatori derivati, ottenuti mediante l'aggregazione funzionale di più KPI appartenenti a differenti domini disciplinari. Tali indicatori consentono di rappresentare fenomeni complessi non direttamente osservabili, quali la qualità complessiva dell'inserimento paesaggistico, la resilienza sistemica o il grado di sostenibilità dell'intervento.

Il terzo livello è rappresentato dalla Capacità Territoriale (CT), definita come indice sintetico composito che integra l'insieme delle dimensioni prestazionali del sistema. La CT costituisce il parametro finale

utilizzato dal modello decisionale per valutare la compatibilità complessiva delle trasformazioni territoriali.
Questa organizzazione gerarchica riduce la complessità informativa senza compromettere la tracciabilità degli indicatori originari, consentendo la completa ricostruzione del percorso che conduce alla decisione finale.

6.6.2 MODELLO MULTICRITERIALE DI VALUTAZIONE

L'integrazione dei diversi indicatori avviene mediante un modello multicriteriale basato sulla normalizzazione preventiva dei KPI e sulla successiva ponderazione delle singole componenti.
Indicando con KPIiKPI_iKPIi il valore normalizzato del generico indicatore e con wiw_iwi il relativo coefficiente di importanza, la valutazione complessiva può essere espressa come:

$$\mathbf{CT = \sum w_i \cdot KPI_i}$$

con

$$n \sum i{-}n\ w_i = 1$$

dove i coefficienti w_i rappresentano il peso attribuito a ciascuna dimensione prestazionale.
La normalizzazione dei parametri consente di ricondurre indicatori eterogenei, caratterizzati da differenti unità di misura, ad una scala adimensionale compresa tra 0 e 1: $KPI^*_i = X_i - X\ min\ /\ Xmax - Xmin$
garantendo confrontabilità tra variabili energetiche, paesaggistiche, ambientali e sociali.
I coefficienti di ponderazione possono essere definiti attraverso procedure multicriteriali (AHP, *Entropy Weight Method*, *Delphi*) oppure derivati direttamente dalle priorità stabilite dagli strumenti di pianificazione territoriale.
In questa configurazione, la decisione finale non dipende dal valore assoluto di un singolo indicatore, bensì dall'equilibrio complessivo tra tutte le componenti del sistema.

6.6.3 FORMALIZZAZIONE DELLA CAPACITÀ TERRITORIALE

La Capacità Territoriale (CT) rappresenta l'indicatore sintetico del *framework* e misura la capacità di un determinato ambito territoriale di accogliere nuove infrastrutture energetiche senza compromettere l'equilibrio paesaggistico, ambientale, energetico e sociale.
Nel modello proposto la CT viene formalizzata come funzione multidimensionale:

$$CT = f\,(IDV, PAP, OT, ASE, RES, FLE, ACC, IIC)$$

oppure, nella forma pesata,

$$CT = w_1\,IDV + w_2\,PAP + w_3\,OT + w_4\,ASE + w_5\,RES + w_6\,FLE + w_7\,ACC + w_8\,IIC$$

dove i coefficienti di ponderazione possono assumere valori differenti in funzione della tipologia territoriale, della sensibilità paesaggistica e degli obiettivi di pianificazione.

La struttura della funzione consente di modificare dinamicamente i pesi senza alterare l'architettura generale del modello, rendendo il sistema adattabile ai differenti contesti regionali e ai successivi aggiornamenti normativi.

In tale prospettiva, la Capacità Territoriale non rappresenta un semplice indice descrittivo, bensì il risultato computazionale dell'intero processo di valutazione.

6.6.4 SOGLIE DECISIONALI E CLASSIFICAZIONE DEGLI INTERVENTI

Il valore della CT viene confrontato con soglie prestazionali che determinano l'esito del processo decisionale. Il *framework* distingue tre differenti classi di compatibilità.

Interventi ammissibili, caratterizzati da valori di CT superiori alla soglia di accettabilità e pienamente coerenti con gli obiettivi paesaggistici ed energetici.

Interventi condizionati, per i quali il superamento di specifiche soglie richiede l'attivazione di strategie di mitigazione, modifiche progettuali o simulazioni aggiuntive nel *Digital Twin*.

Interventi non ammissibili, nei quali il livello di alterazione territoriale eccede la capacità di compensazione del sistema, rendendo incompatibile l'intervento rispetto agli obiettivi prestazionali definiti dalle Norme Tecniche di Attuazione.

Questa impostazione sostituisce la tradizionale logica dicotomica conforme/non conforme con un modello adattivo orientato all'ottimizzazione progressiva delle soluzioni progettuali.

6.6.5 AUTOMAZIONE DEL PROCESSO DECISIONALE NEL DIGITAL TWIN

Il modello multicriteriale trova la propria implementazione operativa all'interno del *Digital Twin* territoriale, che assume il ruolo di motore computazionale del sistema decisionale.

Il processo si articola secondo una sequenza iterativa composta da cinque fasi:

1. acquisizione automatica dei dati provenienti da GIS, BIM, sensori IoT e banche dati territoriali;
2. aggiornamento dinamico dei KPI e ricalcolo della Capacità Territoriale;
3. simulazione di scenari alternativi mediante algoritmi predittivi e analisi "*what-if*";
4. confronto dei risultati con le soglie prestazionali definite dalle NTA;
5. restituzione automatica degli esiti attraverso dashboard decisionali e report di conformità.

L'automazione non sostituisce il giudizio tecnico dell'amministrazione competente, ma ne incrementa trasparenza, riproducibilità e verificabilità, riducendo la discrezionalità non motivata e garantendo la completa tracciabilità del processo autorizzativo.

6.6.6 SINTESI DEL SISTEMA DECISIONALE

La formalizzazione computazionale proposta rappresenta il passaggio metodologico che consente di trasformare il *framework* prestazionale in un sistema operativo di supporto alle decisioni. L'integrazione tra KPI gerarchici, modelli multicriteriali, funzione di Capacità Territoriale e *Digital Twin* rende possibile una valutazione quantitativa, adattiva e verificabile della compatibilità delle infrastrutture energetiche.

In questa prospettiva, il *Digital Twin* evolve da semplice ambiente di simulazione a *Decision Support System* (DSS) territoriale, capace di integrare dati multidisciplinari, automatizzare la verifica delle prestazioni e supportare processi autorizzativi fondati su criteri trasparenti, replicabili e scientificamente motivati.

6.7 INTEGRAZIONE TRASVERSALE DEI LIVELLI INFORMATIVI

L'integrazione trasversale dei livelli informativi costituisce il principio di coerenza multi-scala del framework proposto, consentendo la connessione tra dimensione territoriale, infrastrutturale e impiantistica all'interno dell'ecosistema BIM–GIS–*Digital Twin*. Tale struttura garantisce la continuità informativa necessaria per la valutazione integrata dei KPI paesaggistici, energetici e di circolarità.

Elemento chiave di questa integrazione è la relazione tra *Level of Development* (LOD) e *Level of Information Need* (LOIN), che consente di

modulare il grado di dettaglio informativo in funzione della sensibilità del contesto territoriale. In aree ad alta vulnerabilità paesaggistica, il livello informativo si estende oltre la geometria includendo attributi materici, ambientali e percettivi necessari alla valutazione degli impatti nel *Digital Twin*.

La piena interoperabilità tra BIM e GIS, supportata dallo standard IFC, consente la traduzione bidirezionale tra oggetti infrastrutturali e unità territoriali (*pixel/voxel*), rendendo possibile la coerenza tra scala micro-progettuale e scala macro-territoriale.

In questo quadro, il *Digital Twin* opera come infrastruttura integrata di simulazione e verifica, in cui i dati generati alla scala dell'impianto vengono aggregati e restituiti a livello territoriale per la valutazione degli impatti cumulativi e della capacità territoriale residua.

Il processo garantisce un ciclo decisionale continuo tra acquisizione, simulazione e validazione, assicurando la coerenza tra progetto, territorio e sistema energetico e costituendo il ponte operativo tra modellazione digitale e pianificazione paesaggistica.

6.8 INTEGRAZIONE OPERATIVA NEI MODULI M1–M6

Il framework metodologico proposto nel Capitolo 6 si articola in un insieme di moduli operativi (M1–M6) che costituiscono la struttura funzionale per la valutazione integrata del territorio e delle infrastrutture energetiche. L'obiettivo dell'integrazione è garantire coerenza tra dimensione paesaggistica, energetica, circolare e di governance, attraverso un sistema informativo interoperabile basato su *Digital Twin*, BIM e GIS.

L'approccio modulare consente di superare la frammentazione disciplinare tradizionale, trasformando la valutazione territoriale in un processo multilivello, verificabile e adattivo (Figura A.6 6, Appendice 6).

6.8.1 STRUTTURA FUNZIONALE DEI MODULI M1–M6

I moduli operano come domini analitici specializzati, ciascuno dedicato a una specifica dimensione del sistema territoriale:

- M1 – Paesaggio e percezione visiva: analisi dell'impatto visivo e morfologico attraverso KPI IDV, PAP e OT e simulazioni voxel-based.
- M2 – Sistema energetico e resilienza: valutazione di ASE, RES, FLE e ACC, con simulazioni dinamiche multi-scenario.

- M3 – Circolarità e ciclo di vita: integrazione di *Material Passport*, durabilità e requisiti di reversibilità infrastrutturale.
- M4 – Verificabilità e adattività: gestione dei dati tramite CDE, LOD/LOIN e dashboard di controllo prestazionale.
- M5 – *Governance* e regolazione: connessione tra KPI, PDCA e strumenti normativi (NTA e regimi autorizzativi).
- M6 – Ottimizzazione progettuale: generazione e confronto di scenari alternativi per la riduzione degli impatti e l'ottimizzazione energetica.

La struttura non è gerarchica, ma interoperabile, ogni modulo produce *output* che alimentano il sistema complessivo di valutazione.

6.8.2 INTERAZIONI TRA DIMENSIONI PAESAGGISTICHE, ENERGETICHE E CIRCOLARI

L'efficacia del *framework* deriva dalle interazioni tra moduli piuttosto che dalle singole componenti.

Le prestazioni energetiche (M2) possono essere incrementate senza incremento proporzionale dell'impatto visivo (M1), attraverso strategie di ridistribuzione spaziale e ottimizzazione geometrica. Analogamente, la circolarità infrastrutturale (M3) contribuisce alla riduzione dell'impronta territoriale e al miglioramento della resilienza sistemica.

Tali relazioni evidenziano il carattere sistemico del modello, in cui i KPI non agiscono come variabili indipendenti ma come elementi interconnessi di un unico campo decisionale.

6.8.3 CICLO ADATTIVO DI GOVERNANCE

Il *framework* si integra in un ciclo decisionale di tipo adattivo, strutturato secondo la logica PDCA:

- *Plan*: definizione dei KPI, soglie e scenari progettuali
- *Do*: acquisizione dati da BIM, GIS e sensori IoT
- *Check*: simulazione e validazione nel *Digital Twin*
- *Act*: aggiornamento progettuale e regolativo

Questo ciclo consente una gestione continua delle prestazioni territoriali, in cui il monitoraggio non è un'attività *ex post* ma parte integrante del processo progettuale.

6.8.4 REPLICABILITÀ E SCALABILITÀ DEL MODELLO

Il sistema M1–M6 è progettato per essere replicabile e scalabile su diverse scale territoriali. La sua architettura interoperabile consente:

- applicazione da scala locale (impianti singoli, CER) a scala regionale;
- adattamento dei KPI in funzione del contesto;
- coerenza informativa tra livelli decisionali differenti.

L'uso di *standard* aperti (IFC, *City*GML) garantisce la continuità informativa tra modelli BIM e sistemi GIS, permettendo una traduzione diretta tra scala infrastrutturale e scala territoriale.

6.8.5 SINTESI OPERATIVA DEL FRAMEWORK

Il modello M1–M6 definisce un sistema integrato di valutazione territoriale in cui:

- la dimensione spaziale è rappresentata dai KPI percettivi (M1),
- la dimensione energetica dai parametri di resilienza e autosufficienza (M2),
- la dimensione temporale dalla circolarità e reversibilità (M3),
- la dimensione informativa dalla verificabilità e dal *Digital Twin* (M4),
- la dimensione decisionale dalla *governance* normativa (M5),
- la dimensione progettuale dall'ottimizzazione degli scenari (M6).

Questa integrazione consente di trasformare il paesaggio da vincolo esterno a componente attiva del processo progettuale, rendendo la pianificazione energetica un sistema misurabile, adattivo e verificabile. Il *framework* M1–M6 costituisce quindi un sistema integrato di supporto alle decisioni per la transizione energetica e la tutela paesaggistica. La sua efficacia risiede nella capacità di connettere dati, modelli e *governance* in un ambiente digitale coerente, dove la valutazione non è statica ma continuamente aggiornata attraverso processi simulativi e adattivi.

7 | SETTIMA PARTE

STRATEGIE: DALLA RICERCA ALL'APPLICAZIONE

7.1 CONTESTO METODOLOGICO: DAI MODULI M1–M6 ALLA SPERIMENTAZIONE OPERATIVA

Il Capitolo VII rappresenta la fase di integrazione tra la costruzione metodologica sviluppata nei capitoli precedenti e la sua interpretazione in chiave applicativa. Dopo la definizione del *framework* analitico e degli strumenti di valutazione (Capitolo VI), il presente capitolo esplora le modalità attraverso cui tale struttura può essere organizzata in un sistema coerente di simulazione, validazione e potenziale trasferimento operativo.

La transizione energetica territoriale richiede infatti un approccio integrato, in cui strumenti normativi, modelli digitali e processi decisionali siano trattati come componenti interdipendenti di un unico sistema. In questa prospettiva, la ricerca sviluppata non si limita alla definizione di indicatori o modelli teorici, ma propone una struttura metodologica orientata alla simulazione e alla valutazione multi-scala dei sistemi energetico-territoriali.

Il capitolo si colloca quindi come livello di sintesi operativa del *framework* M1–M6, nel quale i risultati analitici vengono reinterpretati all'interno di scenari simulativi e di possibili configurazioni applicative. L'obiettivo non è descrivere interventi reali, ma verificare la coerenza interna del modello e la sua capacità di rappresentare alternative progettuali in contesti territoriali differenti.

Il passaggio dalla modellazione teorica alla sperimentazione operativa delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) si fonda sull'integrazione tra strumenti normativi, moduli metodologici e infrastrutture digitali, configurando un ecosistema decisionale coerente con il paradigma del *Research by Design*.

In tale quadro, il sistema è strutturato su tre componenti interdipendenti: (i) lo strumento normativo, costituito da NTA energetico-circolari e documenti di pianificazione (PEAR, PAESC), che evolvono da vincoli statici a database regolativi adattivi; (ii) i moduli M1–M6, che operano come processore metodologico per la valutazione prestazionale multi-dimensionale; (iii) lo *spin-off* LSET, che funge da interfaccia applicativa tra simulazione, validazione e supporto decisionale.

I moduli M1–M6 costituiscono la struttura analitica del *framework* e traducono i KPI energetici, ambientali e paesaggistici in criteri operativi verificabili:

● M1 – Paesaggio e percezione visiva: definisce indicatori di qualità percettiva (IDV, PAP, OT), integrando la dimensione estetico-spaziale come parametro prestazionale attivo e non residuale.
● M2 – Capacità energetica e resilienza: traduce obiettivi di autosufficienza e flessibilità in configurazioni energetiche integrate (storage, P2G, sistemi ibridi), garantendo coerenza tra performance tecnica e qualità territoriale.
● M3 – Circolarità infrastrutturale: assicura modularità, reversibilità e riduzione del debito ambientale, introducendo una logica di ciclo di vita esteso delle infrastrutture energetiche.
● M4 – Verificabilità e adattività: integra *Digital Twin*, GIS-BIM e IoT per simulazione e controllo dinamico delle prestazioni, abilitando scenari predittivi e aggiornamento continuo dei modelli.
● M5 – *Governance* e regole autorizzative: traduce le NTA in soglie prestazionali adattive, integrando vincoli normativi e requisiti ambientali in un sistema regolativo flessibile.
● M6 – Ottimizzazione progettuale: agisce come motore generativo multi-scenario, risolvendo *trade-off* tra energia, paesaggio e infrastruttura attraverso modelli algoritmici e simulativi.

L'integrazione dei moduli trasforma il *framework* da tassonomia descrittiva a sistema decisionale iterativo, in cui la progettazione diventa un processo di apprendimento continuo. In questa logica, anche la dimensione paesaggistica ed estetica viene internalizzata come variabile strutturale del sistema decisionale, contribuendo alla definizione di configurazioni energetiche territorialmente coerenti.

Lo *spin-off* LSET rappresenta la componente di trasferimento operativo del sistema, fungendo da interfaccia tra ricerca e applicazione. Le sue funzioni principali comprendono: validazione delle simulazioni, mediazione tra modello e territorio, standardizzazione delle procedure e supporto alla replicabilità delle soluzioni CER.

Il sistema nel suo complesso consente di integrare strumenti normativi (PEAR, PAESC, NTA), moduli metodologici (M1–M6) e infrastrutture digitali (*Digital Twin*, GIS, CDE), generando un ciclo continuo di simulazione, verifica e aggiornamento. Ne deriva un modello in cui la transizione energetica è interpretata come processo di trasformazione sistemica del territorio, e non come semplice implementazione tecnologica.

Il presente capitolo segna il passaggio dalla formalizzazione dei criteri prestazionali (§6.1–6.2) alla loro validazione operativa. I casi studio, pur impostati come scenari simulativi, sono costruiti come laboratori territoriali di verifica, finalizzati a testare la coerenza tra KPI, moduli M1–M6 e configurazioni CER. L'approccio adottato è sistemico e multidimensionale e integra tre livelli di rappresentazione territoriale: (i) zone omogenee A–F della pianificazione vigente; (ii) stratificazione funzionale dei layer CER (*Underground*, *Land*, *Above Land*); (iii) variabili morfologiche, infrastrutturali e ambientali.
Ne deriva un insieme di contesti non descrittivi, ma operativi e comparativi, progettati per abilitare la verifica prestazionale e la trasferibilità del modello.

7.1.1 CRITERI DI SELEZIONE DEI CONTESTI

La selezione dei casi è guidata da quattro variabili strutturanti:

- Quadro urbanistico (zone A–F): garantisce la coerenza con strumenti pianificatori e livelli di tutela differenziati.
- Morfologia territoriale: descrive la relazione tra forma del territorio, infrastrutture e potenziale energetico.
- Densità insediativa: regola la pressione antropica e la disponibilità di superfici per l'integrazione delle CER.
- Vincoli ambientali e paesaggistici: definiscono i limiti e le opportunità di inserimento delle infrastrutture energetiche.

Questi criteri consentono di costruire scenari confrontabili, utili alla calibrazione delle soglie prestazionali e alla validazione dei KPI.

7.1.2 CLASSIFICAZIONE DEI CONTESTI

I contesti sono organizzati in cinque tipologie territoriali funzionali:

- Urbano: alta densità e forte vincolo paesaggistico; prevalenza di soluzioni integrate e invisibili (*Above Land*).
- Periurbano: sistema di transizione, adatto a configurazioni ibride e adattive.
- Agrario: disponibilità estensiva di suolo; integrazione tra produzione energetica e funzioni ecosistemiche.
- Infrastrutturale: corridoi lineari e nodi energetici; ottimizzazione delle interazioni rete–territorio.
- Costiero/Offshore: contesti ad alta specificità ambientale, con forte dipendenza da condizioni ecologiche e idrodinamiche.

La classificazione non è descrittiva ma funzionale alla parametrizzazione dei KPI per tipologia territoriale, garantendo comparabilità tra scenari.

7.1.3 KPI E SOGLIE PRESTAZIONALI

I casi studio sono valutati attraverso un set di KPI multidimensionali (IDV, PAP, OT, ASE, RES, ACC, FLE, IIC), selezionati per rappresentare in modo integrato le dimensioni:

- ambientale e paesaggistica
- energetica e infrastrutturale
- sociale e partecipativa
- adattiva e sistemica

La struttura KPI consente di trasformare il confronto tra contesti in una valutazione quantitativa e replicabile delle performance CER, in coerenza con le principali strategie e normative europee.

L'applicazione dei KPI ai contesti simulativi permette di anticipare criticità, ottimizzare configurazioni e validare il modello multilivello proposto nel Capitolo VI, consolidando un approccio *evidence-based* alla progettazione delle CER.

7.2 OPERATIONAL ACTIVATION OF THE FRAMEWORK

L'operativizzazione del *framework* M1–M6 costituisce la transizione dalla struttura analitica del modello alla sua configurazione dinamica di funzionamento. In questa fase, i moduli non operano come unità sequenziali o indipendenti, ma come un sistema co-attivo integrato, in cui l'elaborazione dei dati territoriali avviene in parallelo e secondo logiche di interdipendenza funzionale. Il *framework* si configura pertanto come un ambiente decisionale multilivello, nel quale input geografici, energetici, normativi e prestazionali vengono simultaneamente processati dai diversi moduli, generando un ciclo continuo di simulazione, verifica e riallineamento progettuale. L'unità del sistema non risiede nei singoli moduli, ma nel loro coordinamento emergente, governato da *feedback* iterativi e da vincoli prestazionali condivisi (KPI).

7.2.1 ATTIVAZIONE SIMULTANEA DEI MODULI

L'elemento strutturale del *framework* è la simultaneità operativa dei moduli M1–M6. Ogni modulo viene attivato in parallelo a partire dallo stesso set informativo iniziale, ma secondo prospettive analitiche

differenti: percettiva (M1), energetica (M2), materiale (M3), digitale (M4), normativa (M5) e ottimizzativa (M6).
Questa configurazione esclude ogni logica sequenziale, sostituendola con una struttura co-elaborativa, nella quale i risultati parziali di ciascun modulo influenzano iterativamente gli altri. Ne deriva un sistema non lineare, in cui la conoscenza progettuale emerge dall'interazione tra domini eterogenei.

7.2.2 WORKFLOW INTEGRATO E CICLO OPERATIVO

Il funzionamento del *framework* si basa su un workflow integrato articolato in quattro fasi ricorsive:

1. Input territoriale unico: integrazione di dati spaziali, energetici, ambientali e normativi in un ambiente informativo coerente (GIS, BIM, *dataset* KPI).
2. Elaborazione parallela multi-modulo: attivazione simultanea dei moduli M1–M6, ciascuno orientato a una specifica dimensione prestazionale.
3. Convergenza dei risultati: aggregazione degli *output* parziali in un sistema di valutazione multicriteriale basato su KPI condivisi.
4. Rialimentazione iterativa: i risultati rientrano nel sistema come vincoli aggiornati, attivando un ciclo di raffinamento progressivo delle soluzioni progettuali.

Questo schema configura un processo adattivo, in cui la progettazione non è un atto lineare ma un ciclo continuo di ottimizzazione guidata dai dati.

7.2.3 INTERAZIONE TRA MODULI E DIPENDENZE FUNZIONALI

Il valore metodologico del *framework* risiede nella struttura relazionale tra i moduli, caratterizzata da dipendenze incrociate e retroazioni sistemiche. In particolare:

- M1 (paesaggio) definisce vincoli percettivi che influenzano direttamente le soluzioni generate da M6 (ottimizzazione progettuale).
- M2 (energia) fornisce scenari prestazionali che alimentano M4 (verificabilità e simulazione digitale).
- M3 (circolarità) impone limiti materiali e cicli di vita che condizionano M6 e M5.

- M4 (*digital twin*) agisce come infrastruttura di simulazione e controllo, integrando e aggiornando continuamente gli output degli altri moduli.
- M5 (*governance*) opera come filtro normativo trasversale, validando la coerenza di tutte le configurazioni generate.
- M6 (ottimizzazione) sintetizza gli output del sistema, ma al contempo retroagisce sugli altri moduli attraverso scenari alternativi.

L'interazione non è quindi gerarchica, ma reticolare: il sistema funziona come una rete decisionale distribuita, in cui ogni modulo è simultaneamente input e output degli altri. Le relazioni tra moduli non sono gerarchiche ma reticolari e bidirezionali.

- M1 influenza M6 attraverso vincoli percettivi e paesaggistici
- M2 alimenta M4 con scenari energetici dinamici
- M3 definisce limiti materiali e cicli di vita per M5 e M6
- M4 funge da infrastruttura di simulazione e controllo
- M5 agisce come filtro normativo trasversale
- M6 sintetizza e retroagisce sul sistema tramite scenari alternativi

Ne deriva una architettura decisionale distribuita, in cui ogni modulo è simultaneamente input e output degli altri. All'interno di questa struttura operativa, i moduli M1–M6 costituiscono le principali funzioni analitiche del sistema:

- M1 – Paesaggio e percezione visiva: valuta impatti percettivi e compatibilità paesaggistica attraverso KPI di qualità visiva e strumenti di simulazione 3D (LIDAR, fotogrammetria, GIS).
- M2 – Energia e resilienza: analizza produzione, accumulo e flessibilità dei sistemi energetici mediante modelli predittivi multi-scala e scenari climatici.
- M3 – Circolarità infrastrutturale: implementa principi di economia circolare tramite tracciabilità dei materiali e progettazione per il riuso (*Material Passport*).
- M4 – Verificabilità digitale: garantisce monitoraggio continuo e aggiornamento dinamico tramite *Digital Twin*, IoT e dashboard KPI.
- M5 – *Governance* e regolazione: integra vincoli normativi e procedurali attraverso NTA, SEA/VIA e cicli PDCA.

- M6 – Ottimizzazione progettuale: sintetizza le dimensioni precedenti in scenari multi-criterio orientati a performance energetica, ambientale e sociale.

7.2.4 SISTEMA ADATTIVO E LOGICA DI FEEDBACK

Il *framework* si configura infine come sistema adattivo basato su cicli di *feedback* continui. Ogni iterazione del modello produce una nuova configurazione del sistema territoriale, che viene nuovamente valutata attraverso i moduli M1–M6. Questo meccanismo consente di trasformare il processo progettuale in un sistema auto-aggiornante, in cui la simulazione digitale (*Digital Twin*) funge da memoria operativa e strumento predittivo.

La progettazione non è quindi finalizzata alla definizione di una soluzione unica, ma alla costruzione di un campo di soluzioni ottimizzate, selezionate in funzione di criteri prestazionali multipli e dinamicamente aggiornabili.

7.2.5 SINTESI OPERATIVA

L'attivazione operativa del *framework* M1–M6 definisce un sistema decisionale integrato caratterizzato da simultaneità funzionale dei moduli; *workflow* iterativo e non lineare; interazione reticolare tra domini prestazionali; e adattività basata su *feedback* continui.

In questo assetto, il modello supera la logica descrittiva per configurarsi come dispositivo metodologico operativo, capace di tradurre dati territoriali complessi in configurazioni progettuali verificabili, scalabili e replicabili.

7.3 STRATEGIA DI IMPLEMENTAZIONE MULTI-SCALA DEL SISTEMA ENERGETICO-TERRITORIALE

La strategia di implementazione multi-scala definisce la traduzione operativa del *framework* energetico-territoriale attraverso un continuum integrato che connette scala micro, meso, eco e macro. Il sistema non è organizzato per livelli autonomi, ma secondo una logica di coerenza inter-scalare, nella quale ogni configurazione territoriale contribuisce simultaneamente agli obiettivi energetici, ambientali e socio-spaziali. In questa prospettiva, le FER e le CER non sono elementi localizzati, ma componenti di un sistema reticolare adattivo. La dimensione paesaggistica assume un ruolo non vincolistico ma generativo, operando come dispositivo di regolazione progettuale.

L'integrazione tra micro-reti, *Positive Energy Districts* (PED) e infrastrutture macro definisce una struttura multilivello coerente con i principi di *smart city* resiliente e territorialmente distribuita.

7.3.1 SCALA MICRO (LOD 400–500): AUTOCONSUMO E CER LOCALI

Alla scala micro, il sistema si articola su edifici e aggregati minimi, nei quali le CER costituiscono l'unità funzionale primaria della transizione energetica. L'obiettivo è massimizzare l'autoconsumo e ridurre la vulnerabilità energetica, garantendo al contempo compatibilità morfologica e accettabilità sociale.

Le tecnologie si configurano come soluzioni a basso impatto integrato:

- fotovoltaico architettonicamente incorporato (trasparente[146], flessibile, integrato in contesti storici);
- micro-eolico[147] a bassa impronta acustico-visiva;
- sistemi domotici[148] e di energy management distribuito.

L'integrazione con la *Land Art* opera come interfaccia tra tecnologia e percezione, riducendo la discontinuità tra infrastruttura energetica e costruito. In questo livello, la prestazione energetica è inseparabile dalla qualità morfologico-percettiva del contesto, secondo una logica di co-progettazione architettonico-ingegneristica.

Le configurazioni di autoconsumo evidenziano una forte correlazione tra scala istituzionale e capacità di diffusione: le CER comunali e sovracomunali rappresentano il livello più efficace di integrazione sistemica, mentre configurazioni puntuali restano marginali o residuali.

7.3.2 SCALA MESO (LOD 300–400): POSITIVE ENERGY DISTRICT E SPAZIO PUBBLICO

Alla scala meso, l'unità progettuale è il distretto urbano, inteso come sistema energetico positivo (PED) integrato con lo spazio pubblico. Qui la transizione energetica si traduce in una riorganizzazione funzionale

---

146 In cui l'integrazione materica e cromatica consente di preservare la continuità visiva del costruito, reinterpretando la tecnologia come elemento discreto e coerente con il contesto storico

147 Progettato non solo per minimizzare l'impatto, ma per inserirsi come elemento riconoscibile e compatibile nel paesaggio urbano.

148 Contribuiscono a rendere l'edificio un sistema adattivo, capace di rispondere dinamicamente alle condizioni ambientali e alle esigenze degli utenti.

e percettiva dell'ambiente urbano. Le tecnologie assumono un carattere infrastrutturale diffuso:

- superfici energetiche urbane (smart pavements);
- elementi fotovoltaici verticali e "solar trees";
- sistemi di accumulo distribuito per resilienza di rete.

Il PED funziona come nodo di interfaccia tra micro-reti e infrastrutture territoriali, garantendo bilanciamento energetico e continuità prestazionale. L'integrazione con CER locali consente una *governance* energetica multilivello basata su scambio bidirezionale di energia e dati.

Lo spazio pubblico diventa infrastruttura attiva: non più supporto neutro, ma componente energetica e sociale del sistema. La dimensione progettuale è quindi simultaneamente tecnica e urbana, con una forte convergenza tra prestazione energetica e produzione di spazio collettivo.

7.3.3 SCALA ECO (LOD 200–300): PAESAGGIO PRODUTTIVO E INFRASTRUTTURALE

Alla scala eco-territoriale, il sistema si estende al paesaggio produttivo, dove la produzione energetica si integra con le funzioni agricole, ecologiche e infrastrutturali. Le principali tecnologie includono: agrivoltaico dinamico; fotovoltaico flottante; eolico a bassa interferenza ecosistemica (bladeless o equivalenti).

In questa scala, il progetto assume una dimensione propriamente territoriale: le FER non occupano il paesaggio, ma lo riorganizzano come sistema produttivo ibrido. La progettazione è guidata da criteri di minimizzazione dell'impatto ecologico e massimizzazione della co-compatibilità funzionale tra energia, biodiversità e uso del suolo. Le NTA differenziate per zona omogenea (A–F) costituiscono il dispositivo regolativo principale, garantendo adattabilità contestuale e replicabilità del modello.

7.3.4 SCALA MACRO (LOD 100–200): INFRASTRUTTURE ENERGETICHE E HUB REGIONALI

Alla scala macro, il sistema si struttura attraverso infrastrutture energetiche strategiche e hub di produzione e conversione su larga scala. Le tecnologie includono: eolico *offshore* galleggiante; sistemi ad alta quota (*kite power*); elettrolisi per produzione di idrogeno verde e sistemi P2G.

Questa scala è caratterizzata da un'elevata intensità infrastrutturale e da una forte interdipendenza con reti energetiche nazionali ed europee. L'integrazione con livelli inferiori (PED e CER) avviene attraverso logiche di bilanciamento energetico e coordinamento sistemico. La dimensione paesaggistica e ambientale viene trattata come parametro progettuale strutturante, attraverso strategie di mitigazione integrate e dispositivi di inserimento territoriale.

7.3.5 INTEGRAZIONE MULTI-SCALA: ARCHITETTURA SISTEMICA DEL MODELLO

L'interazione tra le quattro scale configura un sistema energetico-territoriale continuo, nel quale le relazioni tra CER, PED e infrastrutture macro non sono gerarchiche ma reticolari e bidirezionali. Il sistema si fonda su tre principi operativi:

- continuità funzionale tra produzione, distribuzione e consumo;
- coerenza prestazionale garantita da KPI trasversali;
- adattività dinamica supportata da strumenti digitali e simulativi.

In tale configurazione, la transizione energetica non è interpretabile come somma di interventi locali, ma come processo di riorganizzazione sistemica del territorio. La smart city emerge come esito emergente di questa integrazione, intesa non come forma urbana, ma come infrastruttura territoriale adattiva.

7.4 EXPERIMENTAL APPLICATION AND SCENARIO SIMULATION

Il presente paragrafo costituisce la fase di validazione operativa del *framework* M1–M6 attraverso un ambiente di simulazione integrato GIS–BIM–*Digital Twin*. L'obiettivo non è la descrizione di casi studio, bensì la verifica comportamentale del modello in condizioni controllate multi-scenario, al fine di valutare la coerenza tra input territoriali, trasformazioni progettuali e output prestazionali.

Il sistema viene interpretato come motore decisionale parametrico, nel quale le variabili spaziali, energetiche e paesaggistiche sono processate simultaneamente secondo logiche multi-criterio e multi-scala (zone omogenee A–F). La simulazione consente di testare la robustezza del *framework* rispetto a configurazioni alternative, introducendo perturbazioni controllate su densità, *mix* tecnologico, vincoli paesaggistici e capacità energetica.

7.4.1 SCENARIO GENERATION FRAMEWORK (A–F ZONING SYSTEM)

La generazione degli scenari è strutturata secondo un sistema parametrico basato su zonizzazione omogenea (A–F), in cui ogni zona definisce un set di vincoli e opportunità progettuali.

Per ciascuna configurazione vengono variati i seguenti parametri:

- intensità insediativa (ρu)
- potenziale energetico locale (Ep)
- vincolo paesaggistico (Lv)
- grado di integrazione infrastrutturale (Ii)
- accessibilità alla rete (Rg)

Ogni scenario rappresenta una combinazione coerente di tali variabili e viene processato come input indipendente nel sistema M1–M6, attivando simultaneamente tutte le funzioni di valutazione.

7.4.2 INTEGRATED SIMULATION ENVIRONMENT (GIS–BIM–DIGITAL TWIN PIPELINE)

L'architettura simulativa è basata su una pipeline integrata:

- GIS: definizione spaziale, morfologia, vincoli territoriali
- BIM: definizione oggetti, componenti tecnologiche e materiali
- *Digital Twin* layer: sincronizzazione dinamica e aggiornamento continuo delle variabili

Il sistema consente una lettura coerente tra scala territoriale e scala progettuale, garantendo la trasformazione dei dati geografici in entità computazionali valutabili.

L'interazione tra *layer* produce un ambiente di simulazione chiuso a *feedback*, nel quale ogni variazione progettuale genera immediatamente una riallocazione dei KPI associati.

7.4.3 KPI-DRIVEN EVALUATION MATRIX

La valutazione degli scenari è effettuata attraverso una matrice multi-criteriale basata su indicatori integrati:

- Paesaggio: IDV, PAP, OT
- Energia: ASE, RES, ACC, FLE, P2G
- Sistema integrato: IIC (*Integrated Impact Coefficient*)

Ogni scenario genera un vettore prestazionale "*state vector* S(t)":

$S(t) = f(IDV, PAP, OT, ASE, RES, ACC, FLE, P2G, IIC)$

La comparazione tra scenari non avviene in termini assoluti, ma secondo normalizzazione e *ranking* multi-obiettivo, al fine di

identificare configurazioni Pareto-efficienti tra *performance* energetica, qualità paesaggistica e resilienza sistemica.

7.4.4 COMPARATIVE SIMULATION: BASELINE VS PROPOSED FRAMEWORK

Il modello viene confrontato con uno scenario *baseline* rappresentativo delle pratiche pianificatorie tradizionali non integrate. Il confronto evidenzia tre livelli di differenza sistemica:

Integrazione dei dati

- baseline: segmentata per settore
- *framework*: integrazione simultanea multi-dominio

Processo decisionale

- baseline: sequenziale e normativa
- *framework*: iterativo e adattivo

Output progettuale

- baseline: soluzione unica deterministica
- *framework*: spazio di soluzioni ottimizzate

La simulazione evidenzia un incremento della coerenza tra prestazioni energetiche e compatibilità paesaggistica nei modelli derivati dal *framework* M1–M6, con riduzione delle soluzioni sub-ottimali dovuta a vincoli non integrati.

7.4.5 DECISION-RULE EXTRACTION AND OPERATIONAL SYNTHESIS

L'ultima fase della simulazione consiste nella traduzione degli output in regole decisionali operative, utilizzabili nei processi di progettazione e pianificazione.

Il sistema consente l'estrazione di tre categorie di regole:

- regole di esclusione (configurazioni non compatibili con vincoli paesaggistici o energetici)
- regole di preferenza (soluzioni Pareto-dominanti)
- regole di ottimizzazione (configurazioni con massimo IIC)

Il risultato non è una singola soluzione progettuale, ma un campo operativo strutturato, in cui il progetto emerge come funzione del sistema di vincoli e performance.

La validazione simulativa del *framework* M1–M6 dimostra che il sistema opera come:

- motore decisionale multi-scala
- ambiente di simulazione integrato GIS–BIM–*Digital Twin*

- struttura di valutazione multi-criteriale basata su KPI
- generatore di regole progettuali adattive

Ne consegue che il modello non si configura come strumento descrittivo, ma come dispositivo computazionale di supporto alla decisione territoriale, in grado di trasformare input complessi in configurazioni progettuali verificabili e replicabili.

7.5 LIVELLO DI VALIDAZIONE SCIENTIFICA E VALUTAZIONE DELLA ROBUSTEZZA MULTICRITERIALE

Il presente paragrafo definisce il livello di validazione scientifica del *framework* M1–M6, inteso non come fase simulativa, già sviluppata nel paragrafo 7.4, ma come processo di verifica della robustezza strutturale, coerenza metodologica e affidabilità decisionale del modello. L'obiettivo è valutare la capacità del sistema di mantenere consistenza logica e prestazionale al variare delle condizioni territoriali, delle scale di intervento e delle configurazioni progettuali.
La validazione si configura come un processo multilivello di tipo non empirico, fondato su un approccio comparativo e inferenziale, in cui il modello viene analizzato in termini di stabilità interna, capacità discriminante dei KPI e coerenza tra domini funzionali (paesaggio, energia, circolarità, *governance* e ottimizzazione).

7.5.1 COERENZA METODOLOGICA DEL QUADRO M1–M6

La prima dimensione di validazione riguarda la coerenza metodologica interna del *framework* M1–M6, inteso come sistema integrato di domini funzionali interdipendenti. La verifica si concentra su tre livelli:

- coerenza ontologica, relativa alla corretta separazione e complementarità tra i moduli;
- coerenza funzionale, riferita alla capacità dei moduli di operare senza ridondanze operative;
- coerenza relazionale, relativa alla qualità delle interazioni tra output e vincoli inter-modulo.

In questa prospettiva, il *framework* è validato come sistema non gerarchico ma reticolare, in cui ogni modulo contribuisce alla definizione di un campo decisionale coerente e non contraddittorio.

7.5.2 ROBUSTEZZA STRUTTURALE E SENSIBILITÀ DEL SISTEMA

La robustezza strutturale del modello viene valutata in termini di stabilità delle relazioni tra variabili e invariabilità relativa dei risultati al

variare delle condizioni di *input*. L'analisi considera la sensibilità del sistema rispetto a perturbazioni teoriche di:

- densità insediativa,
- configurazione tecnologica,
- vincoli paesaggistici,
- capacità energetica,
- livelli di accessibilità infrastrutturale.

Il criterio di validazione non riguarda la produzione di nuovi scenari, ma la verifica della tenuta strutturale delle relazioni tra KPI, intesa come capacità del sistema di mantenere pattern decisionali coerenti nonostante variazioni parametriche.

Il modello è considerato robusto se le variazioni di input non alterano in modo non lineare o incoerente la struttura delle priorità progettuali emergenti.

7.5.3 CONVALIDA COMPARATIVA RISPETTO AI MODELLI DI PIANIFICAZIONE TRADIZIONALI

La validazione comparativa viene condotta rispetto a modelli di pianificazione tradizionali (*baseline*), caratterizzati da approcci settoriali, sequenziali e non integrati.

Il confronto è strutturato su tre assi analitici:

- integrazione dei domini decisionali (settoriale vs multidimensionale);
- modalità di processo (lineare vs iterativa-adattiva);
- struttura dell'*output* progettuale (soluzione unica vs spazio di soluzioni).

La validazione evidenzia la capacità del *framework* M1–M6 di superare la frammentazione tipica dei modelli tradizionali, introducendo una struttura decisionale integrata e coerente tra scala edilizia, urbana e territoriale. Il *benchmark* non ha valore sperimentale, ma funzione dimostrativa della superiorità strutturale del modello proposto in termini di integrazione e adattività.

7.5.4 COERENZA E AFFIDABILITÀ DELL'ARCHITETTURA DEI KPI

La presente sezione valida la struttura dei KPI utilizzati nel *framework* come sistema di misurazione coerente e non ridondante.

La verifica riguarda:

- indipendenza relativa degli indicatori, per evitare sovrapposizioni concettuali;

- complementarità funzionale, tra indicatori energetici, paesaggistici e sistemici;
- capacità discriminante, ovvero la sensibilità dei KPI nel distinguere configurazioni progettuali differenti.

I KPI non sono trattati come valori assoluti, ma come **operatori comparativi multidimensionali**, atti a descrivere configurazioni progettuali complesse in termini normalizzati.
La coerenza interna del sistema KPI costituisce condizione necessaria per la validità dell'intero *framework* decisionale.

7.5.5 VALIDITÀ DEL SISTEMA E TRASFERIBILITÀ DEL MODELLO DECISIONALE

L'ultima fase della validazione riguarda la validità complessiva del sistema come modello decisionale trasferibile.
Il *framework* viene valutato in termini di:

- generalizzabilità, ovvero applicabilità a differenti contesti territoriali;
- trasferibilità scalare, dalla dimensione micro alla macro;
- affidabilità decisionale, intesa come capacità del sistema di supportare scelte coerenti in condizioni di complessità multi-criteriale;
- riduzione dell'incertezza progettuale, attraverso la strutturazione di un campo decisionale controllato.

Il modello M1–M6 viene così validato non come strumento predittivo empirico, ma come dispositivo teorico-operativo per la gestione della complessità territoriale, capace di integrare dimensioni energetiche, paesaggistiche e infrastrutturali all'interno di un unico sistema decisionale coerente.

7.6 ANALISI DEI RISULTATI DELLA SIMULAZIONE E DEI VINCOLI DI IMPLEMENTAZIONE

Il presente paragrafo costituisce il livello interpretativo dei risultati derivanti dal *framework* simulativo M1–M6 e dall'analisi multi-scenario condotta nei paragrafi precedenti. A differenza delle fasi di validazione e confronto, qui l'attenzione non è rivolta alla produzione o verifica degli *output*, ma alla loro traduzione in condizioni operative, vincoli implementativi e implicazioni progettuali emergenti.
In questa prospettiva, i risultati non vengono reinterpretati come esiti finali, bensì come campi di comportamento sistemico, nei quali

l'interazione tra scale (micro–meso–macro), domini prestazionali e vincoli territoriali genera configurazioni non lineari, spesso caratterizzate da tensioni tra efficienza energetica, qualità paesaggistica e fattibilità normativa.

7.6.1 RISULTATI EMERGENTI SU DIVERSE SCALE

L'interpretazione trasversale delle simulazioni evidenzia alcuni pattern ricorrenti che non dipendono dalle singole configurazioni, ma dalla struttura del sistema.

Alla scala micro, emerge una forte dipendenza tra performance energetica distribuita e compatibilità percettiva, che conferma la centralità della progettazione integrata tra tecnologia e forma costruita. L'efficacia delle configurazioni CER non è legata unicamente alla capacità produttiva, ma alla loro integrazione morfologica e alla stabilità dei comportamenti di autoconsumo.

Alla scala meso, i risultati indicano che la performance dei PED non è lineare rispetto all'incremento tecnologico, ma dipende in modo critico dalla qualità dell'interconnessione tra spazio pubblico, infrastrutture energetiche e sistemi sociali. L'integrazione di dispositivi energetici nello spazio urbano agisce quindi come fattore di trasformazione morfologica oltre che prestazionale.

Alla scala macro, le simulazioni evidenziano che la resilienza energetica territoriale è fortemente condizionata dalla distribuzione spaziale delle infrastrutture e dalla loro capacità di coesistere con sistemi ecologici e paesaggistici. L'efficienza sistemica risulta quindi subordinata a vincoli ambientali e percettivi non riducibili a metriche puramente energetiche.

7.6.2 VINCOLI DI ATTUAZIONE (CRITICITÀ EMERGENTI)

L'analisi comparativa dei risultati mette in evidenza tre principali categorie di vincoli emergenti.

Il primo riguarda la discontinuità tra scale di intervento, che si manifesta come difficoltà di mantenere coerenza tra logiche micro-locali e strategie territoriali. Tale disallineamento non è tecnico, ma sistemico, e dipende dalla diversa natura dei criteri decisionali tra scala edilizia, urbana e infrastrutturale.

Il secondo riguarda la complessità regolatoria adattiva, legata all'applicazione differenziata delle NTA e alla loro capacità di integrare parametri prestazionali dinamici. In questo contesto, la rigidità

normativa rappresenta un fattore di potenziale riduzione dell'efficacia del modello simulativo.
Il terzo riguarda la interoperabilità digitale e decisionale, in particolare nella gestione coerente dei flussi informativi tra ambienti GIS, BIM e *Digital Twin*. Le simulazioni mostrano che la qualità del risultato dipende in modo diretto dal grado di sincronizzazione tra livelli informativi e non solo dalla loro disponibilità.

7.6.3 QUADRO STRATEGICO DI MITIGAZIONE

Le criticità identificate non vengono interpretate come limiti strutturali del modello, ma come condizioni operative da integrare nel processo progettuale.
In primo luogo, la discontinuità tra scale può essere affrontata attraverso l'introduzione di meccanismi di coerenza gerarchica adattiva, nei quali i risultati micro e meso vengono progressivamente riallineati mediante logiche iterative di *feedback*.
In secondo luogo, la complessità normativa richiede una transizione verso NTA parametrico-prestazionali, capaci di tradurre obiettivi qualitativi in soglie verificabili e dinamiche, coerenti con gli output simulativi.
Infine, l'interoperabilità digitale può essere migliorata attraverso l'adozione di un'architettura informativa integrata, in cui *Digital Twin* funge da infrastruttura centrale di sincronizzazione tra dati spaziali, energetici e paesaggistici.
Il livello interpretativo del *framework* evidenzia che la performance del sistema M1–M6 non dipende esclusivamente dalla qualità delle singole componenti, ma dalla capacità di gestione delle interazioni tra scale, vincoli e domini prestazionali.
In questo senso, il modello si configura come un sistema adattivo, in cui le criticità non rappresentano deviazioni dal funzionamento atteso, ma informazioni strutturali utili alla calibrazione iterativa del processo progettuale e alla futura implementazione operativa del *framework* in contesti reali.

7.7 BUSINESS MODEL – SPIN-OFF LSET (LABORATORY FOR SUSTAINABLE ENERGY TRANSITION)

Il presente paragrafo presenta una sintesi dell'*Executive Summary* del *Business Plan* relativo al *Laboratory for Sustainable Energy Transition* (LSET), mentre la versione integrale del *Business Plan* è riportata

nell'Appendice A. La sintesi è finalizzata a documentare il percorso di trasferimento tecnologico del *framework* metodologico sviluppato nella presente ricerca, evidenziandone la potenziale applicazione in un contesto operativo, istituzionale e imprenditoriale.
L'obiettivo non è descrivere un piano aziendale in senso tradizionale, bensì dimostrare la coerenza tra l'architettura metodologica definita attraverso i moduli M1–M6 e la sua possibile implementazione come piattaforma di supporto alla pianificazione energetica e territoriale. In questa prospettiva, LSET rappresenta il livello applicativo della ricerca, traducendo modelli, procedure e strumenti sviluppati nella tesi in un'infrastruttura digitale orientata alla gestione integrata della transizione energetica.

7.7.1 ORIGINE SCIENTIFICA E POSIZIONAMENTO ISTITUZIONALE

LSET nasce all'interno del Laboratorio di Progettazione Tecnologica e Ambientale dell'Architettura dell'Università degli Studi "G. d'Annunzio", quale naturale sviluppo applicativo del percorso di ricerca svolto nell'ambito del presente Dottorato. Il *framework* integra competenze relative a:

- pianificazione energetica multi-scala (FER, CER, PED);
- modellazione interoperabile GIS–BIM–Digital Twin;
- valutazione ambientale e paesaggistica;
- applicazione dei Criteri Ambientali Minimi (CAM);
- conformità ai principali riferimenti normativi nazionali (D.Lgs. 199/2021, D.Lgs. 36/2023, D.Lgs. 190/2024) e agli indirizzi europei in materia di transizione energetica.

LSET non costituisce un progetto indipendente dalla ricerca, ma rappresenta il naturale percorso di trasferimento tecnologico del *framework* metodologico sviluppato nella presente tesi, traducendo risultati scientifici in servizi digitali ad elevato contenuto tecnologico destinati alla pianificazione e gestione dei sistemi energetico-territoriali.
Il posizionamento istituzionale del sistema è ulteriormente rafforzato dalla collaborazione con enti pubblici di ricerca e controllo ambientale (ISPRA, ARPA/APPA), che costituiscono il potenziale livello di validazione tecnico-scientifica e di futura sperimentazione operativa.

7.7.2 PROBLEMA DI RIFERIMENTO (SYSTEM GAP)

Il contesto operativo della transizione energetica territoriale evidenzia una discontinuità strutturale tra:

- strumenti di pianificazione energetica (PEAR, PAESC, PTCP, PUG);
- strumenti progettuali (BIM/GIS non interoperabili);
- procedure autorizzative (AU, PAS, iter frammentati);
- sistemi informativi ambientali non integrati.

Questa frammentazione produce tre criticità sistemiche:

1. assenza di interoperabilità dati tra livelli istituzionali e tecnici;
2. disallineamento tra progettazione energetica e pianificazione territoriale**;**
3. limitata capacità predittiva nei processi decisionali pubblici.

Il risultato è un sistema caratterizzato da inefficienze decisionali, duplicazioni progettuali e ridotta capacità di valutazione preventiva degli impatti energetici, paesaggistici e ambientali.

7.7.3 ARCHITETTURA DELLA SOLUZIONE LSET

LSET si configura come piattaforma digitale integrata per la gestione del ciclo completo dei progetti energetico-territoriali, strutturata su tre livelli funzionali:

(i) *Data integration layer*

- acquisizione e armonizzazione di dati GIS, BIM e open data;
- integrazione di dataset ambientali, energetici e normativi;
- costruzione di un *Common Data Environment* (CDE) interoperabile.

(ii) *Simulation & decision layer*

- *Digital Twin* territoriale multi-scala;
- modellazione scenari energetici e paesaggistici (*what-if analysis*);
- applicazione di KPI ambientali, energetici e sociali;
- supporto a processi MCDA (*Multi-Criteria Decision Analysis*).

(iii) *Operational layer*

- supporto alla progettazione di CER, CACER e PED;
- validazione preventiva di conformità normativa (regolamenti vigenti);
- monitoraggio continuo dei sistemi energetici e territoriali;

- strumenti di *reporting* per PA e programmi di finanziamento pubblico.

7.7.4 VALUE PROPOSITION E UTENTI TARGET

Il valore del sistema non risiede in una singola funzione tecnologica, ma nella capacità di integrare in un unico ambiente operativo:

- pianificazione energetica;
- progettazione architettonico-territoriale;
- valutazione ambientale;
- gestione amministrativa e finanziaria.

I principali utenti target sono:

- Pubbliche Amministrazioni (PA);
- operatori energetici e *utility*;
- PMI del settore costruzioni ed energia;
- comunità energetiche (CER/CACER);
- enti di ricerca e soggetti regolatori.

Il sistema consente di ridurre la frammentazione informativa tra attori e di supportare decisioni basate su modelli predittivi verificabili, migliorando la coerenza tra obiettivi energetici, vincoli paesaggistici e fattibilità normativa.

7.7.5 VALIDAZIONE DEL MODELLO (SCIENTIFIC & MARKET FIT)

La validazione del *framework* si articola su tre livelli complementari:

- *Scientific fit*: coerenza con letteratura su GIS-BIM integration, *Digital Twin* urbani e sistemi energetici distribuiti;
- *Regulatory fit*: compatibilità con normativa europea e nazionale in materia energetica, ambientale e di appalti pubblici;
- *Market fit* (qualitativo): interesse potenziale da parte di PA e operatori energetici verso strumenti interoperabili di pianificazione e simulazione.

Le sperimentazioni condotte in ambito accademico e territoriale dimostrano la robustezza del modello in termini di interoperabilità e scalabilità concettuale, pur restando in fase di validazione pre-operativa.

7.7.6 RICADUTE APPLICATIVE DELLA RICERCA

La configurazione proposta identifica un possibile percorso di trasferimento dei risultati della ricerca verso applicazioni operative nel campo della pianificazione energetica territoriale. Il *framework*

metodologico sviluppato nei moduli M1–M6 costituisce la base teorica sulla quale potranno essere sviluppati strumenti digitali, servizi di supporto decisionale e piattaforme interoperabili destinati alla Pubblica Amministrazione e agli operatori della transizione energetica. La realizzazione di tali strumenti esula dagli obiettivi della presente ricerca e rappresenta un successivo ambito di sviluppo, da perseguire attraverso attività di ricerca applicata, sperimentazione e collaborazione con soggetti istituzionali e industriali.

7.7.7 MODELLO OPERATIVO E SCALABILITÀ

Il sistema è progettato come infrastruttura scalabile secondo tre livelli di implementazione:

- scala territoriale: supporto a pianificazione regionale e comunale (PEAR, PAESC, PUG);
- scala distrettuale: progettazione e gestione CER e PED;
- scala ediliza e di aggregato: ottimizzazione energetica a livello puntuale.

La scalabilità è garantita dall'architettura modulare del sistema (M1–M6), che consente adattamento a differenti contesti normativi e territoriali senza perdita di coerenza metodologica.

7.7.8 GOVERNANCE E TRASFERIMENTO TECNOLOGICO

Il modello prevede una struttura di *governance* pubblico-privata basata su:

- collaborazione con università e centri di ricerca;
- integrazione con enti ambientali (SNPA, ISPRA, ARPA/APPA);
- interazione con amministrazioni locali;
- coinvolgimento di operatori industriali e *start-up*.

Il trasferimento tecnologico si configura come processo incrementale di validazione e adattamento, finalizzato alla trasformazione della ricerca in strumento operativo per la pianificazione energetica e territoriale.

7.7.9 SINTESI

LSET rappresenta il livello applicativo del *framework* metodologico sviluppato nella presente ricerca. La piattaforma traduce il modello scientifico M1–M6 in un'infrastruttura digitale per la pianificazione, simulazione e *governance* della transizione energetica, dimostrando

come i risultati della ricerca possano essere trasferiti in un contesto operativo, industriale e istituzionale.

L'*Executive Summary* qui presentato costituisce una sintesi del *Business Plan* completo riportato nell'Appendice 7, mentre il Business Model Canvas (Figura A.7 1, Appendice 7) ne sintetizza la struttura economica, organizzativa e di creazione del valore. In questa prospettiva, LSET non rappresenta un elemento accessorio della tesi, bensì la dimostrazione della trasferibilità del *framework* metodologico sviluppato, evidenziando il potenziale passaggio dalla ricerca scientifica alla sua applicazione nei processi di pianificazione energetica e territoriale.

7.8 CONCLUSIONI DEL CAPITOLO

Il presente capitolo ha rappresentato il passaggio dalla costruzione teorico-metodologica del *framework* sviluppato nei capitoli precedenti alla sua interpretazione operativa, dimostrandone la coerenza interna, la trasferibilità metodologica e il potenziale applicativo. Attraverso la definizione delle strategie di implementazione, la costruzione di scenari simulativi multilivello, la validazione concettuale mediante criteri multicriteriali e l'analisi delle condizioni di trasferimento tecnologico, è stato possibile verificare come il modello proposto costituisca un sistema integrato capace di collegare pianificazione energetica, progettazione territoriale, valutazione ambientale e supporto decisionale.

L'impianto metodologico non è stato concepito come un insieme di strumenti indipendenti, bensì come un *framework* unitario nel quale le diverse componenti – moduli M1–M6, approccio PCM–PDCA, Digital Twin, interoperabilità GIS–BIM, sistemi di indicatori prestazionali e strategie di *governance* – operano in modo coordinato lungo l'intero ciclo decisionale. Tale integrazione rappresenta uno dei principali contributi della ricerca, poiché consente di superare la tradizionale separazione tra analisi, progettazione, regolazione e gestione operativa, proponendo una struttura metodologica orientata alla valutazione preventiva e all'adattamento continuo delle decisioni.

La validazione sviluppata nel presente capitolo assume carattere prevalentemente metodologico e concettuale. Le simulazioni, gli scenari e gli indicatori proposti non costituiscono risultati sperimentali derivanti da implementazioni operative, ma strumenti di verifica della consistenza interna del modello e della sua capacità di rappresentare

configurazioni alternative in contesti differenti. In questa prospettiva, la robustezza del *framework* non deriva dalla verifica di un singolo caso studio, bensì dalla coerenza tra i diversi livelli del sistema, dalla tracciabilità delle relazioni tra le componenti metodologiche e dalla possibilità di adattare il modello a differenti condizioni territoriali e normative.

L'inclusione del modello di trasferimento tecnologico LSET completa il percorso di validazione mostrando come il *framework* sviluppato possa costituire la base di una futura infrastruttura operativa per la pianificazione energetica territoriale. Il riferimento al *Business Plan*, riportato integralmente in Appendice A, non rappresenta pertanto un elemento estraneo alla ricerca, ma un'ulteriore verifica della trasferibilità del modello verso possibili applicazioni istituzionali e industriali, mantenendo distinta la dimensione scientifica da quella imprenditoriale.

Permangono, tuttavia, alcuni limiti propri della presente ricerca. In particolare, il *framework* richiede una successiva fase di sperimentazione applicativa attraverso implementazioni territoriali, sviluppo di piattaforme *software* interoperabili e validazione mediante dati operativi. Analogamente, la definizione dei *Key Performance Indicators* e delle procedure di simulazione dovrà essere progressivamente calibrata rispetto a specifici contesti normativi e geografici, al fine di verificarne l'efficacia in condizioni reali.

Tali aspetti non riducono il valore scientifico della ricerca, ma ne definiscono il naturale percorso evolutivo. Il modello proposto è infatti concepito come un *framework* aperto, incrementale e adattabile, suscettibile di successive implementazioni tecnologiche e di ulteriori approfondimenti metodologici.

Nel suo complesso, il Capitolo VII conclude quindi la fase di validazione del *framework* M1–M6, dimostrando la coerenza tra architettura teorica, metodologia operativa e potenziale trasferibilità applicativa. Questa integrazione costituisce il presupposto per le future attività di sviluppo sperimentale e per l'estensione del modello verso strumenti digitali avanzati di supporto alla pianificazione energetica, alla *governance* territoriale e alla gestione delle infrastrutture della transizione energetica.

8 | OTTAVA PARTE

CONCLUSIONI DELLA RICERCA

8.1 PREMESSA

Il presente capitolo sintetizza i risultati attesi, il contributo scientifico e le implicazioni operative del modello PCM–PDCA multilivello sviluppato nei capitoli precedenti. L'obiettivo non è una descrizione applicativa del sistema, ma la valutazione della sua consistenza metodologica, della trasferibilità intercontesto e della capacità di integrazione tra dimensione normativa, digitale e territoriale. La struttura analitica adottata consente di collegare il *framework* teorico sviluppato (M1–M6) con i possibili esiti in termini di impatti istituzionali, energetici e territoriali, evidenziandone i principali ambiti di applicazione e le condizioni di implementazione. In parallelo, il capitolo introduce una lettura critica dei limiti del modello, dei rischi di adozione e delle condizioni necessarie alla sua scalabilità.

I risultati attesi sono interpretati come effetti emergenti dell'interazione tra strumenti di pianificazione, sistemi digitali interoperabili (GIS, BIM, *Digital Twin*) e dispositivi di *governance* multilivello, con particolare riferimento ai processi di transizione energetica territoriale e alla diffusione di CER.

Il capitolo si articola quindi come ponte analitico tra costruzione metodologica e validazione concettuale del *framework*, preparando la successiva discussione su originalità scientifica, limiti e prospettive di ricerca.

8.2 RISULTATI ATTESI

L'implementazione del *framework* multilivello PCM–PDCA è attesa generare effetti trasversali su dimensioni istituzionali, socio-tecniche, energetiche, ambientali e territoriali. Il modello non si configura come un mero strumento di project management, ma come un sistema integrato di supporto alle decisioni, capace di connettere strumenti di pianificazione, assetti normativi e infrastrutture digitali in un unico ambiente operativo coerente.

Un primo risultato atteso riguarda il rafforzamento della capacità amministrativa a scala locale, attraverso l'integrazione tra strumenti di pianificazione tradizionali e sistemi digitali interoperabili. L'uso combinato di GIS, BIM e *Digital Twin* consente il passaggio da procedure statiche, basate su documentazione, a processi decisionali *data-driven*, caratterizzati da aggiornamento continuo, coerenza multi-scala e tracciabilità delle scelte. In tale configurazione, gli

strumenti regolativi evolvono da vincoli statici a componenti adattive incorporate nei flussi computazionali di pianificazione.

Un secondo effetto riguarda la riduzione delle disuguaglianze socio-energetiche attraverso l'implementazione strutturata delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER). Nel *framework* proposto, i sistemi energetici sono reinterpretati come infrastrutture territoriali distribuite, capaci di generare flussi di valore locali e di abilitare forme di *governance* prossimale, partecipazione e condivisione dei benefici. In questa prospettiva, la povertà energetica viene affrontata come componente di una strategia più ampia di resilienza territoriale, e non come fenomeno settoriale isolato (Bouzarovski, 2014).

Dal punto di vista economico e spaziale, il modello favorisce la formazione di filiere energetiche locali integrate con le economie territoriali. L'integrazione tra produzione energetica e sistemi produttivi locali abilita cicli circolari delle risorse, diversificazione occupazionale e riduzione della dipendenza da *supply chain* esterne, rafforzando la capacità adattiva dei territori (Barbier, 1987; Barbier, 2016).

Gli effetti ambientali e paesaggistici derivano da un superamento dell'approccio conservativo verso strategie di progetto integrate, che combinano infrastrutture rinnovabili e pianificazione contestuale. I potenziali conflitti legati al siting delle infrastrutture energetiche vengono affrontati *ex ante* mediante ambienti di simulazione digitale e protocolli partecipativi, che consentono la valutazione preventiva degli impatti visivi, ambientali e sociali, migliorando la qualità dell'*anticipatory governance* e l'allineamento tra *stakeholder*.

L'interoperabilità digitale costituisce una condizione abilitante trasversale. L'integrazione di dati territoriali, ambientali ed energetici consente processi di monitoraggio continuo e aggiornamento iterativo delle decisioni, in coerenza con logiche di *governance* adattiva e cicli PDCA. Ciò determina il passaggio da una pianificazione lineare a sistemi di retroazione continua basati su apprendimento incrementale.

Sul piano socio-culturale, il *framework* incorpora approcci sperimentali di progettazione paesaggistica, inclusi riferimenti alla *Land Art*, che riconfigurano le infrastrutture energetiche come artefatti ibridi tecnico-culturali. Tale riconfigurazione contribuisce a ridefinire il ruolo simbolico e percettivo delle infrastrutture, riducendo conflittualità locali e aprendo nuove forme di costruzione dell'identità territoriale.

Infine, il modello rafforza la *governance* multilivello attraverso il coordinamento tra livelli istituzionali, tecnici e digitali. I processi decisionali diventano progressivamente *data-informed* e continuamente aggiornati, consentendo l'allineamento tra implementazione locale e obiettivi di sostenibilità sovraordinati. Il sistema risultante può essere interpretato come un *framework* socio-tecnico integrato per la transizione energetica, in cui sostenibilità ambientale, inclusione sociale e qualità spaziale sono co-ottimizzate all'interno di un'architettura adattiva unificata.

8.3 ORIGINALITÀ SCIENTIFICA E AVANZAMENTO DELLA CONOSCENZA

L'originalità scientifica della ricerca risiede nell'integrazione sistemica di innovazione metodologica, normativa, digitale e socio-tecnica all'interno di un unico *framework* operativo, superando la tradizionale frammentazione settoriale che caratterizza la pianificazione territoriale ed energetica. Il contributo principale consiste nella costruzione di un modello transdisciplinare che traduce principi di *governance* adattiva e multilivello in una sequenza procedurale esplicita, verificabile e replicabile, connettendo teoria, strumenti e pratica di pianificazione.

Un primo elemento di avanzamento riguarda l'applicazione del *Logical Framework Approach* (LFA) alla pianificazione urbanistica ed energetica. Tale adattamento introduce una logica orientata a obiettivi, indicatori e verificabilità nei processi di piano, colmando un gap nella letteratura esistente relativa all'integrazione tra programmazione territoriale e sistemi energetici.

Ulteriori contributi scientifici includono:

- la reinterpretazione del Documento di Indirizzo alla Progettazione (DIP) come dispositivo di *governance* territoriale, oltre la sua funzione tecnico-procedurale tradizionale;
- l'integrazione strutturale tra pianificazione energetica e qualità paesaggistica, superando la dicotomia tra transizione energetica e tutela del territorio;
- l'adozione del *Digital Twin* come infrastruttura operativa di piano, in grado di supportare processi continui di monitoraggio, simulazione e adattamento decisionale;

- l'istituzionalizzazione di processi partecipativi strutturati attraverso *Living Lab*, che trasformano il coinvolgimento degli *stakeholder* da funzione consultiva a componente co-progettuale del sistema.

Nel loro insieme, questi elementi contribuiscono al dibattito sulle transizioni socio-tecniche, proponendo un modello che integra ingegneria energetica, tecnologia dell'architettura e progettazione urbanistica in una struttura coerente di supporto decisionale. Il risultato è un *framework* che abilita forme di pianificazione iterativa e data-driven, coerenti con logiche di *governance* adattiva.

8.3.1 LIVING LAB E WORKSHOP COME INFRASTRUTTURE DI CAPACITY BUILDING

Nel modello proposto, *workshop* e *Living Lab* non sono intesi come dispositivi occasionali di consultazione, ma come infrastrutture metodologiche permanenti, pienamente integrate nel ciclo PCM–PDCA. Essi costituiscono un dispositivo centrale per l'attivazione di processi di *capacity building*, co-progettazione e sperimentazione applicata, connettendo dimensioni normative, tecniche e territoriali.

Il *Living Lab* è qui inteso come ambiente collaborativo multi-attore in cui amministrazioni pubbliche, progettisti, *stakeholder* locali, comunità energetiche e attori privati partecipano alla definizione, simulazione e valutazione degli interventi. Tale configurazione consente il superamento di modelli decisionali *top-down*, introducendo dinamiche iterative e inclusive coerenti con la complessità delle transizioni energetiche e territoriali.

Dal punto di vista operativo, le attività si articolano lungo le quattro fasi del ciclo PCM–PDCA:

- *Plan*: co-definizione dei quadri esigenziali e dei Documenti di Indirizzo alla Progettazione (DIP);
- *Do*: co-progettazione di soluzioni integrate mediante strumenti digitali (BIM, GIS, *Digital Twin*);
- *Check*: valutazione ex-ante e in itinere tramite simulazioni e indicatori di performance;
- *Act*: adattamento iterativo delle strategie progettuali sulla base dei risultati.

L'integrazione con infrastrutture digitali interoperabili rafforza la capacità del sistema di gestire dati territoriali, energetici e ambientali

in tempo reale, migliorando trasparenza, tracciabilità e qualità decisionale.

In questo quadro, i *Living Lab* assumono anche una funzione di mediazione dei conflitti territoriali e paesaggistici, attraverso strumenti di visualizzazione avanzata e simulazione scenariale, che consentono l'esplorazione ex-ante degli impatti e facilitano la costruzione di consenso informato.

Ulteriori sviluppi includono l'integrazione di approcci di progettazione paesaggistica sperimentale e *Land Art*, che riconfigurano le infrastrutture energetiche come dispositivi ibridi tecnico-culturali, contribuendo alla costruzione di nuove narrazioni territoriali e identitarie.

Nel complesso, l'istituzionalizzazione di *workshop* e *Living Lab* all'interno di un sistema nazionale di *capacity building* consente la creazione di un ecosistema permanente di apprendimento e innovazione, orientato alla qualità progettuale, all'integrazione multilivello e alla replicabilità delle soluzioni.

8.3.2 STRUTTURA MULTILIVELLO DEL SISTEMA DI CAPACITY BUILDING

Il sistema nazionale di *capacity building* si configura come un ecosistema multilivello e multi-attore per la pianificazione, progettazione e gestione delle infrastrutture energetiche e territoriali, coerente con la logica del modello PCM–PDCA.

Il livello strategico-istituzionale è rappresentato dall'organo nazionale di *capacity building*, responsabile di indirizzo, coordinamento e standardizzazione. Esso contribuisce alla definizione di linee guida, criteri esigenziali per i contratti pubblici, standard digitali interoperabili e modelli di DIP, traducendo gli obiettivi di transizione ecologica in strumenti operativi.

Il livello scientifico-accademico costituisce l'infrastruttura cognitiva del sistema. Università e centri di ricerca svolgono un ruolo strutturale nello sviluppo metodologico, nella validazione scientifica e nella formazione continua di amministrazioni e professionisti, partecipando attivamente ai processi di sperimentazione.

Il livello tecnico-operativo comprende soggetti specializzati, tra cui la *start-up Laboratory for Sustainable Energy Transition* (LSET), che opera come unità applicativa e sperimentale. Tale livello sviluppa strumenti

digitali e modelli operativi (BIM, GIS, *Digital Twin*), traducendo requisiti strategici in soluzioni progettuali implementabili.
Il livello amministrativo-territoriale è rappresentato da enti locali e stazioni appaltanti, responsabili dell'attuazione dei processi, dalla redazione dei DIP alla gestione delle procedure di gara e degli interventi.
Il livello socio-economico e comunitario include comunità locali, imprese, *stakeholder* e CER, contribuendo all'accettabilità sociale, alla co-progettazione e allo sviluppo territoriale sostenibile.
L'integrazione tra livelli è garantita da *Living Lab* e *workshop* strutturati, che fungono da dispositivi trasversali di connessione, apprendimento e sperimentazione.
Il funzionamento complessivo del sistema è regolato dal ciclo PCM–PDCA, che abilita un processo continuo di pianificazione, implementazione, monitoraggio e adattamento, trasformando la *governance* territoriale in un sistema iterativo e *data-driven*.
Nel complesso, il modello proposto configura un *framework* integrato per la transizione energetica e territoriale, in cui università, strumenti digitali e dispositivi partecipativi costituiscono elementi strutturali di una *governance* adattiva orientata alla qualità, alla sostenibilità e alla replicabilità.

8.4 LIMITI DELLA RICERCA

La presente ricerca presenta alcuni limiti intrinseci legati alla complessità sistemica e multi-dimensionale del *framework* PCM–PDCA multilivello proposto. Tale complessità, se da un lato costituisce un elemento di avanzamento metodologico, dall'altro implica significativi requisiti in termini di maturità istituzionale, capacità organizzativa e disponibilità di infrastrutture dati interoperabili, non sempre garantiti in modo omogeneo nei contesti territoriali di applicazione.
Un primo limite riguarda la dipendenza dalla qualità, disponibilità e interoperabilità dei dati territoriali. L'efficacia del modello è infatti strettamente subordinata alla presenza di ecosistemi informativi maturi, in grado di integrare dati energetici, ambientali e urbanistici su diverse scale. In assenza di *standard* condivisi e di architetture digitali consolidate (CDE, BIM, GIS, *Digital Twin*), la coerenza e l'affidabilità dei processi simulativi e decisionali possono risultare parzialmente compromesse.

Un secondo limite concerne la variabilità della capacità amministrativa e istituzionale degli enti locali. Come evidenziato anche nei paradigmi di *governance* multi-scala e *Research by Design*, l'efficacia dei modelli integrati dipende in modo critico dalla possibilità di coordinare livelli decisionali eterogenei e attori con competenze differenziate. La frammentazione amministrativa, la carenza di competenze tecniche avanzate e le asimmetrie tra livelli di governo possono rallentare l'implementazione operativa del *framework*.

Un ulteriore limite riguarda la non ancora completa validazione empirica del modello nella sua interezza. Sebbene l'architettura metodologica, digitale e organizzativa sia stata formalizzata in modo coerente, essa non è ancora stata sottoposta a sperimentazioni estensive o applicazioni sistematiche su scala reale. Ne deriva una limitazione nella capacità di verificare empiricamente le interazioni tra componenti normative, digitali e partecipative, nonché l'effettiva scalabilità del sistema in contesti territoriali differenziati.

Sul piano operativo, un limite significativo è rappresentato dalla complessità di coordinamento multi-attore. L'architettura proposta richiede l'interazione strutturata tra istituzioni pubbliche, soggetti tecnico-operativi, comunità energetiche, università e attori privati. In assenza di meccanismi di *governance* robusti e formalizzati, tale configurazione può generare sovraccarichi organizzativi e criticità di coordinamento, riducendo l'efficienza complessiva del sistema.

Un ulteriore elemento critico riguarda la disomogenea diffusione delle CER e la loro attuale maturità organizzativa e digitale. In molti contesti, le CER operano ancora con strumenti limitati di monitoraggio, scarsa standardizzazione dei processi e ridotta integrazione con sistemi decisionali avanzati, rendendo complessa l'adozione uniforme del modello proposto.

Dal punto di vista metodologico, la ricerca presenta inoltre un limite legato alla sua natura prevalentemente progettuale e *framework-oriented*, che privilegia l'integrazione sistemica e operativa rispetto alla formalizzazione di relazioni causali generalizzabili e metriche pienamente standardizzate. Ciò implica la necessità di ulteriori sviluppi in termini di indicatori quantitativi comparabili e modelli di valutazione *ex post*.

Un ulteriore limite riguarda la scalabilità del modello in contesti territoriali altamente eterogenei, caratterizzati da differenti livelli di risorse, competenze e infrastrutture digitali. La replicabilità del

framework richiede infatti condizioni abilitanti minime, senza le quali il rischio è quello di una implementazione parziale o asimmetrica.
Sul piano dell'innovazione tecnologica, emerge inoltre una dipendenza critica dall'evoluzione delle infrastrutture digitali e degli *standard* di interoperabilità, in particolare per quanto riguarda l'integrazione tra BIM, GIS e *Digital Twin*. L'assenza di architetture dati pienamente integrate può limitare la continuità informativa lungo il ciclo PCM–PDCA e ridurre l'efficacia dei processi adattivi.
Un ulteriore limite rilevante riguarda la non ancora sistematica integrazione dell'intelligenza artificiale (AI). Sebbene il *framework* preveda l'utilizzo di *Digital Twin* e piattaforme *data-driven* per il supporto decisionale, le funzionalità avanzate di AI (analisi predittiva, ottimizzazione automatizzata, supporto decisionale dinamico) non risultano ancora integrate in modo strutturale. Ciò limita la capacità del modello di gestire in modo completamente automatizzato scenari complessi e non lineari, riducendo il livello di autonomia computazionale del sistema.
Infine, si evidenzia un limite relativo alla operativizzazione della dimensione estetico-culturale del paesaggio, in particolare per quanto riguarda pratiche riconducibili alla *Land Art* e alla progettazione paesaggistica avanzata. La traduzione di tali componenti in criteri decisionali oggettivi e indicatori misurabili rimane parziale, soprattutto nei contesti di valutazione pubblica, dove prevalgono ancora metriche tecnico-economiche standardizzate.
Nonostante tali limiti, il *framework* PCM–PDCA multilivello mantiene una forte coerenza interna e una significativa potenzialità applicativa. La sua struttura iterativa e adattiva consente infatti di affrontare progressivamente le criticità identificate, configurandosi come un modello evolutivo, suscettibile di ulteriori raffinamenti attraverso sperimentazioni empiriche, casi studio e processi di validazione multi-scala.

8.5 RISCHI DI IMPLEMENTAZIONE E STRATEGIE DI MITIGAZIONE

I rischi di implementazione del modello PCM–PDCA multilivello sono affrontati attraverso un approccio integrato, adattivo e iterativo, coerente con la logica dei *Gate* decisionali e con la struttura ciclica del *framework*. Tali rischi si distribuiscono lungo cinque dimensioni principali: *governance* istituzionale, tecnico-operativa, digitale, socio-

culturale e organizzativa, ciascuna caratterizzata da specifiche condizioni di vulnerabilità e relative traiettorie di mitigazione.

Un primo insieme di rischi riguarda la dimensione della *governance* e del coordinamento istituzionale. La frammentazione delle competenze tra livelli amministrativi, l'instabilità dei quadri normativi e la disomogeneità della capacità amministrativa locale possono compromettere la coerenza delle decisioni e rallentare l'implementazione delle strategie. Tali criticità risultano particolarmente rilevanti nei contesti periferici o caratterizzati da risorse limitate. Le strategie di mitigazione includono la formalizzazione dei ruoli all'interno dei *Gate* decisionali, il rafforzamento dei meccanismi di coordinamento multi-livello e l'integrazione sistematica dei risultati progettuali nei principali strumenti di programmazione e pianificazione, al fine di garantire continuità istituzionale e allineamento strategico.

Un secondo insieme di rischi riguarda la dimensione tecnico-operativa. La complessità degli strumenti digitali adottati – in particolare BIM, GIS e *Digital Twin* – e la variabilità nella qualità e interoperabilità dei dati territoriali possono limitare l'affidabilità delle simulazioni e dei processi decisionali. Dataset incompleti, non standardizzati o non aggiornati rappresentano un fattore critico per la robustezza del modello. Le misure di mitigazione includono la standardizzazione dei formati dati, l'implementazione di protocolli di controllo qualità, la creazione di ambienti informativi condivisi (data environments interoperabili) e programmi strutturati di formazione tecnica avanzata. In questo contesto, i *Digital Twin* assumono anche una funzione di verifica continua delle performance e di validazione iterativa degli scenari progettuali.

Un rischio specifico trasversale riguarda la maturità dell'integrazione dell'intelligenza artificiale (AI). Sebbene il modello preveda un'evoluzione verso sistemi data-driven avanzati, l'attuale assenza di implementazioni AI *consolidate* limita le capacità di analisi predittiva, ottimizzazione automatizzata e supporto decisionale dinamico su larga scala. La mitigazione di tale rischio si basa su un'implementazione progressiva di moduli AI sperimentali all'interno dei *Living Lab*, accompagnata da processi di validazione controllata dei dati e da percorsi di formazione specialistica, finalizzati a garantire affidabilità, trasparenza e scalabilità delle soluzioni algoritmiche.

Un ulteriore insieme di rischi riguarda la dimensione socio-culturale e la legittimazione delle decisioni progettuali. L'introduzione di innovazioni tecnologiche avanzate e di interventi paesaggistici ad alto impatto percettivo – inclusi approcci ispirati alla *Land Art* – può generare resistenze da parte delle comunità locali e degli *stakeholder* territoriali. Tali criticità possono tradursi in conflitti, ridotta accettabilità sociale o rallentamenti procedurali. Le strategie di mitigazione includono l'attivazione sistematica di processi partecipativi strutturati, la diffusione di *Living Lab* territoriali, l'organizzazione di *workshop* di co-progettazione e l'adozione di strumenti di simulazione e visualizzazione avanzata, finalizzati a rafforzare la trasparenza decisionale e la costruzione di consenso informato.

A livello organizzativo e relazionale, un rischio significativo deriva dalla complessità di coordinamento tra i molteplici attori coinvolti nel sistema (amministrazioni pubbliche, università, LSET, operatori tecnici e *stakeholder* locali). L'assenza di una chiara definizione dei ruoli, delle responsabilità e dei flussi decisionali può generare inefficienze, sovrapposizioni operative o ritardi nei processi attuativi. La mitigazione si fonda sulla formalizzazione delle regole di *governance* dei *Living Lab*, sull'introduzione di protocolli operativi condivisi e su attività continuative di *capacity building*, con il supporto delle istituzioni accademiche come soggetti di facilitazione e validazione metodologica.

Un ulteriore rischio riguarda la scalabilità e replicabilità del modello in contesti territoriali caratterizzati da disomogeneità strutturali in termini di risorse economiche, competenze tecniche e infrastrutture digitali. Per affrontare tale criticità, il modello prevede un'architettura modulare di implementazione, basata su componenti progressivi e scalabili. In una prima fase, l'attivazione riguarda i pilastri fondamentali del sistema (organo nazionale di *capacity building*, università, LSET e *Living Lab*), con successiva estensione ad altri livelli e funzioni in funzione della maturità territoriale.

Infine, si evidenziano rischi temporali e di coordinamento delle fasi attuative, legati alla natura multilivello e iterativa del processo PCM–PDCA. La complessità delle sequenze decisionali può generare ritardi o disallineamenti tra fasi progettuali e livelli istituzionali. L'adozione di *Gate* decisionali, milestone intermedie e sistemi di monitoraggio basati su indicatori condivisi consente di migliorare la tracciabilità dei

processi e ridurre l'incertezza temporale, rafforzando la capacità di controllo adattivo.

Nel complesso, il modello PCM–PDCA non elimina il rischio, ma lo rende esplicito, misurabile e governabile all'interno del ciclo decisionale. L'integrazione tra strumenti digitali avanzati, dispositivi partecipativi (*Living Lab*), infrastrutture accademiche e capacità operative (LSET) consente di anticipare le criticità e di trasformare la gestione del rischio in un processo continuo di apprendimento istituzionale. In questa prospettiva, la governance multilivello si configura non solo come meccanismo di coordinamento, ma come infrastruttura adattiva di resilienza, capace di migliorare progressivamente l'efficacia e la robustezza del sistema nel tempo.

8.6 REPLICABILITÀ, TRASFERIBILITÀ E LINEE GUIDA PER STUDI FUTURI

Il modello proposto è concepito per essere replicabile in contesti territoriali eterogenei e trasferibile a diversi livelli di maturità istituzionale, adattandosi a condizioni variabili di capacità amministrativa, digitale e tecnico-operativa. La sua architettura multilivello e transdisciplinare consente l'integrazione coerente di strumenti e approcci provenienti dall'ingegneria dei sistemi energetici, dalla tecnologia dell'architettura, dalla progettazione urbanistica e dalla *governance* territoriale, all'interno di un quadro operativo unitario e scalabile.

In tale prospettiva, la dimensione ingegneristica contribuisce alla definizione di indicatori di performance, scenari energetici e vincoli di rete, supportando la progettazione di sistemi energetici locali e di Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) integrate nel contesto territoriale. La tecnologia dell'architettura svolge una funzione di mediazione tra soluzioni tecniche, fattibilità costruttiva e gestione operativa degli interventi, mentre la progettazione urbanistica fornisce il quadro di *governance* spaziale e di coordinamento multiscalare. L'integrazione tra tali dimensioni consente di affrontare in modo sistemico i conflitti tra uso del suolo, infrastrutture energetiche e qualità paesaggistica, includendo anche pratiche di *Land Art* come dispositivi di valorizzazione ambientale, culturale e identitaria.

La trasferibilità del modello è garantita da una logica modulare e adattativa. I *Living Lab* costituiscono lo strumento principale per la sperimentazione controllata di soluzioni, la validazione progressiva

delle scelte progettuali e il consolidamento di pratiche partecipative prima della loro implementazione estesa, riducendo rischi organizzativi e sociali. In questo quadro, le università operano come infrastruttura cognitiva permanente, assicurando continuità scientifica e metodologica, validazione degli indicatori e supporto alla formazione avanzata degli operatori. La *start-up* LSET agisce come braccio operativo sperimentale del sistema, traducendo il sapere scientifico in strumenti applicativi, piattaforme digitali e sistemi di monitoraggio.

Il modello integra inoltre strumenti avanzati di digitalizzazione – tra cui BIM, GIS e *Digital Twin* – con una prospettiva evolutiva che include l'eventuale adozione dell'Intelligenza Artificiale (AI) per analisi predittive, ottimizzazione dei processi e supporto decisionale adattivo. Sebbene tale componente non sia ancora pienamente implementata, essa rappresenta una leva strategica per incrementare efficienza, scalabilità e resilienza del sistema.

Un elemento distintivo del modello riguarda le Norme Tecniche di Attuazione (NTA), declinate in modo differenziato su casi studio e progetti pilota basati sulle specificità territoriali e sulle caratteristiche delle singole CER. Le NTA consentono di modulare criteri, vincoli e requisiti progettuali in funzione del contesto locale, garantendo al contempo coerenza metodologica e comparabilità dei risultati. Tale approccio favorisce l'analisi cross-case, la sperimentazione controllata e l'affinamento progressivo di linee guida generalizzabili. Le linee guida per studi futuri includono:

- l'estensione del modello a sistemi urbani complessi e reti energetiche multi-vettore integrate;
- l'integrazione di ulteriori fonti rinnovabili e strategie avanzate di decarbonizzazione;
- lo sviluppo di piattaforme digitali interoperabili e scalabili a supporto della *governance* multilivello e della partecipazione delle comunità;
- la formalizzazione di strumenti contrattuali pubblici basati su criteri qualitativi, inclusi documenti di indirizzo alla progettazione e procedure orientate all'innovazione sostenibile;
- l'approfondimento di metodologie per la valutazione degli impatti estetici e culturali di interventi di *Land Art* e integrazione paesaggistica;

- la sperimentazione di NTA differenziate per contesti territoriali specifici, calibrate sulle peculiarità locali delle CER.

Pur evidenziando un'elevata potenzialità di applicazione, il modello richiede ulteriori fasi di sperimentazione e adattamento contestuale. La complessità del sistema, la disomogeneità delle capacità istituzionali e le attuali limitazioni infrastrutturali rappresentano ancora vincoli alla sua replicabilità immediata, pur delineando un percorso chiaro di implementazione progressiva e modulare.

Nel complesso, la ricerca contribuisce all'evoluzione della pianificazione urbanistica ed energetica verso modelli integrati, adattivi e orientati alla sostenibilità di lungo periodo, capaci di connettere dimensioni tecniche, spaziali, istituzionali e culturali in un unico processo progettuale. L'approccio multilivello, supportato da strumenti digitali avanzati, *Living Lab*, università, LSET e NTA differenziate, rende il modello progressivamente scalabile e trasferibile, fornendo una base metodologica solida per studi futuri e per la definizione di linee guida operative e normative.

8.7 CONTRIBUTO DELLA RICERCA E PROSPETTIVE OPERATIVE

8.7.1 SINTESI DELL'APPROCCIO INTEGRATO

L'approccio proposto integra in un unico *framework* transdisciplinare teoria, strumenti operativi e infrastrutture digitali, combinando Norme Tecniche di Attuazione (NTA) differenziate per progetti campione territorialmente specifici, sistemi BIM–GIS, *Digital Twin* territoriali e procedure di tipo STEM-*oriented*. Il risultato è un modello decisionale predittivo, adattivo e partecipativo, progettato per essere implementato in contesti caratterizzati da differenti livelli di complessità urbana e rurale.

L'integrazione tra *governance* multilivello, infrastrutture digitali e dispositivi partecipativi strutturati – inclusi i *Living Lab* – consente la simulazione e valutazione ex ante di scenari energetici, urbanistici, ambientali e socio-culturali. Tale configurazione riduce la separazione tradizionale tra analisi e decisione, introducendo un ciclo continuo di *feedback* basato su evidenze verificabili e aggiornamenti iterativi.

In questo quadro, anche interventi di *Land Art* e strategie di progettazione paesaggistica evolvono da elementi accessori a dispositivi operativi di mediazione territoriale, contribuendo alla

rielaborazione del rapporto tra infrastrutture energetiche, comunità e paesaggio. Tali componenti richiedono tuttavia una regolazione specifica attraverso NTA adattive, in grado di governarne impatti estetici, funzionali e sociali.

8.7.2 CONTRIBUTO SCIENTIFICO E APPLICATIVO DELLA RICERCA

Il principale contributo scientifico risiede nella dimostrazione della replicabilità e trasferibilità del modello PCM–PDCA multilivello in contesti territoriali eterogenei e a diversi livelli di maturità istituzionale, normativa e tecnologica. L'integrazione tra *Logical Framework Approach* (LFA), strumenti di pianificazione territoriale, Documento di Indirizzo alla Progettazione (DIP), NTA differenziate e infrastrutture digitali avanzate configura un impianto metodologico potenzialmente scalabile a livello nazionale ed europeo.

Sul piano applicativo, la ricerca introduce una traiettoria di implementazione operativa attraverso il *Laboratory for Sustainable Energy Transition* (LSET), concepito come infrastruttura di innovazione e non come semplice *start-up* tecnologica. LSET agisce come piattaforma intermedia tra ricerca, *policy* e implementazione, integrando competenze scientifiche, strumenti digitali e processi di supporto decisionale. In tale configurazione, LSET può sviluppare:

- servizi scalabili per amministrazioni pubbliche e Comunità Energetiche Rinnovabili (CER);
- piattaforme digitali modulari per simulazione, monitoraggio e validazione di scenari energetici, urbanistici e paesaggistici;
- strumenti predittivi basati su approcci data-driven e supporto AI per l'analisi adattiva dei sistemi territoriali;
- metodologie operative per l'applicazione di NTA differenziate su base territoriale e funzionale.

Il laboratorio si configura inoltre come nodo di interfaccia tra ricerca scientifica, politiche pubbliche e sistemi produttivi, attraverso collaborazioni con istituzioni nazionali ed europee (MITE, MIMS, ARERA, GSE) e organismi internazionali (WEC, IFEC). In tal senso, esso contribuisce alla traduzione della conoscenza in capacità operativa e impatto sistemico.

8.7.3 LINEE GUIDA PER FUTURI STUDI

Le prospettive di ricerca futura si articolano lungo traiettorie coerenti con l'impostazione adattiva, multilivello e modulare del modello. In particolare, si suggerisce:

- l'estensione del *framework* a sistemi energetici urbani complessi e reti multi-vettore integrate;
- l'integrazione di ulteriori fonti rinnovabili e strategie avanzate di decarbonizzazione;
- lo sviluppo di modelli predittivi potenziati da Intelligenza Artificiale per la gestione adattiva dei sistemi territoriali;
- la progettazione di piattaforme digitali interoperabili e scalabili per governance, simulazione e partecipazione;
- l'approfondimento delle procedure STEM applicate alla pianificazione territoriale ed energetica;
- la formalizzazione di NTA differenziate basate su casi territoriali campione, calibrate sulle specificità delle CER.

Tali direzioni di sviluppo rafforzano il potenziale del modello in termini di impatto scientifico, operativo e istituzionale, consolidando il ruolo del LSET come infrastruttura di trasferimento tecnologico e dispositivo di intermediazione tra ricerca, *policy* e mercato.

Nel complesso, il contributo della ricerca si colloca all'intersezione tra innovazione metodologica, digitalizzazione dei processi decisionali, *governance* multilivello, partecipazione sociale e progettazione territoriale sostenibile. Il *framework* proposto fornisce una base strutturata per lo sviluppo di politiche integrate e applicazioni operative, configurandosi come modello replicabile e progressivamente scalabile per la gestione della transizione energetica e territoriale.

8.8 CONCLUSIONI GENERALI

Il percorso di ricerca si inserisce nel Dottorato in "*Culture del Progetto*: *creatività*, *patrimonio*, *ambiente*", assumendone l'impostazione integrata e critica del progetto contemporaneo, inteso non come mera attività tecnico-procedurale, ma come dispositivo culturale, ambientale e trasformativo. In tale cornice, il contributo si colloca nel settore scientifico-disciplinare CEAR-08/C della Progettazione tecnologica e ambientale dell'architettura, rafforzandone il ruolo di ambito interdisciplinare di sintesi tra innovazione tecnologica, qualità

dello spazio costruito, sostenibilità energetica e responsabilità ambientale.

La ricerca evidenzia come la transizione energetica richieda un ripensamento strutturale degli strumenti e dei processi della progettazione, superando approcci settoriali e deterministici a favore di modelli sistemici, adattivi e multilivello. In questo quadro, il modello PCM–PDCA proposto rappresenta un avanzamento metodologico rilevante, traducendo i principi della *governance* adattiva e della pianificazione integrata in una struttura operativa esplicita, in grado di connettere dimensione strategica, dispositivi normativi, strumenti digitali, NTA differenziate, pratiche partecipative e approcci di progettazione paesaggistica.

All'interno del dominio della progettazione tecnologica e ambientale, il lavoro contribuisce a ridefinire il progetto come interfaccia dinamica tra sistemi energetici, assetti territoriali, comunità locali e strutture istituzionali, attribuendogli una funzione di mediazione attiva tra innovazione tecnologica e tutela del patrimonio paesaggistico e ambientale. In tale prospettiva, la qualità ambientale non costituisce un esito accessorio, ma un principio ordinatore del processo progettuale, che orienta scelte tecnologiche, configurazioni spaziali, criteri normativi e modelli di *governance* multilivello.

L'integrazione tra strumenti digitali avanzati – quali *Digital Twin*, sistemi BIM–GIS, piattaforme decisionali e moduli di Intelligenza Artificiale – e dispositivi partecipativi strutturati, come i *Living Lab*, consente di configurare il progetto come processo conoscitivo continuo, basato su cicli iterativi di simulazione, verifica e apprendimento. Tale impostazione rafforza il carattere predittivo, adattivo e replicabile della pianificazione, contribuendo a ridurre le incertezze decisionali e a colmare il divario tra dimensione teorica e attuazione operativa.

L'apertura verso una dimensione applicativa e di trasferimento tecnologico, attraverso il *Laboratory for Sustainable Energy Transition* (LSET), evidenzia la capacità della ricerca di estendersi oltre l'ambito accademico, configurandosi come infrastruttura di innovazione in grado di connettere ricerca, politiche pubbliche, attori territoriali e sistemi produttivi. In questa prospettiva, LSET opera come piattaforma abilitante capace di: sviluppare servizi scalabili per amministrazioni pubbliche e comunità energetiche locali; realizzare piattaforme digitali modulari per simulazione, monitoraggio e valutazione di scenari

energetici, urbani e paesaggistici; tradurre NTA differenziate e dati territoriali in strumenti operativi replicabili e adattivi; integrare processi partecipativi e metodologie predittive multilivello; sperimentare approcci di progettazione paesaggistica e *Land Art* come dispositivi di valorizzazione culturale e ambientale.

Nel complesso, il lavoro non si configura come un esito conclusivo, ma come una infrastruttura metodologica aperta, progettata per evolvere e adattarsi a contesti territoriali eterogenei, con differenti livelli di maturità tecnica, istituzionale e organizzativa. Ne deriva un modello replicabile, scalabile e progressivamente implementabile, capace di integrare innovazione tecnologica, *governance* multilivello, sostenibilità energetica e qualità del progetto contemporaneo.

Il contributo della ricerca si colloca all'intersezione tra innovazione metodologica, digitalizzazione dei processi decisionali, pianificazione territoriale, partecipazione sociale, strumenti normativi adattivi (NTA) e valorizzazione paesaggistica, fornendo una base solida per applicazioni operative, sviluppo di politiche pubbliche, ulteriori indagini scientifiche e strategie di innovazione nel campo della transizione energetica e della progettazione sostenibile.

BIBLIOGRAFIA

Ahern, J. (2011). Dal fail-safe al safe-to-fail: sostenibilità e resilienza nel nuovo mondo urbano. Paesaggio e pianificazione urbana, 100(4), 341-343.

Almirall, E., & Wareham, J. (2008). *Living lab*s and open innovation: Roles and applicability. eJOV: The Electronic Journal for Virtual Organization & Networks, 10

ANCI - Associazione Nazionale Comuni Italiani. (2024). Autoconsumo individuale a distanza e comunità di energia rinnovabile: Vademecum ANCI per i Comuni (I ed., aprile 2024).

ANCI. (2022). Le comunità energetiche rinnovabili: Il ruolo dei comuni nella transizione energetica. Associazione Nazionale Comuni Italiani.

Angelucci, F. (2012). Gli scenari evolutivi per il progetto delle infrastrutture a rete nel paesaggio. In Conservare, mantenere e valorizzare il paesaggio. Contributi di cultura tecnologica (pp. 71-87). Alinea Editrice.

Angrilli, M., Walter, B., & Filippo, B. (2011). Progetto e paesaggio. Guida pratica per l'autorizzazione e relazione paesaggistica. Maggioli.

Angrilli, M. (2018). Piano progetto paesaggio. Urbanistica e recupero del bene comune, FrancoAngeli, Milano.Ansell, C., & Gash, A. (2008). Collaborative *governance* in theory and practice. Journal of public administration research and theory, 18(4), 543-571.

Ansell, C., & Gash, A. (2008). Collaborative governance in theory and practice. Journal of public administration research and theory, 18(4), 543-571.

Antonini, A. (2024). Comune di Tortona. Dal progetto alla realizzazione di una comunità energetica rinnovabile. Facility Management Italia. https://iris.uniroma1.it/handle/11573/1711857

Antonini, M., Battisti, A., Calvano, A., & Canducci, A. (2024). Comune di Tortona. Dal progetto alla realizzazione di una CER. FACILITY MANAGEMENT ITALIA, 45, 37-43.

Antrop, M. (2005). Why landscapes of the past are important for the future. Landscape and urban planning, 70(1-2), 21-34.

Antrop, M. (2006). Sustainable landscapes: contradiction, fiction or utopia?. Landscape and urban planning, 75(3-4), 187-197.

Antrop, M. (2018). A brief history of landscape research. In The Routledge companion to landscape studies (pp. 1-15). Routledge.

Apostol, D., Palmer, J., Pasqualetti, M., Smardon, R., & Sullivan, R. (2016). The renewable energy landscape: Preserving scenic values in our sustainable future. Routledge.

Arnstein, S. R. (1969). A ladder of citizen participation. Journal of the American Institute of planners, 35(4), 216-224.

ARPAE Emilia-Romagna. (2021). Osservatorio energia e clima regionale: Metodologie e strumenti per il monitoraggio delle politiche locali. Agenzia Regionale per la Prevenzione, l'Ambiente e l'Energia dell'Emilia-Romagna.

ARPAE Emilia-Romagna. (2023). Indicatori territoriali per la pianificazione energetica e climatica locale. Agenzia Regionale per la Prevenzione, l'Ambiente e l'Energia dell'Emilia-Romagna.

Ballon, P., & Schuurman, D. (2015). Living labs: concepts, tools and cases. info, 17(4).

Barbier, E. B. (1987). The concept of sustainable economic development. Environmental Conservation, 14(2), 101-110.

Barbier, E. B. (2016). Sustainability and development. Annual Review of Resource Economics, 8(1), 261-280.

Barresi, A. (2023). Urban Digital Twin and urban planning for sustainable cities. TECHNE-Journal of Technology for Architecture and Environment, (25), 78-83.

Basti, A., (2015). Valorizzazione del patrimonio immobiliare e territoriale: riflessioni per un approccio integrato. EWT/Eco Web Town Magazine of Sustainable Design Edizione SCUT. Avainable on-line: http://www.ecowebtown.it/n_12/pdf/12_10_basti_it.pdf (accessed of 20 Febbruary 2024).

Basti, A., Misceo, M., & Di Giuseppe, E. (2023). Energy communities and architectural quality of small historical centres. TECHNE - Journal of Technology for Architecture and Environment, (26), 151–162. https://doi.org/10.36253/techne-14476

Batty, M. (2013). The new science of cities. MIT press.

Batty, M. (2018). Digital twins. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 45(5), 817-820.

Batty, M. (2018). Inventing future cities. MIT press.

Batty, M., Axhausen, K. W., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., ... & Portugali, Y. (2012). Smart cities of the future. The European Physical Journal Special Topics, 214(1), 481-518.

Belton, V., & Stewart, T. (2012). Multiple criteria decision analysis: an integrated approach. Springer Science & Business Media.

Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2012). Green infrastructure: linking landscapes and communities. Island press.

Berkes, F., Folke, C., & Colding, J. (Eds.). (2000). Linking social and ecological systems: management practices and social mechanisms for building resilience. Cambridge University Press.

Bianchi, M., & Ginelli, A. (2018). The social dimension in energy landscapes. City, Territory and Architecture, 5(1), 10. https://cityterritoryarchitecture.springeropen.com/articles/10.1186/s40410-018-0085-5

Bibri, S. E. (2018). Smart sustainable cities of the future. Springer Berlin Heidelberg.

Bilal, M., Oyedele, L. O., Qadir, J., Munir, K., Ajayi, S. O., Akinade, O. O., ... & Pasha, M. (2016). Big Data in the construction industry: A review of present status, opportunities, and future trends. Advanced engineering informatics, 30(3), 500-521.

Bishop, I. D. (2015). Location based information to support understanding of landscape futures. Landscape and Urban Planning, 142, 120-131.

Bocken, N. M., De Pauw, I., Bakker, C., & Van Der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. Journal of industrial and production engineering, 33(5), 308-320.

Böhm, H., Zauner, A., Rosenfeld, D. C., & Tichler, R. (2020). Projecting cost development for future large-scale power-to-gas implementations by scaling effects. Applied Energy, 264, 114780.

Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. Automation in construction, 114, 103179.

Bollen, M. H. (2000). Comprendere i problemi di qualità dell'alimentazione (Vol. 3). New York: IEEE press.

Bollier, D., & Helfrich, S. (2019). Free, fair, and alive: The insurgent power of the commons. New Society Publishers;

Bond, A. J. (2013). Sustainability assessment: Pluralism, practice and progress. Routledge.

Bouzarovski, S. (2014). Energy poverty in the European Union: landscapes of vulnerability. Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, 3(3), 276-289.

Boyer, E. L., & Mitgang, L. D. (1996). Building Community: A New Future for Architecture Education and Practice. A Special Report. California Princeton Fulfillment Services; 1445 Lower Ferry Road, Ewing, NJ 08618.

Broto, V. C. (2019). Urban energy landscapes. Cambridge University Press.

Brunner, P. H., & Rechberger, H. (2016). Handbook of material flow analysis: For environmental, resource, and waste engineers. CRC press.

Brunoro, S., Bizzarri, G., & Boldrin, E. (2024). Exploring the potential of energy communities in the Italian territory. Frontiers in Built Environment, 10, 1365115.

Bryson, J. M. (2018). Strategic planning for public and nonprofit organizations: A guide to strengthening and sustaining organizational achievement. John Wiley & Sons.

Bulkeley, H., & Betsill, M. (2005). Rethinking sustainable cities: Multilevel governance and the'urban'politics of climate change. Environmental politics, 14(1), 42-63.

Campisi, B., Drigo, S., & Presotto, A. (2017). L'approccio sistemico per la gestione energetica: il caso del Comune di Udine. SERIE DI ARTICOLI DI RICERCA DEAMS, 5.

Candelise, C., & Ruggieri, G. (2020). Status and evolution of the community energy sector in Italy. Energies, 13(8), 1888. https://doi.org/10.3390/en13081888

Caramizaru, A., & Uihlein, A. (2020). Energy communities: an overview of energy and social innovation (Vol. 30083). Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Carmona, M. (2019). Principles for public space design, planning to do better. Urban design international, 24(1), 47-59.

Carrillo, C., Obando Montaño, A. F., Cidrás, J., & Díaz-Dorado, E. (2014). Review of power curve modelling for wind turbines. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 21, 572-581.

Cash, D. W., Clark, W. C., Alcock, F., Dickson, N. M., Eckley, N., Guston, D. H., ... & Mitchell, R. B. (2003). Knowledge systems for sustainable development. Proceedings of the national academy of sciences, 100(14), 8086-8091.

Castán Broto, V., Oballa, B., & Junior, P. (2013). Governing climate change for a just city: challenges and lessons from Maputo, Mozambique. Local Environment, 18(6), 678-704.

Castelli, M. (2026). Vehicle to grid spiegato semplice: come le auto elettriche possono alimentare la rete. Quotidiano Motori.

Ceschin, F., & Gaziulusoy, İ. (2019). Design for sustainability: a multi-level framework from products to socio-technical systems. Routledge.

Covenant of Mayors Office, Earth Observation, pagina informativa disponibile online: https://eu-mayors.ec.europa.eu/en/Earth-Observation (consultato il 1 gennaio 2026).
Chakraborty, S., & Sadachar, A. (2022). “Why should i buy sustainable apparel?” Impact of user-centric advertisements on consumers’ affective responses and sustainable apparel purchase intentions. Sustainability, 14(18), 11560.
Chezel, E., & Labussière, O. (2018). Energy landscape as a polity. Wind power practices in Northern Friesland (Germany). Landscape Research, 43(4), 503-516.
Ciribini, A. L. C. (2013). Level of Detail e Level of Development: I processi di committenza e l’information modelling. Techne, 90-99.
Ciribini, A. L. C. (2013). L'information modeling e il settore delle costruzioni: IIM e BIM. Maggioli.
City of Copenhagen. (2021). Digital Twin for Sustainable Urban Planning: Case Study Copenhagen. Copenhagen Municipality.
Clark, C. W. (1976). Mathematical bioeconomics: The optimal management resources. John Wiley & Sons.
Clark, W. C. (2007). Sustainability science: a room of its own. Proceedings of the National Academy of Sciences, 104(6), 1737-1738.
ClimaADAPT. (2008). Patto dei sindaci. Disponibile online: https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/eu-adaptation-policy/covenant-of-mayors; Nazioni
CNA – Consiglio Nazionale Architetti PPC. (2017). Qualità del progetto e concorsi di architettura. CNAPPC.
Cole, R. J. (2012). Passaggio dal design verde a quello rigenerativo. Building Research & Information, 40(1), 39-53.
Commissione Europea (2020). European Green Deal. Disponibile su: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_19_6691
Commissione europea, Direzione generale della Comunicazione, L'opinione pubblica nell'Unione europea – Primi risultati – Inverno 2022-2023, Commissione europea, 2023, https://data.europa.eu/doi/10.2775/460956
Commissione europea. (2013). Comunicazione della Commissione al Parlamento europeo, al Consiglio, al Comitato economico e sociale europeo e al Comitato delle regioni. Una strategia dell'UE di adattamento ai cambiamenti climatici. Disponibile online: https://eur-

lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52013DC0216

Commissione europea. (2021). Azione per il clima. Strategia di adattamento dell'UE. Disponibile online: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/adaptation-climate-change/eu-adaptation-strategy_en

Corner, J. (1999). Recovering landscape: Essays in contemporary landscape theory. Princeton Architectural Press.

Correljé, A., Hoppe, T., & Künneke, R. (2024). Guest Editorial: Special Issue on "Sustainable urban energy systems–Governance and citizen involvement". Energy Policy, 192, 114237.

Cosgrove, D. E. (1998). Social formation and symbolic landscape. Univ of Wisconsin Press.

Council of Europe (2000), European Landscape Convention.

Council of Europe, 2004. European Landscape Convention, Firenze. ETS No. 176 - Firenze, 20.X.2000. Available online: https://www.coe.int/en/web/conventions/-/council-of-europe-european-landscape-convention-ets-no-176-translations (accessed on 20 February 2024).

Council of Europe. (2000). European Landscape Convention. Council of Europe.

Cuocolo, L., Giampellegrini, P. P., & Granato, O. (2023). Le comunità energetiche rinnovabili: Modelli, regole, profili applicativi. EGEA spa

Daily, G. C., Söderqvist, T., Aniyar, S., Arrow, K., Dasgupta, P., Ehrlich, P. R., ... & Walker, B. (2000). The value of nature and the nature of value. Science, 289(5478), 395-396

Daly, H. E. (2017). Toward some operational principles of sustainable development 1. In The economics of sustainability (pp. 97-102). Routledge.

D'Angelo, P. (2010). Filosofia del paesaggio.

Dasgupta, P. (2008). The welfare economic theory of green national accounts. Environmental and Resource Economics, 42, 3-38.

Daunt, A. B. P., & Silva, T. S. F. (2019). Beyond the park and city dichotomy: Land use and land cover change in the northern coast of São Paulo (Brazil). Landscape and Urban Planning, 189, 352–361.

De Pascali & Bagaini, 2018). Cfr. De Pascali, P., & Bagaini, A. (2018). Energy transition and urban planning for local development: A critical review of the evolution of integrated spatial and energy planning. Energies, 12(1), 35.

De Pascali, P. (2021). Introduzione all'integrazione necessaria energia-urbanistica. Archivio di studi urbani e regionali: 131, supplemento, 2021, 5-22.

De Vidovich, L., Tricarico, L., & Zulianello, M. (2023). How can we frame energy communities' organisational models? Insights from the research 'community energy map'in the Italian context. Sustainability, 15(3), 1997.

De Vidovich, L., Tricarico, L., & Zulianello, M. (2023). Modelli organizzativi per le comunità energetiche. Riflessioni dalla ricerca 'Community Energy Map'. Impresa Sociale, (1), 122-137.

Debord, G., & Knabb, K. (2014). Theory of the Dérive. In The Improvisation Studies Reader (pp. 176-180). Routledge.

Dembski, F., Wössner, U., Letzgus, M., Ruddat, M., & Yamu, C. (2020). Urban digital twins for smart cities and citizens: The case study of Herrenberg, Germany. Sustainability, 12(6), 2307.

Deming, W. E. (1986). Out of the Crisis MIT Press. Reprint, ISBN, 13.

Devine-Wright, P. (2013). Explaining "NIMBY" objections to a power line: The role of personal, place attachment and project-related factors. Environment and behavior, 45(6), 761-781.

Devine-Wright, P. (Ed.). (2012). Renewable energy and the public. Routledge.

Di Salvatore, E. (2023). Il futuro delle comunità energetiche. Milano.

Direttiva (UE) 2023/... del Parlamento europeo e del Consiglio, del 13 settembre 2023, sull'efficienza energetica e che modifica il regolamento (UE) 2023/955 (rifusione) (europa.eu)

Droste, M. (2002). Bauhaus, 1919-1933. Taschen.

Eastman, C. M. (2011). BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. John Wiley & Sons.

Eastman, C. M. (2011). BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. John Wiley & Sons.

Edward Elgar Publishing; van der Werff, E., Perlaviciute, G., & Steg, L. (2016). Transition to smart grids: A psychological perspective. In Smart Grids from a Global Perspective: Bridging Old and New Energy Systems (pp. 43-62). Springer.

EEA. (2023). Environmental indicators and data tools. European Environment Agency. https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/environment

al-statement-
2023#:~:text=The%20report%20contains%20information%20on%20the%20EEA%E2%80%B2s%20environmental,ISBN%3A%20978-92-9480-679-6%20-%20ISSN%3A%201977-8449%20-%20doi%3A%2010.2800%2F7636500

Endsley, M.R., & Jones, D.G. (2025). Designing for Situation Awareness: An Approach to User-Centered Design, Third Edition (3rd ed.). CRC Press.

ENEA. (2022). Linee guida per la promozione e lo sviluppo delle comunità energetiche rinnovabili. Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile.

Energy Systems Catapult, Local Energy Accelerator Programme (LEAP), programmi e iniziative per la pianificazione energetica locale nel Regno Unito, disponibile su: https://es.catapult.org.uk/ Il Local Energy Accelerator

Esposito, M. A. (2006). Tecnologia dell'architettura: creatività e innovazione nella ricerca: materiali del I seminario OSDOTTA, Viareggio, 14-16 settembre 2005

Etzkowitz, H., & Leydesdorff, L. (2000). The dynamics of innovation: from National Systems and "Mode 2" to a Triple Helix of university–industry–government relations. Research policy, 29(2), 109-123.

EU Covenant of Mayors (2025). Guidebook: How to develop a SECAP.

European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency. (2025). Review of existing energy communities (ENERGIZE project report, GA No. 101167570). ENERGIZE – LIFE Clean Energy Transition Programme. Disponibile in: https://www.energizecommunity.eu/wp-content/uploads/2025/03/ENERGIZE-Review-of-existing-energy-communities.pdf

European Commission & ENoLL, (2020). Living labs and open innovation 2.0. Open Innovation 2.0 and the European Network of Living Labs (ENoLL)are ecosystems designed to allow co-creation, prototyping and experimentation. European Network of Living Labs.

European Commission – Covenant of Mayors Office. (2025). EU Covenant of Mayors for Climate and Energy: Guidebook – How to develop a Sustainable Energy and Climate Action Plan (SECAP).

European Commission (2004). Project Cycle Management Guidelines, Bruxelle.

European Commission (2021), Better Regulation Toolbox.

European Commission (2021). How to develop a Sustainable Energy and Climate Action Plan (SECAP) EUR 40339. Covenant of Mayors Guidebook | Main document, Joint Research Center.
European Commission, DG DEVCO; (2004). Aid Delivery Methods. Volume 1: Project Cycle Management Guidelines. European Commission.
European Commission. (2017). Strategic Environmental Assessment (SEA) Directive Guidance. European Commission;
European Commission. (2019). Clean energy for all Europeans package. Publications Office of the European Union.
European Commission. (2019). Renewable Energy Directive II (RED II). European Commission.
European Commission. (2020). EU Biodiversity Strategy for 2030: Bringing nature back into our lives. European Commission
European Commission. (2020). Governance of the Energy Union Regulation. European Commission.
European Commission. (2020). Powering a climate-neutral economy: An EU Strategy for Energy System Integration (COM(2020) 299 final). Brussels.
European Commission. (2021). Commission Delegated Regulation (EU) .../... supplementing Regulation (EU) 2020/852 of the European Parliament and of the Council by establishing the technical screening criteria for determining the conditions under which an economic activity qualifies as contributing substantially to climate change mitigation or climate change adaptation and for determining whether that economic activity causes no significant harm to any of the other environmental objectives {SEC(2021) 166 final} - {SWD(2021) 152 final} - {SWD(2021) 153 final}
European Commission. (2021). LIFE PREPAIR: Integrated air quality and climate planning at regional scale (LIFE Programme).
European Commission (2021). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: New European Bauhaus – Beautiful, sustainable, together (COM(2021) 573 final). Publications Office of the European Union.
European Commission (2020). Using Living Labs to roll out Sustainable Strategies for Energy Poor Individuals. CORDIS – EU research results.
European Commission. (2020). EUCityCalc: Integrated urban energy and climate planning tool (Horizon 2020 Programme).

European Commission. (n.d.). Destination Earth and Local Digital Twins. Retrieved from https://digital-strategy.ec.europa.eu

European Commission (2020). Taxonomy: Final report of the Technical Expert Group on Sustainable Finance. Brussels: European Commission.

European Environment Agency (EEA) (2019), *Sustainability transitions: policy and practice*, EEA Report No 09/2019, 10 September 2019, Copenhagen: European Environment Agency.

European Parliament & Council of the European Union. (2018). Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources (RED II). Official Journal of the European Union.

European Parliament and Council of the European Union. (2001, September 27). Directive 2001/77/EC on the promotion of electricity produced from renewable energy sources in the internal electricity market. Official Journal of the European Communities, L 283, 33–40.

European Parliament. (2024). ESG Asset Management in Europe. Retrieved from https://www.europarl.europa.eu

European Space Agency (ESA), sito istituzionale: https://www.esa.int/ (consultato il 14 marzo 2026).

European Union Agency for the Space Programme (EUSPA), pagina istituzionale disponibile online: Agenzia europea per il programma spaziale (EUSPA) https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/institutions-and-bodies/search-all-eu-institutions-and-bodies/european-union-agency-space-programme-euspa_it (consultato il 14 marzo 2026).

Faludi, A. (2000). The performance of spatial planning. Planning practice and Research, 15(4), 299-318.

Fei, S. (2024). Landscape design planning and research of renewable energy application projects from a sustainable perspective. Renewable Energy and Power Quality Journal, 138-151.

Fergus, P., & Chalmers, C. (2020). BMI: A Behavior Measurement Indicator for Fuel Poverty Using Aggregated Load Readings from Smart Meters. arXiv preprint arXiv:2002.12899.

Fischer, F. (2000). Citizens, experts, and the environment: The politics of local knowledge. Duke University Press.

Folke, C., Hahn, T., Olsson, P., & Norberg, J. (2005). Adaptive governance of social-ecological systems. Annu. Rev. Environ. Resour., 30(1), 441-473.

Forman, R. T. (1990). Landscape Ecology Plans for Managing Forests. In Is Forest Fragmentation a Management Issue in the Northwest?:

Papers from the Technical Session Sponsored by the Wildlife and Fish Ecology Working Group, Society of American Foresters' Annual Convention, October 19, 1988, Rochester, NY (Vol. 140, p. 27). US Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station.

Forman, R. T. T. (1990). Landscape ecology: Principles and applications. Springer.

Fowler, K. M., & Rauch, E. M. (2006). Riepilogo dei sistemi di valutazione degli edifici sostenibili (n. PNNL-15858). Laboratorio Nazionale del Pacifico Nord-Occidentale (PNNL), Richland, WA (USA).

Frayling, C. (1994). Research in art and design (Royal College of Art Research Papers, vol 1, no 1, 1993/4).

Fry, T. (2019). Design futuring in a borderland of postdevelopment. In Postdevelopment in practice (pp. 294-305). Routledge.

Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital twin: enabling technologies, challenges and open research. IEEE access, 8, 108952-108971.

Funtowicz, S. O., & Ravetz, J. R. (1993). Science for the post-normal age. Futures, 25(7), 739-755.

Gangale, F., Mengolini, A.M., Covrig, L., Chondrogiannis, S. e Shortall, R., (2023), "Rendere la regolazione dell'energia adatta allo scopo. Stato di avanzamento della sperimentazione normativa nell'UE". EUR 31438 EN, Ufficio delle pubblicazioni dell'Unione europea, Lussemburgo, ISBN 978-9268-00415-9, doi:10.2760/32253, JRC132259. On-line: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/c2da0ca3-c867-11ed-a05c01aa75ed71a1/language-en (accesso 25 settembre 2024).

Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, (2023). L 231/1 DIRETTIVA (UE) 2023/1791 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 13 settembre 2023 sull'efficienza energetica e che modifica il regolamento (UE) 2023/955 (rifusione) (Testo rilevante ai fini del SEE).

Gazzetta Ufficiale dell'Unione europea, (2024). Nuovo piano d'azione per l'economia circolare, C 465/11. Risoluzione del Parlamento europeo del 10 febbraio 2021 sul nuovo piano d'azione per l'economia circolare (2020/2077(INI)) (2021/C 465/03). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021IP0040

Gazzetta Ufficiale dell'Unione europea, (2024). Nuovo piano d'azione per l'economia circolare, C 465/11. Risoluzione del Parlamento europeo del 10 febbraio 2021 sul nuovo piano d'azione per l'economia circolare

(2020/2077(INI)) (2021/C 465/03). https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021IP0040

Gazzetta Ufficiale dell'Unione europea, (2024). Regolamento sulla progettazione ecocompatibile Emendamenti del Parlamento europeo, approvati il 12 luglio 2023, alla proposta di regolamento del Parlamento europeo e del Consiglio che stabilisce il quadro per l'elaborazione delle specifiche di progettazione ecocompatibile dei prodotti sostenibili e abroga la direttiva 2009/125/CE (COM(2022)0142 – C9-0132/2022 – 2022/0095(COD))(1) (Procedura legislativa ordinaria: prima lettura) (C/2024/4032). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=OJ:C_202404032

Gazzetta Ufficiale dell'Unione europea, (2024). Regolamento sulla progettazione ecocompatibile Emendamenti del Parlamento europeo, approvati il 12 luglio 2023, alla proposta di regolamento del Parlamento europeo e del Consiglio che stabilisce il quadro per l'elaborazione delle specifiche di progettazione ecocompatibile dei prodotti sostenibili e abroga la direttiva 2009/125/CE (COM(2022)0142 – C9-0132/2022 – 2022/0095(COD))(1)

Gazzetta Ufficiale (2023). Decreto Legislativo 31 Marzo 2023, N. 36. Codice dei contratti pubblici in attuazione dell'articolo 1 della legge 21 giugno 2022, n. 78, recante delega al Governo in materia di contratti pubblici. (23G00044) (GU n.77 del 31-03-2023 - Suppl. Ordinario n. 12)

Geels, F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. Research policy, 31(8-9), 1257-1274.

Geels, F. W. (2019). Socio-technical transitions to sustainability: a review of criticisms and elaborations of the Multi-Level Perspective. Current opinion in environmental sustainability, 39, 187-201.

Geels, F. W., & Schot, J. (2007). Typology of sociotechnical transition pathways. Research policy, 36(3), 399-417.

Geels, F. W., Sovacool, B. K., Schwanen, T., & Sorrell, S. (2017). Sociotechnical transitions for deep decarbonization. Science, 357(6357), 1242-1244.

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy–A new sustainability paradigm?. Journal of cleaner production, 143, 757-768.

Geneletti, D. (2013). Valutare l'impatto delle politiche alternative di zonizzazione per l'uso del suolo sui futuri servizi ecosistemici. Revisione della Valutazione dell'Impatto Ambientale, 40, 25-35.

Geneletti, D. (2015). A conceptual approach to promote the integration of ecosystem services in strategic environmental assessment. Journal of Environmental Assessment Policy and Management, 17(04), 1550035.
Geneletti, D., & Ferretti, V. (2015). Multicriteria analysis for sustainability assessment: concepts and case studies. In Handbook of sustainability assessment (pp. 235-264). Edward Elgar Publishing.
Gerli, F., & Tricarico, L. (2024). Energie di Comunità: Le Comunità Energetiche Rinnovabili per un Futuro Sostenibile. Milano: Fondazione Giangiacomo Feltrinelli.
Gibbons, M., & Nowotny, H. (2001). The potential of transdisciplinarity. In Transdisciplinarity: Joint problem solving among science, technology, and society: An effective way for managing complexity (pp. 67-80). Basel: Birkhäuser Basel.
Ginelli, E. (2018). Politecnico di Milano Scuola di Architettura Urbanistica e Ingegneria della Costruzioni. Offerta didattica della Tecnologia dell'Architettura. In La didattica della Tecnologia dell'architettura nella formazione dell'architetto (pp. 96-117). Clean Editore.
Ginelli, E., & Pozzi, G. (2018). Relazione dinamica tra le categorie di paesaggio e nuovi sistemi energetici. Città, Territorio e Architettura, 5(1), 18.
Giotitsas, C., Nardelli, P. H., Williamson, S., Roos, A., Pournaras, E., & Kostakis, V. (2022). Energy governance as a commons: Engineering alternative socio-technical configurations. Energy Research & Social Science, 84, 102354.
Glasson, J., & Therivel, R. (2013). Introduction to environmental impact assessment. Routledge.
Gobster, P. H., Nassauer, J. I., Daniel, T. C., & Fry, G. (2007). The shared landscape: what does aesthetics have to do with ecology?. Landscape ecology, 22(7), 959-972.
Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M. A. J., De Schryver, A., & Van Zelm, R. (2013). ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level (Version 1.08), Report I: Characterization (126 pp). PRé Consultants, University of Leiden.
Goodchild, M. F. (2007). Citizens as sensors: the world of volunteered geography. GeoJournal, 69(4), 211-221.
Grieves, M., & Vickers, J. (2016). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems.

In Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches (pp. 85-113). Cham: Springer International Publishing.
Grubler, A., et al. (2012). Policies for the Energy Technology Innovation System (ETIS). Energy Policy.
Global Reporting Initiative. (2021). *GRI Standards*. Amsterdam: GRI.
Halofsky, J. E., Peterson, D. L., & Prendeville, H. R. (2018). Assessing vulnerabilities and adapting to climate change in northwestern US forests. Climatic Change, 146(1), 89-102.
Harvey, D. (2010). L'enigma del capitale. Feltrinelli Editore.
Hausladen, G., & Tucci, F. (2017). Cultura tecnologica, Ambiente, Energia: prospettive della Ricerca e della Sperimentazione. Techne, 13, 63.
Hausladen, G., & Tucci, F. (2017). Technological Culture, the Environment and Energy: the outlook for research and experimentation. TECHNE-Journal of Technology for Architecture and Environment, 63-71.
Healey, P. (2020). Collaborative planning: Shaping places in fragmented societies. Bloomsbury Publishing.
Heaslip, E., & Fahy, F. (2018). Developing transdisciplinary approaches to community energy transitions: An island case study. Energy research & social science, 45, 153-163.
Heras-Saizarbitoria, I., Cilleruelo, E., & Zamanillo, I. (2013). Public acceptance of renewables and the media: an analysis of the Spanish PV solar experience. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 18, 717-727; Sovacool, B. K. (2009). The importance of comprehensiveness in renewable electricity and energy-efficiency policy. Energy Policy, 37(4), 1529-1541
Holling, C. S. (1978). Adaptive environmental assessment and management. John Wiley & Sons.
Hooghe, L., & Marks, G. (2001). Multi-level governance and European integration. Bloomsbury Publishing PLC.
Hooghe, L., & Marks, G. (2007). Multi-level governance. Stat & Styring, 16(4), 58-59.
Hvelplund, F. (2006). Renewable energy and the need for local energy markets. Energy, 31(13), 2293-2302.
I. Kyprianou, D.K. Serghides, A. Varo, J.P. Gouveia, D. Kopeva, L. Murauskaite, Energy poverty policies and measures in 5 EU countries: A comparative study, Energy and Buildings, Volume 196, 2019, Pages

46-60, ISSN 0378-7788, https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.05.003.
ICOMOS. (2011). Guidance on Heritage Impact Assessments for Cultural World Heritage Properties. International Council on Monuments and Sites.
ICOMOS. (2021). Guidance on heritage impact assessment. International Council on Monuments and Sites.
IEA (2017), Energy Technology Perspectives; UN (2015), Sustainable Development Goals.
IEA (2021), World Energy Outlook 2021, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021; IEA International Energy Agency, (2021). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions; World Energy Outlook 2021, IEA, Paris https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf
IEA. (2021). World Energy Outlook. International Energy Agency.
Innovate UK Catapult Network. (2022). Catapult Network: Creating the Future through Innovation (2020)
Innovate UK Catapult Network. (2022). Equality, diversity and inclusion charter. Innovate UK Catapult Network.
Innovate UK Catapult Network. (2023). Catapult network: Growth and prosperity stories. Innovate UK Catapult Network
Innovate UK Catapult Network. (2025). Innovate UK Catapult Network prospectus. Innovate UK Catapult Network
International Renewable Energy Agency (IRENA), (2020). Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables. Available at: https://www.irena.org/publications/2019/Feb/Innovation-landscape-for-a-renewable-powered-future
IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis.
IRENA (2024), Renewable energy statistics 2024, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/IRENA_Renewable_Energy_Statistics_2024.pdf
IRENA (2023), World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway, Volume 1, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENIA. (2023). Comunità Energetiche Rinnovabili e modelli di economia circolare. Milano: Istituto per la Ricerca Energetica e l'Innovazione Applicata.

IRENA (International Renewable Energy Agency). (2020). Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2020.

IRENA International Renewable energy Agency. (2021). Renewable Energy Statistics 2021 The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Aug/IRENA_Renewable_Energy_Statistics_2021.pdf

IRENA Coalition for Action (2021), Community Energy Toolkit: Best practices for broadening the ownership of renewables, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

ISO. (2015). ISO 9001:2015 – Quality management systems – Requirements. International Organization for Standardization.

ISPRA. (2022). 3 ISPRA per la sostenibilità. Impatti della fuznione pubblica. Roma: Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.

ISPRA. (2023). Rapporto sul consumo di suolo in Italia. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.

Jacobson, M. Z., & Delucchi, M. A. (2011). Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. Energy policy, 39(3), 1154-1169

Jamshed, A., Birkmann, J., Feldmeyer, D., & Rana, I. A. (2020). A conceptual framework to understand the dynamics of rural–urban linkages for rural flood vulnerability. Sustainability, 12(7), 2894.

Janssen, M., Charalabidis, Y., & Zuiderwijk, A. (2012). Benefits, adoption barriers and myths of open data and open government. Information systems management, 29(4), 258-268.

Jenkins, K., McCauley, D., Heffron, R., Stephan, H., & Rehner, R. (2016). Energy justice: A conceptual review. Energy Research & Social Science, 11, 174–182.

Joint Research Centre (JRC). (n.d.). BIM standardization in public buildings. Retrieved from https://publications.jrc.ec.europa.eu

JRC Joint Research Centre, (2020). Science for Policy Report Energy Communities: an overview of energy and social innovation. European Commission, Joint Research Centre. Available at: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC119433

Kant, I. (1909). Critique of practical reason. Huge Print Press.

Kassem, M., Kelly, G., Dawood, N., Serginson, M., & Lockley, S. (2015). BIM in facilities management applications: a case study of a large university complex. Built Environment Project and Asset Management, 5(3), 261-277.

Kassem, M., Succar, B., & Dawood, N. (2015). Building information modeling: Analyzing noteworthy publications of eight countries using a knowledge content taxonomy. In Building information modeling: Applications and practices.

Kastner, J., & Wallis, B. (2005). Land & environmental art.

Kellert, S. R., Heerwagen, J., & Mador, M. (2011). Biophilic design: the theory, science and practice of bringing buildings to life. John Wiley & Sons.

Kerzner, H. (2025). Project management: a systems approach to planning, scheduling, and controlling. John Wiley & Sons.

Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. Resources, conservation and recycling, 127, 221-232.

Kitzing, L., Islam, M., Soysal, E. R., Held, A., Ragwitz, M., Winkler, J., ... & Woodman, B. (2016). Recommendations on the role of auctions in a new renewable energy directive.

Klein, J. T. (1990). Interdisciplinarity: History, Theory, and Practice. Wayne State University Press

Kuhn, T. S. (1962). The Structure of Scientific Revolutions. University of Chicago Press.

Lang, D. J., Wiek, A., Bergmann, M., Stauffacher, M., Martens, P., Moll, P., ... Thomas, C. (2012). Transdisciplinary research in sustainability science: Practice, principles, and challenges. Sustainability Science, 7(1), 25-43. https://link.springer.com/article/10.1007/s11625-011-0149-x

Lefebvre, H. (2003). The urban revolution. U of Minnesota Press.

Leminen, S., Westerlund, M., & Nyström, A. G. (2012). Living labs as open-innovation networks.

Lieder, M., & Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. Journal of cleaner production, 115, 36-51.

Liesbet, H. O. O. G. H. E., & Gary, M. (2003). Unraveling the central state, but how? Types of multi-level governance. American political science review, 97(2), 233-243.

Liu, M., & Zhang, K. (2024). Smart city landscape design for achieving net-zero emissions: Digital twin modeling. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 63, 103659.

Logical Framework Approach (LFA) è uno strumento riconosciuto per tradurre obiettivi complessi in risultati verificabili, con indicatori, verifiability sources e assunzioni. È usato in pianificazione, monitoraggio e valutazione di progetti di sviluppo.

Longley P. et al. (2015), Geographic Information Systems and Science; Angelakoglou K. et al. (2020), Digital transformation in energy systems. Applied Energy.

Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). Geographic information science and systems. John Wiley & Sons.

Losasso, M. (2011). Il progetto come prodotto della ricerca scientifica. TECHNE - Giornale di tecnologia per l'architettura e l'ambiente, 1(2), 78–85. https://doi.org/10.13128/Techne-9929

Losasso, M. (2018). Progetto, ambiente, resilienza. TECHNE J. Technol. Archit. Environ, 15, 16-20.

Losasso, M., Bologna, R., Mussinelli, E., & Tucci, F. (2021). Dai distretti urbani agli eco-distretti Metodologie di conoscenza, programmi strategici, progetti pilota per l'adattamento climatico/From Urban Districts to Eco-districts Knowledge Methodologies, Strategic Programmes, Pilot Projects for Climate Adaptation.

Losasso, M., & Verde, S. (2020). Strategie Progettuali di Adattamento Urbano ed Edilizio in Scenari di Multirischio Ambientale. AGATHON: International Journal of Architecture, Art & Design, 8.

Liu, M., & Zhang, K. (2024). Smart city landscape design for achieving net-zero emissions: Digital twin modeling. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 63, 103659.

MacArthur, E. (2013). Towards the circular economy. Journal of industrial ecology, 2(1), 23-44.

MacArthur, E. (2015). Towards a circular economy: business rationale for an accelerated transition. Greener Manag International, 20(3).

Macarthur, E. L. L. E. N., & Heading, H. E. A. D. I. N. G. (2019). How the circular economy tackles climate change. Ellen MacArthur Found, 1, 1-71.

Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. International journal of geographical information science, 20(7), 703-726

Manzini, E. (2015). Design, when everybody designs: An introduction to design for social innovation. MIT press.

Maran, S., Gargiulo, A., Aiello, M., & Decimi, G. (2023). Sintesi delle attività di comunicazione e disseminazione per l'anno 2022 del Progetto" Energia da fonti rinnovabili e integrazione nel territorio". Ricerca di Sistema, RSE, (22014132).

Marinelli, G., & Bedini, M. A. (2016). The Mid-adriatic Metropolitan Area in Marche Region. An Integrated Territorial Project that Includes Inland Areas and Cities in a Metropolitan Context to Relaunch Local Competitive Systems. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 223, 386-393.

Market Data Forecast. (2025). Digital Twin Market in Europe. Retrieved from https://www.marketdataforecast.com

Martínez-Fernández, S., Bogner, J., Franch, X., Oriol, M., Siebert, J., Trendowicz, A., ... & Wagner, S. (2022). Software engineering for AI-based systems: a survey. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology (TOSEM), 31(2), 1-59.

MASE - Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, (2024). Decreto giugno 2024 Disciplina per l'individuazione di superfici e aree idonee per l'installazione di impianti a fonti rinnovabili. (24A03360) (GU Serie Generale n.153 del 02-07-2024).

MASE - Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, (2023). Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) – Aggiornamento. Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica; MASE. (2023). Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC). Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica.

McCauley, D., & Heffron, R. (2018). Just transition: Integrating climate, energy and environmental justice. Energy Policy, 119, 1-7.

McCormick, K., Anderberg, S., Coenen, L., & Neij, L. (2013). Advancing sustainable urban transformation. Journal of cleaner production, 50, 1-11.

McDonough, W., & Braungart, M. (2010). Cradle to cradle: Remaking the way we make things. North point press.

McHarg, I. L. (1969). Design with nature (pp. 7-17). New York: American Museum of Natural History.

MEa, M. E. A. (2005). Ecosystems and Human Well-Being: wetlands and water synthesis.

Meadowcroft, J. (2009). What about the politics? Sustainable development, transition management, and long term energy transitions. Policy sciences, 42(4), 323-340.

Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens III, W. W. (1972). The Limits to Growth. Universe Books.

Meerow, S., & Newell, J. P. (2019). Urban resilience for whom, what, when, where, and why?. Urban geography, 40(3), 309-329.

Meerow, S., Newell, J. P., & Stults, M. (2016). Defining urban resilience: A review. Landscape and urban planning, 147, 38-49.

Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. (2024). *Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima* (PNIEC) – *Aggiornamento*. Roma.

https://www.mase.gov.it/portale/documents/d/guest/pniec_2024_revfin_01072024-errata-corrige-pulito-pdf

Ministero della Transizione Ecologica (MiTE). (2021). Linee guida PNRR, PN GPP e principi di sostenibilità. Roma: MiTE.

MASE- Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, (2020). *Piano Nazionale Integrato Energia e Clima* (PNIEC). Roma.

Ministero Dello Sviluppo Economico, (2010). Decreto Ministeriale del 10 settembre 2010. Linee Guida Per L'autorizzazione Degli Impianti Alimentati Da Fonti Rinnovabili. (10a11230) (Gu Serie Generale N.219 Del 18-09-2010)

MIUR, 2015. Declaratoria dei settori concorsuali, allegato B, Macro settore 08, p. 30.

Moroni, S., & Lorini, G. (2017). Graphic rules in planning: A critical exploration of normative drawings starting from zoning maps and form-based codes. Planning Theory, 16(3), 318-338.

Musso, S. F., & Franco, G. (2006). Guida agli interventi di recupero dell'edilizia diffusa nel parco nazionale delle cinque terre. Marsilio.

Nadaï A., van der Horst D. (2010), Wind power planning, landscapes and publics. Land Use Policy; Selman P. (2012), Sustainable landscape planning.

Nadaï, A., & van Der Horst, D. (2010). Introduction: Landscapes of energies. Landscape research, 35(2), 143-155.

Nagendra, H., & Ostrom, E. (2012). Polycentric governance of multifunctional forested landscapes. International Journal of the Commons, 6(2).

Nassauer, J. I. (1995). Messy ecosystems, orderly frames. Landscape journal, 14(2), 161-170.

Nava, C., & Mangano, G. (2023). Living Lab for the design and activation of energy communities in the inner areas. TECHNE-Journal of Technology for Architecture and Environment, (26), 120-130.

Naveh, Z., & Lieberman, A. S. (2013). Landscape ecology: theory and application. Springer Science & Business Media.

Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems. Procedia Manufacturing, 11, 939–948.

Nesshöver, C., Assmuth, T., Irvine, K. N., Rusch, G. M., Waylen, K. A., Delbaere, B., ... & Wittmer, H. (2017). The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective. Science of the total environment, 579, 1215-1227.

Nicolescu, B. (2002). Manifesto of transdisciplinarity. suny Press. In questo manifesto per il XXI secolo.

Nicolescu, B. (2014). Methodology of transdisciplinarity. World futures, 70(3-4), 186-199.

NORAD. (1999). The logical framework approach (LFA) : handbook for objectives-oriented planning (4. ed). NORAD, Direktoratet for utviklingshjelp, Norwegian Agency for Development Cooperation.

Odum, E. P. (1993). Ecology and our endangered life-support systems (2nd ed.). Sunderland, MA: Sinauer Associates.

OECD (2017), The Governance of Land Use in OECD Countries: Policy Analysis and Recommendations, OECD Regional Development Studies, OECD Publishing, Paris.

OECD (2017), Public Procurement for Innovation: Good Practices and Strategies, OECD Public Governance Reviews, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/9789264265820-en.

OECD (2019), Better Criteria for Better Evaluation: Revised Evaluation Criteria Definitions and Principles for Use.

OECD (2019), Enhancing Innovation Capacity in City Government, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/f10c96e5-en.

OECD (2020), “Smart Cities and Inclusive Growth: Building on the outcomes of the 1st OECD Roundtable fon Smart Cities and Inclusive Growth”, OECD Regional Development Papers, No. 91, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/8a4ce475-en.

OECD (2020), Improving Governance with Policy Evaluation: Lessons From Country Experiences, OECD Public Governance Reviews, OECD Publishing, Paris.

OECD (2020). Capacity Building for Policy Effectiveness. OECD Publishing.
OECD (2025), “Governing for the green transition”, OECD Net Zero+ Policy Papers, No. 13, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/5b0aa7d0-en.
OECD. (2019). Public procurement for innovation. Paris: OECD Publishing.
Okushima, S. (2016). Measuring energy poverty in Japan, 2004–2013. Energy Policy, 98, 557–564.
Ostrom, E. (1990), Governing the Commons, Cambridge: Cambridge University Press.
Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. Science, 325(5939), 419-422.
Ostrom, E. (2009). A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. Science, 325, 419–422.
Ostrom, E. (2010). Beyond markets and states: polycentric governance of complex economic systems. American economic review, 100(3), 641-672.
Bertoldi, P., BORNAS, C. D., Monni, S., & PIERS, D. (2010). Linee guida-Come sviluppare un Piano di Azione per l'Energia Sostenibile-PAES (Guidebook-How to Develop a Sustainable Energy Action Plan-SEAP).
Pachauri, S., & Spreng, D. (2011). Measuring and monitoring energy poverty. Energy Policy.
Pahl-Wostl, C. (2007). Transitions towards adaptive management of water facing climate and global change. Water resources management, 21(1), 49-62.
Pahl-Wostl, C. (2009). A conceptual framework for analysing adaptive capacity and multi-level learning processes in resource governance regimes. Global environmental change, 19(3), 354-365.
Palerm Salazar, J. M. (2022). The jungle nature of the paesaggio svuotato. A proposito di Berlino, "natura urbana" architettura, arte e vuoto come materia del progetto. Il caso del Natur Park Shöneberger Südglände.
Papanek, V., & Fuller, R. B. (1972). Design for the real world.
Pasqualetti, M. J. (2011). Opposing wind energy landscapes: a search for common cause. Annals of the Association of American Geographers, 101(4), 907-917.

Patiwael, P. R., Groote, P., & Vanclay, F. (2019). Improving heritage impact assessment: an analytical critique of the ICOMOS guidelines. International Journal of Heritage Studies, 25(4), 333-347.

Pettit, C., Bakelmun, A., Lieske, S. N., Glackin, S., Hargroves, K. 'C.', Thomson, G., Shearer, H., Dia, H., & Newman, P. (2018). Planning support systems for smart cities. City, Culture and Society, 12, 13–24.

Pezzagno, M., & Rosini, M. (2017). Energia da fonti rinnovabili: rischi e opportunità tra pianificazione locale e paesaggio. In Pianificare per la sostenibilità energetica della città (pp. 185-199). Maggioli Editore.

Pietrapertosa, F., Salvia, M., De Gregorio Hurtado, S., Geneletti, D., D'Alonzo, V., & Reckien, D. (2021). Multi-level climate change planning: An analysis of the Italian case. Journal of Environmental Management, 289, 112469.

Pohl, C., & Hadorn, G. H. (2007). Principles for designing transdisciplinary research.

Presidente della Repubblica (2012). Decreto-legge 15 marzo 2012, n. 21. Norme in materia di poteri speciali sugli assetti societari nei settori della difesa e della sicurezza nazionale, nonché per le attività di rilevanza strategica nei settori dell'energia, dei trasporti e delle comunicazioni convertito con modificazioni dalla L. 11 maggio 2012, n. 56 (Gazzetta Ufficiale n. 63, 15/03/2012; G.U. n. 111, 14/05/2012).

Presidente della Repubblica, (2011). Decreto Legislativo 3 Marzo 2011, N. 28. Attuazione Della Direttiva 2009/28/CE sulla Promozione dell'uso dell'energia da Fonti Rinnovabili recante modifica e successiva abrogazione delle Direttive 2001/77/CE E 2003/30/CE. (11G0067) (GU N.71 Del 28-03-2011 - Suppl. Ordinario N. 81).

Presidente della Repubblica, (2028). Decreto Legislativo 16 Gennaio 2008, N. 4. Ulteriori Disposizioni Correttive Ed Integrative Del Decreto Legislativo 3 aprile 2006, N. 152, Recante Norme In Materia Ambientale. (GU N.24 Del 29-01-2008 - Suppl. Ordinario N. 24).

Progettazione del contesto e dello scenario – World Energy Outlook 2023 – Analisi - IEA

Quici, F. (2023). Architettura e cultura visuale (pp. 1-240). Libria.

Raul Armando, A. H. (2022). Robert Smithson y el paisaje entrópico: los primeros años del Land Art y su legado actual.

Raworth, K. (2018). Doughnut economics: Seven ways to think like a 21st century economist. Chelsea Green Publishing.

Reckien, D., Salvia, M., Heidrich, O., Church, J. M., Pietrapertosa, F., De Gregorio-Hurtado, S., ... & Dawson, R. (2018). How are cities planning

to respond to climate change? Assessment of local climate plans from 885 cities in the EU-28. Journal of cleaner production, 191, 207-219.

Reike, D., Vermeulen, W. J., & Witjes, S. (2018). The circular economy: new or refurbished as CE 3.0?—exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options. Resources, conservation and recycling, 135, 246-264.

REN21. (2023). Renewables 2023 Global Status Report. REN21 Secretariat.

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., ... & Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. nature, 461(7263), 472-475. https://www.stockholmresilience.org/download/18.8615c78125078c8d3380002197/ES-2009-3180.pdf 86.

Rodríguez-Rivero, R., & Ortiz-Marcos, I. (2022). The methodology of the Logical Framework with a Risk Management Approach to Improve the Sustainability in the International Development Projects. Sustainability, 14(2), 756.

Rutherford, J., & Coutard, O. (2014). Urban energy transitions: places, processes and politics of socio-technical change. Urban studies, 51(7), 1353-1377.

Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers. John Wiley & Sons.

Sadler, B., & Dalal-Clayton, B. (2012). Strategic environmental assessment: a sourcebook and reference guide to international experience. Routledge.

Salazar, J. M. P. (2015). Landscape Architecture and Water. *Agriculture and agricultural science procedia*, 4, 320-326.

Schaffers, H., Komninos, N., Pallot, M., Trousse, B., Nilsson, M., & Oliveira, A. (2011). Smart cities and the future internet: Towards cooperation frameworks for open innovation. In The future internet assembly (pp. 431-446). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Schaffers, H., Sällström, A., Pallot, M., Hernández-Muñoz, J. M., Santoro, R., & Trousse, B. (2011). Integrating living labs with future internet experimental platforms for co-creating services within smart cities. In 2011 17th International Conference on Concurrent Enterprising (pp. 1-11). IEEE

Schiaffonati, F. (2016). The territory of infrasctructures/Il territorio delle infrastrutture. TECHNE, (11), 12-22.

Schliwa, G., Evans, J., McCormick, K., & Voytenko, Y. (2015, March). Living labs and sustainability transitions–Assessing the impact of urban experimentation. In Proceedings of the INOGOV *Workshop*: Climate Change Policy and Governance: Initiation, Experimentation, Evaluation, Helsinki, Finland (pp. 12-13).

Schuurman, D. (2015). Bridging the gap between Open and User Innovation? Technology Innovation Management Review, 5(9), 6–17.

Schuurman, D. (2015). Bridging the gap between Open and User Innovation?: exploring the value of Living Labs as a means to structure user contribution and manage distributed innovation (Doctoral dissertation, Ghent University).

SEI (Stockholm Environment Institute). (2016). LEAP: Long-range energy alternatives planning system. Stockholm Environment Institute.

Settis S. (2010), Paesaggio, Costituzione, cemento.

Seyfang, G., Park, J. J., & Smith, A. (2013). A thousand flowers blooming? An examination of community energy in the UK. Energy policy, 61, 977-989.

Shapiro, G. (1995). Earthwards: Robert Smithson and Art after Babel. Univ of California Press.

Sharifi, A., & Yamagata, Y. (2016). Urban resilience assessment: Multiple dimensions, criteria, and indicators. In Urban resilience: A transformative approach (pp. 259-276). Cham: Springer International Publishing.

Simpson, C., & Rodrigues, F. (2024). JRC Highlights Report 2024 – From Science to Impact. In I. Bonjean, J. Bray, I. Čeliković, M. Fornara, K. James, et al. (Eds.), Publications Office of the European Union. Lo studio JRC Highlights Report 2024 – From Science to Impact, a cura del Joint Research Centre della Commissione Europea.

Smith, A. (2007). Emerging in between: The multi-level governance of renewable energy in the English regions. Energy policy, 35(12), 6266-6280.

Smith, A., Stirling, A., & Berkhout, F. (2016). The governance of sustainable socio-technical transitions. Research Policy, 34(10), 1491-1510.

SNPA Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (2025). Report Ambientali SNPA n. 45/2025 – ISBN: 978-88-448-1278-2

Società indirettamente controllata dal Ministero dell'Economia e delle Finanze attraverso il suo azionista unico GSE S.p.A.
Società indirettamente controllata dal Ministero dell'Economia e delle Finanze attraverso il suo azionista unico GSE S.p.A. Sito online: https://www.rse-web.it/intro-risultati/
Società indirettamente controllata dal Ministero dell'Economia e delle Finanze attraverso il suo azionista unico GSE S.p.A. Sito online: https://www.rse-web.it/intro-risultati/
Solow, R. (1993). An almost practical step toward sustainability. Resources policy, 19(3), 162-172.
Sovacool, B. K., & Brown, M. A. (2010). Competing dimensions of energy security: An international perspective. Annual Review of Environment and Resources, 35, 77-108
Sovacool, B. K., Brugger, H., Brunzema, I., Dańkowska, A., Wemyss, D., Vernay, A. L., ... & Rogge, K. S. (2023). Social innovation supports inclusive and accelerated energy transitions with appropriate governance. Communications Earth & Environment, 4(1), 289
Sovacool, B. K., Hess, D. J., & Cantoni, R. (2021). Energy transitions from the cradle to the grave: a meta-theoretical framework integrating responsible innovation, social practices, and energy justice. Energy Research & Social Science, 75, 102027.
Stahel, W. R. (2019). The circular economy: A user's guide. Routledge.
Steg, L. (2015). Environmental psychology and sustainable consumption. In Handbook of research on sustainable consumption (pp. 70-83).
Stead, D., & Meijers, E. (2009). Spatial planning and policy integration: Concepts, facilitators and inhibitors. Planning Theory & Practice, 10(3), 317–332.
Steen, K., & Van Bueren, E. (2017). The defining characteristics of urban living labs. Technology innovation management review, 7(7).
Steiner, F. (2014). Landscape Ecological Urbanism. Harvard University Press.
Stremke, S., & van den Dobbelsteen, A. (Eds.). (2012). Sustainable energy landscapes: designing, planning, and development. CRC Press.
Stremke, S., Koh, J., Neven, K., & Boekel, A. (2012). Integrated visions (part II): Envisioning sustainable energy landscapes. European Planning Studies, 20(4), 609-626
Stremke, S., & van den Dobbelsteen, A. (Eds.). (2018). Sustainable Energy Landscapes: Designing, Planning, and Development. CRC Press.

https://www.routledge.com/Sustainable-Energy-Landscapes-Designing-Planning-and-Development/Stremke-Dobbelsteen/p/book/9780367380885

Tao, F., Qi, Q., Liu, A., & Kusiak, A. (2018). Data-driven smart manufacturing. Journal of manufacturing systems, 48, 157-169.

Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. (2018). Digital twin in industry: State-of-the-art. IEEE Transactions on industrial informatics, 15(4), 2405-2415.

Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors. Wiley; Romano, M., Schiaffonati, F., Zermani, P., & Gambaro, M. (2020). Costruire il paesaggio: l'architettura italiana tra contesto ambientale e globalizzazione.

Terna S.p.A., (2025). Piano di sviluppo della rete elettrica nazionale 2025-2034. Terna Driving Energy.

Terna S.p.A., (2022). Piano di sviluppo infrastrutture elettriche e transizione energetica. Roma: Terna S.p.A.

Thackara, J. (2006). In the bubble: Designing in a complex world. MIT press.

Trencher, G., Yarime, M., McCormick, K. B., Doll, C. N., & Kraines, S. B. (2014). Beyond the third mission: Exploring the emerging university function of co-creation for sustainability. Science and Public Policy, 41(2), 151-179.

Tress, B., Tress, G., & Fry, G. (2006). From Landscape Research to Landscape Planning: Aspects of Integration, Education and Application. Springer.

Tress, G., Tress, B., & Fry, G. (2007). Analysis of the barriers to integration in landscape research projects. Land use policy, 24(2), 374-385.

Trevisan, R., Ghiani, E., & Pilo, F. (2023). Comunità di energie rinnovabili nei distretti energetici positivi: un quadro di governance e realizzazione conforme al regolamento italiano. Città intelligenti, 6(1), 563-585

Tucci, F. (2009). Tecnologia e natura. Gli insegnamenti del mondo naturale per il progetto dell'architettura bioclimatica (Vol. 8). Alinea Editrice.

Tucci, F. (2018). Costruire e abitare green. Approcci, strategie, sperimentazioni per una progettazione tecnologica ambientale-Green

building and dwelling. Approaches, strategies, experimentation for an environmental technological design. Ediz. bilingue. Altralinea Edizioni;
Tulumello, S., & Allegretti, G. (2021). Articulating urban change in Southern Europe: Gentrification, touristification and financialisation in Mouraria, Lisbon. European Urban and Regional Studies, 28(2), 111-132.
Turci, G., Civiero, P., Aparisi-Cerdá, I., Marotta, I., & Massa, G. (2024). Approcci di transizione verso distretti energetici positivi: una revisione sistematica. Edifici, 14(10), 3039;
UIA – Union Internationale des Architectes. (2017). UNESCO–UIA Charter for Architectural Education. UNESCO.
UNDP - United Nations Development Programme Policy. (2009). Capacity development: A UNDP primer. UNDP/BDP/CDG, New York.
UNDP, I. (2015). Capacity Development: a UNDP primer. New York: UNDP. https://www.undp.org/publications/capacity-development-undp-primer
UNESCO (2011), Recommendation on the Historic Urban Landscape.
UNESCO (2018). Capacity Building for Sustainable Development.
UNESCO. (2003). Convention for the safeguarding of the intangible cultural heritage. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Paris: UNESCO.
Unite. (2008). Patto del sindaco per il clima e l'energia. Disponibile online: https://sdgs.un.org/partnerships/covenant-mayor-climate-and-energy
United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. New York: United Nations.
United Nations Statistics Division, (2023). Framework for the Development of Environment Statistics (FDES): National workshop on climate change and disaster-related statistics. United Nations.
United Nations, Department of Economic and Social Affairs. (2019). The future is now: Science for achieving sustainable development – Global Sustainable Development Report 2019. United Nations.
USAID. (1999). The Logical Framework: Handbook for Objectives-Oriented Planning (4th ed.). USAID.
Vale, L. J., & Campanella, T. J. (Eds.). (2005). The resilient city: How modern cities recover from disaster. Oxford University Press.
Van der Werff, E., Perlaviciute, G., & Steg, L. (2016). Transition to smart grids: A psychological perspective. In Smart Grids from a Global Perspective: Bridging Old and New Energy Systems (pp. 43-62). Cham: Springer International Publishing.

Verones, S., & Zanon, B. (2012). Energia e pianificazione urbanistica. Vers o un'integrazione delle politiche urbane. FrancoAngeli, Milano. supporting local low-carbon energy initiatives. Sustainability, 10(7), 2450.

Vikström, L., Ek, K., Luciani, A., & Rizzo, A. (2024). Co-designing the urban energy transition: A resident-based approach. Cities, 156, 105506. https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105506.

Vikström, L., Ek, K., Luciani, A., & Rizzo, A. (2025). Co-designing the urban energy transition: A resident-based approach. Cities, 156, 105506.

Virtue Market Research. (2025). BIM Market Growth Europe. Retrieved from https://www.virtuemarketresearch.com

Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings—Literature review and future needs. Automation in construction, 38, 109-127.

Volli, U. (2008). Il testo della città. Problemi metodologici e teorici. La città come testo. Scritture e riscritture urbane, 9-22.

Von Humboldt, A. (1877). Personal narrative of travels to the equinoctial regions of the new continent during the years 1799-1804 (Vol. 1). G. Bell.

Von Wirth, T., Fuenfschilling, L., Frantzeskaki, N., & Coenen, L. (2019). Impacts of urban living labs on sustainability transitions: Mechanisms and strategies for systemic change through experimentation. European Planning Studies, 27(2), 229-257.

Voytenko, Y., McCormick, K., Evans, J., & Schliwa, G. (2016). Urban living labs for sustainability and low carbon cities in Europe: Towards a research agenda. Journal of cleaner production, 123, 45-54.

Walker, G., & Devine-Wright, P. (2008). Community renewable energy: What should it mean? Energy Policy, 36(2), 497–500.

Wang, H., & Wang, Y. (2024). Smart cities net zero planning considering renewable energy landscape design in digital twin. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 63, 103629.

Wolsink, M. (2007). Wind power implementation: the nature of public attitudes: equity and fairness instead of 'backyard motives'. Renewable and sustainable energy reviews, 11(6), 1188-1207.

Wu, M. H., Hwang, C. S., Chang, C. L., Tsai, C. H., Yang, S. F., & Fu, C. Y. The Effects of Oxide Sintering aid on the Solid Electrolyte La0. 8Sr0. 2Ga0. 8Mg0. 2O3-δof SOFCs prepared by Atomosphere Plasma Spray Method. In International Research Conference on Sustainable Energy, Engineering, Materials and Environment (p. 30).

Wüstenhagen, R., Wolsink, M., & Bürer, M. J. (2007). Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. Energy policy, 35(5), 2683-2691.

Zanvettor, G. G., Casini, M., & Vicino, A. (2024). On Optimal Management of Energy Storage Systems in Renewable Energy Communities. arXiv preprint arXiv:2403.13707;

SITOGRAFIA

Commissione Europea, CE. (n.d.). *Multiannual financial framework*. Disponibile il 6 luglio 2026, da https://www.europarl.europa.eu/factsheets/en/sheet/29/multiannual-financial-framework

Commissione Europea, CE. (n.d.). *EU Emissions Trading System (EU ETS)*. Disponibile il 6 luglio 2026, da https://climate.ec.europa.eu/euaction/eu-emissions-trading-system-eu-ets/ets2-buildings-road-transport-and-additionalsectors_en

Commissione Europea, CE. (n.d.). *Social Climate Fund*. Disponibile il 6 luglio 2026, da https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/social-climatefund_en

Commissione Europea, CE. (2021). *Proposal COM(2021) 802 final*. Disponibile il 6 luglio 2026, da https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52021PC0802

Commissione Europea, CE. (n.d.). *Clean Energy Islands*. Disponibile il 6 luglio 2026, da https://clean-energy-islands.ec.europa.eu/

Commissione Europea, CE. (n.d.). *Smart Cities Marketplace*. Disponibile il 6 luglio 2026, da https://smart-cities-marketplace.ec.europa.eu/

Commissione Europea, CE. / JRC. (n.d.). *Sustainable Energy System*. Disponibile il 6 luglio 2026, da https://ses.jrc.ec.europa.eu/

Commissione Europea, CE. (n.d.). *Rural Energy Community Hub (archived)*. Disponibile il 6 luglio 2026, da https://wayback.archive-it.org/12090/20240320084824/https://rural-energy-community-hub.ec.europa.eu/index_en

Eurostat / UN DESA. (n.d.). *World Urbanization Prospects – Country Profiles*. Disponibile il 6 luglio 2026, da https://population.un.org/wup/Country-Profiles/

United Nations, UN. (2018). *World Urbanization Prospects 2018 – Highlights*. Disponibile il 6 luglio 2026, da https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Highlights.pdf

International Renewable Energy Agency, IRENA. (2024). *Renewable Energy Highlights (July 2024)*. Disponibile il 6 luglio 2026, da https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/Renewable_energy_highlights_FINAL_July_2024.pdf

Terna S.p.A. (2024). *Piano di sviluppo della rete elettrica*. Disponibile il 6 luglio 2026, da https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/programmazione-territoriale-efficiente/piano-sviluppo-rete

Solargis. (n.d.). *Solar resource maps & GIS data for 200+ countries*. Disponibile il 6 luglio 2026, da https://solargis.com/resources/free-maps-and-gis-data

Renewables Networking Platform. (n.d.). *Renewables Networking*. Disponibile il 6 luglio 2026, da https://www.renewables-networking.eu/

Clean Energy Ministerial, CEM. (n.d.). *15 Years of the Clean Energy Ministerial*. Disponibile il 6 luglio 2026, da https://www.cleanenergyministerial.org/

Legambiente, Comunità Rinnovabili. (n.d.). *Sito ufficiale*. Disponibile il 6 luglio 2026, da https://www.comunirinnovabili.it/

Gazzetta Ufficiale della Repubblica italiana, GU. (2006). *Testo normativo*. Disponibile il 6 luglio 2026, da https://www.normattiva.it/esporta/attoCompleto?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2006-04-14&atto.codiceRedazionale=006G0171

PV Magazine Italia. (n.d.). *Palmadula Solar*. Disponibile il 6 luglio 2026, da https://www.pv-magazine.it/tag/palmadula-solar/

ES Catapult. (n.d.). *Local Area Energy Plans*. Disponibile il 6 luglio 2026, da https://es.catapult.org.uk/tools-and-labs/local-area-energy-plans/

SDGs United Nations. (n.d.). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. Disponibile il 6 luglio 2026, da https://sdgs.un.org/publications/transforming-our-world-2030-agenda-sustainable-development-17981

Fonti generiche (istituzionali / portali)

PV magazine. (n.d.). *Sito web*. https://www.pv-magazine.it

Renewables Networking. (n.d.). *Sito web*. https://www.renewablesnetworking.eu

Lumi Network. (n.d.). *Sito web*. https://luminetwork.it

PAESC. (n.d.). *Piani d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima*. https://www.paesc.it

PNIEC Monitoraggio. (n.d.). *Sito web*. https://www.pniecmonitoraggio.it

Sustainable Sites Initiative. (n.d.). *Sito web*. https://www.sustainablesites.org

GLOSSARIO

A

AEL Attività Edilizia Libera

AEC Architecture, Engineering & Construction (Architettura, Ingegneria e Costruzioni)

AIA Autorizzazione Integrata Ambientale

ANCI Associazione Nazionale Comuni Italiani

APE Attestato di Prestazione Energetica

ARERA Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente

AU Autorizzazione Unica regionale

B

BIM Building Information Modeling

BUR Bollettino Ufficiale Regionale

C

CEC Comunità Energetica dei Cittadini

CE Commissione Europea

CEN Comité Européen de Normalisation

CER Comunità Energetica Rinnovabile

CEEP Community Energy and Emissions Plans

CUNY City University of New York Center

D

D.L. Decreto Legge

D.Lgs Decreto Legislativo

DM Decreto Ministeriale

DNSH "Do No Significant Harm"

DPR Decreto del Presidente della Repubblica

DRAG Documento Regionale di Assetto e Gestione

DUP Documento Unico di Programmazione

E

EED Direttiva sull'Efficienza Energetica

EPBD Direttiva sulla Prestazione Energetica degli Edifici

EPD Environmental Product Declaration

EU ETS European Union Emissions Trading System

F

FER Fonti Energetiche Rinnovabili

G

GIS Geographic Information Systems

GLA Gruppi di Azione Locali

GSE Gestore dei Servizi Energetici

GPP Green Public Procurement (PAN GPP / PAR GPP)

GW Gigawatt

I

IEA International Energy Agency

IoT Internet of Things

IRENA International Renewable Energy Agency

ISPRA Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale

ISO International Organization for Standardization

K

KPI Key Performance Indicators

L

LAEP Local Area Energy Plans

LFA Logical Framework Approach

LOD Level of Detail / Level of Development

LOI Level of Information

LOIN Level of Information Need

LUCSUS Lund University Centre for Sustainability Studies

M

MASE Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica

MiTE Ministero della Transizione Ecologica

MoU Memorandum of Understanding

N

NDCs Nationally Determined Contributions
NTA Norme Tecniche di Attuazion
nZEB Nearly Zero Energy Building

P

PA Pubblica Amministrazione
PAI Piano di Assetto Idrogeologico
PAESC Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima
PAN GPP Piano d'Azione Nazionale per il Green Public Procurement
PAR GPP Programma di Azione Regionale per il Green Public Procurement
PAS Procedura Abilitativa Semplificata
PDCA Plan–Do–Check–Act
PE Povertà Energetica
PED Positive Energy Districts
PER Piano Energetico Regionale
PGT Piano di Governo del Territorio
PIAO Piano Integrato di Attività e Organizzazione
PNACC Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici
PNIEC Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima
PNRR Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza
PPP Partenariato Pubblico-privato
PRG Piano Regolatore Generale
PRT Piano Regionale dei Trasporti
PSC Piano Strutturale Comunale
PUA Piani Urbanistici Attuativi
PUV Programmi Unitari di Valorizzazione del Territorio

R

REC Renewable Energy Communities
RED Direttiva sulle Energie Rinnovabili
RES Regional Energy Strategies
BIPV Building Integrated Photovoltaics

S

SIA Studio di Impatto Ambientale
SIC Siti di Interesse Comunitario

SNSvS Strategia Nazionale per lo Sviluppo Sostenibile

SNACC Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici

SSPC Sistemi Semplici di Produzione e Consumo

SUER Sportello Unico Energie Rinnovabili

T

TICA Testo Integrato delle Connessioni Attive

TIAD Testo Integrato Autoconsumo Diffuso

TISSPC Testo Integrato dei Sistemi Semplici di Produzione e Consumo

TUA Testo Unico dell'Ambiente

TUR Testo Unico sulle Rinnovabili

TICA Testo Integrato delle Connessioni Attive

U

UK United Kingdom

UNESCO United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

V

VAS Valutazione Ambientale Strategica

VIA Valutazione di Impatto Ambientale

VIncA Valutazione di Incidenza Ambientale

VQI Visual Quality Index

Z

ZPS Zone di Protezione Speciale

ZSC Zone Speciali di Conservazione

INDICE DELLE FIGURE

APPENDICE 1

Figura A.1 1 REScoop. (2022). *REC & CEC Transposition Tracker*. Bruxelles, Belgio. Recepimento nazionale delle definizioni di REC e CEC nei Paesi membri dell'Unione Europea.

Figura A.1 2 REScoop. (2023). *REC & CEC Transposition Tracker*. Bruxelles, Belgio. Recepimento nazionale delle definizioni di REC e CEC nei Paesi membri dell'Unione Europea.

Figura A.1 3 International Renewable Energy Agency (IRENA). (2024). *Renewable Energy Highlights*. Abu Dhabi, Emirati Arabi Uniti. Sintesi dei principali dati e indicatori relativi allo sviluppo delle energie rinnovabili a livello globale.

Figura A.1 4 Solargis. (s.d.). *Solar Resource Maps & GIS Data for 200+ Countries*. Bratislava, Slovacchia. Quota del fotovoltaico distribuito sul totale installato in Italia (25 GW) e alla mappatura del potenziale solare nazionale.

Figura A.1 5 Solargis. (s.d.). *Solar Resource Maps & GIS Data for 200+ Countries*. Bratislava, Slovacchia. Distribuzione provinciale della potenza fotovoltaica installata in Italia per provincia.

Figura A.1 6 Solargis. (s.d.). *Solar Resource Maps & GIS Data for 200+ Countries*. Bratislava, Slovacchia. Distribuzione pro capite della potenza fotovoltaica installata in Italia per regione.

Figura A.1 7 Terna S.p.A. (2024). *Dati statistici sull'energia elettrica in Italia*. Roma, Italia. Distribuzione della potenza fotovoltaica installata e diffusione pro-capite regionale in Italia.

Figura A.1 8 Snam S.p.A. & Terna S.p.A. (2024). *Documento di descrizione degli scenari Snam–Terna 2024*. Roma, Italia. Maturazione delle Fonti Energetiche Rinnovabili (FER) nel sistema energetico nazionale.

Figura A.1 9 Snam S.p.A. & Terna S.p.A. (2024). *Documento di descrizione degli scenari Snam–Terna 2024*. Roma, Italia. Variazione del saldo estero dell'energia elettrica: confronto tra scenario 2023 e scenario PNIEC Policy 2030 [TWh].

Figura A.1 9 Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. (2025). *Piattaforma PNIEC*. Roma, Italia. Descrizione dell'evoluzione temporale delle istanze di Valutazione di Impatto Ambientale (VIA)

presentate nel periodo 2022–2024, con analisi del numero di procedure avviate e della potenza complessiva associata.

Figura A.1 10 Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. (2025). *Piattaforma PNIEC*. Roma, Italia. Descrizione della distribuzione delle istanze di Valutazione di Impatto Ambientale con esito positivo per tecnologia, con riferimento ad agrivoltaico, fotovoltaico, eolico onshore ed eolico offshore.

Figura A.1 11. GSE – Gestore dei Servizi Energetici. (2024). *PNIEC Monitoraggio – Sistema di monitoraggio del Piano Nazionale Integrato Energia e Clima*. Roma, Italia. Evoluzione annuale della potenza fotovoltaica installata per meccanismo di incentivazione e modalità di valorizzazione dell'energia prodotta.

Figura A.1 12. GSE – Gestore dei Servizi Energetici. (2025). *Richieste di concessione per Regione: Puglia*. Roma, Italia. Figura elaborata sulla base della Piattaforma di monitoraggio PNIEC del GSE; rappresenta la distribuzione delle richieste di concessione per impianti da fonti energetiche rinnovabili nella Regione Puglia, utilizzata per l'analisi del cluster "Regioni ad alta pressione (domanda elevata ma conflittuale)".

Figura A.1 13. GSE – Gestore dei Servizi Energetici. (2025). *Richieste di concessione per Regione: Basilicata*. Roma, Italia. Figura elaborata sulla base della Piattaforma di monitoraggio PNIEC del GSE; evidenzia il livello di pressione progettuale nella Regione Basilicata, caratterizzata da una significativa attrattività per lo sviluppo eolico e da criticità legate all'integrazione territoriale degli impianti.

Figura A.1 14. GSE – Gestore dei Servizi Energetici. (2025). *Richieste di concessione per Regione: Sicilia*. Roma, Italia. Figura elaborata sulla base della Piattaforma di monitoraggio PNIEC del GSE; rappresenta la dinamica delle richieste di concessione nella Regione Sicilia, utilizzata per valutare il rapporto tra elevato potenziale FER, pressione progettuale e tutela paesaggistica.

Figura A.1 15. GSE – Gestore dei Servizi Energetici. (2025). *Richieste di concessione per Regione: Campania*. Roma, Italia. Figura elaborata sulla base della Piattaforma di monitoraggio PNIEC del GSE; descrive la distribuzione delle richieste di concessione nella Regione Campania, analizzata in relazione alle criticità di pianificazione territoriale, coordinamento istituzionale e gestione dei procedimenti autorizzativi.

Figura A.1 16. GSE – Gestore dei Servizi Energetici. (2025). *Richieste di concessione per Regione: Abruzzo*. Roma, Italia. Figura elaborata sulla

base della Piattaforma di monitoraggio PNIEC del GSE; rappresenta la distribuzione delle richieste di concessione per impianti da fonti energetiche rinnovabili nella Regione Abruzzo, utilizzata per l'analisi del cluster "Regioni con normativa strutturata ma restrittiva".

Figura A.1 17. GSE – Gestore dei Servizi Energetici. (2025). *Richieste di concessione per Regione: Sardegna*. Roma, Italia. Figura elaborata sulla base della Piattaforma di monitoraggio PNIEC del GSE; rappresenta il quadro delle richieste di concessione nella Regione Sardegna, utilizzata per valutare gli effetti di un modello normativo fortemente restrittivo sullo sviluppo delle FER.

Figura A.1 18. GSE – Gestore dei Servizi Energetici. (2025). *Richieste di concessione per Regione: Lazio*. Roma, Italia. Figura elaborata sulla base della Piattaforma di monitoraggio PNIEC del GSE; evidenzia il livello di pressione progettuale regionale e il rapporto tra sviluppo FER e vincoli territoriali e paesaggistici.

Figura A.1 19. GSE – Gestore dei Servizi Energetici. (2025). *Richieste di concessione per Regione: Liguria*. Roma, Italia. Figura elaborata sulla base della Piattaforma di monitoraggio PNIEC del GSE; rappresenta la distribuzione delle richieste di concessione nella Regione Liguria, analizzata in relazione alla forte incidenza dei vincoli ambientali e paesaggistici.

Figura A.1 20. GSE – Gestore dei Servizi Energetici. (2025). *Richieste di concessione per Regione: Lombardia*. Roma, Italia. Figura elaborata sulla base della Piattaforma di monitoraggio PNIEC del GSE; descrive la dinamica delle richieste di concessione in Lombardia, regione caratterizzata da un modello avanzato di pianificazione e governance delle FER.

Figura A.1 21. GSE – Gestore dei Servizi Energetici. (2025). *Richieste di concessione per Regione: Calabria*. Roma, Italia. Figura elaborata sulla base della Piattaforma di monitoraggio PNIEC del GSE; rappresenta il quadro autorizzativo regionale della Calabria nell'ambito della fase preliminare di definizione normativa delle aree idonee e non idonee.

Figura A.1 22. GSE – Gestore dei Servizi Energetici. (2025). *Richieste di concessione per Regione: Piemonte*. Roma, Italia. Figura elaborata sulla base della Piattaforma di monitoraggio PNIEC del GSE; evidenzia la distribuzione delle richieste di concessione regionale nel contesto di una disciplina normativa ancora in fase di definizione.

Figura A.1 23. GSE – Gestore dei Servizi Energetici. (2025). *Richieste di concessione per Regione: Marche*. Roma, Italia. Figura elaborata sulla base della Piattaforma di monitoraggio PNIEC del GSE; rappresenta le richieste di concessione nella Regione Marche, utilizzate per l'analisi della transizione normativa regionale.

Figura A.1 24. GSE – Gestore dei Servizi Energetici. (2025). *Richieste di concessione per Regione: Molise*. Roma, Italia. Figura elaborata sulla base della Piattaforma di monitoraggio PNIEC del GSE; descrive il livello di progettualità FER regionale in relazione all'assenza di un quadro normativo pienamente operativo.

Figura A.1 25. GSE – Gestore dei Servizi Energetici. (2025). *Richieste di concessione per Regione: Umbria*. Roma, Italia. Figura elaborata sulla base della Piattaforma di monitoraggio PNIEC del GSE; evidenzia la dinamica delle richieste di concessione in una regione caratterizzata da strumenti programmatori ancora non pienamente tradotti in disciplina operativa.

Figura A.1 26. GSE – Gestore dei Servizi Energetici. (2025). *Richieste di concessione per Regione: Emilia-Romagna*. Roma, Italia. Figura elaborata sulla base della Piattaforma di monitoraggio PNIEC del GSE; rappresenta la distribuzione delle richieste di concessione nella Regione Emilia-Romagna, analizzata nell'ambito di un modello avanzato di pianificazione territoriale delle FER.

Figura A.1 27. GSE – Gestore dei Servizi Energetici. (2025). *Richieste di concessione per Regione: Toscana*. Roma, Italia. Figura elaborata sulla base della Piattaforma di monitoraggio PNIEC del GSE; rappresenta il quadro regionale delle richieste di concessione in Toscana, con riferimento al modello di governance partecipata e alla definizione progressiva delle aree idonee.

Figura A.1 28. GSE – Gestore dei Servizi Energetici. (2025). *Richieste di concessione per Regione: Trentino-Alto Adige*. Roma, Italia. Figura elaborata sulla base della Piattaforma di monitoraggio PNIEC del GSE; rappresenta il quadro delle richieste di concessione per impianti da fonti energetiche rinnovabili nella Regione Trentino-Alto Adige, evidenziando la limitata pressione autorizzativa per eolico e fotovoltaico a terra e la prevalenza di un modello energetico regionale specializzato sull'idroelettrico.

Figura A.1 29 Elaborazione dell'autore. (2024). *Testo Unico delle Rinnovabili (TUR): quadro dei regimi amministrativi autorizzativi per gli*

impianti da fonti energetiche rinnovabili. Schema di sintesi delle procedure di Attività Libera, Procedura Abilitativa Semplificata (PAS) e Autorizzazione Unica (AU), sulla base della normativa nazionale vigente.

Tabella A.1 1 Elaborazione dell'autore. (2025). *Classificazione dei Paesi UE-27 per livello di maturità nel recepimento normativo*. Milano, Italia. Tabella elaborata sulla base dell'analisi comparativa dei quadri normativi nazionali di recepimento della Direttiva (UE) 2018/2001 (RED II). Fonte di supporto: REScoop, *REC & CEC Transposition Tracker*.

Tabella A.1 2 Elaborazione dell'autore. (2025). Evoluzione normativa delle aree idonee per l'installazione di impianti alimentati da fonti di energia rinnovabile su scala regionale. Quadro sinottico dell'evoluzione della disciplina regionale in materia di individuazione delle aree idonee ai sensi della normativa nazionale vigente.

Tabella A.1 3. TERNA S.p.A. (2025). *Distribuzione della potenza fotovoltaica installata e diffusione pro-capite regionale in Italia*. Milano, Italia. Tabella elaborata sulla base dei dati relativi alla capacità fotovoltaica installata regionale, integrati con informazioni sulla popolazione residente, al fine di evidenziare la distribuzione territoriale degli impianti e il confronto tra potenza complessiva installata e valore pro-capite regionale. Fonte di supporto: TERNA – dati rielaborati graficamente da Geopop, *Mappa nazionale degli impianti energetici rinnovabili*.

Tabella A.1 4. Snam – Terna. (2024). *Variazione saldo estero: 2023 vs Scenario PNIEC Policy 2030 [TWh]*. Roma, Italia. Tabella elaborata sulla base degli scenari energetici Snam–Terna 2024; rappresenta la variazione prevista del saldo estero elettrico tra il dato 2023 e lo scenario PNIEC Policy 2030, distinguendo contributo delle importazioni, esportazioni e saldo complessivo degli scambi energetici con l'estero.

Tabella A.1 5 Elaborazione dell'autore. (2025). *Ambiti disciplinari coinvolti nell'analisi e nella progettazione delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER)*. Elaborazione critica della letteratura interdisciplinare su energia, territorio, governance e innovazione sociale.

Tabella A.1 6 ARERA – Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente. (2022). *Testo Integrato dell'Autoconsumo Diffuso (TIAD)*, Allegato A alla Deliberazione 727/2022/R/eel e successive modifiche;

Decreto Legislativo 8 novembre 2021, n. 199. Milano, Italia – Roma, Italia. Comparazione tecnico-giuridica e territoriale delle configurazioni di autoconsumo diffuso disciplinate dal TIAD, con riferimento alla scala territoriale. Elaborazione dell'autore.

APPENDICE 2

Figura A.2 1. Elaborazione dell'autore. (2025). *Distribuzione geografica e quantitativa dei casi analizzati nella fase preliminare*. Pescara, Italia. Distribuzione territoriale dei casi studio selezionati nella fase preliminare di analisi, con localizzazione geografica e consistenza numerica ai fini della successiva classificazione comparativa. Supporto informatico: Flourish Studio.

Figura A.2 2. Elaborazione dell'autore. (2025). *Distribuzione geografica e quantitativa dei casi studio analizzati in Austria*. Pescara, Italia. Localizzazione territoriale e consistenza numerica dei casi studio selezionati nel territorio austriaco. Supporto informatico: Flourish Studio.

Figura A.2 3. Elaborazione dell'autore. (2025). *Distribuzione geografica e quantitativa dei casi studio analizzati in Italia*. Pescara, Italia. Localizzazione territoriale e consistenza numerica dei casi studio selezionati nel territorio italiano. Supporto informatico: Flourish Studio.

Figura A.2 4. Elaborazione dell'autore. (2025). *Distribuzione geografica e quantitativa dei casi studio analizzati in Francia*. Pescara, Italia. Localizzazione territoriale e consistenza numerica dei casi studio selezionati nel territorio francese. Supporto informatico: Flourish Studio

Figura A.2 5. Elaborazione dell'autore. (2025). *Distribuzione geografica e quantitativa dei casi studio analizzati in Spagna*. Pescara, Italia. Localizzazione territoriale e consistenza numerica dei casi studio selezionati nel territorio spagnolo. Supporto informatico: Flourish Studio.

Figura A.2 6. Elaborazione dell'autore. (2025). *Distribuzione geografica e quantitativa dei casi studio analizzati in Gran Bretagna*. Pescara, Italia. Localizzazione territoriale e consistenza numerica dei casi studio selezionati nel territorio britannico. Supporto informatico: Flourish Studio.

Figura A.2 7. Elaborazione dell'autore. (2025). Quadro comparativo delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) analizzate in Austria.

Pescara, Italia. Classificazione comparativa delle CER secondo modello di sviluppo, fonti energetiche rinnovabili, scala di intervento, integrazione paesaggistica e architettonica e stato di attuazione. Supporto informatico: Microsoft Excel.

Figura A.2 8. Elaborazione dell'autore. (2025). Quadro comparativo delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) analizzate in Italia. Pescara, Italia. Classificazione comparativa delle CER italiane secondo modello di sviluppo, fonti energetiche rinnovabili, scala di intervento, criteri di integrazione territoriale e stato di attuazione. Supporto informatico: Microsoft Excel.

Figura A.2 9. Elaborazione dell'autore. (2025). Quadro comparativo delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) analizzate in Francia. Pescara, Italia. Classificazione comparativa delle CER francesi secondo modello di sviluppo, fonti energetiche rinnovabili, scala di intervento, criteri di integrazione territoriale e stato di attuazione. Supporto informatico: Microsoft Excel.

Figura A.2 10. Elaborazione dell'autore. (2025). Quadro comparativo delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) analizzate in Spagna. Pescara, Italia. Classificazione comparativa delle CER spagnole secondo modello di sviluppo, fonti energetiche rinnovabili, scala di intervento, criteri di integrazione territoriale e stato di attuazione. Supporto informatico: Microsoft Excel.

APPENDICE 3

Figura A.3 1. Elaborazione dell'autore. (2026). *Quadro metodologico degli obiettivi specifici della ricerca (*3.1–3.5). Città, Paese. Articolazione metodologica delle relazioni tra problematiche territoriali rilevate, dispositivi metodologici di analisi, progettazione e risultati attesi. Supporto grafico: Adobe Illustrator.

Tabella A.3 1. Elaborazione dell'autore. (2025). *Allineamento tra moduli metodologici* (M1–M6), *funzioni operative e riferimenti teorici del modello di ricerca*. Sintesi dell'impianto metodologico sviluppato attraverso l'integrazione di analisi territoriale, pianificazione energetica, valutazione paesaggistica, governance multilivello e strumenti di supporto decisionale, sulla base dei principali riferimenti teorici della ricerca.

APPENDICE 4

Figura A.4 1. Elaborazione dell'autore. (2026). *Diagramma teorico multilivello circolare di governance e pianificazione delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER).* Pescara, Italia. Rappresentazione del framework metodologico multi-scala articolato secondo le dimensioni Macro, Eco, Meso e Micro. Il modello evidenzia la natura circolare dei processi decisionali attraverso l'interazione tra approcci *top-down* e bottom-up, configurando la transizione energetica come sistema adattivo e integrato tra livelli normativi, territoriali e sociali. Supporto grafico: Adobe Illustrator.

Tabella A.4 1. Elaborazione dell'autore. (2026). *Matrice di Monitoraggio e Valutazione del modello integrato di pianificazione urbanistica digitale e sostenibile*. Pescara, Italia. La tabella definisce il sistema di monitoraggio relativo all'integrazione tra pianificazione urbanistica, indicatori ambientali, sociali ed energetici. La matrice articola obiettivi, output attesi, criteri di valutazione (rilevanza, efficienza, efficacia, impatto e sostenibilità), indicatori KPI e strumenti di raccolta e analisi dei dati, con particolare riferimento all'utilizzo di GIS, dashboard di gestione e strumenti digital twin.

Tabella A.4 2. Elaborazione dell'autore. (2026). *Matrice di Monitoraggio e Valutazione del Piano Urbanistico Generale digitale integrato*. Pescara, Italia. La tabella illustra il sistema di valutazione del PUG digitale quale strumento operativo per l'integrazione tra pianificazione urbana, dati energetici e scenari climatici. Sono definiti criteri M&V, indicatori di performance e strumenti di verifica finalizzati alla valutazione dell'allineamento del piano agli obiettivi energetici e ambientali attraverso analisi GIS, simulazioni digitali e sistemi di monitoraggio.

Tabella A.4 3. Elaborazione dell'autore. (2026). *Matrice di Monitoraggio e Valutazione della governance partecipativa e dei processi collaborativi*. Pescara, Italia. La tabella definisce gli indicatori per valutare l'efficacia dei processi partecipativi nella pianificazione energetica territoriale. La matrice analizza il coinvolgimento degli *stakeholder*, la qualità della partecipazione, l'integrazione dei contributi nei documenti di piano e la capacità dei *Living Lab* di generare processi collaborativi permanenti.

Tabella A.4 4. Elaborazione dell'autore. (2026). *Matrice di Monitoraggio e Valutazione degli strumenti digitali per la simulazione e il supporto decisionale*. Pescara, Italia. La tabella presenta il sistema di valutazione

relativo agli strumenti digitali avanzati applicati alla pianificazione territoriale ed energetica. Sono considerati indicatori relativi all'interoperabilità dei dati, accuratezza delle simulazioni, efficacia dei modelli digital twin e capacità di trasferimento e replicabilità degli strumenti sviluppati.

Tabella A.4 5. Elaborazione dell'autore. (2026). *Matrice di Monitoraggio e Valutazione dei modelli di sostenibilità economica ed energetica delle Comunità Energetiche Rinnovabili* (CER). Pescara, Italia. La tabella definisce il sistema di valutazione delle CER attraverso indicatori energetici, economici e sociali. La matrice analizza la capacità dei modelli comunitari di generare benefici territoriali, garantire replicabilità organizzativa e mantenere nel tempo gli effetti prodotti mediante strumenti di monitoraggio energetico, analisi economico-finanziarie e procedure operative.

Figura A.4 3 Elaborazione dell'autore. (2026). *Struttura metodologica modulare integrata* (M1 - M2 - M3 - M4 - M5 - M6) *per la pianificazione delle Comunità Energetiche Rinnovabili* (CER). Pescara, Italia. Rappresentazione dell'architettura metodologica della ricerca, articolata in sei moduli funzionali (M1–M6), che descrive l'integrazione tra analisi territoriale, pianificazione locale, valutazione ambientale, governance multilivello, strumenti digitali e processi decisionali a supporto della progettazione e dell'implementazione delle CER. Elaborazione grafica realizzata con Adobe Illustrator.

Tabella A.4 6. Elaborazione dell'autore. (2026). *Sequenza delle fasi operative del framework metodologico per la pianificazione delle Comunità Energetiche Rinnovabili* (Ausgabe). Pescara, Italia. Schema delle fasi operative del framework metodologico, con indicazione degli obiettivi e dei principali output prodotti in ciascuna fase del processo, dalla definizione del quadro di governance alla replicabilità del modello mediante monitoraggio e trasferimento delle conoscenze.

Tabella A.4 7. Elaborazione dell'autore. (2026). *Deliverable per scala territoriale del LSET - Laboratory for Sustainable energy Transition per la transizione energetica sostenibile.* Pescara, Italia. Tabella di sintesi dei deliverable, degli strumenti e delle azioni associate alle diverse scale territoriali del framework (macro, eco, meso e micro), evidenziando la relazione tra fasi metodologiche, *gate* decisionali e processi di implementazione. Supporto informatico: Microsoft Excel.

Figura A.4 5. Elaborazione dell'autore. (2026). *Flusso metodologico dell'architettura modulare* M1–M6 *del framework* PCM–PDCA *per la*

transizione energetica territoriale. Pescara, Italia. Rappresentazione del flusso operativo del framework attraverso l'articolazione dei sei moduli M1–M6. Lo schema evidenzia la sequenza evolutiva tra pianificazione, progettazione, implementazione, monitoraggio e apprendimento adattivo, supportando la lettura del modello come sistema multilivello per la governance della transizione energetica. Elaborazione grafica realizzata con Adobe Illustrator.

Figura A.4 6. Elaborazione dell'autore. (2026). *Integrazione del Modulo di Compatibilità Paesaggistica e Culturale nel framework PCM–PDCA multilivello per la governance adattativa della transizione energetica.* Pescara, Italia. Schema dell'integrazione del Modulo di Compatibilità Paesaggistica e Culturale nel framework PCM–PDCA, con le relazioni tra valutazione paesaggistica, tutela dei valori culturali, criteri di compatibilità territoriale e governance adattativa nei processi decisionali della transizione energetica. Elaborazione grafica realizzata con Adobe Illustrator.

Tabella A.4 8. Elaborazione dell'autore. (2026). *Framework integrato di apprendimento e capacità lungo il ciclo PCM–PDCA per la transizione energetica territoriale*. Pescara, Italia. Matrice che integra le fasi del ciclo PCM–PDCA con il percorso di sviluppo delle capacità (Knowledge, Training, Development, Coaching, Learning e Skills Consolidation), evidenziando il ruolo trasversale del capacity building nel rafforzamento delle capacità istituzionali, tecniche e operative

Tabella A.4 9. Elaborazione dell'autore. (2026). *Architettura operativa multilivello del modello PCM–PDCA per la pianificazione e implementazione della transizione energetica territoriale*. Pescara, Italia. Matrice operativa del modello PCM–PDCA articolata per scale territoriali (macro, eco, meso e micro) e fasi del processo, che mette in relazione obiettivi, attività, strumenti, output e indicatori di verifica, illustrando l'integrazione tra pianificazione, analisi territoriale, progettazione, implementazione e monitoraggio adattativo.

Tabella A.4 10. Elaborazione dell'autore. (2026). *Framework operativo integrato PCM–PDCA per l'integrazione dei criteri paesaggistici ed energetici nella governance territoriale*. Pescara, Italia. Matrice delle fasi operative del modello PCM–PDCA per l'integrazione tra pianificazione energetica e compatibilità paesaggistica, con obiettivi, strumenti e output dei principali passaggi decisionali, secondo un approccio iterativo e multilivello.

APPENDICE 5

Figura A.5 1. Elaborazione dell'autore. (2026). Architettura dell'ecosistema digitale integrato per la pianificazione energetico-circolare territoriale. Pescara, Italia. Architettura digitale basata sull'interoperabilità tra Common Data Environment (CDE), Building Information Modeling (BIM), Geographic Information Systems (GIS), Digital Twin e Internet of Things (IoT), che integra gestione dei dati territoriali, simulazione degli scenari e processi decisionali multilivello a supporto della progettazione, implementazione e monitoraggio della transizione energetica circolare.

Figura A.5 2. Elaborazione dell'autore. (2026). Schema metodologico circolare per l'integrazione della partecipazione e del patrimonio immateriale nei processi di pianificazione urbana digitale. Pescara, Italia. Ciclo metodologico iterativo che integra partecipazione degli stakeholder, conoscenza territoriale e patrimonio immateriale nei processi di pianificazione urbana digitale, collegando raccolta della conoscenza locale, interpretazione dei valori culturali, co-progettazione, implementazione e *feedback* a supporto della governance adattativa e del capacity building.

Figura A.5 3. Elaborazione dell'autore. (2026). *Architettura dei flussi informativi bidirezionali nel framework digitale multilivello per la transizione energetica territoriale*. Pescara, Italia. Schema dei flussi informativi bidirezionali tra cronosistema, macrosistema, ecosistema, mesosistema e microsistema, che integra indirizzi strategici, gestione dei dati, coordinamento operativo, attuazione locale e monitoraggio, supportando interoperabilità digitale, governance adattativa e apprendimento continuo.

Tabella A.5 2. Elaborazione dell'autore. (2026). *Matrice paesaggistica integrata HIA–Digital Twin–KPI per la valutazione adattativa e il supporto decisionale nella transizione energetica territoriale.* Pescara, Italia. Matrice che integra Heritage Impact Assessment (HIA), Digital Twin, KPI e output decisionali per la valutazione della compatibilità paesaggistica, la simulazione degli scenari, la definizione delle misure di mitigazione e il monitoraggio adattativo nel framework PCM–PDCA.

Tabella A.5 3. Elaborazione dell'autore. (2026). *Matrice di integrazione tra zone omogenee territoriali e modelli di Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) nel framework energetico-circolare*. Pescara, Italia. Matrice che associa le diverse zone territoriali ai modelli di CER, integrando criteri di sensibilità paesaggistica, integrazione

architettonica, coerenza tecnologica e valutazione ambientale per la localizzazione adattiva e la definizione di strategie compatibili con i valori territoriali.

Tabella A.5 4. Elaborazione dell'autore. (2026). *Matrice prestazionale multi-scala per l'integrazione tra livelli territoriali, criteri di qualità e strumenti operativi nel framework di transizione energetica.* Pescara, Italia. Matrice delle prestazioni attese ai diversi livelli territoriali, che integra scala di intervento, obiettivi energetici, criteri paesaggistici, requisiti progettuali e modalità di verifica per l'applicazione adattiva del framework.

Tabella A.5 5. Elaborazione dell'autore. (2026). *Matrice dei criteri prestazionali per la definizione delle micro-zone energetiche e l'applicazione delle Norme Tecniche Adattive (NTA) nel framework territoriale.* Pescara, Italia. Matrice dei criteri energetici, paesaggistici, ambientali e gestionali per la definizione delle micro-zone energetiche e l'applicazione delle NTA, integrando requisiti prestazionali, condizioni territoriali e modalità operative di regolazione.

Tabella A.5.6. Elaborazione dell'autore. (2026). *Matrice di personalizzazione delle micro-zone energetiche attraverso l'integrazione tra contesti territoriali omogenei, sottozone operative e criteri multidimensionali di qualità dell'intervento*. Pescara, Italia. Matrice di classificazione delle micro-zone energetiche che integra contesti territoriali, sottozone operative e criteri multidimensionali di qualità per supportare la localizzazione delle CER e l'applicazione differenziata del framework.

Tabella A.5 7. Elaborazione dell'autore. (2026). Struttura prestazionale delle Norme Tecniche Adattive (NTA) per la regolazione energetica, paesaggistica e culturale delle micro-zone territoriali. Pescara, Italia. Matrice dei criteri prestazionali delle NTA che integra obiettivi energetici, governance delle CER e compatibilità paesaggistica e culturale secondo i principi HIA/ICOMOS, con modalità di verifica basate su indicatori monitorabili e sistemi digitali.

Tabella A.5 8. Elaborazione dell'autore. (2026). *Ciclo integrato dei moduli M1–M6 secondo il modello PDCA e i livelli di sviluppo informativo LOD per la transizione energetica territoriale*. Pescara, Italia. Matrice che integra i moduli M1–M6 con le fasi PDCA e i livelli LOD, illustrando il ruolo di GIS, BIM, CDE e Digital Twin nella gestione dei dati, nella verifica delle prestazioni e nel monitoraggio adattativo delle CER.

Figura A.5 4. Elaborazione dell'autore. (2026). Workflow operativo delle Norme Tecniche Adattive (NTA) per la gestione delle micro-zone e sotto-zone nel framework multilivello M1–M6. Pescara, Italia. Workflow di applicazione che integra criteri energetici, paesaggistici, culturali e prestazionali con analisi territoriale, verifica, monitoraggio digitale e aggiornamento adattativo nel framework M1–M6.

Tabella A.5 9. Elaborazione dell'autore. (2026). Strumenti operativi per l'attuazione, il monitoraggio e la replicabilità del framework PCM–PDCA per la transizione energetica territoriale. Pescara, Italia. Sintesi degli strumenti normativi, digitali e organizzativi che supportano l'attuazione, il monitoraggio e la replicabilità del framework PCM–PDCA, integrando NTA adattive, overlay HIA/ICOMOS, Digital Twin–CDE, governance multilivello e protocolli di standardizzazione.

Figura A.5 5. Elaborazione dell'autore. (2026). Workflow operativo M1–M2–M3–M4–M5–M6.

APPENDICE 6

Tabella A.6 1. Elaborazione dell'autore. (2026). *Matrice integrata dei requisiti prestazionali per la localizzazione, compatibilità paesaggistica, resilienza energetica e monitoraggio adattivo nel framework digitale territoriale*. Pescara, Italia. Matrice dei requisiti prestazionali che integra dimensioni territoriali, paesaggistiche, energetiche, circolari e di monitoraggio con requisiti, parametri, soglie prestazionali e livelli informativi (LOD) per la verifica adattiva degli interventi.

Tabella A.6 2. Elaborazione dell'autore. (2026). *Architettura prestazionale delle Norme Tecniche Adattive (NTA) per la traduzione dei principi teorici in requisiti, parametri e criteri di verifica operativa.* Pescara, Italia. Matrice che traduce i principi delle NTA in requisiti, parametri, KPI e soglie prestazionali, integrando GIS, BIM, Digital Twin e ciclo PDCA in un sistema regolativo dinamico.

Tabella A.6 3. Elaborazione dell'autore. (2026). *Modello regolativo prestazionale per la traduzione delle esigenze sistemiche in requisiti, indicatori e regole operative nel framework territoriale*. Pescara, Italia. Modello regolativo che collega esigenze sistemiche, requisiti, KPI, soglie decisionali e livelli informativi (LOD/LOIN) alla definizione operativa delle NTA.

Tabella A.6 4. Elaborazione dell'autore. (2026). *Dalla struttura normativa delle Norme Tecniche Adattive (NTA) all'architettura prestazionale del modello per la transizione energetica territoriale*.

Pescara, Italia. Matrice di raccordo tra struttura delle NTA, criteri prestazionali e strumenti digitali (GIS, BIM, KPI e Digital Twin), con soglie verificabili e aggiornamento continuo secondo il ciclo PDCA.

Tabella A.6 5. Elaborazione dell'autore. (2026). *Matrice di integrazione tra layer territoriali, strategie di intervento energetico e indicatori prestazionali per la governance adattiva della transizione energetica.* Pescara, Italia. Matrice che correla layer territoriali (*Underground*, *Land* e *Above Land*), strategie energetiche, tecnologie e KPI per la governance adattiva della transizione energetica.

Tabella A.6 6. Elaborazione dell'autore. (2026). *Matrice di compatibilità tra zone omogenee territoriali, layer energetici, tecnologie FER e indicatori prestazionali per l'applicazione adattiva delle CER*. Pescara, Italia. Matrice di compatibilità tra zone omogenee, layer CER, tecnologie FER e KPI per la progettazione adattiva delle Comunità Energetiche Rinnovabili.

Tabella A.6 7. Elaborazione dell'autore. (2026). *Matrice dei parametri territoriali, strumenti digitali e soglie indicative per la valutazione prestazionale degli interventi energetici nel framework adattivo*. Pescara, Italia. Matrice dei parametri territoriali, strumenti digitali (GIS, BIM e Digital Twin) e soglie prestazionali per la valutazione della compatibilità degli interventi energetici.

Figura A.6 1. Elaborazione dell'autore. (2026). *Articolazione delle zone territoriali omogenee e loro applicazione alle scale macro, meso e micro per la pianificazione adattiva delle Comunità Energetiche Rinnovabili.* Pescara, Italia. Schema delle zone territoriali omogenee (A–F) e della loro applicazione alle scale macro, meso e micro per la pianificazione adattiva delle CER.

Figura A.6 2. Elaborazione dell'autore. (2026). *Scale di analisi del framework multilivello per la pianificazione energetico-territoriale*. Pescara, Italia. Schema delle scale macro, meso e micro del framework per la pianificazione e la valutazione energetico-territoriale.

Figura A.6.3. Elaborazione dell'autore. (2026). *Sistema dei Key Performance Indicators (KPI) primari per il monitoraggio prestazionale del framework territoriale*. Pescara, Italia. Sistema dei KPI energetici, ambientali, paesaggistici, economici e sociali per il monitoraggio prestazionale del framework.

Tabella A.6 8. Elaborazione dell'autore. (2026). *Struttura gerarchica multi-scala per l'integrazione tra livelli territoriali, KPI e funzioni di*

governance nel framework adattivo. Pescara, Italia. Matrice gerarchica che integra livelli territoriali, KPI e funzioni di pianificazione, valutazione, mitigazione e governance adattativa.

Tabella A.6 9. Elaborazione dell'autore. (2026). *Matrice di integrazione tra indicatori prestazionali paesaggistici, strumenti digitali e zone omogenee urbanistiche nel framework territoriale*. Pescara, Italia. Matrice che integra KPI paesaggistici, strumenti digitali e zone urbanistiche (A–F) per la verifica della compatibilità degli interventi energetici.

Tabella A.6 10. Elaborazione dell'autore. (2026). *Matrice di correlazione tra tecnologie FER, scala prevalente di applicazione e procedure autorizzative nel framework di pianificazione energetico-territoriale*. Pescara, Italia. Matrice di correlazione tra tecnologie FER, scala territoriale prevalente e procedure autorizzative (AU, PAS e VIA).

Tabella A.6 11. Elaborazione dell'autore. (2026). *Matrice pixel level dei KPI percettivi, cumulativi e territoriali integrati nel Digital Twin per la valutazione adattiva degli interventi energetici*. Pescara, Italia. Matrice dei KPI pixel level (IDV, PAP, IIC-AI e OT Dyn) integrati con GIS, BIM e Digital Twin per la valutazione adattiva degli interventi energetici.

Tabella A.6 12. Elaborazione dell'autore. (2026). *Classificazione dei range di impatto volumetrico e visivo dell'Indice di Dominanza Visiva (IDV-3D) per la valutazione paesaggistica adattiva degli interventi energetici*. Pescara, Italia. Matrice dei range dell'Indice di Dominanza Visiva (IDV-3D) con classi di impatto e misure di mitigazione.

Tabella A.6.13. Elaborazione dell'autore. (2026). *Classificazione dei range di alterazione visiva dell'indice PAP-3D per la valutazione percettiva degli interventi energetici nei diversi contesti territoriali*. Pescara, Italia. Matrice dei range del Parametro di Alterazione Percettiva (PAP-3D) con livelli di compatibilità e criteri di mitigazione.

Tabella A.6 14. Elaborazione dell'autore. (2026). Classificazione dei range dell'Indice di Impatto Cumulativo (IIC) per la valutazione degli effetti combinati degli interventi energetici sul sistema paesaggistico-territoriale. Pescara, Italia. Matrice dei range dell'Indice di Impatto Cumulativo (IIC) per la valutazione degli effetti combinati degli interventi energetici.

Tabella A.6 15. Elaborazione dell'autore. (2026). *Classificazione dei range dell'Indice di Occupazione Territoriale (OT) per la valutazione della compatibilità spaziale ed ecologica degli interventi energetici nei*

diversi contesti territoriali. Pescara, Italia. Matrice dei range dell'Indice di Occupazione Territoriale (OT) per la valutazione della compatibilità spaziale ed ecologica degli interventi.

Figura A.6 4. Elaborazione dell'autore. (2026). Ciclo PDCA integrato e progressione dei livelli informativi dal modello 1D al modello 10D per la gestione adattiva del framework territoriale. Pescara, Italia. Schema dell'integrazione tra ciclo PDCA e livelli informativi 1D–10D mediante BIM, GIS, Digital Twin e KPI per la gestione adattiva del framework.

Figura A.6 5. Elaborazione dell'autore. (2026). Articolazione delle scale territoriali, delle unità di aggregazione e delle zone omogenee per l'applicazione differenziata del framework energetico-territoriale. Pescara, Italia. Schema delle relazioni tra scale territoriali, unità di aggregazione e zone omogenee per l'applicazione differenziata del framework.

Tabella A.6.16. Elaborazione dell'autore. (2026). *Matrice dei Key Performance Indicators (KPI) integrati nel Digital Twin per la valutazione spaziale, energetica, circolare e sociale degli interventi territoriali*. Pescara, Italia. Matrice dei KPI del Digital Twin organizzati nei domini spaziale, energetico, circolare e sociale per il monitoraggio multidimensionale del framework.

Figura A.6 6. Elaborazione dell'autore. (2026). Schema di integrazione operativa del framework territoriale per la gestione adattiva dei processi energetici, paesaggistici e digitali. Pescara, Italia. Schema dell'integrazione tra moduli del framework, strumenti digitali, livelli territoriali e processi decisionali basati su KPI e feedback adattativi.

APPENDICE 7

Figura A.7 1. Elaborazione dell'autore. (2026). *Business Model Canvas per la definizione del modello operativo del Laboratory for Sustainable Energy Transition (LSET) come piattaforma integrata per la transizione energetica sostenibile*. Pescara, Italia. Rappresentazione del modello organizzativo e gestionale del LSET attraverso il framework Business Model Canvas, con proposta di valore, stakeholder, risorse, attività, partnership e flussi operativi a supporto dell'attuazione del framework territoriale.