



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

DOTTORATO DI RICERCA IN ENERGIA E AMBIENTE
PhD Program in ENERGY and ENVIRONMENT

XXXVIII Cycle

Dalla complessità alla sostenibilità: un modello
basato su agenti per lo sviluppo e la governance
delle Comunità Energetiche Rinnovabili

PhD Thesis

Scuola di Dottorato in Scienze e Tecnologie per l'Innovazione Industriale

Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale

Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica

PhD Candidate
DI LERNIA Gianni

Advisor
Prof. CORSINI Alessandro

A.A. 2024-25

CC BY-NC-SA “Il presente documento è distribuito secondo la licenza Creative Commons CC BY-NC-SA, attribuzione, non usi commerciali, condividi allo stesso modo.”

Sommario

1	INTRODUZIONE	18
1.1	Verso una nuova cittadinanza sostenibile: energia, clima e città in trasformazione	18
1.2	Obiettivi della tesi	20
1.3	Ipotesi di ricerca	20
1.4	Struttura della tesi.....	23
2	MATERIALI E METODI.....	26
2.1	Stato dell'arte e partecipazione civica: il cittadino nel sistema energetico in evoluzione	26
2.1.1	Declinazione del concetto di ESG.....	30
2.1.2	Sistemi di acquisto solidali, PPAS e Comunità Energetiche: riferimenti normativi	39
2.1.3	Fondamenti teorici: economia comportamentale, complessità e cooperazione	50
2.1.4	Revisione della letteratura e contributo della tesi	56
2.1.5	Stato dell'arte: tre paradigmi frammentati	63
2.1.6	Posizionamento della ricerca.....	66
2.2	Metodi e disegno del modello	67
2.2.1	Architettura del modello: panoramica generale	70
2.2.2	Strumenti e software: descrizione della piattaforma software	88
3	CASO STUDIO: APPLICAZIONE DEL MODELLO A CONTESTI URBANI DI MEDIA DENSITA'. IL CASO DI LATINA.....	110
3.1	Inquadramento generale	112
3.1.1	Demografia e nuclei familiari	114
3.2	Profilo energetico della città	115
3.3	Impianto fotovoltaico	118
3.4	Scenario di riferimento.....	125
4	SIMULAZIONE E ANALISI DEI RISULTATI.....	128

4.1	Implementazione del modello ABM in Netlogo	128
4.1.1	Architettura computazionale del modello	128
4.1.2	Struttura degli agenti e relazioni spaziali	130
4.1.3	Procedure principali di esecuzione.....	131
4.1.4	Implementazione della teoria di Axelrod	132
4.2	ABM per CER.....	133
4.2.1	Parametri della sperimentazione	134
4.3	Ottimizzazione CER.....	138
4.4	Risultati della simulazione	147
4.4.1	Setup computazionale	147
4.4.2	Risultati tecnico-economici.....	148
4.4.3	Dinamiche di adozione: scenari principali	149
4.4.4	Superamento del tipping point	153
4.4.5	Effetti sul welfare sostenibile (ASW)	154
4.4.6	Analisi di sensitività e robustezza	154
4.4.7	Implicazioni sistemiche.....	155
4.4.8	Validazione dei dati.....	156
4.4.9	Risultati della simulazione	157
5	CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE.....	162
5.1	Sintesi dei Contributi della Ricerca.....	162
5.2	Limitazioni del modello e prospettive di miglioramento	164
5.3	Implicazioni per le Politiche Pubbliche.....	167
5.4	Sviluppi futuri della ricerca	169
5.5	Conclusioni finali	171
6	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	173
7	APPENDICI.....	181

7.1	Il listato “Ottimizzazione CER”	181
7.2	Il listato “ABM per CER”	190

Abstract

Renewable Energy Communities (RECs) represent a decentralised model of sustainable energy production and consumption, consistent with ESG principles and aimed at improving energy self-sufficiency, reducing environmental impacts and strengthening social cohesion.

This study uses an Agent-Based Model (ABM) to analyse citizen participation in RECs, integrating individual decisions influenced by bounded rationality, social interactions and governance tools, together with a technical simulation of photovoltaic energy production. System performance is evaluated using an aggregate utility index that combines economic, environmental, and social benefits.

The simulations, implemented in NetLogo, show that in the absence of educational policies (education-effort = 0), incentives of 0.15 generate stable participation rates of 28–29%. A synergistic strategy combining education-effort = 0.4 and incentives = 0.15 increases participation to 47–48%, exceeding the theoretical critical threshold of 42%. Aggregate social welfare (ASW) follows a similar trend, growing from around 0.29 in the baseline scenario to 0.47 in the synergistic scenarios, with an overall increase of around +68%. In the absence of incentives, participation remains negligible (≈ 0 –0.5%) even with high levels of education, highlighting the need for combined governance policies to trigger collective adoption dynamics. These results confirm that the success of RECs depends crucially on the integration of economic incentives, educational interventions and social dynamics, as well as on the technical feasibility of the energy system.

Le comunità energetiche rinnovabili (CER) rappresentano un modello decentralizzato di produzione e consumo di energia sostenibile, coerente con i principi ESG e orientato a migliorare l'autosufficienza energetica, ridurre gli impatti ambientali e rafforzare la coesione sociale. Questo studio utilizza un modello basato su agenti (ABM) per analizzare la partecipazione dei cittadini alle CER, integrando decisioni individuali influenzate da razionalità limitata, interazioni sociali e strumenti di governance, insieme a una simulazione tecnica della produzione di energia fotovoltaica. Le prestazioni del sistema sono valutate tramite un indice di utilità aggregata che combina benefici economici, ambientali e sociali. Le simulazioni, implementate in NetLogo, mostrano che in assenza di politiche educative (education-effort = 0), e con incentivi pari a 0.15 si realizzano tassi di adesione stabili del 28–29%. Una strategia sinergica che combina education-effort = 0.4 e incentivi = 0.15 aumenta la partecipazione al 47–48%, superando la soglia critica teorica del 42%. Il benessere sociale aggregato (ASW) segue un andamento analogo, crescendo da circa 0.29 nello scenario base fino a 0.47 negli scenari sinergici, con un incremento complessivo di circa +68%. In assenza di incentivi, l'adesione rimane trascurabile nel breve periodo (≈ 0 –0.5%) anche con elevati livelli di educazione, evidenziando la necessità di politiche di governance combinate per innescare dinamiche di adozione collettiva. Questi risultati confermano che il successo delle CER dipende in modo cruciale dall'integrazione tra incentivi economici, interventi educativi e dinamiche sociali, oltre che dalla fattibilità tecnica del sistema energetico.

Ringraziamenti

Questa tesi rappresenta non solo il punto di arrivo di un percorso di ricerca, ma anche la punta dell'iceberg di un viaggio umano fatto di impegno, curiosità, dubbi e scoperte.

Desidero ringraziare innanzitutto il prof. Corsini, per avermi accompagnato con costanza, disponibilità e fiducia in ogni fase di questo lavoro. La sua competenza e la sua capacità di orientare il mio pensiero con equilibrio e rigore hanno rappresentato una guida fondamentale, anche e soprattutto quando la direzione della ricerca sembrava allontanarsi da strade tracciate e sicure. Le disquisizioni argute sono un ricordo che porterò con me.

Un sentito ringraziamento alla prof.ssa Zannella, che con la sua fiducia e la sua disponibilità mi ha consentito di affrontare questo percorso con maggiore serenità.

Un ringraziamento speciale va alla mia famiglia, vicina e lontana, per il sostegno incondizionato, la pazienza e la fiducia che mi hanno accordato fin dall'inizio, e per l'esempio di vita operosa e mente aperta che mi hanno trasmesso. Un pensiero affettuoso e grato va anche a coloro che non sono più qui, ma che con il proprio esempio, la propria forza e l'amore che continua a vivere nel ricordo, hanno continuato a guidarmi lungo questo cammino.

Infine, un pensiero va a tutte le persone che, anche solo con una parola di incoraggiamento o un gesto di gentilezza, hanno contribuito a rendere questo percorso più ricco e significativo.

Elenco figure

Figura 1 Confronto tra modello lineare e modello sistemico nel processo di innovazione.	27
Figura 2 Gestione delle politiche sociali	29
Figura 3. Network delle interdipendenze tra le funzioni del modello (f1-f12). I tre colori identificano i domini del comportamento sociale (in blu M1), della performance tecnico-economica (in verde M2-M3) e della governance di sintesi (in arancione M4). Gli archi rappresentano le connessioni sistemiche e i feedback bidirezionali che caratterizzano l'evoluzione dinamica della Comunità Energetica	74
Figura 4 Visione d'insieme integrata: dal framework teorico al modello computazionale.....	80
Figura 5 Modello e flusso delle attività.....	89
Figura 6 Connessioni tra le variabili del programma	105
Figura 7 Densità abitativa dei comuni italiani	112
Figura 8 Consumi energetici delle famiglie nel 2021	118
Figura 9 Producibilità per kWp	120
Figura 10 World con plot del programma in Netlogo	137
Figura 11 Schema del programma “Ottimizzazione CER”	140
Figura 12 Interfaccia di simulazione NetLogo con parametri di governance, world grid e plot di output in tempo reale.....	148
Figura 13 Intervalli del LCOE in funzione delle tecnologie. I valori registrati (70 €/MWh) risultano coerenti con i benchmark internazionali IEA e le analisi RSE.	149
Figura 14 Adesioni in funzione dei Tick per incentivi pari a 0.....	150
Figura 15 Adesione in funzione dei Tick per education effort pari a 0	151
Figura 16 Adesione in funzione dei Tick per combinazione di incentivi 0.1 e education effort 0.2.....	152
Figura 17 Adesione in funzione dei Tick per combinazione di incentivi 0.1 e education effort 0.4. Confronto dell'andamento temporale dell'adesione. Gli incentivi garantiscono il plateau, mentre lo sforzo educativo accelera drasticamente la fase transitoria	152
Figura 18 Grafici statistici per gli scenari analizzati.....	159

Elenco tabelle

Tabella 1 Aree di impatto e il collegamento con le Comunità Energetiche Rinnovabili.....	30
Tabella 2 Riscaldamento Globale e ESG	34
Tabella 3 Sfide e opportunità della transizione energetica	36
Tabella 4 Caratteristiche chiave della governance nel paradigma ESG e applicazioni alle CER	38
Tabella 5 Attori e metodi di modellizzazione	67
Tabella 6 Sintesi delle macroaree.....	71
Tabella 7 Funzioni fondamentali.....	71
Tabella 8 Mappatura delle funzioni del modello (f1–f12) secondo i pilastri del framework ESG (Environmental, Social, Governance).	72
Tabella 9 Relazioni tra le funzioni.....	73
Tabella 10 Comparazione dei metodi.....	76
Tabella 11 Riepilogo delle funzioni	78
Tabella 12 Correlazioni tra funzioni e variabili e parametri in netlogo	96
Tabella 13 Variabili e parametri nel modello ABM	97
Tabella 14 Valori di riferimento ci derivanti dalla distribuzione di Rogers	100
Tabella 15 Pesi nel calcolo dell'ASW	103
Tabella 16 Scomposizione della funzione di Sistema	108
Tabella 17 Indicatori sintetici di confronto di Latina.....	113
Tabella 18 Distribuzione della popolazione per composizione del nucleo familiare.....	114
Tabella 19 Consumi Elettrici per Settore - Latina (2020).....	115
Tabella 20 Impatti ambientali ed economici dei consumi.....	117
Tabella 21 Generazione da impianti fotovoltaici	117
Tabella 22 Radiazione solare su Latina.....	119
Tabella 23 Caratteristiche pannello fotovoltaico	120

Tabella 24 Caratteristiche tecniche dell'impianto	122
Tabella 25 Impatti Ambientali (per km ²)	123
Tabella 26 Parametri Energetici di Riferimento	123
Tabella 27 Impatti Economici e Sociali (per km ²)	124
Tabella 28 Indicatori economici.....	124
Tabella 29 Sintesi degli impatti per abitante	124
Tabella 30 Distribuzione dei nuclei familiari nel 2022.....	125
Tabella 31 Consumo energetico medio per composizione del nucleo familiare.....	126
Tabella 32 Condizioni al contorno	126
Tabella 33 Parametri utilizzati nella simulazione	127
Tabella 34 Descrizione delle variabili energetiche	134
Tabella 35 Variabili ambientali.....	135
Tabella 36 Variabili sociali	136
Tabella 37 Variabili generali usate nel programma	143
Tabella 38 Variabili energetiche usate nel programma.....	144
Tabella 39 Variabili economiche	145
Tabella 40 Matrice di validazione teoria modello.....	156
Tabella 41 Risultati statistici degli scenari iniziali.....	158
Tabella 42 Implicazione del diverso tasso di adesione	159

Keywords

Renewable Energy Communities (RECs), Decentralized Energy Systems, ESG (Environmental, Social, and Governance), Complex Systems, Agent-Based Model (ABM), decarbonization, PED positive energy district, renewable energy, photovoltaic plant, ESG energy social governance, investments, ABM agent based modeling, Energy Transition, Multi Criteria Decision Analysis, povertà energetica, Behavioral Economics, Policy Design

Acronimi e nomenclatura

ARERA	Italian Regulatory Authority for Energy, Networks and Environment
BES	Battery Energy Storage
CAPEX	CAP EXPenditure
CEC	Citizen Energy Community
CER	Comunità Energetica Rinnovabile
CHP	Combined Heat and Power
DES	DESalinationSystem
DNO	Distribution network operators
EC	Energy Community
EFSI	European Fund for Strategic Investments
ESCO	Energy service companies
ESG	Environmental, Social and Governance
EU	European Union
GIS	Geographical Information System
GSE	Energy Services Manager
ICE	Internal Combustion Engine
ICEs	Integrated Community Energy Systems
IEM	Internal Electricity Market Directive
LCOE	Levelized Cost Of Energy
LV	Low voltage
MASE	Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica
MES	Multi-Energy Systems
MiSE	Ministry of Economic Development
MLP	Multi-Layer Perceptron
MV	Medium voltage

NPV	Net Present Value
NSGA	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
OPEX	OPerational EXpenditure
PNRR	National Recovery and Resilience Plan
POD	Point Of Delivery
PUN	National Single Price
PV	Photovoltaic
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
REC	Renewable Energy Community
RED II	Renewable Energy Directive
RES	Renewable Energy Source
SME	Small Medium Enterprise
TEC	Thermal Energy Community
TSO	Transmission system operators
ZEC	Net Zero-Energy Community
FER	Fonte di Energie Rinnovabili
ABM	Agent Based Model -Modellazione Basata su Agenti
<i>tick</i>	passo temporale

Simboli e variabili

Simbolo Variabile	Unità	Descrizione
c_1	[0· 1]	Variabile di stato: livello di consapevolezza ambientale individuale
c_2	[0· 1]	Variabile di stato: comportamento ecologico (propensione alla sostenibilità)
c_3	[0· 1]	Interesse economico dell'agente
ap	[0· 1]	Action Potential (Potenziale d'azione per l'adesione)
$threshold_{adhesion}$	[0· 1]	Soglia di adozione
edu	[0· 1]	Education-effort (variabile di governance - slider)
inc	[0· 1]	Incentives (incentivi economici - slider)
$social_{influence}$	[-]	Effetto della pressione dei pari (raggio di 2 patch)
$\frac{BSA}{ASW}$	[0· 1]	Benessere Sociale Aggregato (Aggregate Social Welfare) BSA nel programma, ASW nel testo.
$tick$	[-]	Unità temporale (1 tick = 1 giorno o fase decisionale)
P_{peak}	[kW_p]	Potenza nominale di picco dell'impianto fotovoltaico
E_{spec}	[$\frac{kWh}{kW_p} \cdot anno$]	Producibilità specifica
E_{surf}	[$\frac{kWh}{m^2} \cdot anno$]	Energia specifica per unità di superficie
E_{yield}	[$\frac{MWh}{anno}$]	Energia annua teorica prodotta per km^2
$CO_2 avoided$	[$\frac{kg}{kWh}$]	Fattore di emissione evitato (
$loss_{syst}$	[%]	Perdite di sistema (
$ageing$	[$\% \frac{anno}{anno}$]	Decadimento annuale delle prestazioni (0.8%)
C_{energy}	[$\frac{€}{kWh}$]	Costo dell'energia elettrica da mercato
C_{REC}	[$\frac{€}{kWh}$]	Costo dell'energia all'interno della CER
$CAPEX_{spec}$	[$\frac{€}{kW_p}$]	Costo di installazione

PBT	$[anni]$	Payback Time (tempo di ritorno dell'investimento)
Emp_{rate}	$\left[\frac{posti}{abitante} \right]$	Occupazione generata
$k_{primary}$	$\left[\frac{MJ}{kWh_{el}} \right]$	Energia primaria necessaria per produrre 1 kWh
k_1, k_2, k_3, k_4	$[0, 1]$	Pesi decisionali nella valutazione dell'action potential.

1 INTRODUZIONE

1.1 Verso una nuova cittadinanza sostenibile: energia, clima e città in trasformazione

Il legame tra clima, energia e città costituisce una delle dinamiche globali più complesse da analizzare e gestire. Ogni intervento in un settore specifico genera effetti sistemici che si propagano su dimensioni economiche, sociali, ambientali e politiche.

Le proiezioni demografiche indicano che entro il 2050 circa il 68-70% della popolazione mondiale risiederà in aree urbane [1], [2] con una conseguente crescita della domanda energetica complessiva [3], [4]. L'urbanizzazione, combinata con le attività economiche prevalenti nei centri urbani (trasporti, industria, edilizia), è responsabile di oltre il 78% delle emissioni globali di gas serra derivanti dall'uso di energia [5]. Contestualmente, la variabilità climatica influisce in maniera significativa sui consumi elettrici, soprattutto nei settori residenziale e terziario [6], configurando un meccanismo di retroazione tra cambiamento climatico e fabbisogno energetico [7].

In tale quadro, il sistema energetico, ancora fortemente basato sui combustibili fossili, necessita di un riallineamento ai paradigmi della sostenibilità, delle città low-carbon e dell'economia circolare. Questo processo è identificato come "Transizione Energetica", la cui urgenza è determinata tanto dalle pressioni climatiche quanto dalla necessità di garantire sicurezza energetica e crescita socioeconomica [8]. La transizione, tuttavia, non può limitarsi al solo lato dell'offerta energetica: la diffusione delle rinnovabili e dell'efficienza è in corso, ma ancora in una fase embrionale rispetto all'obiettivo di una società capace di autosostenersi con fonti rinnovabili.

Le implicazioni della transizione si estendono su più livelli: ambientale, economico, sociale e politico, richiedendo cambiamenti strutturali nella pianificazione urbana e territoriale. In letteratura, è ormai consolidata la necessità di adottare la strategia delle tre "D" (decarbonizzazione, decentralizzazione e digitalizzazione) [9] integrata con le dimensioni ESG (Environmental, Social, Governance) [10]. Ciò implica il perseguimento di obiettivi simultanei: mantenere la competitività economica, garantire accesso equo e a prezzi sostenibili all'energia, incrementare la sicurezza

energetica, e promuovere l'integrazione tra consumo urbano e produzione locale di energia rinnovabile [11], con particolare riferimento alla generazione fotovoltaica [12]. In sintesi, comprendere e governare l'interazione tra clima, energia e città rimane una sfida sistemica ancora aperta, che richiede approcci interdisciplinari e strumenti innovativi. Tuttavia, nonostante l'urgenza, mancano modelli integrati che simulino dinamicamente l'interazione tra comportamenti individuali, governance e flussi energetici nelle CER urbane. I modelli esistenti si concentrano su aspetti isolati (energia/economia), trascurando di fatto una ottimizzazione multidimensionale che integri in modo esplicito dimensioni sociali, ambientali e di governance.

Sebbene la letteratura evidenzi l'importanza di approcci sistemici e la necessità di integrare dimensioni tecniche, economiche e sociali, persiste un significativo gap metodologico: i modelli ABM esistenti, pur sofisticati nell'analisi comportamentale, trattano i flussi energetici come esogeni o semplificati, mentre i modelli di ottimizzazione energetica, pur accurati sul lato tecnico (bilanci orari, profili PV), scarsamente catturano l'eterogenea razionalità dei cittadini e le dinamiche emergenti di cooperazione. In particolare, si evidenziano tre lacune:

- disallineamento temporale: i modelli di adozione operano su scale mensili/annuali, mentre la produzione FV e i consumi variano su scale orarie. Questa frammentazione impedisce di quantificare come la variabilità infragiornaliera di domanda/offerta influenzi le decisioni individuali di partecipazione (ad es., rendimenti reali vs. attesi).
- separazione funzionale: modelli comportamentali (Rogers, Bass) e modelli tecnico-economici (energy balance, NPV) operano su piani diversi differenti. Manca un framework unificato che simuli come incentivi, education-effort e governance alterino simultaneamente scelte individuali e prestazioni di sistema su scale diverse (ore $\rightarrow$ anni).
- assenza di feedback multi-scala: i modelli ABM consolidati non integrano cicli di feedback tra comportamento individuale (adesione/abbandono) e

performance di sistema (autoconsumo collettivo, resilienza), impedendo di catturare tipping points e dinamismi non lineari emergenti dalle CER reali. La presente ricerca affronta tali lacune sviluppando un modello ABM-energetico ibrido che accoppia dinamicamente simulazioni comportamentali su scala giornaliera (decisioni, peer effects) con bilanci energetici orari (PV, domanda, autoconsumo), creando così un ambiente di simulazione capace di esplorare scenari politici realistici e multiscala.

1.2 Obiettivi della tesi

La presente ricerca si propone di sviluppare e validare un modello computazionale basato su agenti per l'analisi dello sviluppo e della governance delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER, cfr. Sezione 2.1.2). L'obiettivo primario è comprendere come l'integrazione di aspetti tecnici, economici, sociali e ambientali influenzi le dinamiche di partecipazione e di sostenibilità energetica in contesti urbani a media densità. In particolare, la ricerca indaga:

- come le politiche di governance (incentivi, tassazione, regolamentazione) influenzano le decisioni individuali di adesione a una CER, considerando la razionalità limitata e i bias comportamentali degli agenti economici;
- come il comportamento cooperativo emergente da interazioni microscopiche (modellate secondo il Dilemma del Prigioniero Iterato, cfr. Sezione 2.2.4) determini l'evoluzione macroscopica del sistema energetico comunitario;
- come l'approccio ESG (Environmental, Social, Governance) possa fornire un quadro unificato per valutare la sostenibilità multidimensionale di una CER oltre i soli indicatori economici.

1.3 Ipotesi di ricerca

La complessità delle dinamiche di adozione delle nuove tecnologie, in particolare nei settori delle energie rinnovabili e della sostenibilità, richiede un approccio che vada

oltre il modello tradizionale di diffusione delle innovazioni, concepito come un processo lineare che va dall'invenzione all'adozione [13], [14]. Nel tempo, la comprensione della diffusione tecnologica si è evoluta verso una prospettiva sistemica e circolare, in cui le innovazioni non si limitano a essere trasferite dagli sviluppatori agli utenti passivi. Al contrario, i cittadini sono oggi considerati agenti attivi che co-creano, adattano e diffondono le tecnologie all'interno di contesti sociali, culturali e istituzionali in continua evoluzione [11], [15]. Le loro decisioni e i loro comportamenti sono influenzati da norme sociali, pressioni dei pari e valori personali, spesso radicati nelle comunità locali [16] e nelle reti digitali [17].

In questo contesto, le reti sociali e tecnologiche assumono un ruolo cruciale, potendo amplificare o ostacolare la diffusione delle innovazioni. Gli effetti tra pari, la fiducia reciproca e la visibilità dei comportamenti all'interno delle comunità contribuiscono a determinare i tassi di adozione [17], [18]. Parallelamente, i meccanismi di governance, che comprendono politiche pubbliche, sussidi, regolamentazioni e piattaforme partecipative, modellano l'ambiente abilitante e indirizzano l'innovazione verso obiettivi sociali più ampi [15]. Anche il mercato svolge una funzione rilevante, non solo come piattaforma di commercializzazione, ma come spazio di negoziazione in cui si confrontano le preferenze dei consumatori, gli interessi degli investitori e le dinamiche delle catene di approvvigionamento globali [19]. Infine, l'ambiente stesso diventa un attore determinante, in quanto le scelte tecnologiche influenzano e sono influenzate dagli impatti ecologici, creando circuiti di feedback che sottolineano la necessità di un'innovazione orientata alla sostenibilità.

Questa visione sistemica e circolare mette in evidenza l'interdipendenza tra attori e scale, fornendo un quadro più realistico e inclusivo per comprendere e accelerare la diffusione delle innovazioni nei sistemi sociotecnici complessi. I cittadini prendono decisioni influenzate da fattori personali, sociali ed economici, mentre la governance cerca di promuovere comportamenti sostenibili attraverso strumenti educativi, normativi e finanziari. In questo contesto, la "Teoria dei Beni Comuni " [20], [21]

evidenza che gli incentivi alla cooperazione nelle comunità socio-energetiche possono derivare dalla progettazione di regole condivise. Tuttavia, l'adozione di nuovi comportamenti non è immediata né universale, e per comprendere pienamente questa transizione sociotecnica [15], è necessario considerare come le innovazioni emergono e si diffondono attraverso l'interazione tra sistemi tecnici, culturali e istituzionali.

Di conseguenza, i sistemi energetici urbani e comunitari sono intrinsecamente interconnessi e richiedono un approccio sistemico per essere compresi e ottimizzati. Nonostante l'interesse crescente verso le Comunità Energetiche Rinnovabili (CER), manca ancora una modellazione basata su agenti che integri in modo dinamico aspetti tecnici ed economici su scale temporali giornaliere e annuali. I modelli esistenti tendono a concentrarsi sui flussi di energia o sulle prestazioni economiche, ma raramente catturano l'interazione in tempo reale tra produzione, consumo e rendimenti finanziari a livello individuale.

Sulla base di queste considerazioni teoriche, il presente studio fa riferimento al lavoro dello scienziato politico americano Robert Axelrod [22] e alla "Teoria della diffusione delle innovazioni" [17], secondo cui il processo di adozione comporta cinque fasi principali: consapevolezza dell'innovazione, sviluppo di un atteggiamento favorevole o sfavorevole, decisione di adottare o rifiutare, implementazione e conferma della decisione. Per tenere conto della possibilità di comportamenti non cooperativi, il modello integra i principi della teoria dell'egoismo e della cooperazione di Axelrod, arricchiti da considerazioni psicologiche [23], sociologiche [24] e sulla gestione sociale delle esternalità [21] [25]. Le azioni degli individui possono generare effetti positivi o negativi su soggetti non direttamente coinvolti, come nel caso delle emissioni di CO₂, costituendo un elemento centrale nelle decisioni politiche ed economiche [26].

Le ipotesi di ricerca si fondano su tre pilastri teorici principali:

1. Ipotesi 1 - Razionalità limitata e nudging: gli agenti non operano secondo la razionalità perfetta della teoria economica classica, ma secondo modelli cognitivi duali (Sistema 1 veloce/emotivo, Sistema 2 lento/razionale di

Kahneman [27]). Pertanto, politiche di "nudging" ben progettate possono orientare significativamente le scelte verso comportamenti prosociali e sostenibili, senza vincoli coercitivi.

2. Ipotesi 2 - Cooperazione emergente: il comportamento cooperativo non è individuale ma emerge dalle interazioni ripetute tra agenti secondo la logica del Dilemma del Prigioniero Iterato (Axelrod). La topologia delle relazioni sociali determina la capacità del sistema di auto organizzarsi verso equilibri cooperativi stabili. [Per dettagli teorici, cfr. Sezione 2.2.4]
3. Ipotesi 3 - Sostenibilità Multidimensionale: Una CER è sostenibile non solo economicamente, ma quando integra dimensioni ambientali, sociali e di governance. Un modello ABM che incorpori queste molteplici dimensioni può simulare scenari contrastanti e supportare il processo decisionale pubblico.

In particolare, questo studio introduce un modello basato su agenti sviluppato in NetLogo [28], [29] che consente di valutare simultaneamente l'autoconsumo energetico e l'utilità individuale. Tale modello fornisce un quadro semplificato ma efficace per esplorare strategie di ottimizzazione nella progettazione iniziale delle CER. La principale novità risiede nell'integrazione delle simulazioni del bilancio energetico con risultati economici specifici per ciascun attore, in un ambiente visivo e interattivo che permette di osservare le dinamiche decisionali all'interno di comunità energetiche eterogenee. Il modello mira a evidenziare come le scelte individuali, pur apparentemente piccole, possano avere conseguenze sistemiche significative, e come la governance possa influenzare in maniera determinante tali decisioni.

1.4 Struttura della tesi

Il presente studio sviluppa un modello basato su agenti per comprendere i meccanismi che guidano la partecipazione dei cittadini nelle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER). Ogni agente è dotato di un potenziale d'azione, indicatore dinamico della sensibilità individuale alle questioni di sostenibilità, che viene modulato da strategie

di governance, come incentivi economici e campagne educative, da fattori economici quali costi energetici e accessibilità tecnologica, e dalle condizioni ambientali locali, tra cui il potenziale di energia solare e le abitudini di consumo. Quando il potenziale d'azione supera una soglia prestabilita, l'agente decide di aderire a una CER, permettendo di simulare sia le scelte individuali sia la diffusione collettiva nel tempo. Le simulazioni hanno mostrato come la combinazione di incentivi economici e interventi educativi possa determinare un incremento significativo della partecipazione. Gli incentivi accelerano l'adozione iniziale, ma il loro effetto tende a esaurirsi rapidamente, mentre l'educazione produce un coinvolgimento più lento, ma duraturo. L'integrazione di dinamiche sociali e variabilità geografica ha reso possibile valutare strategie politiche adattate ai contesti locali, evidenziando l'importanza di bilanciare obiettivi a breve termine con la sostenibilità a lungo termine. Questi risultati indicano chiaramente come le decisioni individuali possano generare impatti sistemici, contribuendo a un maggiore autoconsumo energetico, a una resilienza locale più elevata e a migliori risultati ambientali.

Per rendere il modello realistico, si è tenuto conto della razionalità limitata degli individui nelle scelte tecnico-economiche, integrando approcci probabilistici e sociologici per individuare l'investimento minimo necessario a ottenere gli effetti desiderati. Inoltre, sono stati considerati i principi della finanza comportamentale [23], per comprendere l'evoluzione dell'utilità personale e di sistema e le interazioni tra incentivi individuali e strategie collettive. Questo approccio multidisciplinare consente di analizzare come le decisioni degli individui possano guidare l'evoluzione complessiva della comunità e fornire indicazioni concrete per pianificatori e governi nella definizione di politiche energetiche locali coerenti con la Transizione Energetica. La Modellazione Basata su Agenti (ABM) ha permesso di rappresentare la popolazione come un insieme di nodi interattivi, capaci di influenzarsi reciprocamente e di reagire all'ambiente circostante. Le simulazioni hanno evidenziato traiettorie diverse a seconda delle combinazioni di fattori sociali, economici e ambientali, con punti di

biforcazione che mettono in luce percorsi alternativi per l'adozione delle CER. Questo approccio consente di esplorare strategie in grado di accelerare processi spontanei, minimizzare le risorse necessarie e massimizzare gli effetti positivi sull'ambiente, evidenziando il legame tra le scelte individuali e le conseguenze sistemiche.

In sintesi, il modello sviluppato fornisce un quadro integrato e interattivo per studiare le dinamiche della partecipazione alle CER, mostrando come la combinazione di incentivi economici, educazione e governance possa favorire decisioni più sostenibili e resilienti. La simulazione dei comportamenti individuali all'interno di comunità energetiche eterogenee evidenzia l'importanza di approcci integrati e multidimensionali per guidare efficacemente la transizione verso un sistema energetico urbano più sostenibile.

2 MATERIALI E METODI

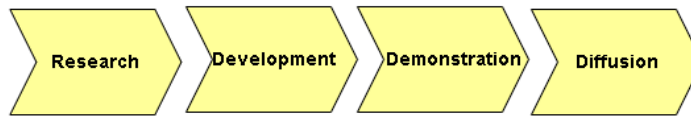
L'obiettivo di questa ricerca è la realizzazione di un modello che possa ottimizzare l'uso delle risorse e ridurre l'impronta ecologica, senza compromettere il contributo degli altri settori. Sebbene la ricerca tecnologica fornisca già strumenti avanzati per l'implementazione di sistemi energetici sostenibili e le valutazioni economiche evidenzino indicatori promettenti, la realtà quotidiana appare spesso distante da quanto riportato nelle pubblicazioni tecnico-economiche. Il punto cruciale sembra risiedere nelle scelte che ogni individuo compie giorno per giorno, le quali, se analizzate e applicate a casi reali, permettono di quantificare l'impatto concreto delle azioni individuali sul sistema complessivo.

La capacità di prevedere o, eventualmente, influenzare il comportamento dei gruppi sociali costituisce un tema di ricerca ricco di spunti e implicazioni pratiche. Nonostante la complessità e la numerosità delle interazioni sociali ed economiche rendano impossibile prevedere con precisione il comportamento di ogni individuo, risultati di carattere generale possono essere ottenuti mediante la modellizzazione matematica dei sistemi e delle dinamiche sociali. Tali modelli consentono di identificare pattern comportamentali, di stimare l'effetto aggregato delle decisioni individuali e di supportare strategie finalizzate a promuovere comportamenti più sostenibili, sia a livello individuale sia collettivo.

2.1 Stato dell'arte e partecipazione civica: il cittadino nel sistema energetico in evoluzione

Lo sviluppo tecnologico nel settore energetico e l'introduzione di nuove tecnologie nella vita quotidiana seguono percorsi articolati e multidimensionali, come schematizzato in Figura 1, in cui si evidenziano le differenze nel processo di innovazione tra il modello lineare ed un modello sistemico, quest'ultimo rielaborato a partire dal modello di Gallagher [19].

Linear Model of Innovation Process



Systemic Model of Innovation Process

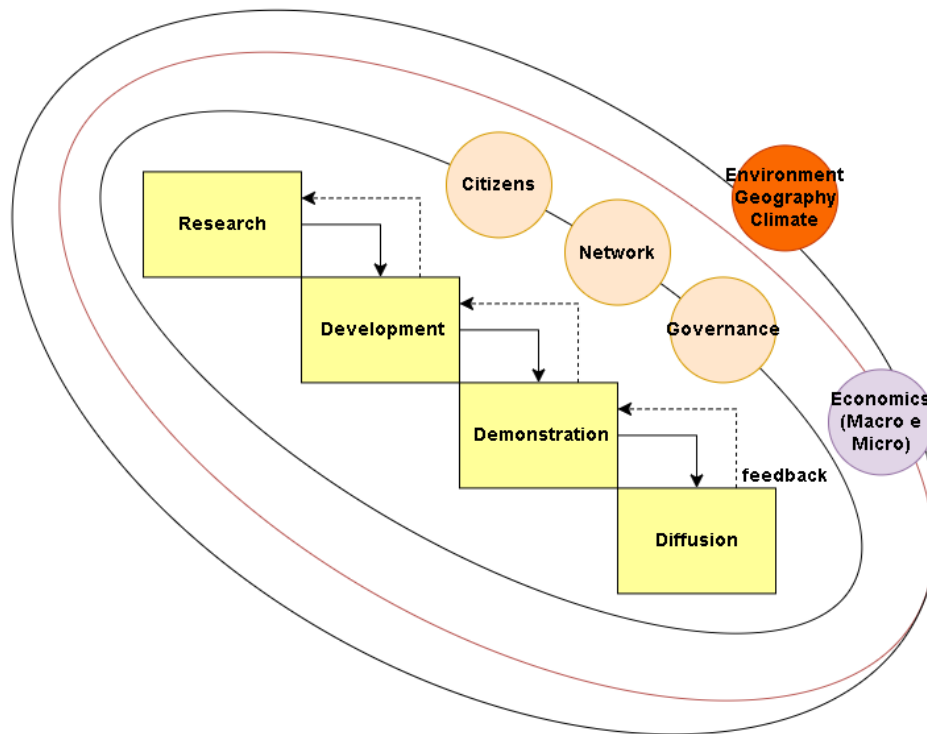


Figura 1 Confronto tra modello lineare e modello sistemico nel processo di innovazione.

Il contributo di istituzioni, reti e attori sociali risulta pervasivo per l'affermarsi di nuovi paradigmi di produzione e consumo dell'energia. L'innovazione, infatti, non si limita alla componente tecnologica, ma si sviluppa all'interno di contesti socio-istituzionali complessi, in cui il ruolo della governance, delle reti collaborative e dei singoli cittadini diventa determinante per il successo dei processi di cambiamento.

Allargando lo sguardo, emerge come la tematica dell'innovazione energetica possa essere analizzata in maniera più ampia attraverso la lente dei nuovi modelli di

governance territoriale delle politiche sociali. Questi modelli, stimolati anche dall'introduzione della Legge Quadro 328/2000 sul riassetto delle politiche sociali, puntano a strutturare interventi su aree vaste o distretti sociosanitari, definendo reti di partenariato capaci di integrare attori pubblici, privati e cittadini in processi partecipativi e coordinati. In contesti sociali sempre più complessi, diventa necessario ridefinire le dimensioni di funzionamento e di verifica dell'efficacia di tali reti, assicurando la coerenza tra obiettivi strategici e implementazione operativa.

Tuttavia, non tutti i tentativi di creare nuovi modelli di governance hanno avuto esiti positivi, a causa di diversi fattori critici, tra cui:

- carenze nell'analisi organizzativa dei punti di forza e di debolezza delle strutture di governance;
- adozione frequente di criteri extra-organizzativi nella selezione dei partner del privato sociale;
- assenza o formazione insufficiente di figure professionali in grado di facilitare il team building e gestire i conflitti;
- carenza di strumenti di monitoraggio e valutazione degli interventi, sia ex ante, ampliando lo sguardo insufficiente sviluppo di "comunità di pratiche" capaci di rendere operative la conoscenza e l'implementazione delle best practices attraverso strumenti di comunicazione istituzionale.

In questo contesto, il presente lavoro si propone di indagare, sia qualitativamente sia quantitativamente, il ruolo che istituzioni, reti collaborative e singoli cittadini possono svolgere nello sviluppo di modelli di governance efficaci. Data l'eterogeneità dei dati e la numerosità degli attori coinvolti, lo studio si basa sulla teoria della complessità, che offre strumenti concettuali e metodologici per analizzare sistemi sociotecnici dinamici e interconnessi.

Parallelamente, viene definita la situazione energetica italiana mediante dati statistici dettagliati, con l'obiettivo di stabilire i confini del sistema e identificare parametri numerici utili per le analisi quantitative. Questo approccio integrato consente di

collegare la dimensione sociale e di governance alla realtà energetica nazionale, fornendo una base solida per l'indagine e la simulazione dei processi di innovazione e partecipazione collettiva.

Queste criticità, già emerse nei nuovi modelli di governance delle politiche sociali, si ripropongono anche nel campo energetico, rendendo necessario un disegno istituzionale più rigoroso e basato su analisi organizzative sistematiche.



Figura 2 Gestione delle politiche sociali

Si indaga quindi, qualitativamente e quantitativamente sul ruolo che le istituzioni, che hanno il compito di governance, le reti e i singoli cittadini possono contribuire a questo sviluppo (Figura 2).

Data l'eterogeneità delle informazioni considerate e l'elevato numero di agenti coinvolti, l'intero impianto metodologico si fonda sui principi della teoria della complessità, che fornisce il quadro concettuale più idoneo per analizzare sistemi caratterizzati da interazioni non lineari, comportamenti emergenti e adattività collettiva. Parallelamente, è stata delineata in modo sistematico la situazione energetica italiana, attraverso l'elaborazione di dati statistici e indicatori economici,

con l'obiettivo di definire i confini operativi del sistema e individuare i parametri quantitativi di riferimento necessari per la successiva fase di analisi e simulazione.

2.1.1 Declinazione del concetto di ESG

Il concetto di ESG (Environmental, Social, Governance) ha acquisito un ruolo crescente nel dibattito accademico, politico e industriale. La sostenibilità, nella sua dimensione tridimensionale, si configura come il fulcro delle trasformazioni economiche e sociali che mirano a coniugare sviluppo e responsabilità verso l'ambiente e le comunità.

La logica ESG, originariamente sviluppata come criterio per la valutazione degli investimenti finanziari responsabili, è oggi diventata un paradigma interpretativo più ampio, capace di guidare modelli di governance, pratiche aziendali e strategie pubbliche. Nel contesto della transizione energetica e climatica, tale approccio non si limita a un esercizio di rendicontazione, ma diventa uno strumento operativo di misurazione, pianificazione e ottimizzazione delle scelte collettive.

La Tabella 1 sintetizza le tre dimensioni fondamentali, evidenziando le principali aree di impatto e il loro collegamento con le Comunità Energetiche Rinnovabili.

Tabella 1 Aree di impatto e il collegamento con le Comunità Energetiche Rinnovabili

Dimensione	Focus principale	Collegamenti con le CER	Riferimenti teorici
Ambientale (E)	Riduzione emissioni, tutela risorse naturali, resilienza climatica	Produzione locale da rinnovabili, riduzione CO ₂ , efficienza energetica	[4] [28] [29] [30]
Sociale (S)	Inclusione, equità, coesione sociale, partecipazione comunitaria	Coinvolgimento cittadini, riduzione povertà energetica, giustizia energetica	[30], [31], [32]
Governance (G)	Trasparenza, regole decisionali, accountability	Modelli partecipativi nelle CER, distribuzione equa dei benefici	[6], [20]

La valutazione della sostenibilità di sistemi complessi, come le comunità energetiche e i distretti energetici, richiede un approccio multidimensionale che superi i confini della sola analisi tecnico-economica delle tecnologie impiegate. In questa prospettiva, i criteri ESG offrono un quadro di riferimento strutturato, capace di indagare in che modo i processi di trasformazione energetica incidano sull'ambiente, sulla società e sulle modalità decisionali collettive. L'applicazione integrata di tali criteri consente di oltrepassare la tradizionale frammentazione disciplinare, proponendo una lettura sistemica che risulta particolarmente adatta all'analisi di processi energetici distribuiti e territorialmente radicati.

La dimensione ambientale riguarda primariamente la riduzione dell'impronta ecologica associata alla produzione e ai consumi. I dati internazionali mostrano una crescita costante della capacità installata di fonti rinnovabili, con un'espansione significativa di fotovoltaico ed eolico che si affianca al contributo storico dell'idroelettrico. Tuttavia, tale dinamica non si traduce ancora in una riduzione proporzionale delle emissioni di CO₂, che rimangono su livelli elevati. Questo divario mette in evidenza come l'innovazione tecnologica, pur necessaria, non sia da sola sufficiente a garantire una transizione sostenibile. È dunque indispensabile integrare le misure ambientali con strategie capaci di incidere sui modelli di consumo, sulla gestione delle risorse locali e sulla pianificazione territoriale. Nel caso delle comunità energetiche, ciò significa combinare la crescita della produzione da FER con interventi di efficienza energetica e con pratiche di governance orientate a una riduzione strutturale delle emissioni.

La dimensione sociale rappresenta un aspetto cruciale, spesso trascurato nelle analisi più tecnicistiche. La transizione energetica non si limita infatti a un cambiamento tecnologico, ma implica una riorganizzazione dei modelli di partecipazione, delle relazioni sociali e dei meccanismi di distribuzione dei benefici. Gli indicatori sociali ESG permettono di valutare il grado di inclusione delle comunità locali, le politiche di pari opportunità, le condizioni di lavoro e, più in generale, la qualità della vita

generata dalle iniziative sostenibili. In un'ottica territoriale, questo significa chiedersi non solo in che misura una comunità energetica contribuisca alla riduzione delle emissioni o dei costi energetici, ma anche come promuova equità sociale, coesione comunitaria e riduzione delle disuguaglianze.

In tale contesto, anche il coefficiente di Gini [33] emerge come strumento rilevante [33]: applicato alle comunità energetiche, esso consente di quantificare la distribuzione dei benefici economici derivanti dalla produzione e dall'autoconsumo collettivo, evidenziando eventuali concentrazioni o squilibri. Questo approccio apre alla riflessione sul concetto di giustizia energetica, intesa come garanzia che la transizione non generi nuove forme di esclusione, ma favorisca invece empowerment e inclusione. Ovviamente trattandosi di ridistribuzione di un reddito, l'abbassamento del coefficiente di Gini sarà legato alle iniziative intraprese.

La dimensione di governance completa il quadro analitico. Se in ambito aziendale essa si riferisce principalmente a strutture di controllo, costi di gestione e strumenti di conformità normativa, traslata al contesto dei distretti energetici assume una valenza più ampia. Si tratta infatti di valutare i modelli decisionali, la capacità di costruire partenariati territoriali e l'efficacia dei processi di monitoraggio e valutazione. La governance non è soltanto un insieme di regole formali, ma una dimensione dinamica che incide direttamente sulla possibilità di attuare concretamente la transizione energetica. Le esperienze pregresse mostrano come i processi di governance territoriale possano incontrare criticità legate alla scarsa analisi organizzativa, alla debolezza delle strutture di coordinamento o alla mancanza di competenze nella gestione dei conflitti e nella promozione della cooperazione. Inoltre, l'assenza di strumenti sistematici di monitoraggio riduce la capacità di valutare l'efficacia delle azioni ex ante, in itinere ed ex post.

Per superare tali criticità è necessario adottare un approccio integrato che combini strumenti quantitativi e qualitativi, rafforzi la formazione degli attori coinvolti e promuova la creazione di comunità di pratica capaci di condividere conoscenze e best

practices. Solo in questo modo la governance può evolvere da potenziale ostacolo a vero e proprio fattore abilitante della transizione. Nel contesto delle comunità energetiche, una governance efficace significa garantire processi decisionali trasparenti, inclusivi e capaci di mediare tra interessi eterogenei, traducendo obiettivi globali, come il NetZero 2050, in azioni concrete e misurabili a scala locale.

In definitiva, l'analisi ESG non si riduce a un mero esercizio di rendicontazione, ma rappresenta un vero e proprio paradigma interpretativo per comprendere la transizione energetica nella sua complessità. La sostenibilità di un sistema non dipende esclusivamente dalla riduzione delle emissioni o dall'efficienza tecnologica, ma scaturisce da un equilibrio dinamico tra impatto ambientale, equità sociale e solidità delle strutture di governance. Solo attraverso una visione sistemica, supportata dalla teoria della complessità e da strumenti di modellizzazione capaci di cogliere le interazioni tra attori e variabili, è possibile delineare scenari credibili e orientare politiche efficaci. In questa prospettiva, i criteri ESG si configurano non soltanto come sistema di indicatori, ma come chiave interpretativa per progettare comunità energetiche resilienti, inclusive e capaci di generare valore sociale oltre che ambientale ed economico

2.1.1.1 Situazione climatica: riscaldamento globale

Il cambiamento climatico costituisce la sfida più significativa del XXI secolo, con conseguenze dirette e indirette sui sistemi naturali, sociali ed economici.

Secondo l'ultimo rapporto IPCC (2023), la temperatura media globale è aumentata di circa 1,1 °C rispetto all'epoca preindustriale (1850-1900). Le proiezioni indicano che, senza un rapido abbattimento delle emissioni, sarà altamente probabile il superamento della soglia di 1,5 °C entro il 2030-2035.

Le principali conseguenze osservabili includono:

- Aumento della frequenza e intensità di eventi estremi (ondate di calore, uragani, precipitazioni intense).

- Scioglimento dei ghiacciai e innalzamento del livello del mare, con rischio per aree costiere e insediamenti urbani.
- Impatto su agricoltura e risorse idriche, con riduzione della produttività agricola in aree vulnerabili.
- Effetti sulla salute pubblica, in particolare per anziani, bambini e popolazioni a basso reddito.

In Italia, i dati ISPRA (2023) mostrano un aumento della temperatura media annua superiore a +1,5 °C rispetto al periodo 1961-1990, con una riduzione delle precipitazioni medie e una maggiore frequenza di eventi estremi come alluvioni e siccità.

Oltre agli aspetti ambientali, il cambiamento climatico pone questioni di giustizia climatica, poiché gli effetti si distribuiscono in maniera diseguale, penalizzando maggiormente le comunità più vulnerabili e meno responsabili delle emissioni. In Tabella 2 si riportano le diverse dimensioni impattate dal riscaldamento climatico.

Tabella 2 Riscaldamento Globale e ESG

Area di impatto	Effetti osservati	Effetti attesi (2030-2050)	Dimensione ESG prevalente
Ambiente	+1,1 °C globali; scioglimento ghiacciai	+1,5 °C entro 2035; aumento livello mare	E
Società	Maggiore esposizione a eventi estremi	Incremento migrazioni climatiche, insicurezza alimentare	S
Economia	Danni alle infrastrutture, costi sanitari crescenti	Perdita PIL globale tra 2-4% annuo (scenari IPCC)	E/S

2.1.1.2 Situazione energetica

Il sistema energetico globale si trova al centro della transizione verso la decarbonizzazione, obiettivo reso imprescindibile dall'Accordo di Parigi (2015) e dal Green Deal Europeo (2019).

Secondo i dati IEA (2023):

- I combustibili fossili coprono ancora circa 82% del fabbisogno energetico primario mondiale.
- Le rinnovabili hanno raggiunto il 30% della generazione elettrica e rappresentano quasi il 90% delle nuove installazioni nel 2022.
- La domanda di elettricità continua a crescere, trainata dall'elettrificazione dei trasporti e del riscaldamento.

Per quanto riguarda l'Europa, la guerra in Ucraina ha evidenziato la fragilità della sicurezza energetica legata alla dipendenza dal gas russo, spingendo gli Stati membri a diversificare le fonti e accelerare sull'autonomia energetica.

In Italia, il PNIEC (2023) prevede:

- Riduzione delle emissioni del 55% entro il 2030 rispetto al 1990.
- Copertura delle rinnovabili al 40% dei consumi finali lordi di energia.
- Potenziamento della capacità installata fotovoltaica ed eolica.

Le sfide principali della transizione energetica (Tabella 3) includono:

1. Variabilità delle rinnovabili → necessità di sistemi di accumulo e smart grid.
2. Adeguamento delle reti elettriche → per integrare generazione distribuita e modelli prosumer.
3. Sostenibilità socioeconomica → evitare che i costi della transizione ricadano in modo diseguale.

Tabella 3 Sfide e opportunità della transizione energetica

Dimensione	Sfide	Opportunità	Collegamento con CER
Tecnologica	Intermittenza rinnovabili, limiti rete	Accumuli, digitalizzazione, "Demand Response"	Generazione distribuita
Economica	Alti costi iniziali, rischio disuguaglianze	Riduzione costi rinnovabili, nuovi mercati	Autoconsumo e condivisione
Sociale	Accettazione pubblica, povertà energetica	Inclusione, empowerment comunità locali	Partecipazione attiva
Governance	Complessità regolatoria, coordinamento multilivello	Normative UE e nazionali a supporto	Governance partecipativa

Le Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) si collocano al crocevia di tali sfide: rappresentano un modello innovativo capace di integrare la produzione locale da fonti rinnovabili, promuovere la partecipazione attiva dei cittadini e contribuire alla resilienza energetica e sociale delle comunità.

2.1.1.3 Governance e regolamentazione

La dimensione della Governance (G) nel paradigma ESG rappresenta il quadro istituzionale, normativo e organizzativo attraverso cui vengono prese le decisioni collettive, stabilite le regole di funzionamento dei sistemi e definite le modalità di distribuzione dei benefici e dei costi della transizione.

In ambito energetico, la governance assume un ruolo particolarmente delicato poiché deve garantire equilibrio tra obiettivi ambientali, economici e sociali, assicurando contemporaneamente:

- trasparenza e accountability nei processi decisionali;
- partecipazione inclusiva degli stakeholder;
- coerenza tra le politiche locali, nazionali ed europee;
- strumenti normativi e regolatori stabili, che favoriscano gli investimenti a lungo termine.

La governance, dunque, non si riduce alla sola regolamentazione istituzionale, ma comprende anche i meccanismi di coordinamento tra attori pubblici e privati, i sistemi di monitoraggio e valutazione delle performance e le logiche di co-progettazione con la società civile.

L'Unione Europea ha definito un percorso chiaro per la decarbonizzazione, fissando obiettivi vincolanti attraverso il Pacchetto "Fit for 55" (2021) e il Green Deal (2019). Gli elementi chiave includono:

- riduzione delle emissioni di gas serra di almeno il 55% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990;
- neutralità climatica entro il 2050;
- rafforzamento delle direttive sulle energie rinnovabili (RED II e RED III), che riconoscono formalmente le Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) come nuovi soggetti del mercato elettrico.

Tali disposizioni promuovono modelli di governance partecipativa, in cui i cittadini non sono più meri consumatori, ma assumono un ruolo attivo nella produzione, gestione e condivisione dell'energia.

La governance della transizione energetica si sviluppa su più livelli:

- Sovranazionale (UE): definizione di obiettivi comuni e direttive quadro.
- Nazionale: recepimento delle direttive europee, piani energetici e regolazioni tariffarie (es. PNIEC in Italia).

- Locale: implementazione di politiche territoriali e gestione operativa delle CER.

Questa articolazione multilivello può generare sia opportunità che conflitti: da un lato permette di adattare le politiche al contesto territoriale; dall'altro richiede un coordinamento efficace per evitare frammentazioni regolatorie e ostacoli burocratici.

Le CER, in quanto nuove entità collettive, richiedono un modello di governance che concili:

- inclusività (coinvolgimento di famiglie, imprese, enti pubblici);
- equità distributiva (giusta ripartizione dei benefici economici ed energetici);
- trasparenza decisionale (meccanismi democratici interni);
- resilienza organizzativa (capacità di adattarsi a shock economici, tecnologici e climatici).

Ostrom, nelle sue teorie sulla gestione dei beni comuni, sottolinea l'importanza di regole condivise, meccanismi di monitoraggio e sanzioni proporzionate per garantire la sostenibilità di lungo periodo delle istituzioni collettive. Le CER possono essere lette come beni comuni energetici, in cui la governance diventa il fattore determinante del successo (Tabella 4).

Tabella 4 Caratteristiche chiave della governance nel paradigma ESG e applicazioni alle CER

Dimensione	Principi chiave	Applicazioni alle CER
Trasparenza	Accesso aperto alle informazioni; accountability	Rendicontazione su energia prodotta, costi e benefici
Partecipazione	Inclusione di tutti gli stakeholder	Coinvolgimento cittadini, enti locali, PMI
Equità	Distribuzione proporzionata di benefici e costi	Ripartizione incentivi e risparmi energetici
Resilienza	Capacità di adattamento a shock esterni	Flessibilità organizzativa, innovazione tecnologica
Coerenza multilivello	Coordinamento tra politiche UE, nazionali e locali	Integrazione CER nei PNIEC e nei piani regionali

2.1.1.4 Beneficio Sociale Aggregato e legittimazione

Un ulteriore aspetto centrale è la capacità della governance di generare Beneficio Sociale Aggregato, concetto che si lega direttamente alla dimensione “S” dell’ESG. Nelle CER, ciò si traduce in:

- riduzione della povertà energetica;
- rafforzamento della coesione sociale;
- creazione di un capitale sociale fondato su fiducia e cooperazione;
- contributo alla giustizia energetica, intesa come distribuzione equa dei vantaggi della transizione.

La legittimazione sociale diventa così il fondamento su cui costruire la durabilità delle CER: senza un consenso ampio e un’adesione convinta dei cittadini, le comunità energetiche rischiano di rimanere esperimenti di nicchia.

2.1.2 Sistemi di acquisto solidali, PPAS e Comunità Energetiche: riferimenti normativi

I Gruppi di Acquisto Energia rappresentano soggetti associativi costituiti con la finalità di selezionare uno o più fornitori per la fornitura di energia elettrica e/o gas naturale ai clienti finali aggregati nel gruppo stesso. Tali gruppi non operano come venditori diretti, ma agiscono da intermediari tra la domanda, costituita dai consumatori, e l’offerta dei fornitori nel mercato energetico. La modalità operativa consiste nell’organizzazione di aste competitive a cui partecipano diversi fornitori, finalizzate alla negoziazione della tariffa più vantaggiosa. L’Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente (ARERA) ha elaborato delle linee guida volontarie, rivolte ai Gruppi di Acquisto destinati a clienti domestici e piccole imprese, al fine di garantire trasparenza e correttezza nelle campagne di acquisto collettivo.

I Power Purchase Agreements (PPAs) sono contratti di lungo periodo stipulati tra un produttore di energia — frequentemente da fonti rinnovabili — e un acquirente che

può essere un fornitore o un consumatore finale. Tali contratti regolano condizioni commerciali quali prezzo, durata, quantità e modalità di fornitura, offrendo stabilità e certezza economica alle parti coinvolte.

Le Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) sono state introdotte nell'ordinamento italiano con il Decreto Legislativo 162/19, che recepisce la direttiva europea 2018/2001 (RED II). Le CER si configurano come aggregazioni volontarie di cittadini, imprese, enti territoriali e autorità locali che si associano con l'obiettivo di produrre e condividere energia elettrica da fonti rinnovabili per soddisfare il proprio fabbisogno. Il Decreto CER, entrato in vigore il 24 gennaio 2024, definisce le modalità di incentivazione volte a sostenere l'elettricità prodotta da Comunità energetiche rinnovabili e dall'autoconsumo diffuso, prevedendo misure quali tariffe incentivanti e contributi a fondo perduto per promuovere lo sviluppo di 7 GW di impianti a livello nazionale.

La Direttiva RED costituisce il quadro normativo comunitario volto a promuovere l'adozione di fonti rinnovabili, basandosi su principi fondamentali quali la sostenibilità ambientale, la diversificazione delle fonti energetiche, il raggiungimento di obiettivi vincolanti per gli Stati membri, la promozione di investimenti e il primato dell'efficienza energetica. Tale disciplina incentiva l'applicazione di meccanismi di sostegno, la cooperazione internazionale e l'adozione di criteri di sostenibilità, specie nell'ambito dei biocarburanti.

In Italia, le modalità di acquisto e consumo di energia si articolano anche attraverso altre tipologie contrattuali, inclusi:

- la fornitura tradizionale tramite operatori che acquistano energia all'ingrosso per rivenderla al dettaglio;
- il trading diretto, che consente a consumatori o imprese di acquistare energia direttamente dai produttori;
- l'autoconsumo con sistemi di accumulo, che prevede la produzione e l'immagazzinamento per utilizzi futuri;

- la produzione autonoma di energia da fonti rinnovabili, come solare, eolico, idroelettrico, geotermico e biomassa;
- i Gruppi d'Acquisto Solidale (GAS) nel settore energetico, che privilegiano la provenienza verde dell'energia rispetto al mero risparmio tariffario.

Il Decreto del Ministro dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica n. 414 del 7 dicembre 2023, noto come Decreto CACER, entrato in vigore il 24 gennaio 2024, disciplina le modalità di erogazione degli incentivi per gli impianti a fonti rinnovabili integrati in comunità energetiche, gruppi di autoconsumatori e consumatori a distanza. Il Testo Integrato per l'Autoconsumo Diffuso (TIAD), allegato alla Delibera ARERA 727/2022/R/eel, regola il meccanismo di valorizzazione dell'energia autoconsumata nelle diverse configurazioni di autoconsumo collettivo, definendo sette tipologie possibili, tra cui gruppi di autoconsumatori, comunità energetiche rinnovabili (CER), comunità energetiche dei cittadini (CEC), autoconsumatori individuali a distanza con o senza linea diretta e clienti attivi a distanza.

Secondo il Decreto CACER, possono accedere alla tariffa incentivante le seguenti configurazioni: autoconsumatori a distanza, gruppi di autoconsumatori e comunità energetiche rinnovabili; mentre ai benefici del PNRR possono accedere gruppi di autoconsumatori e CER localizzati in comuni con meno di 5.000 abitanti. Le misure previste includono:

- una tariffa incentivante per la quota di energia condivisa da impianti a fonti rinnovabili integrati nelle configurazioni ammesse, disponibile fino al raggiungimento di un contingente di potenza di 5 GW o fino al 31 dicembre 2027;
- un contributo a fondo perduto fino al 40% dei costi ammissibili, finalizzato allo sviluppo di comunità energetiche e autoconsumo collettivo nei piccoli comuni, con termini per la presentazione delle richieste e tempistiche rigorose per l'entrata in esercizio.

Le Regole Operative per l'accesso al servizio di autoconsumo diffuso e ai contributi PNRR fissano modalità e tempistiche per il riconoscimento degli incentivi e dei contributi, normando altresì i requisiti per l'ammissibilità degli impianti. Questi devono appartenere a configurazioni di CER, gruppi di autoconsumatori o autoconsumatori a distanza, essere connessi alla medesima cabina primaria, essere impianti di nuova costruzione o potenziamenti e rispettare limiti di potenza di 1 MW. Inoltre, specifici criteri, quali il principio DNSH (Do No Significant Harm) e i requisiti per impianti a biogas o biomassa, sono prescritti per garantire la sostenibilità ambientale.

In caso di impianti con potenza superiore a 1 MW, è riconosciuto esclusivamente il contributo di valorizzazione dell'energia autoconsumata.

Campione e popolazione: contesto particolare

L'analisi quantitativa e qualitativa proposta in questa ricerca si fonda su un campione selezionato che rappresenta un contesto socio-ambientale e territoriale specifico, caratterizzato da una pluralità di attori con diverse tipologie di consumo e comportamenti energetici. La composizione del campione riflette una realtà eterogenea, in cui sono presenti situazioni di consumo domestico, commerciale e industriale, nonché vari livelli di coinvolgimento nelle dinamiche di autoconsumo e Comunità Energetiche Rinnovabili.

La definizione precisa del contesto di studio consente di circoscrivere i parametri di analisi e di calibrare il modello simulativo secondo le peculiarità locali e le normative vigenti. Tale approccio garantisce una maggiore robustezza dei risultati, oltre a favorire l'identificazione di interventi mirati a livello di quartiere o comunità.

Dal punto di vista demografico, il campione include una distribuzione diversificata in termini di età, composizione familiare, livello di istruzione e capacità economica, elementi che influenzano direttamente le scelte energetiche e la propensione alla partecipazione in schemi collettivi.

L'attenzione rivolta al contesto territoriale si traduce anche nella raccolta e nel monitoraggio di dati energetici dettagliati, relativi ai consumi elettrici e termici, ai profili di produzione da impianti rinnovabili e alle abitudini di mobilità. Questi dati, integrati con informazioni qualitative, rappresentano la base su cui si fonda l'analisi delle dinamiche sociali e tecniche proprie delle Comunità Energetiche.

Si sottolinea inoltre che il focus sul contesto specifico permette di evidenziare criticità e opportunità che possono passare inosservate in analisi di carattere generale, valorizzando l'importanza della scala territoriale nella progettazione e gestione sostenibile dell'energia.

Analisi dell'ambito territoriale: città e quartiere

L'analisi territoriale rivolta alle città e ai singoli quartieri costituisce un elemento imprescindibile per comprendere le dinamiche spaziali e sociali che influenzano la formazione e lo sviluppo delle Comunità Energetiche Rinnovabili. Questa scala di osservazione consente di rilevare le caratteristiche peculiari dei diversi ambiti urbani, tra cui la densità abitativa, la tipologia edilizia, la distribuzione funzionale delle attività, e le reti infrastrutturali esistenti.

L'approccio adottato si basa sulla raccolta e integrazione di dati statistici, geografici e sociali, che permettono di delineare profili di consumo energetico e comportamenti di mobilità specifici per ciascuna area analizzata. Tali profili sono essenziali per identificare potenziali aggregazioni di utenti e per pianificare interventi mirati che facilitino la condivisione e l'ottimizzazione delle risorse energetiche.

L'applicazione di metodi di analisi spaziale e di modellizzazione agent-based consente altresì di simulare scenari di diffusione e interazione tra i diversi attori, valutando l'impatto di politiche e incentivi su scala locale. Questa prospettiva contribuisce a superare approcci frammentati e a promuovere una governance integrata, in grado di valorizzare le sinergie tra stakeholder pubblici, privati e cittadini.

Inoltre, l'analisi a livello di quartiere evidenzia come le caratteristiche sociodemografiche e le reti sociali influenzino la partecipazione collettiva e la capacità di risposta alle iniziative di transizione energetica. Ciò rende possibile individuare modelli di intervento personalizzati, capaci di favorire l'adesione e la coesione sociale nelle Comunità Energetiche.

Si sottolinea infine che la conoscenza approfondita delle dinamiche territoriali rappresenta un presupposto fondamentale per progettare strategie sostenibili e resilienti, coerenti con i contesti urbani e in grado di supportare processi di innovazione sociale ed energetica.

Il presente lavoro prende in considerazione le riflessioni teoriche relative alla "Città a 15 minuti," concetto formulato da Carlos Moreno [34], nell'ottica di una città estesa su alcuni chilometri quadrati. Per l'analisi si considerano i seguenti assi tematici:

1. La declinazione del paradigma Net Zero 2050;
2. Il consumo e gestione delle risorse naturali;
3. Il concetto integrato di benessere;
4. L'impatto sociale e le dinamiche di governance;
5. I vantaggi derivanti da accordi di Power Purchase Agreements (PPA) a livello globale.

Le città e il settore edilizio svolgono un ruolo decisivo in questo processo. I Distretti e i Quartieri a Energia Positiva sono parte integrante di approcci globali verso un'urbanizzazione sostenibile, includendo prospettive tecnologiche, spaziali, normative, finanziarie, legali, sociali ed economiche. Richiedono interazione e integrazione tra edifici, utenti e il sistema energetico, di mobilità e ICT regionale. In questo senso, un Distretto a Energia Positiva è visto come un quartiere urbano con un bilancio energetico netto annuale pari a zero importazioni di energia e zero emissioni nette di CO₂, che mira a una produzione eccedentaria di energia rinnovabile, integrata in un sistema energetico urbano e regionale.

In merito ai possibili impatti delle Comunità di Energia Rinnovabile (CER), si seguono le indicazioni rese dalla Commissione europea che ha stabilito una serie di indicatori, raccolto i dati e li ha resi pubblici.

Tra le iniziative c'è per esempio la creazione di una guida che spiega quali sono gli elementi da considerare per aprire gli "Energy communities one-stop-shops", cioè gli sportelli unici dedicati alle CER (vedi "Una guida europea per creare sportelli unici per le comunità energetiche").

Impatti e numeri delle CER europee aderenti

Tornando all'analisi delle CER, per valutare i loro impatti locali (energetici, economici, sociali e ambientali), l'*Energy Communities Repository* ha definito una metodologia che consiste nella creazione di un portale online in cui tutte le CER disposte a rendere disponibili i loro dati, possono registrarsi e rispondere a un questionario composto da 47 domande.

Dai dati raccolti nel primo periodo, emerge che in tutta Europa hanno aderito all'iniziativa solo 49 CER; in Spagna si registra il numero più alto con 22 CER, mentre in Italia sono solo 2 CER: la *Cer Sole Aps* a Genova e la *CERSRA* di Ravenna.

Tra i principali risultati a scala comunitaria, troviamo per esempio che la capacità complessiva delle 49 CER è pari a 249 MW (di cui 164 MW solo in Spagna, 61 in Belgio e 20 in Olanda).

È stato anche valutato il risparmio delle emissioni di gas serra, avuto grazie alle CER: pari a circa 55mila tonnellate di CO₂.

Altri due risultati riguardano l'occupazione di addetti a tempo pieno nelle CER aderenti, equivalente a 153 impiegati (di cui 76 in Spagna, 57 in Belgio e 10 in Grecia) e gli investimenti complessivi generati pari a 25,3 milioni di euro (di cui 23 milioni solo in Olanda e circa 1,5 milioni in Belgio).

È importante notare che le risposte fornite sono di tipo quantitativo (valori numerici, oppure "sì/no") permettono quindi di fare calcoli e confronti con i dati.

Alcuni dati richiesti si riferiscono all'anno 2022, altri invece riguardano tutto il periodo di attività della CER (dalla sua costituzione ad oggi).

Il database pubblico europeo permette di accedere alla lista completa degli indicatori e dei relativi dati forniti da ogni Paese. Gli indicatori sono stati raggruppati in 7 categorie. La prima riguarda i dati generali della CER, come estensione in kmq e popolazione.

Una seconda categoria raggruppa i dati energetici della CER, come:

- capacità totale installata e rendimenti totali per elettricità, riscaldamento, raffrescamento, biogas
- risparmi sulle emissioni di gas serra
- tecnologie utilizzate per la produzione di energia: biogas, biomassa, biocarburanti, geotermica, pompa di calore, idroelettrica, solare fotovoltaica, solare termica ed eolica
- capacità totale di accumulo dell'energia
- energia elettrica totale fornita tramite stazioni di ricarica nel 2022
- prezzo medio per kWh
- prezzi medi nazionali dell'energia nel 2022 (elettricità e gas)

Nella terza categoria ci sono le informazioni sui sistemi di governance della CER, cioè:

- forma giuridica: se si tratta di cooperativa, società a partecipazione pubblica, società privata, società in accomandita, associazione senza scopo di lucro o Fondazione.
- tipi di partecipanti presenti nel consiglio: cittadini, autorità locali, enti pubblici, scuola/università, associazioni, PMI, società o servizi energetici privati/pubblici, investitori istituzionali, banche, altre comunità energetiche, società di edilizia sociale.

- sistema di voto, per esempio: un voto per membro o azione; nessun diritto di voto per i membri; azioni senza diritto di voto; maggioranza dei voti nel consiglio per i fondatori.
- processi decisionali: se avvengono per esempio tramite assemblee generali; gruppi di lavoro; aggiornamenti regolari tramite e-mail.
- percentuale di partecipanti all'assemblea generale.

La quarta categoria analizza invece i partecipanti alla comunità, attraverso:

- numero e tipo di membri ammessi: cittadini, autorità locali, enti pubblici, scuola/università, associazioni, PMI, società o servizi energetici privati/pubblici, investitori istituzionali, banche, altre comunità energetiche, società di edilizia sociale.
- rispetto dei criteri di inclusività: quota di partecipanti femminili, di membri con meno di 35 anni e di soggetti vulnerabili.
- età media dei partecipanti alla CER.

I dettagli delle attività offerte sono raccolti nella quinta categoria, che include:

- principali attività svolte come: produzione di elettricità/calore; autoconsumo; efficienza energetica; condivisione di energia; mobilità elettrica; gestione della rete locale/chiusa (isole energetiche); accumulo di energia; teleriscaldamento/raffreddamento; campagne di sensibilizzazione.
- servizi offerti, come: workshop; consulenza finanziaria sugli incentivi disponibili; consigli per cambiare fornitore di energia; audit energetici per abitazioni ed edifici pubblici (comprese indagini sulla perdita di calore e verifica delle correnti d'aria); valutazioni dell'efficienza energetica tramite modelli di consumo e elettrodomestici utilizzati; istruzione e formazione; fornitura di software/hardware per la misurazione intelligente; monitoraggio energetico; interventi di retrofitting.
- difficoltà incontrate dalle CER fin dalla loro costituzione, di tipo: normativo (es. nessun quadro di sostegno per le comunità energetiche); amministrativo (es.

procedure di richiesta complicate); sociale (es. opposizione da parte della comunità locale); tecnologico (es. mancanza di capacità nella rete); finanziario (es. nel reperimento dei fondi).

Gli aspetti economici della CER sono stati riuniti nella sesta categoria di dati e comprendono:

- tipi di modelli di business, come: fornitura; generazione collettiva e commercio; autoconsumo collettivo residenziale, pubblico o commerciale; rete di proprietà comunitaria (rete di distribuzione, microreti, isole naturali non interconnesse); investimento collettivo in un progetto comunitario (acquisto collettivo/installazione di tecnologia, ristrutturazione collettiva di edifici nella comunità); investimento collettivo in un progetto energetico indipendente (cooperative, azione energetica collettiva-crowdfunding); investimento collettivo in un progetto energetico da parte di un promotore commerciale privato o pubblico; erogazione di servizi (es. comunità della mobilità, servizio di flessibilità ai mercati e al DSO, consulenza energetica, servizi di efficienza energetica); cluster energetico.
- risorse umane: numero di occupati a tempo pieno; volontari e ore totali di volontariato.
- tipi di sostegni finanziari ottenuti come contributi a fondo perduto, agevolazioni fiscali, fondi di beneficenza, prestiti agevolati e obbligazioni.
- quali sono le fonti del sostegno finanziario, in particolare: Unione Europea, Autorità nazionale, Autorità regionale, Enti locali, ONG e associazioni, Fondazioni o Banche.
- finanziamento totale medio ottenuto fin dalla costituzione della CER.

Infine, nella settima categoria, ci sono le informazioni riguardanti gli aspetti sociali della CER, per esempio le misure di beneficio ambientale adottate nel 2022. In questo caso la comunità dovrà indicare se non ha previsto misure specifiche, oppure se ha attuato misure di: riduzione del consumo energetico; mitigazione del cambiamento

climatico; adattamento climatico; riduzione dei rifiuti o dell'inquinamento; miglioramento della qualità di acqua e biodiversità.

Rientrano nella categoria anche gli impatti sull'ambiente locale fin dalla costituzione della comunità. La CER dovrà indicare se non ha comportato nessun impatto, oppure se ha generato impatti positivi/negativi su biodiversità, cambiamento climatico, riduzione dei rifiuti, qualità dell'acqua.

La CER dovrà inoltre indicare se non ha ottenuto benefici sociali, oppure se ha contribuito ad aumentare nella comunità locale: la coesione sociale, l'inclusione di famiglie/individui vulnerabili, le azioni dei cittadini, la giustizia energetica, l'accettazione delle energie rinnovabili, l'alfabetizzazione energetica e la riduzione della povertà energetica.

Per valutare il sostegno concesso alle famiglie vulnerabili nel 2022, la CER risponderà se non ha adottato nessuna azione specifica, oppure se per esempio ha previsto sconti per gruppi vulnerabili, istituito un fondo dedicato, sostenuto l'istruzione, dato priorità alle assunzioni provenienti da gruppi sottorappresentati, fatto donazioni ad associazioni di questa categoria, oppure se ha previsto la condivisione dell'energia.

Nella categoria si deve specificare anche se la CER ha adottato criteri per misurare l'impatto sociale e di che tipo (valutazione esterna/interna, raccolta dati, intervista ai membri, intervista alle parti interessate).

Anche gli obiettivi degli investimenti in surplus delle CER vengono quantificati. Se prevede investimenti, la CER indicherà se sono diretti a ristrutturazioni/isolamento nell'edilizia sociale, ad attività educative (es. nelle scuole), misure di protezione ambientale, sostenere servizi locali (es. creazione di una rete di trasporto pubblico), oppure fondi di previdenza sociale.

Infine, la CER indicherà il numero di attività educative e sociali nel 2022 e il rispettivo numero di partecipanti.

Per concludere, questa iniziativa della Commissione europea è interessante perché parte da una metodologia definita e gli indicatori scelti permettono di ricavare delle informazioni quantitative e confrontabili tra tutte le CER europee.

Purtroppo, quello che manca è l'adesione delle Comunità energetiche al questionario, probabilmente, secondo la Commissione europea, per mancanza di tempo da dedicare al questionario. Per agevolare la partecipazione ha scelto 22 domande come obbligatorie, le altre restano facoltative.

Se ci fosse più partecipazione da parte delle CER sarebbe possibile avere una valutazione degli impatti più realistica, non solo a scala comunitaria ma anche a scala locale.

Si evince che le interazioni presenti tra i diversi agenti sono di numero elevato caratterizzando un sistema sia complesso che complicato.

Si rende necessaria la realizzazione di una mappa strategica che tenga conto delle relazioni e interazioni.

2.1.3 Fondamenti teorici: economia comportamentale, complessità e cooperazione

L'analisi delle dinamiche decisionali nelle comunità energetiche richiede un approccio multidisciplinare che integri contributi provenienti dall'economia comportamentale, dalla teoria della complessità e dalla sociologia economica. Il framework teorico di riferimento si fonda principalmente sui contributi di Daniel Kahneman, il cui lavoro ha rivoluzionato la comprensione del processo decisionale umano. La teoria dei sistemi di pensiero duali elaborata da Kahneman distingue tra il Sistema 1, caratterizzato da processi cognitivi rapidi, intuitivi ed emotivi, e il Sistema 2, contraddistinto da elaborazioni più lente, deliberate e razionali. Questa distinzione è particolarmente rilevante nel contesto delle decisioni di investimento in tecnologie rinnovabili, dove bias cognitivi sistematici e prevedibili possono influenzare significativamente le scelte degli individui. La teoria del prospetto [35], ulteriore contributo di Kahneman, evidenzia come le persone valutino le opzioni non in termini

assoluti, ma relativamente a uno stato di riferimento, focalizzandosi su potenziali guadagni o perdite rispetto alla situazione attuale.

Complementare all'approccio di Kahneman è il concetto di paternalismo libertario sviluppato da Richard Thaler e Cass Sunstein, che propone un modello ibrido di policy design volto a orientare le scelte individuali verso comportamenti ottimali mantenendo intatta la libertà decisionale. Il meccanismo del "nudging", tradotto in italiano con "la spinta gentile" rappresenta uno strumento particolarmente efficace nel contesto energetico, dove si possono progettare architetture decisionali che facilitino l'adesione a comunità energetiche senza imporre vincoli coercitivi. Questo approccio riconosce che, pur preservando la libertà di scelta, è possibile strutturare il contesto decisionale in modo da favorire risultati socialmente desiderabili.

Gli studi empirici confermano che incentivi e regolamentazioni influenzano significativamente i consumi di rinnovabili. In uno studio del 2021 [36] si analizzano 15 paesi europei, dimostrando che PIL pro capite, innovazione tecnologica e politiche ambientali spiegano il 72% della varianza nei consumi FER, con effetti positivi ma differenziati tra paesi occidentali e orientali [36]. Questi risultati empirici supportano la parametrizzazione del modello, dove incentivi (d3) e educazione (education-effort) modulano le decisioni individuali verso equilibri cooperativi sostenibili.

Sul versante della complessità sistemica, i contributi di Biggiero offrono una chiave interpretativa fondamentale per comprendere le dinamiche relazionali che caratterizzano le comunità energetiche. La teoria delle risorse relazionali di Biggiero sottolinea come la conoscenza e le risorse non siano attributi esclusivamente individuali, ma siano distribuite all'interno di reti sociali e organizzative. I concetti di "competenze relazionali" e "capitale relazionale" sviluppati dall'autore evidenziano il ruolo cruciale che le connessioni interpersonali e le reti sociali giocano nel determinare il successo di iniziative collettive come le comunità energetiche.

Nei suoi lavori sulla teoria delle risorse relazionali [37], [38] Biggiero distingue in modo analiticamente netto tra competenze relazionali e capitale relazionale, collocandole rispettivamente a livello micro-dinamico e macro-sistemico.

Le competenze relazionali rappresentano capacità dinamiche individuali (e orizzontali) degli agenti di gestire interdipendenze complesse all'interno di reti sociotecniche. Esse non coincidono con tratti psicologici, ma con la capacità operativa di coordinamento sotto vincolo relazionale. Formalmente, Biggiero le modella come grado di vincolo relazionale C_r in un grafo diretto:

$$C_r = f(I_p, I_s, I_r)$$

dove:

I_p = interdipendenza parallela (bassa complessità; attività indipendenti),

I_s = interdipendenza sequenziale (complessità intermedia; output A → input B),

I_r = interdipendenza reciproca (alta complessità; feedback bidirezionale A ↔ B).

La complessità relazionale cresce secondo l'ordine:

$$I_p < I_s < I_r$$

ed è empiricamente misurabile attraverso indicatori di struttura reticolare quali densità degli archi, presenza di cicli e molteplicità dei feedback. L'interdipendenza reciproca costituisce il livello massimo di vincolo coordinativo, poiché introduce retroazioni continue e adattamento congiunto.

Il capitale relazionale, invece, è uno stock emergente e verticale accumulato dal sistema. Non è somma delle competenze individuali, ma proprietà sistemica derivante dalla configurazione delle relazioni. Può essere formalizzato come:

$$K_r = \sum_{i,j} w_{ij} \cdot \text{sim}(c_i, c_j)$$

dove:

- w_{ij} è il peso del legame tra i nodi i e j,
- $\text{sim}(c_i, c_j)$ è la similarità culturale/competenziale tra agenti (coerente con metriche di omofilia e con il modello culturale di Robert Axelrod).

Il capitale relazionale è quindi funzione congiunta di:

- intensità dei legami,
- compatibilità tra agenti,
- struttura complessiva del network.

Esso genera resilienza, capacità innovativa e coordinamento adattivo; può essere amplificato da fiducia e cooperazione o eroso da conflitto e frammentazione.

L'Agent-Based Model implementato in NetLogo non utilizza la teoria come semplice riferimento interpretativo, ma la traduce in meccanismo generativo multilivello, riproducendo la distinzione micro–macro proposta da Biggiero.

Nel modello CER:

- Le competenze relazionali sono mappate su attributi individuali (awareness, cooperation-attitude, social susceptibility).
- Il potenziale d'azione dell'agente evolve secondo dinamiche di influenza sociale locale.

L'attivazione avviene quando:

$$action-potential > threshold$$

La soglia è influenzata da:

- pressione dei vicini (social influence, parametro $k_{social} = 0.3$),
- politiche di governance (education, incentives),
- struttura di interdipendenza nel network.

L'interdipendenza reciproca I_r è operazionalizzata come quota di legami bidirezionali nel grafo locale. All'aumentare di I_r , cresce il numero di cicli e feedback, quindi il vincolo coordinativo C_r .

Il capitale relazionale emerge endogenamente come proprietà aggregata del network spaziale (Moore neighborhood). Nel modello è approssimato tramite l'Aggregated Social Welfare (ASW):

$$ASW = \sum_k w_k \cdot U_k$$

dove:

- U_k è l'utilità dell'agente k (componenti ambientale, sociale, economica),
- w_k incorpora la similarità relazionale e l'intensità dei legami.

L'ASW non è mera somma aritmetica, ma riflette la configurazione strutturale del network: cluster coesi con alta similarità generano moltiplicatori sistemici; frammentazione o bassa reciprocità producono dispersione di valore.

Il calcolo del beneficio sociale aggregato segue l'approccio multidimensionale proposto da Selim e Mabughi (2022), che suggerisce l'uso di una funzione di welfare aggregata per valutare l'impatto di politiche sistemiche in contesti complessi [39].

Le simulazioni mostrano l'esistenza di punti critici: quando la quota di interdipendenza reciproca supera una soglia (ad esempio $I_r > 0.4$), la partecipazione alla CER aumenta in modo non lineare (dal 28% al 47%) in presenza di combinazione sinergica tra incentivi economici e politiche educative.

Questo risultato conferma l'ipotesi teorica di Biggiero:

- Le competenze relazionali (micro) non producono effetti lineari.
- L'accumulazione di interdipendenze reciproche genera capitale relazionale (macro).
- Il sistema attraversa transizioni di fase coordinativa.

Il modello ABM opera quindi come verifica computazionale dell'ipotesi centrale della teoria delle risorse relazionali:

L'aumento della complessità relazionale (via interdipendenza reciproca) amplifica la probabilità di generazione di capitale relazionale sistemico.

In tal senso, la simulazione colma un gap nella letteratura sulle Comunità Energetiche Rinnovabili, fornendo un ponte formale tra:

- struttura reticolare,
- dinamiche di attivazione individuale,
- welfare sociale aggregato.

La distinzione tra competenze e capitale non rimane concettuale, ma diventa architettura generativa del modello. Questo framework teorico permette di interpretare la formazione e l'evoluzione delle comunità energetiche non solo come aggregazioni economiche, ma come sistemi sociotecnici complessi in cui le relazioni tra gli attori costituiscono un asset strategico fondamentale.

Dal punto di vista della modellazione del comportamento cooperativo [22], la teoria dei giochi fornisce strumenti analitici essenziali. Il “dilemma del prigioniero”, nella sua versione iterata studiata da Robert Axelrod [28], rappresenta il framework più appropriato per analizzare le dinamiche di cooperazione all'interno delle comunità energetiche. Tale modello descrive situazioni in cui il perseguimento degli interessi individuali conduce a esiti subottimali rispetto a quelli raggiungibili attraverso la cooperazione. L'estensione del modello di Axelrod permette di analizzare come le strategie individuali degli agenti e la topologia delle loro relazioni influenzino l'evoluzione complessiva del sistema, fornendo indicazioni sulla produttività e sulla resilienza della comunità energetica. I modelli di Schelling sulla segregazione e gli sviluppi successivi proposti da Edmonds e Hales completano il quadro teorico, permettendo di rappresentare come soglie individuali di accettabilità e appartenenza influenzino le dinamiche di aggregazione. Si è tuttavia scelto di non implementare, nel modello proposto, il dilemma del prigioniero tramite una matrice di payoff statica 2x2, bensì attraverso una dinamica di Gioco Evolutivo Spaziale (Spatial Evolutionary Game).

La soglia di adesione rappresenta la barriera cognitiva ed economica che impedisce la cooperazione spontanea. In termini di “Teoria dei Giochi”, questa soglia incorpora la paura del “Sucker's Payoff” (pagare i costi di installazione senza ottenere i benefici di condivisione se nessun altro aderisce).

Il meccanismo di superamento della soglia mappa la Reciprocità di Axelrod in un contesto multipolare: l'agente non decide basandosi su una previsione astratta, ma osserva il comportamento locale. L'aumento dell'Action Potential guidato dai vicini

(social-influence) simula la strategia “Tit-for-Tat” in cui l’agente coopera se nel suo intorno c’è una massa critica di cooperazione’.

Pertanto, il modello risolve il dilemma sociale trasformando la defezione in cooperazione non per altruismo puro, ma per imitazione strategica e riduzione del rischio percepito, coerentemente con la letteratura sulla Conditional Cooperation [24]. La letteratura scientifica identifica diverse soglie critiche affinché una minoranza possa innescare un cambiamento sistemico. Mentre studi classici pongono il punto di ribaltamento intorno al 10% per la diffusione di opinioni incrollabili, ricerche sperimentali più recenti indicano che una minoranza impegnata pari al 25% è sufficiente per sovvertire convenzioni sociali consolidate [40]. Tuttavia, in sistemi caratterizzati da alta resistenza al cambiamento o da 'contagi complessi', dove l'adozione richiede un impegno economico e sociale significativo, come nel caso delle CER, la soglia di ribaltamento può estendersi fino al 43% [41], [42].

Un contributo fondamentale riguarda il concetto di “social acceptance “ social delle innovazioni rinnovabili, articolato in socio-politica, comunitaria e di mercato, che influenzano in modo congiunto il successo dei progetti energetici distribuiti [43].

Infine, l'approccio di modellazione Agent-Based (ABM), teorizzato inizialmente da Epstein e Axtell e successivamente applicato ai sistemi economici da Dragulescu e Yakovenko, costituisce lo strumento metodologico più adatto per simulare le interazioni complesse tra agenti eterogenei in contesti energetici. Tale metodologia permette di catturare l'emergenza di pattern collettivi a partire dalle regole comportamentali individuali, rappresentando in modo realistico l'eterogeneità degli attori, le loro funzioni di utilità differenziate e le dinamiche di apprendimento e adattamento che caratterizzano i sistemi sociotecnici complessi.

2.1.4 Revisione della letteratura e contributo della tesi

Come illustrato nella Sezione 2.1.3, i contributi di Kahneman sull'economia comportamentale, di Thaler e Sunstein sul paternalismo libertario, di Biggiero sulla

complessità relazionale e di Axelrod sulla cooperazione iterata forniscono il fondamento teorico della presente ricerca. La presente sezione individua il posizionamento della ricerca rispetto alla letteratura esistente, identificando le lacune critiche che questa tesi si propone di colmare.

La letteratura recente sull'applicazione degli ABM alle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) evidenzia un crescente interesse per la modellazione di mercati decentralizzati e decarbonizzazione urbana. Negli Stati Uniti sviluppano un framework ABM per valutare mercati P2P negli USA [44], dimostrando come dinamiche locali di prezzo e consumo influenzino l'autoconsumo collettivo [45] presentano una SLR sistematica di 50 studi ABM su distretti energetici, identificando gap metodologici in termini di eterogeneità comportamentale e integrazione energetica [46] propongono un'integrazione innovativa tra ABM e Reinforcement Learning per mercati energetici, aprendo prospettive per l'ottimizzazione adattiva. Infine, in uno studio del 2024 viene applicato Q-Learning multi-agente per la gestione real-time delle CER, enfatizzando meccanismi cooperativi emergenti [47].

Parallelamente, studi psicologici fondamentali spiegano le barriere comportamentali: Kollmuss e Agyeman [48] identificano il gap tra consapevolezza ambientale e azioni concrete, mentre Stern [49] propone una teoria integrata del comportamento significativo, considerando norme, valori e contesti sociali. Il presente modello integra tali prospettive modellando razionalità limitata e dinamiche peer-to-peer, colmando il divario tra letteratura tecnica e comportamentale.

Teoria della complessità e reti sociotecniche

L'indagine sulle comunità energetiche organizzate si fonda su approcci derivanti dalla teoria della complessità, disciplina interdisciplinare volta a comprendere sistemi caratterizzati da molteplici componenti interagenti e da fenomeni emergenti non deducibili semplicemente dalle caratteristiche dei singoli elementi. Un approccio centrale è rappresentato dalla teoria dei network, che mediante la rappresentazione di

grafi consente di modellare le interazioni tra entità diverse. Gli strumenti metodologici associati alla teoria delle reti complesse consentono di studiarne struttura, dinamiche e proprietà emergenti, partendo da concetti classici come il Small World di Milgram fino ai modelli di Watts-Strogatz (1998). Questi modelli dimostrano come la connettività locale possa generare coerenza globale, favorendo fenomeni come la diffusione di innovazioni o la resilienza urbana — un aspetto di rilevanza cruciale per comprendere come le comunità energetiche si formano e si stabilizzano nel tempo.

La teoria della complessità integra, inoltre, strumenti quali modelli di auto-organizzazione, dinamiche non lineari e sistemi adattivi complessi. Un'applicazione particolarmente rilevante riguarda le reti sociali, dove le interazioni tra individui portano alla formazione di gruppi con caratteristiche comuni e di sottoreti densamente connesse. Questi legami generano effetti a catena, formazione di opinioni collettive, alleanze strategiche, diffusione di idee, fenomeni di emergenza sociale che la teoria aiuta a modellare e prevedere. Nel contesto urbano e energetico, questa dinamica è fondamentale per comprendere come le decisioni individuali di aderire a una CER convergono verso configurazioni stabili e sostenibili.

La ricerca recente ha introdotto una pluralità di concetti affini nel contesto della transizione energetica decentralizzata: Positive Energy Districts (PED), Nearly Zero Energy Communities, Plus Energy Districts e Comunità Energetiche Rinnovabili (CER). Sebbene questi termini si riferiscano a configurazioni similari di comunità locali con produzione rinnovabile, esiste una sostanziale frammentazione concettuale che rende difficile il confronto sistematico tra approcci. Una revisione sistematica basata sui tre pilastri della sostenibilità — economico, sociale e ambientale — ha evidenziato affinità e divergenze significative tra questi concetti, rivelando inoltre numerose omissioni che potrebbero rappresentare spunti di apprendimento per ricerche future. In particolare, l'analisi di 60 progetti PED esistenti in Europa ha approfondito aspetti geografici, spaziali, energetici e finanziari, senza tuttavia dedicare un'attenzione sistematica alla dimensione sociale, che rimane confinata a sezioni marginali dedicate

a sfide e opportunità. Questa lacuna risulta particolarmente problematica se da un lato i documenti ufficiali riconoscono la complessità della relazione tra cittadini e stakeholder, dall'altro evitano di affrontarla in maniera strutturata e quantificata.

Stato dell'Arte negli Agent-Based Models per Sistemi Energetici

Gli Agent-Based Models hanno dimostrato considerevole versatilità nel contesto dei sistemi energetici. La letteratura scientifica sull'applicazione degli ABM nei mercati energetici decentralizzati e peer-to-peer ha prodotto risultati significativi: studi hanno simulato gli scambi di elettricità P2P tra famiglie eterogenee, scoprendo che i risultati di mercato dipendono in modo cruciale dal rapporto tra prosumer e consumatori, oltre che da fattori ambientali e geografici. Tali simulazioni hanno dimostrato che la presenza di sistemi di stoccaggio energetico (batterie domestiche) aiuta a superare limitazioni legate a una previsione imperfetta, migliorando la flessibilità e permettendo ai prosumer di vendere una quota maggiore di energia autoprodotta nel mercato P2P.

Gli ABM sono inoltre considerati uno strumento ideale per la valutazione di politiche a supporto della transizione energetica. L'approccio bottom-up è particolarmente adatto per esplorare scenari what-if e per incorporare le prospettive dei diversi attori. I modelli più consolidati si concentrano sulla diffusione di innovazioni (come l'adozione di pannelli solari) e sulla disseminazione di comportamenti di risparmio energetico. Nel campo della gestione e del controllo delle microgrid e delle smart grid, l'approccio decentralizzato degli ABM si è rivelato un'architettura adeguata per una gestione robusta e in tempo reale. L'integrazione con tecniche di machine learning, in particolare il reinforcement learning, permette di dotare gli agenti di comportamenti adattivi basati sull'esperienza passata, conducendo a simulazioni più realistiche e dinamiche.

Nonostante questi successi, un'analisi critica della letteratura rivela che il campo di applicazione degli ABM per i sistemi energetici è ancora lontano dalla maturità. Le sfide persistenti limitano la capacità di questi modelli di rispecchiare fedelmente la complessità dei sistemi energetici reali, in particolare nel contesto delle CER.

Si riportano le lacune riscontrate:

- *Rappresentazione limitata degli agenti.*

La maggior parte degli studi si concentra quasi esclusivamente sulla modellizzazione dei nuclei familiari residenziali. Esiste un considerevole gap nella comprensione e rappresentazione del comportamento di consumatori e prosumer commerciali e industriali. Le CER non sono formate unicamente da famiglie, ma da reti complesse che includono imprese, enti pubblici e altri stakeholder con obiettivi e logiche decisionali radicalmente differenti.

- *Incapacità di modellare interazioni complesse.*

La ricerca esistente tende a focalizzarsi su decisioni a singolo attore (ad esempio, l'installazione di un pannello solare), che rappresentano un investimento a singolo passo. Tuttavia, fenomeni cruciali per le CER, come il retrofit energetico degli edifici o la conversione a sistemi di energia di quartiere, sono processi decisionali a più livelli che coinvolgono una molteplicità di parti interessate. L'incapacità di modellare adeguatamente queste interazioni complesse limita la capacità dei modelli di cogliere le dinamiche socioeconomiche al centro del funzionamento di una CER su larga scala.

- *Problemi di scalabilità.*

Sebbene gli ABM siano concepiti per studiare sistemi complessi e adattivi, i modelli esistenti faticano a gestire scenari fortemente complessi con un largo numero di agenti. Questa limitazione rappresenta una tensione intrinseca: gli ABM sono scelti proprio per la loro capacità di modellare la complessità, ma la loro implementazione pratica si scontra con limiti computazionali e di design. La complessità della

metodologia ABM stessa può inoltre ostacolare un'ampia adozione da parte dei ricercatori e rendere difficile il miglioramento continuo dei risultati. Senza una documentazione standardizzata e rigorosa, l'adattamento degli ABM a nuovi campi di ricerca rischia di portare alla perdita di dettagli modellistici essenziali.

- *Scarso ancoraggio empirico.*

La validità e credibilità di un modello di simulazione dipendono dalla sua capacità di essere parametrizzato, calibrato e validato utilizzando dati del mondo reale. Tuttavia, la ricerca sottolinea che pochi studi descrivono esplicitamente in che modo i dati empirici sono stati impiegati in queste fasi cruciali. L'assenza di solido ancoraggio empirico ha implicazioni dirette sulla robustezza degli ABM come strumenti per la politica e le decisioni strategiche. Se i parametri non sono scelti con rigore e i modelli non sono convalidati con dati reali, le simulazioni what-if rischiano di produrre risultati poco affidabili e non applicabili, riducendo inevitabilmente la fiducia dei policy maker nell'utilizzo di questi modelli per guidare investimenti o definire regolamenti.

Fondamenti teorici complementari: dalla segregazione alla cooperazione evolutiva

Un contributo metodologico rilevante proviene dagli studi di Thomas Schelling sulla segregazione, in cui dimostra che alcuni fenomeni sociali derivano non da decisioni centralizzate, bensì dall'interazione spontanea delle scelte individuali. Schelling sviluppa analisi teoriche sulle dinamiche interattive delle decisioni individuali e introduce il concetto di "tipping point", il fenomeno per cui non esiste una corrispondenza lineare tra incentivi individuali e risultati collettivi, ma emergono fenomeni inattesi come segregazione, densità anomale e schemi esagerati. Questo lavoro trovava una naturale connessione con gli approfondimenti di Von Neumann e Morgenstern, fondatori della moderna teoria dei giochi, i quali sviluppano un

approccio innovativo per analizzare le decisioni strategiche in situazioni di interazione tra più attori.

È in questa direzione che si colloca il contributo di Robert Axelrod, il quale sviluppa modelli capaci di illustrare come la cooperazione possa emergere spontaneamente in sistemi complessi, anche in contesti dominati da individui egoisti. Utilizzando il “Dilemma del Prigioniero Iterato”, Axelrod dimostra che strategie semplici come il tit-for-tat sono in grado di favorire la cooperazione di lungo periodo. La sua ricerca mostra che, in ambienti caratterizzati da interazioni ripetute, la cooperazione non solo è possibile, ma può essere evolutivamente stabile — un principio di rilevanza cruciale per comprendere come le comunità energetiche possono autostabilizzarsi.

L'analisi della letteratura evidenzia tre principali lacune che questa tesi si propone di colmare:

1. Insufficiente integrazione della dimensione sociale: gran parte degli studi sulle CER e sui PED si concentra prevalentemente su aspetti tecnologici ed economici, lasciando in secondo piano le dinamiche individuali e collettive che regolano l'interazione tra cittadini, istituzioni e mercato.
2. Frammentazione concettuale: la pluralità di termini e concetti affini rende difficile il confronto sistematico tra approcci e impedisce di cogliere pattern comuni di successo o fallimento.
3. Assenza di modelli interdisciplinari: non risultano tentativi sistematici che mettano in relazione in un unico framework computazionale ambiti disciplinari tradizionalmente distanti, quali l'analisi del comportamento individuale e collettivo, la progettazione tecnico-economica degli impianti e le dinamiche di governance.

Contributo originale della ricerca

Il valore aggiunto della presente tesi consiste nel proporre un modello agent-based che integri:

- La teoria della razionalità limitata e dell'economia comportamentale (per modellare le scelte individuali di adesione alle CER)
- La teoria dei sistemi complessi e il dilemma del prigioniero iterato (per catturare l'emergenza di cooperazione stabile)
- Un framework ESG multidimensionale per avere indicatori di sostenibilità ambientale, sociale e di governance simultaneamente
- Un'esplicita parametrizzazione empirica basata su dati reali (per assicurare validità ecologica del modello)

La possibilità di connettere queste prospettive, comportamentale, tecnico-economica e di governance, a situazioni reali, traducendo le simulazioni in valutazioni oggettive e misurabili, consente di generare ricadute di ampio respiro: dalla decarbonizzazione alla riduzione del consumo di suolo, fino all'attivazione di investimenti con impatto sociale positivo. In tal modo, il modello contribuisce a restituire un quadro integrato in cui il comportamento dei cittadini, le scelte tecnologiche e le politiche pubbliche convergono verso obiettivi condivisi di sostenibilità, fornendo strumenti sia al dibattito accademico che all'elaborazione di politiche pubbliche orientate alla sostenibilità energetica.

2.1.5 Stato dell'arte: tre paradigmi frammentati

La letteratura sui sistemi energetici decentralizzati e sulle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) risulta caratterizzata da una marcata frammentazione metodologica, riconducibile a tre principali filoni di ricerca che si sono sviluppati in

larga misura in modo indipendente: i modelli comportamentali, i modelli tecnico-energetici e i modelli di governance istituzionale. Sebbene ciascun paradigma abbia prodotto contributi rilevanti, l'assenza di un'integrazione sistematica tra questi approcci costituisce un limite strutturale nello studio dei sistemi energetici sociotecnici complessi. Questa sezione sintetizza lo stato dell'arte e identifica il gap critico che la presente ricerca intende colmare.

Modelli comportamentali: agenti, diffusione e influenza sociale

I modelli comportamentali affondano le proprie radici nella teoria della diffusione dell'innovazione di Rogers (1962), che classifica gli individui in categorie di *innovativeness* (innovators, early adopters, early majority, late majority e laggards). Tale impianto teorico è stato progressivamente integrato in modelli Agent-Based in grado di rappresentare l'eterogeneità degli individui, la razionalità limitata e le dinamiche di influenza sociale.

Un contributo rappresentativo è lo studio [11], che sviluppa un ABM per analizzare l'adozione di impianti fotovoltaici residenziali in Svizzera, includendo norme sociali, sussidi economici e reti di diffusione dell'informazione peer-to-peer. Tuttavia, il modello non include una rappresentazione esplicita del bilancio energetico orario, trascurando aspetti cruciali quali l'autoconsumo reale, l'intermittenza della produzione fotovoltaica, l'uso dello storage e i feedback tra dinamiche intragiornaliere di produzione e consumo e decisioni di adesione degli agenti. Analogamente, Zamengo (2014) propone un ABM per la diffusione degli smart meters in Europa [50], focalizzandosi su una innovazione individuale e benefici percepiti, ma senza un'integrazione con simulazioni energetiche dettagliate né con meccanismi di governance multilivello. I modelli comportamentali offrono una rappresentazione sofisticata delle decisioni individuali e delle dinamiche sociali, ma operano prevalentemente in isolamento dal dominio tecnico-energetico, limitandone l'applicabilità a sistemi reali come le CER.

Modelli tecnico-energetici: bilanci orari, ottimizzazione e LCOE

Il secondo paradigma è costituito dai modelli tecnico-energetici, orientati all'analisi dei bilanci energetici orari, del *dispatch* ottimizzato e della valutazione economica tramite indicatori come il Levelized Cost of Energy (LCOE). Un framework di riferimento è PyPSA [51], che consente di modellare reti energetiche con profili di carico orari, generazione fotovoltaica basata su dati reali e vincoli di rete.

Tuttavia, questi modelli assumono generalmente agenti perfettamente razionali, che massimizzano funzioni obiettivo di tipo economico, ignorando bias cognitivi, effetti di pari e l'eterogeneità comportamentale ampiamente documentata dalla letteratura di economia comportamentale. Analogamente, studi come Hledik (2014), focalizzati sull'ottimizzazione dei profili di carico e sulla "demand response" tramite segnali di prezzo, restano confinati in un'analisi statica e di minimizzazione dei costi, priva di una rappresentazione esplicita delle politiche pubbliche e dei processi decisionali collettivi [52]. I modelli energetici eccellono nella rappresentazione tecnico-fisica del sistema, ma risultano astratti dalle motivazioni e dai vincoli degli attori umani reali, riducendo la loro capacità predittiva in contesti sociotecnici complessi.

Modelli di governance: istituzioni, policy e processi deliberativi

Il terzo filone riguarda i modelli di governance dei sistemi energetici, ispirati alla teoria istituzionale di Ostrom (1990) sui beni comuni, che identifica principi di design per una gestione sostenibile delle risorse condivise. Tali approcci sono stati ulteriormente sviluppati introducendo il concetto di "coproduzione delle transizioni energetiche" e, enfatizzando processi deliberativi, pluralismo di valori e co-creazione tra stakeholder [15], [20].

Nonostante l'elevato valore analitico, questi modelli rimangono prevalentemente qualitativi e difficilmente traducibili in framework computazionali. L'operationalizzazione delle dinamiche di governance in modelli simulativi, così

come il loro accoppiamento con bilanci energetici e comportamenti individuali, risulta ancora largamente inesplorata.

Insight critico: i modelli di governance catturano la complessità istituzionale e politica, ma mancano di formalizzazione computazionale e di integrazione con modelli energetici e comportamentali.

Sintesi del gap: tre mondi paralleli

La revisione critica della letteratura evidenzia un gap metodologico strutturale: nessun contributo esistente integra simultaneamente (i) comportamenti individuali eterogenei con razionalità limitata e interazioni sociali, (ii) bilanci energetici orari realistici e (iii) meccanismi dinamici di governance multiscala, inclusivi di incentivi economici, politiche educative e criteri ESG. I modelli comportamentali avanzati rimangono disaccoppiati dal dominio energetico, i modelli energetici assumono razionalità perfetta e i modelli di governance restano prevalentemente analitici. La presente ricerca si colloca precisamente in questo spazio vuoto, proponendo un framework integrato capace di superare la frammentazione esistente.

2.1.6 Posizionamento della ricerca

Il modello proposto, opportunamente calibrato attraverso dati empirici e parametri specifici, consente di tracciare traiettorie comportamentali degli agenti in risposta a diverse variabili, inclusi investimenti pubblici. Tale approccio permette di stimare il cosiddetto effetto leva di ciascun contributo pubblico, valutando in modo integrato gli impatti attesi quali la riduzione delle emissioni di CO₂ all'interno di una comunità, la creazione di occupazione e lo sviluppo di investimenti nel settore sociale. In tal modo, il modello assume un ruolo strategico nel supportare decisioni politiche mirate e nell'ottimizzazione delle risorse allocate per il conseguimento degli obiettivi di sostenibilità e benessere collettivo.

2.2 Metodi e disegno del modello

Il presente studio adotta un approccio multidisciplinare e sistemico per analizzare le Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) come sistemi sociotecnici complessi. Questi sistemi coinvolgono molteplici attori — cittadini, gruppi sociali, imprese e istituzioni — i cui comportamenti e dinamiche vengono modellati tenendo conto delle loro caratteristiche specifiche e di dati empirici consolidati (ISTAT, ENEA).

Una panoramica degli attori e metodi di modellizzazione è sintetizzata in Tabella 5:

Tabella 5 Attori e metodi di modellizzazione

Attore	Ambito/Dinamica	Parametri	Metodo/Modellizzazione
Partecipanti	Dinamiche psicologiche	Consumo energetico ed economico	Analisi dati ISTAT, modelli psicometrici
Gruppi sociali	Dinamiche psico-sociali	Diffusione idee, stabilità gruppi	Matrice payoff, modelli di Axelrod
CER	Dimensione normativa	Quadro regolatorio	Analisi regolatoria
Tecnologia	Fattibilità tecnico-economica	Stato dell'arte tecnologico	Analisi tecnico-economica
Ambiente locale	Contestualizzazione territoriale	Irraggiamento e demografia	Dati ENEA, GIS
Governance	Dimensione istituzionale e ESG	Politiche e indicatori ESG	Analisi integrata qualitativa e quantitativa

La cornice teorica si basa su cinque prospettive chiave:

- Teoria dei beni comuni [20] per comprendere la governance collaborativa.
- Teoria della transizione sociotecnica [53], [54] per la diffusione dell'innovazione tecnologica.

- Teoria dell'accettabilità sociale [43], [55] per analizzare consenso e coinvolgimento pubblico.
- Teoria dei sistemi complessi [56], [57] per dinamiche emergenti e resilienza [58].
- Teoria dell'efficienza paretiana per la sostenibilità economica [25].

Per cogliere la complessità e le dinamiche multilivello delle CER si adotta la metodologia ABM [59] che consente di rappresentare agenti eterogenei e le loro interazioni, simulando fenomeni emergenti dall'aggregazione di decisioni individuali.

I punti di forza dell'ABM includono:

- Rappresentazione della variabilità socioeconomica e culturale degli agenti [28].
- Cattura di comportamenti emergenti in sistemi dinamici non lineari [29].
- Integrazione di dati quantitativi e qualitativi in un modello flessibile [60]
- Simulazione di scenari di policy e analisi dell'impatto della governance [58].

Il modello integra una struttura ibrida:

- Top-down: influenza della governance e degli istituti pubblici.
- Bottom-up: decisioni individuali e collettive degli agenti

Il criterio fondamentale che guida la suddivisione degli elementi tra interni ed esterni al sistema è rappresentato dal grado di gestibilità, ossia dalla possibilità effettiva di intervento e di controllo sugli stessi. Nella fase di analisi dell'ambiente esterno, il primo passo consiste nell'identificazione accurata dei fattori esogeni che influenzano il sistema, valutandone la natura, la direzione e l'intensità dell'impatto. Successivamente, il secondo passo, ben più complesso, richiede la proiezione dei possibili scenari evolutivi di tali fattori, riconoscendo l'impossibilità di ottenere previsioni perfettamente precise ma accettando, invece, la necessità di un approccio esplorativo e probabilistico. In questa prospettiva, l'obiettivo non è tanto quello di formulare predizioni puntuali, quanto di costruire mappe di possibilità che orientino le decisioni strategiche in contesti caratterizzati da elevata incertezza e interdipendenza tra le variabili. Nel processo di rappresentazione sistemica, è essenziale evitare alcuni errori comuni che possono compromettere la qualità

dell'analisi. Tra questi, la dimenticanza di elementi rilevanti, che può condurre a visioni parziali o distorte del sistema, e, all'opposto, la sovrabbondanza di elementi, che riduce la leggibilità e l'efficacia della mappa concettuale. In generale, una rappresentazione sistemica efficace dovrebbe contenere un numero limitato di elementi (idealmente non superiore a 20–25), focalizzandosi sulle relazioni determinanti che governano il comportamento complessivo del sistema. Un'eccessiva complessità relazionale, infatti, rischia di oscurare i nessi causali principali, rendendo più difficile individuare leve d'intervento e priorità di azione. Per affrontare il problema della complessità, diverse strategie di semplificazione possono risultare utili. L'analisi storica consente di comprendere come il sistema si sia evoluto nel tempo, identificando pattern ricorrenti e punti di biforcazione. La tecnica dello sfrondamento mira invece a eliminare componenti marginali per verificare se la struttura residua mantenga la propria funzionalità. Un approccio più radicale è quello del ripensamento da zero, che invita a riprogettare il sistema prescindendo dalle condizioni esistenti, favorendo così l'innovazione e la rottura con le inerzie cognitive. Un'ulteriore strategia consiste nell'estrazione dei concetti operativi, ossia nell'individuazione delle parole chiave o dei principi fondamentali su cui si basa il sistema, al fine di esplorare modalità alternative e più efficienti per realizzarli. Un principio guida nella gestione della complessità è la modularità, che suggerisce di suddividere il sistema in unità autonome ma interconnesse. I moduli, essendo più facilmente gestibili, possono essere analizzati, aggiornati o sostituiti senza compromettere l'intera struttura, a condizione che vengano preservate le interfacce tra di essi. Altre strategie prevedono il trasferimento della complessità verso l'esterno o verso altri sottosistemi, la semplificazione degli elementi, riducendo la diversità interna, la semplificazione delle interazioni e la distribuzione della complessità gestionale tra più agenti o team, in modo da diluire il carico cognitivo e decisionale. In conclusione, il principio generale che deve orientare ogni processo di modellazione o progettazione sistemica è quello di semplificare in modo intelligente, ossia

intervenire sulla complessità solo laddove ciò risulti coerente, utile e funzionale agli obiettivi analitici o operativi. Occorre evitare, infatti, tanto la semplificazione eccessiva, che conduce alla perdita di informazioni critiche, quanto l'ipercomplessità, che compromette la capacità di comprensione e di azione. La sfida consiste dunque nel mantenere un equilibrio dinamico tra precisione e leggibilità, tra profondità analitica e usabilità del modello, condizione necessaria per affrontare efficacemente i problemi sistemici contemporanei.

2.2.1 Architettura del modello: panoramica generale

Il modello proposto integra quattro macroaree di analisi, ciascuna declinata in funzioni specifiche che catturano diverse dimensioni della sostenibilità e della governance delle comunità energetiche:

- Macroarea 1 - Partecipazione (M1): rappresenta i fattori che influenzano la decisione individuale di aderire a una CER. Include consapevolezza ambientale (f1), accettabilità sociale (f2), propensione all'azione (f3) e adesione comunitaria (f4).
- Macroarea 2 - Tecnologia (M2): Modella gli aspetti tecnico-energetici della CER. Include diffusione tecnologica (f5) e resilienza energetica (f6).
- Macroarea 3 - Mercato (M3): rappresenta le dinamiche economiche e ambientali. Include bilanciamento energetico (f7), riduzione emissioni (f8) ed efficienza economica (f9).
- Macroarea 4 - Governance (M4): modella i meccanismi di policy e i loro impatti. Include meccanismi di governance (f10), effetti lungo termine (f11) e beneficio sociale aggregato (f12).

Le 12 funzioni sono interconnesse secondo una rete di dipendenze e sintetizzate nella Tabella 6. Il modello opera secondo due livelli di utilità: utilità di sistema collettiva e utilità individuale (per agente), come descritto nella Sezione 2.2.3.

Tabella 6 Sintesi delle macroaree

Codice	Macroarea	Descrizione
M1	Partecipazione ed Accettabilità	Apprendimento sociale, processo decisionale
M2	Tecnologia ed Efficienza Energetica	Prestazioni tecnologiche e ambientali
M3	Mercato ed Economia	Valutazione economica e sostenibilità
M4	Governance ed Impatto Sociale	Politiche pubbliche, regolamentazioni e benessere

Il modello comprende quattro macroaree (Tabella 7) e dodici funzioni principali con relazioni causali che rappresentano le dinamiche e i feedback propri dei sistemi complessi.

Tabella 7 Funzioni fondamentali

	Funzione	Descrizione	Collegamenti	Autore / Teoria	Relazione I/O
M1	f1	Impatto educativo sulla consapevolezza individuale.	f2, f4	[61]	I: Campagne / O: Awareness
M1	f2	Consenso sociale verso le infrastrutture CER.	f1, f3, f4	[43]	I: Fiducia / O: Accettazione
M1	f3	Scambio di informazioni e passaparola tra agenti.	f2, f4	[28]	I: Grafi sociali / O: Cooperazione
M1	f4	Processo decisionale di partecipazione alla CER.	f1, f5, f10	[17]	I: Incentivi / O: Tasso adozione
M2	f5	Penetrazione delle tecnologie rinnovabili (FV).	f4, f6, f10	[17]	I: Accessibilità / O: Diffusione (%)
M2	f6	Capacità del sistema di reagire a shock esterni.	f5, f8	[56]	I: Shock / O: Tempo recupero
M2	f7	Ottimizzazione oraria produzione/consumo.	f4, f8, f9	[62]	I: Carico orario / O: Autoconsumo
M2	f8	Calcolo della decarbonizzazione (CO2 evitata).	f6, f7, f12	[21], [25]	I: kWh / O: tCO2 risparmiate
M3	f9	Analisi di sostenibilità economica e LCOE.	f7, f10, f12	[33]	I: CAPEX / O: ROI e LCOE
M4	f10	Regole, sussidi e coordinamento istituzionale.	f4, f5, f9	[63]	I: Policy / O: Efficacia
M4	f11	Proiezione evolutiva degli scenari futuri.	f1-f10	[53], [64]	I: Trend / O: Scenari 20 anni
M4	f12	Indice di Benessere Sociale Aggregato (ASW).	f1-f11	[39]	I: f1-f11 / O: Indice ASW (0-1)

L'architettura del modello ABM non si limita a una scomposizione funzionale, ma si radica nei pilastri della sostenibilità internazionale attraverso l'integrazione del framework Environmental, Social, and Governance (ESG). Tale mappatura permette di ricondurre le dinamiche di adozione e le prestazioni tecniche a dimensioni analitiche misurabili, assicurando che la valutazione finale del benessere sociale (ASW) rifletta la reale complessità degli obiettivi della transizione energetica.

La Tabella 8 illustra la distribuzione delle dodici funzioni (f1–f12) tra i diversi domini della sostenibilità, distinguendo tra variabili dinamiche di processo e output emergenti del sistema.

Tabella 8 Mappatura delle funzioni del modello (f1–f12) secondo i pilastri del framework ESG (Environmental, Social, Governance).

Pilastro ESG	Funzioni Coinvolte	Dimensione Analitica	Tipo di Variabile
Environmental (E)	f5, f6, f7, f8	Decarbonizzazione e resilienza tecnica.	Emergente (Risultato del sistema)
Social (S)	f1, f2, f3, f4	Accettabilità, equità e capitale sociale.	Dinamica (Interazione tra agenti)
Governance (G)	f10	Meccanismi di incentivo e regole comunitarie.	Controllo (Input della politica)
Sostenibilità (Sintesi)	f11, f12	Impatto di lungo termine e benessere (ASW).	Aggregata (Valutazione finale)

A loro volta le funzioni individuate, sono a loro volta interconnesse creando una serie di relazioni. In Tabella 9 si evidenzia la dipendenza da alcune funzioni e l'influenza su altre. Le funzioni interconnesse generano una rete sinergica che riflette l'influenza reciproca tra partecipazione, tecnologia, economia e governance.

Tabella 9 Relazioni tra le funzioni

Funzione	Relazioni principali
f1	→ f2, f4 (educazione stimola accettabilità/adesione)
f2	← f1; → f3, f4 (accettabilità influenza interazione/adesione)
f3	↔ f2; → f4 (interazioni sociali sostengono adesione)
f4	← f1, f2, f3; → f5, f7 (adesione stimola diffusione e bilancio)
f5	← f4; → f6, f7 (diffusione sostiene resilienza e bilancio)
f6	← f5; → f8 (resilienza supporta riduzione emissioni)
f7	← f4, f5; → f8, f9 (bilanciamento migliora emissioni ed efficienza)
f8	← f6, f7; → f12 (riduzione emissioni contribuisce al beneficio ambientale)
f9	← f7, f10; → f12 (efficienza economica influenza beneficio)
f10	→ f4, f5, f9 (governance modula processi decisionali)
f11	← tutte le funzioni; → f12 (impatto a lungo termine)
f12	Sintesi output da tutte le funzioni

La Figura 3 rappresenta la rete di interdipendenze tra le dodici funzioni del framework (f1–f12), organizzate nelle quattro macroaree Partecipazione, Tecnologia, Mercato e Governance. La struttura evidenzia la presenza di retroazioni e catene causali, in cui le leve di policy e i fattori sociali (f1–f4, f10) influenzano la dinamica di diffusione e le prestazioni del sistema (f5–f9), fino a convergere sull’output sintetico di benessere (f12). La figura fornisce quindi una giustificazione strutturale alla natura non lineare del modello e alla possibilità di tipping point nelle dinamiche di adozione.

La scelta cromatica della Figura 3 riflette la triplice natura del modello: la dimensione socio-comportamentale (f1-f4), il dominio tecnico-ambientale (f5-f9) e la sfera della governance e degli impatti aggregati (f10-f12). Questa distinzione visiva facilita l'identificazione immediata dei sottosistemi che interagiscono nel modello ABM.

Gli archi non direzionali nella Figura 3 rappresentano relazioni di interdipendenza reciproca. In linea con la teoria dei sistemi complessi, il modello non assume una causalità lineare unidirezionale, ma riconosce che ogni componente agisce come nodo di una rete di feedback, dove le prestazioni energetiche (f7) possono, ad esempio, influenzare retroattivamente l'accettabilità sociale (f2) e l'adesione (f4).

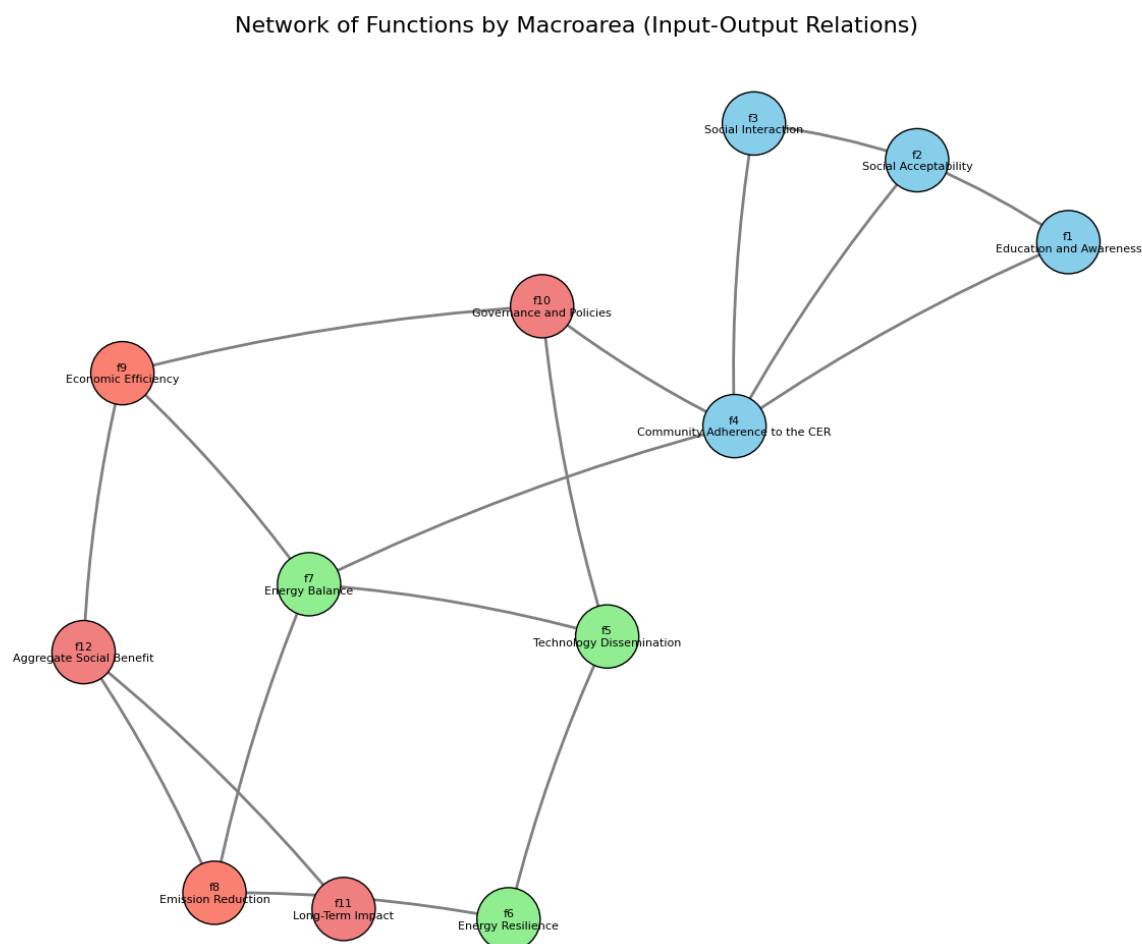


Figura 3. Network delle interdipendenze tra le funzioni del modello (f1-f12). I tre colori identificano i domini del comportamento sociale (in **blu** M1), della performance tecnico-economica (in **verde** M2-M3) e della governance di sintesi (in **arancione** M4). Gli archi rappresentano le connessioni sistemiche e i feedback bidirezionali che caratterizzano l'evoluzione dinamica della Comunità Energetica

A questo punto risulta chiaramente delineata la cornice concettuale all'interno della quale si intende sviluppare il modello. Rimane tuttavia meno immediata la definizione dello strumento metodologico più adeguato, nonostante le analisi presentate nel capitolo precedente abbiano già fornito importanti elementi di orientamento. La scelta

dell'approccio non è meramente tecnica, bensì epistemologica: implica infatti la capacità di individuare un metodo che rifletta la complessità intrinseca dei sistemi sociali ed energetici e che, al tempo stesso, consenta di tradurre in termini operativi le ipotesi teoriche formulate. In questa prospettiva, la modellizzazione ad agenti (Agent-Based Modelling, ABM) si configura come la soluzione più coerente e innovativa. L'approccio ABM è particolarmente adatto a rappresentare sistemi composti da attori eterogenei, ciascuno caratterizzato da proprie preferenze, risorse e capacità decisionali, che interagiscono in maniera dinamica tra loro e con l'ambiente. Il principale valore aggiunto di questo metodo consiste nella possibilità di cogliere i fenomeni emergenti che derivano dall'aggregazione di comportamenti individuali, spesso non prevedibili attraverso strumenti analitici lineari. In altre parole, l'ABM permette di ricostruire il legame micro-macro, mostrando come le decisioni quotidiane dei singoli possano generare effetti collettivi sistemici. Se confrontato con approcci alternativi, l'ABM evidenzia ulteriori vantaggi. I modelli di System Dynamics (SD), ad esempio, risultano potenti per l'analisi dei feedback circolari e delle dinamiche aggregate di lungo periodo, ma tendono a sacrificare l'eterogeneità individuale a favore di rappresentazioni aggregate. Le tecniche econometriche e statistiche consentono di identificare relazioni causali a partire da dati storici, ma non permettono di catturare la natura dinamica e adattiva delle interazioni sociali. I modelli di ottimizzazione matematica, infine, si rivelano particolarmente efficaci per individuare configurazioni efficienti sotto vincoli determinati, ma si fondano spesso su ipotesi di razionalità perfetta e di equilibrio statico, difficilmente compatibili con contesti caratterizzati da incertezza e comportamenti bounded-rational. Alla luce di tali considerazioni, l'adozione di ABM consente non soltanto di esplorare scenari alternativi, ma anche di testare ex-ante l'efficacia di diverse strategie di policy, valutando il loro impatto sulle scelte individuali e sui conseguenti esiti collettivi. La flessibilità del metodo, inoltre, consente di integrare agevolmente dati quantitativi (quali consumi energetici, indicatori ambientali e parametri economici) con variabili

qualitative (come atteggiamenti sociali, propensione all'innovazione o fiducia istituzionale), offrendo così una rappresentazione multidimensionale e realistica del sistema oggetto di studio.

La Tabella 10 sintetizza i punti di forza e di debolezza dei principali approcci.

Tabella 10 Comparazione dei metodi

Metodo	Caratteristiche principali	Vantaggi	Limiti
Agent-Based Modelling (ABM)	Simulazione bottom-up di agenti eterogenei che interagiscono in un ambiente complesso.	Cattura l'emergenza micro-macro; rappresenta eterogeneità e adattamento; integra variabili qualitative e quantitative; utile per scenari di policy.	Richiede elevata capacità computazionale; complessità nella calibrazione e validazione; difficoltà di comunicazione dei risultati a un pubblico non tecnico.
System Dynamics (SD)	Modelli a livello aggregato basati su equazioni differenziali e relazioni di feedback.	Efficace per analisi di lungo periodo; consente di evidenziare relazioni causali e feedback sistemici; relativamente più semplice da implementare.	Scarsa rappresentazione dell'eterogeneità individuale; visione macro che rischia di appiattire le differenze micro.
Econometria e metodi statistici	Analisi quantitativa dei dati storici per stimare relazioni causali.	Rigorosità statistica; capacità di identificare correlazioni robuste; validità empirica se supportata da dati di qualità.	Approccio retrospettivo, poco adatto a scenari ipotetici; difficoltà nel rappresentare adattamenti dinamici e interazioni complesse.
Ottimizzazione matematica	Individuazione di soluzioni ottimali rispetto a vincoli e obiettivi definiti.	Estrema precisione nel calcolo di configurazioni efficienti; utile per analisi tecnico-economiche e di allocazione delle risorse.	Ipotesi di razionalità perfetta; difficoltà a includere comportamenti sociali; rappresentazione statica o deterministica.

L'ABM offre la possibilità di integrare:

- Attributi individuali (reddito, propensione alla cooperazione, sensibilità ambientale).
- Processi emergenti (diffusione tecnologica, coesione sociale, tipping behavior).
- Dimensioni qualitative e quantitative (indicatori energetici, fiducia, motivazione, norme condivise).
- Scenari ipotetici e meccanismi di policy ex ante.

Questa metodologia viene ampiamente riconosciuta come la più adatta a cogliere la logica oggetto di studio, sia nella letteratura sui sistemi sociotecnici (Ostrom, Geels, Meadows) sia nella recente produzione scientifica sulle CER e sulle smart grid decentralizzate. Infine, ricapitolando le informazioni precedenti si ottiene la tabella 11.

Tabella 11 Riepilogo delle funzioni

Macroarea	Funzione (Codice)	Descrizione	Input principali	Output attesi	Teorie di riferimento
Partecipazione cittadino	Educazione e Consapevolezza (f1)	Crescita consapevolezza e motivazione attraverso campagne e informazione	Campagne, dati, informazione	Conoscenza, motivazione	Rogers, Bandura, Capitale umano
Partecipazione cittadino	Accettabilità (f2)	Valutazione supporto, legittimazione e consenso pubblico	Fiducia, norma sociale, pressione peers	Supporto pubblico, consenso	Wüstenhagen, Social Acceptance, Normative Social Influence, Cialdini
Partecipazione cittadino	Interazione sociale (f3)	Dinamiche collettive, influenza culturale e coesione comunitaria	Collaborazione, ambiente, capitale sociale	Coesione, densità reti	Axelrod, Network Theory, Granovetter
Partecipazione cittadino	Adesione comunitaria (f4)	Partecipazione a CER con modello SIR modificato	Incentivi, supporto sociale, governance	Tasso di adesione	Participatory Theory, Participatory Model, SIR
Tecnologia ed efficienza	Diffusione tecnologica (f5)	Adozione tecnologie rinnovabili e penetrazione nel mercato	Adozione, incentivi economici, accessibilità	Penetrazione e nuove tecnologie	Rogers, Socio-Technical Systems
Tecnologia ed efficienza	Resilienza energetica (f6)	Robustezza e risposta a eventi critici del sistema energetico	Tecnologie, coinvolgimento, backup	Tenuta sistema, sicurezza	Adger, Adaptive Systems, Resilience Theory
Tecnologia ed efficienza	Bilanciamento energetico (f7)	Ottimizzazione produzione/consumo e riduzione costi attraverso load shifting	Monitoraggio produzione/consumo, load shifting	Ottimizzazione, riduzione costi	System Dynamics, Optimization Theory
Tecnologia ed efficienza	Riduzione emissioni (f8)	Monitoraggio CO ₂ e impatto ambientale attraverso tecnologie pulite	Scelte produzione/consumo, tecnologie pulite	CO ₂ evitata, benefici ambientali	Pigou, Meadows, Externalities, EKC
Efficienza economica	Efficienza economica (f9)	Sostenibilità economica attraverso analisi costi-benefici	Analisi costi/benefici, incentivi, output f7-f8	Sostenibilità economica, rendimenti	Pareto, Coase, Transaction Cost Theory
Governance e impatto sociale	Governance politiche (f10)	Incentivi, regolamentazione e impatto multilivello	Regole, incentivi, feedback comunitario	Policy, strategie di regolazione	Institutional Theory, Multilevel Governance
Governance e impatto sociale	Impatto lungo termine (f11)	Scenari futuri e valutazione sostenibilità basata su trend cumulativi	Trend, comportamenti, scelte cumulative	Proiezione scenari futuri	Path Dependency, Meadows, Rawls
Governance e impatto sociale	Benessere sociale aggregato (f12)	Integrazione impatti su ESG e benessere collettivo	Aggregazione output da f1-f11	Indice benessere, sostenibilità globale	Welfare Theory, Sen, Putnam

Un elemento centrale dell'approccio ABM consiste nell'evidenziare le relazioni di interdipendenza tra funzioni, le quali creano una rete sinergica. La partecipazione dei cittadini (f1–f4) alimenta la diffusione tecnologica (f5) e contribuisce al bilanciamento energetico (f7). Quest'ultimo, a sua volta, ha effetti diretti sull'efficienza economica (f9) e sulla riduzione delle emissioni (f8). La governance (f10) influenza trasversalmente più dimensioni, generando effetti a lungo termine (f11) che si riflettono infine nel beneficio sociale aggregato (f12). La parametrizzazione tecnica ed economica degli impianti fotovoltaici, utilizzata nelle funzioni f5 (Diffusione Tecnologica), f7 (Bilanciamento Energetico) e f9 (Efficienza Economica), è dettagliata nella Sezione 4.3 con riferimento al caso studio di Latina.

La Tabella 11 mostra dunque come la complessità intrinseca del sistema richieda un approccio di modellizzazione capace di includere vari livelli di analisi, evitando riduzionismi. L'ABM, in questo quadro, emerge come metodo privilegiato poiché in grado di mettere in relazione aspetti psicologici, sociali, economici, tecnologici e ambientali, consentendo di analizzare sia l'evoluzione dei comportamenti individuali sia gli effetti sistemici prodotti dalle interazioni collettive.

L'architettura del modello proposto si fonda sull'integrazione di due prospettive metodologiche complementari, che consentono di analizzare il fenomeno da livelli differenti ma interconnessi. La Figura 4 mostra una relazione di input-output con retroazione. La parte centrale è suddivisa in due modelli, volti a considerare sia l'aspetto psicosociale che l'aspetto tecnico-economico.

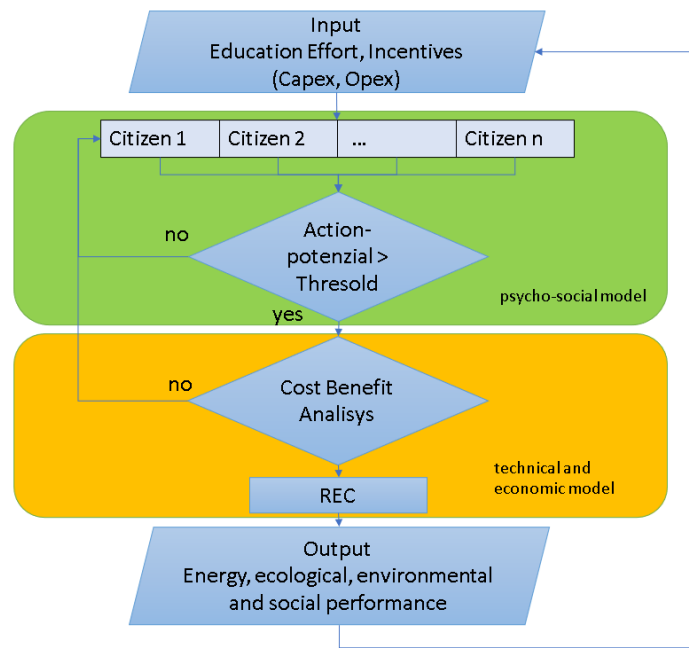


Figura 4 Visione d'insieme integrata: dal framework teorico al modello computazionale

Il Modello Agent-Based: struttura e componenti fondamentali

Il modello agent-based sviluppato ricostruisce le dinamiche socioeconomiche e ambientali che influenzano le decisioni dei nuclei familiari all'interno delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER). Monitora le prestazioni del sistema attraverso metriche globali quali il consumo energetico totale e il bilancio energetico. Gli agenti sono categorizzati in quattro entità nucleari: nuclei familiari (cittadini), governance (organismi decisionali), mercato (prezzi e disponibilità), e contesto ambientale per le tecnologie di fonti energetiche rinnovabili (condizioni esterne).

I nuclei familiari agiscono come decisori primari, influenzati da incentivi finanziari, norme sociali e consapevolezza ambientale. La governance modella il comportamento attraverso politiche; il mercato definisce i costi dell'energia; l'ambiente fornisce vincoli contestuali. Questa struttura rispecchia la complessità sistemica delle dinamiche comunitarie, dove ogni componente interagisce con le altre in processi di feedback continui e non lineari.

Fasi evolutive del modello

Il modello progredisce attraverso quattro fasi integrate:

1. Inizializzazione (creazione degli agenti e assegnazione degli attributi): Ogni agente nucleo familiare è dotato di attributi socioeconomici e comportamentali specifici, parametrizzati su dati storici di consumo e preferenze individuali.
2. Interazione (influenza tra pari e politiche): gli agenti interagiscono secondo modelli di diffusione culturale e sociale, influenzandosi reciprocamente sulla base della prossimità, similarità di valori e fiducia nelle istituzioni.
3. Processo decisionale (valutazione dell'adesione alle CER): I nuclei familiari valutano l'adesione alle CER basandosi su criteri economici (risparmio potenziale), sociali (pressione dei pari, senso di comunità) e ambientali (consapevolezza ecologica).
4. Aggiornamento dello stato (riflessione delle decisioni aggregate): Le decisioni individuali sono aggregate per produrre effetti sistemici: evoluzione del tasso di adesione, variazione del bilancio energetico, cambiamenti nella fiducia collettiva nelle istituzioni.

Comportamento Emergente e driver psicosociali

Il comportamento dei nuclei familiari emerge dall'integrazione di tre driver fondamentali:

- Segnali ambientali percepiti: consapevolezza delle conseguenze ambientali, variabilità climatica percepita, urgenza della transizione energetica.
- Influenza tra pari: Pressione sociale, effetti imitativi, conformità a comportamenti osservati nel circondario, costruzione di capital sociale.

- Driver personali: Valori biosferico-altruistici (motivazione pro-ambientale intrinseca), outcome awareness (conoscenza degli impatti), self-efficacy (fiducia nella propria capacità di fare differenza).

Ogni agente nucleo familiare riflette le condizioni urbane reali ed è parametrizzato con dati del Punto di Consegna (POD), inclusi:

- Profili di consumo energetico annuale e stagionale
- Livello di consapevolezza ambientale iniziale
- Pressione sociale percepita (composizione dei vicini cooperativi)
- Spese energetiche storica

Integrazione teorica: Rogers e Axelrod

Il modello dell'agente-cittadino integra due teorie fondamentali:

1- Teoria della Diffusione delle Innovazioni di Rogers [65]

La distribuzione di Rogers descrive come un'innovazione si diffonde in una popolazione nel tempo, suddividendo gli individui in cinque categorie in base alla rapidità di adozione:

- Innovatori ($\approx 2,5\%$): pionieri, propensi al rischio e aperti alla sperimentazione.
- Early adopters / Primi adottanti ($\approx 13,5\%$): leader d'opinione, influenzano il resto della popolazione.
- Maggioranza iniziale ($\approx 34\%$): adotta dopo aver osservato i benefici.
- Maggioranza tardiva ($\approx 34\%$): più scettica, adotta per pressione sociale o necessità.
- Ritardatari ($\approx 16\%$): tradizionalisti, resistenti al cambiamento.

Cattura come l'adesione alle CER segua una curva S tipica di diffusione tecnologica, con fasi iniziali di innovatori ed early adopters, seguiti da una maggioranza seguace e infine da ritardatari. La diffusione è modulata da attributi dell'innovazione (compatibilità economica, complessità tecnica, vantaggio relativo percepito).

- 2- Modello di diffusione culturale di Axelrod [22]: rappresenta come l'interazione sociale influenzi gli atteggiamenti di sostenibilità attraverso contaminazione comportamentale tra individui con caratteristiche simili. La similarità tra agenti determina la probabilità e l'intensità di influenza reciproca; quando superata una soglia di dissimilarità, l'influenza si attenua o cessa.

Ruolo della Governance: incentivi e sensibilizzazione

Gli interventi politici, traducibili operativamente in tre leve di governance, impattano il comportamento dell'agente-cittadino e guidano l'evoluzione sistemica della comunità:

1. Education Effort (sensibilizzazione e consapevolezza): campagne informative che aumentano la conoscenza sui benefici ambientali e sociali della partecipazione alle CER, agendo sulla dimensione cognitiva e valoriale della decisione.
2. Incentives (incentivi economici): contributi finanziari diretti (€/kWh di ricavo), sgravi fiscali o riduzioni tariffarie che agiscono sulla razionalità economica, riducendo le barriere di ingresso e migliorando la redditività percepita.
3. Subsidies (sussidi e meccanismi di accesso): interventi sulla struttura dei costi iniziali, abbattimento delle soglie di investimento, finanziamenti agevolati che

rendono la partecipazione economicamente accessibile a fasce più ampie di popolazione.

Tecnologia e contesto ambientale

La tecnologia di conversione dell'energia rinnovabile adottata nel modello è il fotovoltaico. Il dimensionamento dell'impianto dipende da:

- Radiazione solare (basata sulla latitudine e dati PVGIS specifici per la localizzazione geografica)
- Profili di domanda energetica dei partecipanti della comunità (variabili per composizione del nucleo familiare)
- Disponibilità di superfici idonee (tetti, aree comuni) dedicate all'installazione

La CER adotta le tecnologie FV, con produzione e consumo di energia legati dinamicamente all'adesione: man mano che crescono i partecipanti cresce la potenza installata e la produzione complessiva.

Vincoli economici e finanziari

Il modello considera i vincoli economici dati da:

- Costi di capitale e di investimento (CAPEX): legati all'adozione di sistemi fotovoltaici, proporzionali alla potenza installata e alle tecnologie di accumulo (battery energy storage).
- Costo complessivo dell'energia elettrica: riflette le tariffe di mercato, i costi di distribuzione, i meccanismi di incentivazione e le fluttuazioni dovute a variabilità stagionale e intraday.
- Costi operativi annuali (OPEX): manutenzione, assicurazioni, gestione amministrativa della CER.

L'interazione tra questi vincoli e le decisioni individuali genera dinamiche di feedback che determinano la sostenibilità economica della comunità nel medio-lungo termine.

Output e Metrica di Benessere Aggregato

Il modello agent-based restituisce come output principale un indice di Benessere Sociale Aggregato (

- Aggregate Social Welfare) che tiene conto dei co-benefici:

- Ambientali: riduzione della CO₂ (kg CO₂/kWh), risparmio di suolo agricolo (m²/kWp), riduzione dell'uso di carburanti fossili.
- Economici: risparmio energetico individuale, creazione di occupazione nel settore rinnovabile, riduzione della spesa energetica complessiva.
- Sociali: crescita del senso di comunità, equità nell'accesso ai benefici, inclusione di fasce vulnerabili, resilienza collettiva.

L'ASW sintetizza questi aspetti multidimensionali in un indice normalizzato, permettendo il confronto tra scenari di policy alternativi e la valutazione della sostenibilità integrata. Nel presente studio, ASW è definito come un indice composito adimensionale che aggrega i benefici economici, ambientali e sociali generati dalla CER. In accordo con la Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) [62] l'ASW non rappresenta una somma monetaria diretta, ma una funzione di utilità aggregata in cui indicatori eterogenei (es. emissioni evitate in tonnellate, risparmio in euro, occupazione in unità) vengono prima normalizzati su una scala comune e successivamente ponderati in base alle priorità di policy simulate.

Implementazione in NetLogo

Il modello è stato implementato in NetLogo, linguaggio specificamente progettato per la modellazione agent-based. Nell'ottica di un'analisi sincronica (effetti istantanei di policy) e diacronica (traiettorie evolutive nel tempo), il programma mira a evidenziare le dinamiche psicologiche e sociali come risultato delle azioni di governance, non solamente gli effetti tecnico-energetici.

La tabella 11 riepiloga le interconnessioni tra le funzioni f_1 - f_{12} , evidenziando i rapporti input/output del modello della comunità con riferimento sia ai perimetri individuali (psico-sociali) che ai perimetri sistemici (tecnico-economici).

Rappresentazione grafica e flussi causali

Le figure 4 e 5 completano la descrizione tecnica del modello agent-based, sfruttando:

- Diagrammi di flusso: rappresentazione del processo sequenziale di simulazione (inizializzazione → interazione → decisione → aggiornamento).
- Grafi causali: visualizzazione della rete di interdipendenze tra le funzioni di sistema, con identificazione di percorsi causali, dipendenze reciproche e possibili effetti non lineari o retroazioni.
- Mappe di agenti: rappresentazione spaziale dell'adesione e della diffusione territoriale della partecipazione alla CER.

Questa prospettiva agent-based consente di combinare i driver (funzioni f_1 - f_{12}) e le interconnessioni tra gli attori (cittadini, governance, mercato, ambiente) in un sistema coerente e interconnesso, in grado di catturare l'emergenza di comportamenti collettivi da decisioni individuali.

Il primo approccio, di tipo top-down, prende avvio dall'analisi del ruolo della governance e delle istituzioni, intese come attori in grado di influenzare le dinamiche sistemiche mediante l'adozione di politiche e interventi mirati. In questo quadro, la

governance viene modellata come un'entità capace di modificare alcuni parametri chiave legati agli indicatori ESG (Environmental, Social, Governance), con lo scopo di orientare le traiettorie evolutive del sistema. Gli effetti di tali interventi vengono sintetizzati in una funzione aggregata, denominata Benessere Sociale Aggregato, che si configura come una misura multidimensionale di utilità di sistema. Questa funzione, oltre a fornire un riferimento quantitativo, consente di valutare come diverse scelte politiche e istituzionali possano generare impatti differenziati sulla sostenibilità ambientale, sul tessuto sociale e sulla coesione economica. L'analisi delle variazioni di questa utilità, derivanti dalle ipotesi implementate nelle simulazioni, costituirà uno degli aspetti centrali della trattazione.

Il secondo approccio, di natura bottom-up, si concentra invece sul livello micro, ossia sugli individui e sui gruppi sociali. In questa prospettiva, i partecipanti sono rappresentati come agenti autonomi, dotati di caratteristiche proprie e di capacità decisionale, le cui scelte si basano su considerazioni psicologiche, sociali ed economiche. Attraverso la simulazione agent-based è possibile osservare come le decisioni individuali, che possono includere la propensione a investire risorse personali, la disponibilità a partecipare a comunità energetiche rinnovabili o il grado di coinvolgimento sociale, si traducano in comportamenti collettivi emergenti.

Elemento cruciale di questa architettura è il legame dinamico tra governance e individuo: da un lato, le amministrazioni pubbliche possono attivare strumenti di incentivazione o regolamentazione che incidono sui parametri ESG; dall'altro, i cittadini rispondono a tali stimoli mettendo in gioco risorse proprie, motivazioni intrinseche e forme di partecipazione collettiva che vanno oltre la sola dimensione economica. Il modello intende quindi catturare questa doppia direzionalità, mostrando come le politiche top-down possano favorire o ostacolare i processi di attivazione bottom-up e come, viceversa, l'aggregazione delle scelte individuali possa retroagire sul livello istituzionale, alimentando un ciclo di apprendimento reciproco.

In sintesi, l'architettura del modello si configura come un sistema ibrido e multilivello, in cui la coesistenza di approcci top-down e bottom-up permette di rappresentare in maniera più realistica le dinamiche di una comunità energetica rinnovabile, caratterizzata da interazioni complesse tra individui, gruppi, governance e ambiente. Per delineare percorsi concreti verso la sostenibilità e la decarbonizzazione delle città, il modello sviluppato integra in una rete sinergica diverse aree chiave, ciascuna essenziale per comprendere le dinamiche delle comunità energetiche rinnovabili (CER):

1. Partecipazione del Cittadino e Accettabilità Sociale
2. Ambiente e Tecnologia
3. Mercato e altri attori economici
4. Impatto della governance

2.2.2 Strumenti e software: descrizione della piattaforma software

Il modello è stato implementato utilizzando il software Netlogo [51], un ambiente di simulazione per sistemi complessi sviluppato al Center for Connected Learning della Northwestern University [59].

La traduzione computazionale del modello teorico è realizzata mediante Agent-Based Modeling (ABM), integrato con un ambiente di analisi in Google Colab per garantire flessibilità, tracciabilità e replicabilità.

NetLogo consente di implementare efficientemente l'architettura modulare del modello (cfr. Sezione 2.2.1 e figura 5) attraverso un linguaggio specificamente progettato per la simulazione ad agenti, mentre Google Colab facilita l'elaborazione dati successiva mediante Python, il calcolo di indicatori sintetici e la visualizzazione dei risultati.

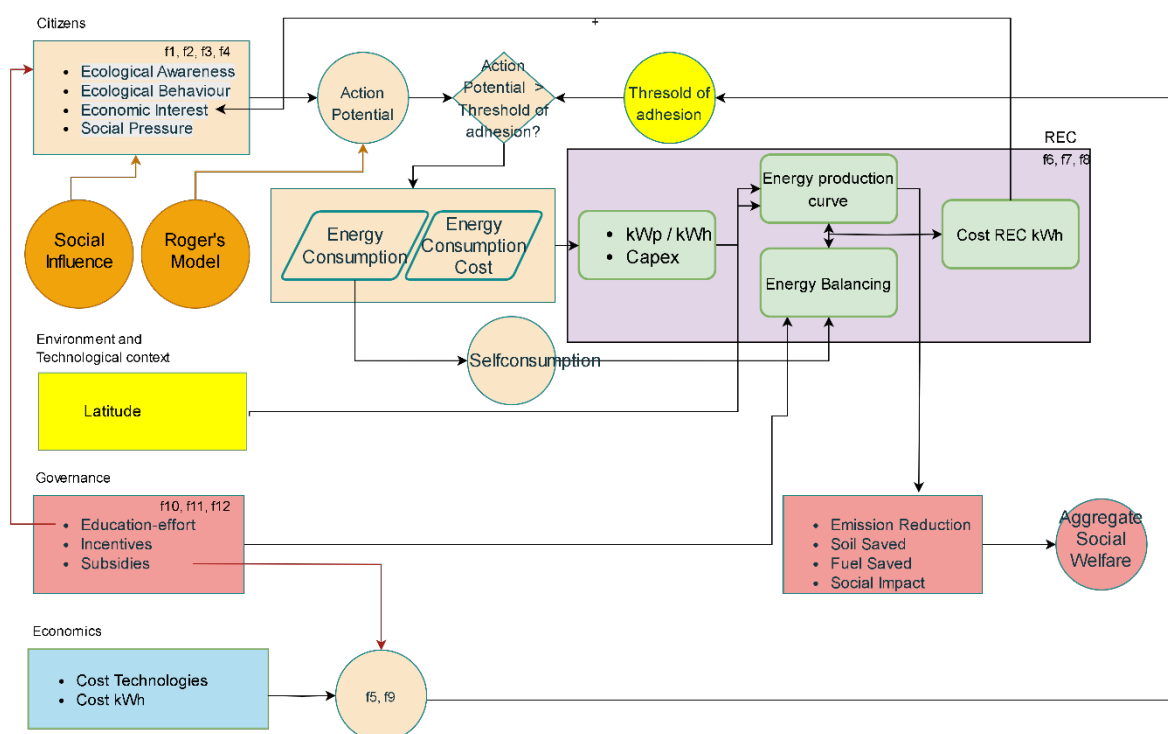


Figura 5 Modello e flusso delle attività

Il modello rappresenta tre tipologie di agenti principali, ciascuna con ruoli e dinamiche specifiche: consumer (solo consumatori, rappresentati visivamente in blu), producer (solo produttori, in verde) e prosumer (produttori-consumatori simultanei, in giallo). Ogni agente possiede attributi socioeconomici e comportamentali (consapevolezza ambientale, attitudine cooperativa, interesse economico, propensione all'innovazione tecnologica e fiducia nella governance) che evolvono secondo le regole decisionali definite dalla logica di simulazione e dalle interazioni con i vicini. La distinzione tra queste tre tipologie consente di catturare l'eterogeneità reale delle comunità energetiche, dove coesistono soggetti con strategie e capacità differenziate. I parametri economici del modello sono calibrati su fonti autorevoli. I prezzi dell'elettricità variano significativamente: la World Population Review (2025) evidenzia differenze globali tra paesi a basso costo (0,05 €/kWh) e alti (0,40 €/kWh), mentre Eurostat (2025) riporta 0,28 €/kWh medi per l'UE domestico [66], [67]. In Italia, RSE (2025) stima costi aggiuntivi della transizione fino a 15-20 €/MWh per il consumatore finale [68].

Per il LCOE, IEA (2020) fissa range fotovoltaico 30-60 \$/MWh, confermato da Rinnovabili.it (2025) per l'Italia (35-55 €/MWh) [69], [70]. Questi valori definiscono i parametri `energy-price`, `CER-cost` e `incentivi` (d3), garantendo realismo economico delle simulazioni

2.2.2.1 Struttura computazionale e ciclo di simulazione

La simulazione si articola in quattro procedure iterative fondamentali:

1. Setup e inizializzazione- Il modello legge i dati storici di consumo e produzione da file CSV, parametrizzati su dati reali ISTAT, ENEA e misurazioni locali. Contemporaneamente, assegna a ogni agente i propri attributi iniziali e calcola il costo totale dell'impianto fotovoltaico come funzione della potenza installata (slider kWp) e della capacità di accumulo (BES).
2. Ciclo di simulazione (tick). Ad ogni passo temporale, il modello aggiorna sequenzialmente:
 - a. i consumi e la produzione energetica giornaliera sulla base dei dati storici,
 - b. il bilancio energetico istantaneo (differenza tra produzione e consumo),
 - c. la distribuzione dell'energia virtuale tra gli agenti,
 - d. il calcolo dei ricavi e dei costi incrementali,
 - e. l'aggiornamento delle variabili di stato e dei grafici di output. Un anno di simulazione corrisponde a 365 tick, consentendo di catturare la variabilità stagionale e i pattern di consumo reali.
3. Logica decisionale e dinamica degli agenti. Sebbene la partecipazione iniziale sia determinata dalla configurazione degli agenti, il modello prevede la possibilità di aggiornare dinamicamente le sensibilità individuali (consapevolezza, comportamento ecologico, interesse economico, influenza sociale) secondo modalità dipendenti dalla similarità o dissimilarità con i vicini,

ispirate al modello culturale di Axelrod. Quando le condizioni di similarità superano una soglia, le variabili si evolvono ricorsivamente; in caso di dissimilarità, solo consapevolezza e comportamento ecologico vengono rivisti, riflettendo meccanismi di adattamento parziale e resistenza.

4. Ottimizzazione e campagne parametriche. NetLogo consente di eseguire campagne sistematiche attraverso BehaviourSpace, uno strumento che varia simultaneamente più parametri (numero di agenti consumer, potenza installata kWp, tasso di autoconsumo, costi unitari) e registra gli output per ogni combinazione. Questo approccio permette di individuare la configurazione ottimale in termini di utile massimizzato, efficienza economica e resilienza energetica, nonché di analizzare la sensibilità del modello rispetto a variazioni parametriche.

2.2.2.2 Variabili di stato e indicatori

Il modello gestisce tre categorie principali di variabili:

Energetiche: energia consumata e prodotta (per tick, giorno e anno), bilancio energetico (surplus/deficit), autoconsumo, energia virtuale distribuita e energia disponibile nel sistema. Questi indicatori consentono di tracciare il profilo energetico della comunità e valutare il grado di autosufficienza.

Economiche: costi totali (investimento iniziale, ammortamento annuale, manutenzione), ricavi (da risparmio energetico e vendita dell'eccedente), utile netto annuale e cumulato, spese totali e punto di pareggio. Questi parametri permettono di valutare la sostenibilità economica della CER nel medio-lungo termine.

Finanziarie: tasso di sconto, valore attuale netto (VAN) e flussi di cassa cumulativi, essenziali per l'analisi della redditività degli investimenti secondo criteri finanziari consolidati.

2.2.2.3 Output e visualizzazione

La simulazione produce automaticamente grafici che illustrano l'evoluzione temporale di variabili chiave — energia prodotta e consumata (per identificare pattern stagionali), bilancio energetico giornaliero, costi e ricavi cumulativi, e utile netto della CER — facilitando il riconoscimento di trend e anomalie. Inoltre, al termine di ogni anno simulato, il modello genera una tabella riepilogativa contenente i principali indicatori energetici, economici e finanziari, supportando l'analisi retrospettiva e il confronto tra diversi scenari di policy.

L'integrazione con Google Colab estende le capacità analitiche mediante calcolo statistico, regressione, clustering e visualizzazione avanzata, trasformando i dati grezzi della simulazione in insight sintetici e comparabili.

2.2.2.4 Parametrizzazione e configurazione degli slider

I principali slider disponibili in NetLogo consentono di modulare scenari alternativi e testare politiche di governance:

- Potenza installata (kWp): varia la capacità fotovoltaica del sistema.
- Numero di consumer: determina la composizione demografica della comunità.
- Tasso di autoconsumo: fissa la percentuale di energia autoprodotta consumata localmente.
- Costo unitario dell'energia (€/kWh): simula variazioni tariffarie.
- Costo di manutenzione (% annuale del CAPEX): modula il costo operativo.

Attraverso questi slider e il tool BehaviourSpace, è possibile esplorare sistematicamente lo spazio dei parametri, identificando le strategie di governance più efficaci in termini di minimizzazione dei costi, massimizzazione dell'autoconsumo e generazione di beneficio sociale aggregato.

2.2.2.5 Validazione e robustezza

Il modello è stato eseguito su hardware standard (AMD A12 di settima generazione, 8 GB RAM) con tempi di elaborazione medi (5 ore per 900 simulazioni a 2000 ticks). L'uso di valori LCOE (Levelized Cost of Energy) calcolati dal modello — con minimi intorno a 70 €/MWh — si attesta in linea con i parametri di letteratura, confermando la coerenza interna della logica computazionale e la ragionevolezza delle assunzioni economiche sottostanti.

In sintesi, l'implementazione in NetLogo-Google Colab rappresenta un ambiente robusto e flessibile per l'esplorazione della complessità sociotecnica delle CER, permettendo di testare ipotesi teoriche in tempo reale e di supportare il processo decisionale di stakeholder pubblici e privati con evidenza computazionale affidabile. La traduzione computazionale del modello teorico è stata realizzata mediante un approccio di modellizzazione ad agenti (*Agent-Based Modelling*, ABM), implementato in NetLogo e integrato con un ambiente di analisi in Google Colab, al fine di garantire flessibilità, tracciabilità e replicabilità dei risultati sperimentali.

Il modello rappresenta le interazioni dinamiche tra cittadini, tecnologie, mercato e governance, integrando variabili sociali, economiche e tecniche secondo la rete di relazioni concettuali illustrata nella sezione precedente. L'architettura del sistema è stata strutturata in modo modulare, articolata in cinque componenti principali:

1. Definizione degli agenti. Gli agenti rappresentano i diversi attori del sistema, cittadini, istituzioni e imprese, ciascuno caratterizzato da un insieme di attributi socioeconomici e comportamentali che ne determinano l'evoluzione nel tempo, tra cui:
 - livello di consapevolezza ambientale;
 - attitudine cooperativa;
 - interesse economico individuale;
 - propensione all'innovazione tecnologica;
 - percezione della governance e fiducia nelle istituzioni.

2. Funzioni dinamiche (f1–f12) Ogni funzione rappresenta una variabile di stato del sistema, aggiornata a ogni passo temporale (*tick*). Le relazioni di dipendenza tra funzioni sono codificate secondo la rete causale (grafo ABM), in modo da riprodurre i meccanismi di feedback tipici dei sistemi complessi, permettendo di analizzare l'evoluzione emergente del comportamento collettivo.
3. Rete di interdipendenza (grafo causale) Il sistema di equazioni è stato tradotto in un grafo diretto, i cui nodi corrispondono alle funzioni (f1–f12) e gli archi rappresentano le relazioni di influenza. Questa rappresentazione consente di visualizzare e analizzare il flusso informativo tra le componenti, identificando percorsi causali, dipendenze reciproche e possibili effetti non lineari o retroazioni.
4. Evoluzione temporale. Il modello è stato lanciato con tre diversi orizzonti temporali (lungo, medio, breve periodo) al fine di individuare comportamenti asintotici. L'analisi principale è condotta su un orizzonte temporale discreto (es. 600 tick), aggiornando a ogni passo i valori delle funzioni secondo le regole di interazione definite. Tale evoluzione consente di simulare processi di apprendimento, adattamento e diffusione tipici dei sistemi socio-tecnici, riproducendo la dinamica di adesione progressiva dei cittadini alla Comunità Energetica Rinnovabile (CER). Output e visualizzazione dei risultati. I risultati della simulazione comprendono:
 - l'evoluzione temporale di variabili chiave, quali l'Adesione Comunitaria (f4), l'Efficienza Economica (f9) e il Beneficio Sociale Aggregato (f12);
 - la rappresentazione grafica della rete di interdipendenze tra le funzioni;
 - analisi statistiche, matrici di correlazione e indici di sensitività, utili per valutare la coerenza interna e la robustezza del modello rispetto alle variazioni parametriche.

L'integrazione tra NetLogo e Google Colab consente di collegare la fase di simulazione agent-based con strumenti di analisi quantitativa, regressione e visualizzazione

avanzata, estendendo la capacità esplorativa del modello e facilitando l'interpretazione dei risultati in chiave sistemica.

La dinamica delle funzioni nel modello segue una logica iterativa e deterministica, arricchita da componenti stocastiche controllate per rappresentare l'incertezza dei comportamenti sociali e la variabilità individuale. Ad esempio, l'Adesione Comunitaria (f_4) è calcolata tramite il confronto tra l'"action potential" e una soglia critica (threshold adhesion).

L'action potential è una media pesata dei fattori influenti quali educazione, accettabilità, interazione sociale e governance, ponderati da coefficienti di normalizzazione e preferenze individuali.

In Tabella 12 si riportano le relazioni che legano le funzioni del modello teorico alla simulazione in netlogo.

Tabella 12 Correlazioni tra funzioni e variabili e parametri in netlogo

f	Descrizione	Variabili NetLogo	Formule	Note
f1	Educazione e Consapevolezza	education-effort	$\Delta c_1(t+1) = c_1(t) + \text{educ-effort} \times 0.01$	Variazione dinamica della awareness individuale
f2	Accettabilità (Consenso)	Adhesion threshold	$ap > \text{threshold}$	Soglia di attivazione; confronto dinamico con action-potential
f3	Interazione Sociale	social-influence	$\Delta c_4(t+1) = c_4(t) + \text{media-eco} \times 0.02$	Modello Axelrod: dinamica di omofilia e contagio sociale
f4	Adesione Comunitaria	adoption-category	$\text{action-potential} > \text{threshold}$	Modello Rogers: classificazione agenti (1-5) e curva a S
f5	Diffusione Tecnologica	diffusion-rate	$0.05 \times \text{adhesion-rate}$	Velocità di penetrazione della tecnologia nel mercato locale
f6	Resilienza Energetica	resilience-metric	$\frac{\text{energy-balance} + \text{RES-coverage}}{2}$	Indice di stabilità e autosufficienza del sistema locale
f7	Bilanciamento Energetico	energy-balance	$\Sigma P_{PV} - \Sigma D_{\text{load}}$	Saldo netto dinamico tra produzione FV e domanda
f8	Riduzione Emissioni	co2-saved	$\text{energy-balance} \times \frac{0.45 \text{ kgCO}_2}{\text{kWh}}$	Impatto ambientale calcolato su fattori di emissione ISPRA
f9	Efficienza Economica	LCOE	$\frac{\text{CAPEX} + \text{OPEX}}{\text{total-energy}}$	Calcolo della redditività e del costo livellato dell'energia
f10	Governance (ESG)	incentive-level	$\text{education-effort} + \text{subsidy-rate}$	Strategia integrata di policy (incentivi + formazione)
f11	Impatto Lungo Termine	growth-rate	$\text{ASW}_{t-1} \times 1.02$	Trend inerziale del benessere basato su apprendimento sociale
f12	Benessere (ASW)	aggregate-social-welfare	$0.4 \cdot f_9 + 0.3 \cdot f_8 + 0.3 \cdot f_7$	Indice multi-critico normato (Economico, Amb., Soc.)

La tabella 13 illustra l'insieme delle variabili e parametri impiegati nel modello ABM, specificandone la definizione e l'intervallo di variazione.

Tabella 13 Variabili e parametri nel modello ABM

Variabile / Parametro	Simbolo	Range / Valore	Descrizione e Funzione
education-effort	ϵ	0 – 1	Intensità delle politiche educative (Slider)
awareness	c_1	0 – 1	Livello di consapevolezza ambientale individuale
social-influence	c_4	0 – 1	Propensione all'influenza sociale (Modello Axelrod)
adhesion-threshold	θ	0.2 – 0.6	Soglia critica di utilità per l'adesione alla CER
action-potential	ap	0 – 1	Potenziale di azione calcolato per ogni tick
adoption-category	cat	1 – 5	Classe di adozione secondo la teoria di Rogers
diffusion-rate (f5)	dr	0 – 1	Tasso di penetrazione tecnologica nel sistema
resilience-metric (f6)	rm	0 – 1	Indice di stabilità e autosufficienza energetica
energy-balance (f7)	E_{bal}	kWh	Saldo netto tra produzione FV e domanda totale
co2-saved (f8)	CO_2	t	Tonnellate di emissioni evitate cumulate
LCOE (f9)	L_{cost}	€/kWh	Costo livellato dell'energia calcolato dal sistema
incentive-level (f10)	γ	0 – 1	Forza della governance (Incentivi + Educazione)
growth-rate (f11)	gr	%	Tasso di crescita del benessere a lungo termine
ASW (f12)	ASW	0 – 1	Benessere Sociale Aggregato (Output primario)

L'evoluzione degli agenti, rappresentati principalmente da cittadini, segue una logica ricorsiva in cui, a ogni passo (tick temporale), le sensibilità individuali a fattori chiave (consapevolezza, comportamento ecologico, interesse economico, influenza sociale) sono aggiornate in base a condizioni di similarità o dissimilarità tra agenti vicini.

Se i vicini sono simili, le variabili coesistono e si evolvono secondo le seguenti formule ricorsive, con un termine randomizzato per incorporare variabilità:

- Aggiornamento della consapevolezza (c_1),

- Comportamento ecologico (c2),
- Interesse economico (c3),
- Influenza sociale (c4).

In caso di dissimilarità, solo consapevolezza e comportamento ecologico sono soggetti a revisione.

Per quanto riguarda la governance, il modello calcola gli output chiave quali il Benessere Sociale Aggregato (ASW) e il Tasso di Adesione (ar), sfruttando parametri tecnici ed economici relativi alla performance TEC, indicatori di riduzione emissioni e coinvolgimento sociale.

Le funzioni correlate — come la Diffusione Tecnologica (f5) e la Resilienza Energetica (f6) — sono modellate come funzioni di input delle funzioni precedenti, costruite per simulare rispettivamente la diffusione delle tecnologie e la risposta del sistema a eventi critici, descrivendo interazioni dinamiche tipiche.

Il Beneficio Sociale Aggregato (f12) sintetizza i risultati delle funzioni di sistema in un indice normalizzato che fornisce una misura complessiva dell'impatto sociale.

Il modello è programmato in NetLogo, modularizzato in cinque componenti principali:

1. Definizione degli agenti: ogni agente è dotato di un'opinione/strategia legata alla sostenibilità e alla cooperazione, soggetta a variazioni temporali basate sulle interazioni locali.
2. Reti di Interazione: la struttura sociale degli agenti è modellata tramite reti casuali, geografiche o basate su gruppi, influenzando la diffusione di comportamenti e opinioni sostenibili. L'influenza è condizionata dalla prossimità e dal livello di cooperazione dei vicini (modello basato su Axelrod).
3. Partecipazione alle CER: gli agenti decidono di aderire basandosi su incentivi, costi e comportamenti imitativi, con barriere e benefici inclusi nel modello.

4. Politiche Pubbliche e Incentivi: attraverso variabili parametriche rappresentate da slider in NetLogo, il modello consente di testare effetti di interventi governativi su adesione, diffusione tecnologica e sostenibilità complessiva.
5. Visualizzazione e Output: la simulazione produce mappe visuali di adesione, grafici temporali di variabili chiave e statistiche descrittive per valutare stabilità, coerenza e traiettorie emergenti.

Per aumentare la fedeltà e utilità del modello si sono introdotti:

- Indicatori di governance dinamica, simulando impatti di politiche su incentivi e partecipazione.
- Simulazioni di shock esterni per testare resilienza energetica.
- Parametri che tengono conto della consapevolezza energetica nel bilanciamento consumi/produzione.
- Indicatori ponderati per il beneficio sociale, considerando riduzione CO₂, crescita economica, soddisfazione e resilienza.

Questa logica computazionale articolata consente di calcolare traiettorie temporali, identificare equilibri dinamici e punti di transizione critica, facilitando l'analisi di scenari complessi e guidando la progettazione di politiche di governance efficaci per comunità energetiche resilienti e sostenibili.

Con riferimento al comportamento dei cittadini, l'agente viene modellato introducendo l'action potential, che attiva la decisione di aderire alla comunità energetica o di abbandonare la CER qualora fosse già membro, quando supera una soglia specifica, (adhesion threshold), così definita:

$$ap_i = \sum_1^4 k_i \times c_i \times d_i \quad (1)$$

dove:

- k_i identifica i parametri di normalizzazione o preferenza, la cui somma è pari a 1, con lo scopo di amplificare o meno l'importanza dei singoli fattori.
- c_i identifica la sensibilità del cittadino ai diversi fattori;
- d_i rappresenta l'elemento quantitativo: d_1 e d_2 sono pari a 1 mentre d_3 tiene conto degli incentivi, e d_4 riguarda la somiglianza di comportamento ecologico con i vicini.

Con questa formalizzazione, la formula separa nettamente tre dimensioni ontologiche diverse:

- la dimensione strategica (k_i): I pesi di preferenza (con $\sum k_i = 1$) che rappresentano il "tipo" di popolazione (es. una comunità più sensibile all'economia o all'ambiente).
- dimensione individuale (c_i): la sensibilità o "tratto psicologico" dell'agente (es. quanto è propenso ad ascoltare i vicini).
- dimensione quantitativa e/o ambientale (d_i): l'input esterno o segnale che l'agente riceve dal sistema (incentivi, pressione dei pari).

Si sceglie inoltre di impostare $d_1 = 1$ e $d_2 = 1$, per affermare che la consapevolezza (c_1) e il comportamento ecologico (c_2) sono tratti intrinseci dell'agente, mentre d_3 e d_4 rimangono le variabili di stato esterne. L'elemento d_4 è modellato come il valore medio del comportamento ecologico dei vicini entro un raggio R ($media_{eco_{vicini}}$), riflettendo la teoria di Axelrod sulla cooperazione emergente basata sulla somiglianza locale

Nella fase di inizializzazione, ogni famiglia assume i valori c_i pari a quelli derivanti dalla distribuzione di Rogers secondo la correlazione di Tabella 14.

Tabella 14 Valori di riferimento c_i derivanti dalla distribuzione di Rogers

Categoria	Base	Range [0-1]	% Popolazione
Innovatori	0.98	0.90-1.00	2.5%
Early	0.91	0.83-0.99	13.5%

Magg. iniz.	0.67	0.59-0.75	34%
Magg. tard.	0.33	0.25-0.41	34%
Ritardatari	0.15	0.07-0.23	16%

Ogni nucleo familiare viene posizionato su una patch della griglia 21×21, rappresentando la struttura spaziale della comunità. I valori iniziali dei coefficienti comportamentali (awareness c_1 , ecological-behavior c_2 , economic-interest c_3 , social-influence c_4) sono assegnati secondo la distribuzione di Rogers per categoria di adottante, garantendo eterogeneità realistica: innovatori (2.5%, valori alti 0.7-0.9), early adopters (13.5%, 0.5-0.7), maggioranza iniziale (34%, 0.3-0.5), maggioranza tardiva (34%, 0.1-0.3), ritardatari (16%, 0-0.1). I consumi energetici (2.800-5.000 kWh/anno) riflettono composizioni familiari reali (1-5 persone), con correlazione inversa awareness-consumo (c_1 alta $\rightarrow$ risparmio 30%). Il potenziale d'azione iniziale api è calcolato coerentemente con la formula $\Sigma(k_i \cdot c_i \cdot d_i)$, eliminando discrepanze e permettendo dinamica emergente dal tick 0.

Ossia durante le iterazioni del modello, possono verificarsi due condizioni per popolazione della comunità:

- i vicini sono simili oppure
- i vicini non sono simili.

Nel caso di vicini simili, le seguenti formule ricorsive si applicano ai coefficienti delle variabili agenti:

- coefficiente di consapevolezza c_1 (Awareness coefficient)

$$c_1(t+1) = c_1(t) + \text{random}(0 \div 0.05) + \text{education} - \text{effort} \times 0.1 \quad (2)$$

- comportamento ecologico (Ecological behaviour)

$$c_2(t+1) = c_2(t) + \text{random}(0 \div 0.03) + c_1(t) \times 0.1 \quad (3)$$

- interesse economico c_3 (Economic interest)

$$c_3(t + 1) = c_3(t) \quad (4)$$

- influenza sociale c_4 ,

$$c_4(t + 1) = c_4(t) + \text{peer} - \text{pressure} \times 0.05 \quad (5)$$

Dove

- peer-pressure indica la percentuale di vicini aderenti ad una CER
- t indica il passo temporale incrementale,
- e la funzione random introduce variabilità nelle variazioni dei coefficienti.

Nel caso di vicini non simili, il modello corregge solamente i coefficienti di consapevolezza c_1 e comportamento ecologico c_2 , rispettivamente con:

$$c_1(t + 1) = c_1(t) + \text{random}(0 \div 0.02) - 0.01 \quad (6)$$

$$c_2(t + 1) = c_2(t) + \text{random}(0 \div 0.01) - 0.005 \quad (7)$$

Per quanto riguarda l'agente "governance", gli output della comunità ottenibili sono il Benessere Sociale Aggregato (*ASW Aggregate Social Welfare*) definito come:

$$ASW = \sum_i^4 g_i \times h_i(l_i), \quad (8)$$

dove:

g_i sono i pesi della funzione (con $\sum g_i=1$),

h_i, l_i realizzano la normalizzazione della funzione e in particolare misurano gli indici di prestazione tecno-economico-ambientale effettivi della CER.

La funzione di trasformazione $h_i(l_i)$ riveste un ruolo critico nel garantire la validità scientifica dell'indice ASW. Essa opera una normalizzazione adimensionale delle diverse grandezze fisiche coinvolte: senza tale passaggio, le tonnellate di CO2 evitata (ordine delle migliaia) oscurerebbero completamente i metri quadri di suolo

risparmiato (ordine delle unità), rendendo i pesi di preferenza g_i del tutto inefficaci. Grazie a h_i , ogni sottolivello l_i viene ricondotto a una scala di utilità coerente con i pilastri ESG: l'ambiente (l_1, l_2), l'economia e la governance (l_3), e l'impatto sociale (l_4)

I pesi della funzione di utilità non sono interpretati come valori assoluti, ma come leve di governance che riflettono differenti priorità istituzionali. L'analisi esplora scenari alternativi di policy al fine di valutare la robustezza dei risultati rispetto alle preferenze decisionali. Sono stati realizzati 4 scenari (Tabella 15), in funzione dell'enfasi che si vuole dare ai diversi aspetti.

Tabella 15 Pesi nel calcolo dell'ASW

Scenario	Econ	Env	Soc
Market-driven	0.5	0.3	0.2
Climate-driven	0.2	0.6	0.2
Social-driven	0.2	0.2	0.6
Balanced	0.33	0.33	0.34

e il Tasso di Adesione (*ar* *adhesion rate*), definito come:

$$ar = \frac{\text{numero di aderenti}}{\text{popolazione totale}} \quad (9)$$

I coefficienti comportamentali c_1 (awareness), c_2 (ecological-behavior), c_3 (economic-interest), c_4 (social-influence) sono inizializzati secondo la curva di Rogers con valori basali distinti: innovatori (0.98), early adopters (0.91), maggioranza iniziale (0.67), maggioranza tardiva (0.33), ritardatari (0.08), più variabilità gaussiana (μ =base, σ =0.08) limitata nell'intervallo. Durante l'evoluzione dinamica, i c_i mutano per due meccanismi: (1) omofilia culturale (Axelrod): agenti con $\geq 3/4$ tratti simili copiano un tratto casuale dal vicino (± 0.01 rumore); (2) contagio cooperativo: vicinanza a aderenti CER incrementa $c_1(+0.05 \pm \text{education} \times 0.1)$, $c_2(+0.03 \pm \text{awareness} \times 0.1)$, $c_4(+0.02)$, ricalcola $c_3 = \text{consumption} \times (\text{energy-price} - \text{CERcost}) \times \text{incentivi}$, mentre non-aderenti riducono

leggermente $c_1(-0.01)$, $c_2(-0.005)$. L'educazione globale aggiunge $+0.01 \times \text{education-effort}$ a c_1 ogni tick. Tale dinamica genera eterogeneità persistente e tipping points realistici, con ritardatari ($c < 0.16$) resistenti fino a contagi $> 80\%$.

Output della simulazione

L'esecuzione del modello produce:

1. **Grafici temporali** delle funzioni principali (f_4 , f_9 , f_{12}), che mostrano la traiettoria evolutiva del sistema;
2. **Visualizzazione del grafo di interdipendenza**, utile per comprendere le relazioni causali;
3. **Matrice di correlazione** tra le funzioni, che evidenzia coerenze e convergenze tra le dimensioni sociali, tecnologiche, economiche e istituzionali;
4. **Statistiche descrittive** sui valori medi, varianza e stabilità del sistema.

L'analisi dei risultati consente di identificare condizioni di equilibrio dinamico, in cui la cooperazione sociale, la governance efficace e la sostenibilità economico-ambientale convergono verso un beneficio collettivo ottimale. La Figura 6 permette la visualizzazione della relazione tra i parametri di stato, l'utilizzo di coefficienti interni e l'impatto sui parametri esterni.

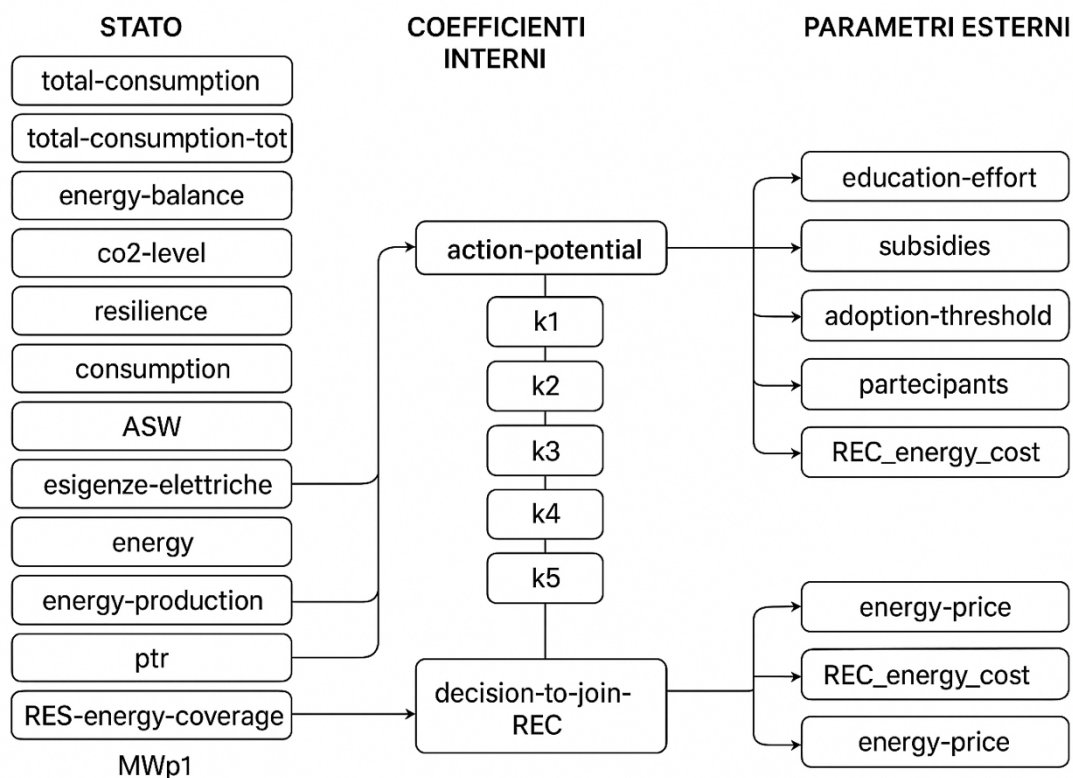


Figura 6 Connessioni tra le variabili del programma

L'implementazione in NetLogo traduce questa impostazione teorica in una struttura computazionale che riproduce l'evoluzione temporale e spaziale del sistema, considerando l'interazione tra cittadini, tecnologie, istituzioni e mercato come elementi co-determinanti di un ecosistema energetico complesso. Ogni agente rappresenta un cittadino o un'entità locale potenzialmente coinvolta nella CER, ed è descritto da un insieme di attributi comportamentali e socioeconomici che ne determinano la propensione all'adesione: livello di consapevolezza ambientale, attitudine alla cooperazione, sensibilità economica, fiducia nella governance e apertura all'innovazione tecnologica. Tali variabili non sono statiche, ma evolvono nel tempo in risposta alle interazioni sociali e alle condizioni del contesto, dando origine a dinamiche emergenti difficilmente osservabili attraverso modelli aggregati o deterministici.

Le regole decisionali degli agenti si ispirano al modello culturale di Axelrod, nel quale la diffusione delle opinioni e dei comportamenti avviene per imitazione tra individui

con caratteristiche simili. In questo contesto, la “contaminazione” comportamentale tra agenti assume una valenza cognitiva e sociale: la probabilità che un cittadino aderisca a una CER aumenta proporzionalmente alla densità di vicini cooperativi nel suo intorno, alla percezione dei benefici economici e alla fiducia nelle istituzioni locali. L’interazione sociale si sviluppa dunque come un processo di apprendimento collettivo e di adattamento evolutivo, dove il consenso e la cooperazione emergono gradualmente attraverso l’influenza reciproca e la costruzione di capitale sociale. La rete di relazioni tra agenti può essere configurata secondo topologie differenti — random, small-world, o basata sulla prossimità geografica — per esplorare il ruolo delle strutture sociali e spaziali nella diffusione dei comportamenti pro-sostenibili.

Parallelamente, l’intervento della governance viene rappresentato attraverso due leve principali: gli incentivi economici (incentives) e le campagne di sensibilizzazione e formazione (education-effort). Gli incentivi economici agiscono sulla dimensione razionale della decisione, riducendo le barriere di ingresso e migliorando la redditività percepita della partecipazione alla CER, mentre le campagne educative influenzano la dimensione cognitiva e valoriale, aumentando la consapevolezza ambientale e la fiducia nella cooperazione. Queste variabili, modellate come parametri regolabili nel simulatore, consentono di generare e confrontare scenari di policy alternativi, nei quali la combinazione e l’intensità delle strategie di intervento producono differenti traiettorie evolutive del sistema.

Le dinamiche di cooperazione seguono un principio imitativo e adattivo: ogni agente osserva il comportamento dei propri vicini e può modificare la propria strategia se l’interazione produce un beneficio sociale o economico superiore. Tale processo, che può essere interpretato come una forma di “apprendimento evolutivo” o “diffusione sociale”, dà origine a fenomeni di clustering comportamentale, nei quali si formano nuclei locali di cooperazione stabile o, in presenza di condizioni sfavorevoli, zone di resistenza e frammentazione. Il ruolo del capitale sociale e della fiducia risulta cruciale: in reti caratterizzate da elevata coesione e reciprocità, la diffusione dei comportamenti

cooperativi è più rapida e stabile, mentre in contesti frammentati o polarizzati prevalgono fenomeni di inerzia e disallineamento, con conseguente rallentamento del processo di transizione energetica.

Il modello computazionale, pertanto, non mira unicamente a predire un esito deterministico, ma a esplorare lo spettro di possibilità e le condizioni sistemiche entro le quali emergono comportamenti collettivi desiderabili. Gli output della simulazione comprendono l'evoluzione temporale del numero di cittadini aderenti alla CER, la distribuzione spaziale della partecipazione, la variazione del beneficio sociale aggregato e indicatori di sostenibilità ambientale, come la riduzione delle emissioni o l'aumento della quota di energia rinnovabile. Attraverso l'uso del tool "BehaviourSpace" di NetLogo, è possibile condurre vere e proprie campagne di simulazione sistematiche, esplorando un ampio spazio dei parametri e individuando le configurazioni ottimali di policy in termini di efficienza, equità e stabilità sociale.

In sintesi, il modello proposto integra approcci teorici provenienti dalle scienze sociali, economiche e della complessità, proponendo un paradigma di analisi della transizione energetica fondato sull'interazione tra individui, istituzioni e tecnologie. La simulazione agent-based diventa uno strumento di governance adattiva, in grado di supportare la definizione di strategie pubbliche e collettive orientate alla sostenibilità e alla resilienza. Essa permette di osservare, in modo controllato e riproducibile, come le scelte individuali e le politiche pubbliche interagiscano nel generare processi emergenti, trasformando il modello in un vero e proprio laboratorio cognitivo per la progettazione di comunità energetiche più inclusive, efficienti e consapevoli. In questa prospettiva, l'ABM non rappresenta soltanto un metodo di simulazione, ma un approccio epistemologico che restituisce la complessità delle relazioni sociali ed economiche, fornendo un contributo metodologico e operativo di rilievo per la comprensione e la gestione della transizione energetica sostenibile.

L'obiettivo è definire una funzione di sistema dipendente da parametri ambientali (E), sociali (S) ed economici (G), che consenta di dimensionare un sistema energetico in

un'area cittadina in funzione dei consumi specifici, massimizzando la sua utilità complessiva.

Ciascuna delle tre dimensioni principali viene scomposta in variabili chiave (Tabella 16).

Tabella 16 Scomposizione della funzione di Sistema

Ambito	Parametro	Definizione	Unità di misura
Parametri ambientali (E)	Climate Change	Risparmio di CO ₂	kg CO ₂ / kWh
	Agricultural Land Depletion	Risparmio di suolo agricolo	m ² / kWh
	Fossil Fuel Depletion	Riduzione dell'uso di carburanti	kg carburante / kWh
Parametri sociali (S)	Investimento	Ore lavorate per km ² e per anno	ore lavorate / (km ² · anno)
	Ricadute sul territorio	Impatto delle iniziative sociali	- (da definire, es. indice)
	Iniziative sociali	Dinamiche relazionali e senso di comunità	- (misure qualitative o proxy quantitativi)
Parametri economici (G)	Profitto individuale	Guadagno economico personale	€ / anno
	Profitto di sistema	Valore attuale netto (VAN) complessivo	€

La funzione di utilità agisce come obiettivo da massimizzare, bilanciando aspetti ambientali (es. riduzione CO₂), sociali (es. impatto e coesione comunitaria) ed economici (es. sostenibilità e profittabilità).

Dal punto di vista tecnologico, al momento si considera esclusivamente la realizzazione di impianti fotovoltaici. La modellizzazione di sistemi cogenerativi sarà affrontata in una fase successiva dello studio.

Questa formulazione rende possibile l'analisi integrata dei diversi impatti e contribuisce a definire strategie ottimali di sviluppo energetico in aree urbane specifiche, incorporando aspetti multidimensionali fondamentali per la transizione verso sistemi sostenibili.

3 CASO STUDIO: APPLICAZIONE DEL MODELLO A CONTESTI URBANI DI MEDIA DENSITA'. IL CASO DI LATINA

Il cambiamento climatico rappresenta una delle sfide più pressanti della contemporaneità, con effetti tangibili su ecosistemi e sistemi socioeconomici. L'IPCC conferma l'aumento delle temperature medie, la maggiore frequenza di eventi estremi e l'accelerazione dello scioglimento glaciale, che minacciano la sicurezza idrica e la stabilità regionale [30].

Nel settore energetico, la transizione verso le rinnovabili è inarrestabile. IRENA nel 2024 registra 3372 GW di capacità installata globale nel 2022, con solare (1053 GW) e idroelettrico (1256 GW) in testa, ma le emissioni di CO₂, rimangono elevate, contraddicendo gli obiettivi di neutralità climatica entro il 2050 [14].

Le città italiane #NetZero2030 emettono oltre 14,5 milioni di tonnellate di CO₂ annue, richiedendo azioni urgenti su mobilità e su consumi energetici residenziali per allinearsi agli Accordi di Parigi. Studi condotti dal Politecnico di Milano [71] mostrano che il 33% delle abitazioni si colloca nella classe di consumo 3.001–4.000 kWh/anno, mentre l'80% presenta consumi tra 2.000 e 5.000 kWh/anno. Il consumo pro capite più frequente si attesta tra 750 e 1.000 kWh/anno e l'80% delle abitazioni manifesta consumi per metro quadrato compresi tra 16 e 45 kWh/anno.

Queste tendenze globali si riflettono in molti contesti urbani.

Con l'obiettivo di applicare quanto sviluppato in un contesto reale, si considera che le metropoli presentino problematiche complesse sotto molteplici punti di vista; in questo senso, la realizzazione di comunità energetiche rinnovabili (CER) può rappresentare una strategia efficace nell'ambito di una nuova visione di urbanizzazione sostenibile. Il contesto urbano preso in esame è quello di una città di medie dimensioni, classificata come grado 2 secondo la più recente classificazione urbanistica DEGURBA. In Italia la densità abitativa fotografata dall'Istat nel 2019 è rappresentata in figura 7.

La classificazione dei comuni si basa sulla contiguità geografica e su soglie minime di densità e popolazione calcolate su una griglia regolare con celle di 1 km² (Reg. UE 2017/2391). ISTAT, in collaborazione con Eurostat, ha predisposto tale classificazione sulla base del censimento della popolazione del 2011 (aggiornamento Eurostat 2018).

La classificazione distingue tre gradi di urbanizzazione:

Grado 1 – Città: zone densamente popolate;

Grado 2 – Piccole città e sobborghi: zone a densità intermedia;

Grado 3 – Zone rurali: aree scarsamente popolate.

Per garantire la coerenza tra i dati di irraggiamento solare e consumi energetici, il modello ABM è stato applicato al caso studio di Latina, città di medie dimensioni nel Centro Italia classificata DEGURBA Grado 2 (300-600 ab./km²).

Latina (127.000 abitanti, densità 461 ab. /km², 73 MWp FV installati) rappresenta paradigmaticamente circa 40 contesti italiani analoghi [Eurostat, 2018], prioritari per lo sviluppo delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) data la prevalenza di nuclei urbani <5.000 ab. (55% del totale; Legambiente, 2019). Non configura un outlier energetico (9° posto su 116 capoluoghi per kWh rinnovabili/ab.; Legambiente, 2019), presentando parametri replicabili e statisticamente robusti: consumi familiari ISTAT 2.800-5.000 kWh/anno, producibilità fotovoltaica 1.400 kWh/kWp, qualità della vita media (77°/107 province; Il Sole 24 Ore, 2024).

Costituisce benchmark per studi sulle CER e risulta generalizzabile a circa 10 milioni di cittadini italiani, oltre a contesti europei comparabili (Almere, NL: 450 ab./km²; Vitoria, ES: 500 ab./km²). La scelta si rivela quindi strategica per simulare transizioni energetiche distribuite in aree non-metropolitane, rappresentative dell'80% della popolazione UE [ASviS, 2018].

ANNI REGIONI	Classi di superficie territoriale (in km²)										Totale	
	Fino a 10,00		10,01-20,00		20,01-60,00		60,01-200,00		Oltre 200,01			
	Comuni	Densità (a)	Comuni	Densità (a)	Comuni	Densità (a)	Comuni	Densità (a)	Comuni	Densità (a)	Comuni	Densità (a)
2015	1.713	552	2.031	277	2.966	175	1.185	166	151	220	8.046	201
2016	1.687	558	2.014	278	2.961	175	1.183	166	153	217	7.998	201
2017	1.680	559	2.007	278	2.951	175	1.187	165	153	217	7.978	200
2018	1.669	561	1.992	279	2.951	175	1.188	164	154	216	7.954	200
2019 - PER REGIONE												
Piemonte	390	151	403	151	319	146	68	228	1	460	1.181	171
Valle d'Aosta/Vallée d'Aoste	8	147	13	65	37	68	14	11	2	10	74	38
Liguria	58	329	84	203	79	196	12	91	1	2.389	234	285
Lombardia	717	725	455	412	286	263	46	559	3	20	1.507	423
Trentino-Alto Adige/Südtirol	40	173	57	103	118	132	69	54	7	18	291	79
Bolzano/Bozen	9	265	14	129	49	179	38	36	6	17	116	72
Trento	31	154	43	94	69	95	31	79	1	27	175	87
Veneto	40	417	196	345	264	256	59	238	4	242	563	268
Friuli-Venezia Giulia	14	255	54	214	113	180	33	106	1	20	215	153
Emilia-Romagna	7	783	14	664	179	201	116	155	12	299	328	199
Toscana	5	811	19	525	99	230	134	159	16	83	273	162
Umbria	-	-	8	99	38	78	35	68	11	153	92	104
Marche	18	360	67	231	95	157	45	158	3	73	228	162
Lazio	27	159	100	213	176	184	67	189	8	1.034	378	340
Abruzzo	24	231	81	126	158	129	41	96	1	147	305	121
Molise	2	23	35	50	85	72	14	67	-	-	136	68
Campania	161	1.496	139	573	214	237	36	439	-	-	550	423
Puglia	26	433	39	354	97	257	72	199	23	167	257	205
Basilicata	-	-	6	43	57	51	61	53	7	68	131	55
Calabria	38	244	88	140	224	114	49	107	5	231	404	126
Sicilia	51	887	64	379	141	179	104	205	30	138	390	192
Sardegna	22	182	56	59	163	65	117	65	19	75	377	68
Nord-ovest	1.173	495	955	278	721	192	140	295	7	446	2.996	272
Nord-est	101	340	321	298	674	205	277	141	24	212	1.397	187
Centro	50	293	194	247	408	180	281	154	38	351	971	206
Sud	251	1.004	388	300	835	157	273	161	36	157	1.783	188
Isole	73	671	120	224	304	117	221	131	49	115	767	132
ITALIA	1.648	565	1.978	279	2.942	175	1.192	163	154	215	7.914	199

Fonte: Istat, Movimento e calcolo della popolazione residente annuale (R); Variazioni territoriali, denominazione dei comuni, calcolo delle superfici comunali (E)
(a) La densità è data dal rapporto tra la popolazione residente e la superficie in km².

Figura 7 Densità abitativa dei comuni italiani

3.1 Inquadramento generale

Secondo la classifica annuale sulla qualità della vita elaborata da “*Il Sole 24 Ore*”, Latina si posizionava all’87° posto nel 2023, evidenziando un posizionamento medio-basso a livello nazionale. Nel 2024, la provincia ha registrato un miglioramento, collocandosi al 77° posto su 107 province italiane, con un avanzamento di dieci posizioni rispetto all’anno precedente. Questo progresso riflette un’evoluzione positiva in alcune aree chiave, pur evidenziando criticità strutturali persistenti, in particolare legate alla sostenibilità ambientale, alla cultura e alla sicurezza.

Da un lato, si osserva una tendenza territoriale in miglioramento, sostenuta da dinamiche economiche e sociali in evoluzione, da una maggiore resilienza del tessuto produttivo locale e dalla progressiva digitalizzazione dei servizi pubblici. L’indagine si basa su 90 indicatori certificati, suddivisi in sei macroaree: ricchezza e consumi; affari e lavoro; ambiente e servizi; demografia e salute; giustizia e sicurezza; cultura e tempo libero, che consentono una valutazione articolata e comparabile della qualità della vita.

Latina mostra buone performance nei settori dell'occupazione e della solidità economica, in linea con la media regionale del Lazio. Inoltre, il territorio presenta potenzialità di sviluppo nei comparti tecnologico ed energetico, favoriti dai recenti programmi di transizione ecologica e dall'espansione delle CER. Tuttavia, permangono criticità che incidono sulla qualità complessiva del contesto:

Efficienza idrica insufficiente, con perdite superiori alla media nazionale;

Limitata offerta culturale, con spesa pro capite di circa 3 € rispetto alla media italiana di 13 €;

- Elevata incidenza di criminalità diffusa e incendi dolosi, penalizzando la percezione di sicurezza;
- Disparità sociali e carenza di servizi per giovani, donne e anziani, con effetti negativi sulla coesione sociale;
- Basso sviluppo delle fonti rinnovabili e limitata adesione alle iniziative locali di transizione ecologica.

Tali criticità evidenziano la necessità di politiche integrate che combinino innovazione tecnologica, partecipazione sociale e strategie di governance sostenibile per rafforzare la competitività e la qualità della vita urbana. In Tabella 17 si riportano i principali indicatori sintetici.

Tabella 17 Indicatori sintetici di confronto di Latina

Indicatore	Latina (2024)	Media nazionale	Posizione relativa
Qualità della vita	77 ^a / 107	-	Migliorata di 10 posizioni
Spesa culturale pro capite	3 €/ab	13 €/ab	100° posto
Efficienza rete idrica	Bassa	-	Critica
Sicurezza	Penalizzata	-	Tra le ultime

L'indagine si basa su dati ufficiali e certificati provenienti da ISTAT, Ministero dell'Interno, Ministero della Giustizia, INPS, AGCOM, SIAE, Banca d'Italia, oltre a istituti di ricerca e società specializzate. Il punteggio per ciascun indicatore varia da 0 a 1.000, attribuendo 1.000 punti alla provincia con la performance migliore e 0 alla peggiore; la classifica finale è determinata dalla media aritmetica dei punteggi delle sei macroaree tematiche.

Gli indici sintetici, elaborati dal Sole 24 Ore o da istituti terzi, consentono di rappresentare aspetti specifici della qualità della vita, tra cui sportività, ecosistema urbano, amministrazioni digitali, clima, bambini, giovani, anziani e donne. Tutti i dati sono disponibili in formato open data sulla piattaforma GitHub del Sole 24 Ore: Qualità della vita – Latina (<https://lab24.ilsole24ore.com/qualita-della-vita/latina>).

3.1.1 Demografia e nuclei familiari

Al censimento ISTAT 2022, Latina conta 127.859 abitanti distribuiti in 55.624 nuclei familiari, con una densità abitativa media di 461 abitanti/km² e una densità di famiglie pari a 221 famiglie/km² [72], [71]. La distribuzione della popolazione per composizione del nucleo familiare è sintetizzata nella Tabella 18.

Tabella 18 Distribuzione della popolazione per composizione del nucleo familiare

Numero Componenti	Famiglie	Famiglie/km ²	Abitanti/km ²
1	14.935	53,9	53,9
2	10.668	38,5	77,0
3	7.965	28,8	86,3
4	1.809	6,5	26,1
5	680	2,5	12,3
6 o più	567	2,0	~12
Totale	55.624	201	456

Questa composizione demografica evidenzia una predominanza di nuclei familiari di piccole dimensioni (1-2 componenti), che costituiscono circa il 46% del totale. Tale configurazione ha implicazioni dirette sulla domanda energetica residenziale e sulla propensione all'adozione di soluzioni di autoconsumo fotovoltaico.

3.2 Profilo energetico della città

I dati sui consumi elettrici del Comune di Latina (fonte: Terna, anno 2020) evidenziano un consumo elettrico complessivo di 2.312 GWh/anno [73], ripartito tra i seguenti settori (tabella 19):

Tabella 19 Consumi Elettrici per Settore - Latina (2020)

Categoria	Consumo Annuale (GWh)	Consumo Annuale (MWh)	Percentuale sul Totale
Agricoltura	124,1	124.100	5,4%
Industria	909,6	909.600	39,3%
Servizi (Terziario)	644,2	644.200	27,9%
Domestico	634,2	634.200	27,4%
Totale	2.312,1	2.312.100	100%

Il settore residenziale rappresenta una componente rilevante della domanda energetica complessiva, contribuendo a circa un quarto dei consumi totali. Tale settore costituisce pertanto un ambito prioritario per l'implementazione delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER), in virtù della natura distribuita dei consumi e della possibilità di adottare soluzioni decentralizzate basate sull'autoproduzione e sull'autoconsumo collettivo.

Un elemento strutturale che caratterizza i consumi residenziali è la presenza di una diseconomia di scala inversa, per cui il consumo energetico pro capite tende a diminuire all'aumentare del numero di componenti del nucleo familiare. Questo

fenomeno riflette una maggiore efficienza nell'uso condiviso di elettrodomestici, impianti e spazi abitativi, e rafforza l'interesse verso modelli di consumo collettivo come quelli promossi dalle CER.

Dal punto di vista territoriale, secondo i dati ufficiali di Terna (Statistiche Regionali, 2020), il consumo elettrico complessivo della Provincia di Latina ammonta a circa 2.312 GWh/anno. Assumendo una stima proporzionale basata sul peso demografico ed economico del capoluogo, il consumo del Comune di Latina può essere stimato in un intervallo compreso tra 450 e 480 GWh/anno, pari a circa il 19–21% del totale provinciale.

Per quanto riguarda la produzione da fonti rinnovabili, il Dossier Legambiente “Comuni Rinnovabili Lazio 2019”, su dati Terna 2017, indica per la Provincia di Latina una produzione fotovoltaica pari a 332,2 GWh/anno, mentre nel Comune di Latina risulta installata una potenza fotovoltaica di circa 73,5 MW. In coerenza con tali valori, i dati ISTAT 2019 stimano per il Comune di Latina una produzione complessiva da fonti rinnovabili pari a circa 94 GWh/anno, equivalenti a oltre 700 kWh per abitante, collocando il capoluogo al nono posto su 116 città italiane.

Il contributo del fotovoltaico rappresenta circa il 20% della produzione elettrica complessiva, confermando il ruolo crescente di questa tecnologia nel mix energetico locale e il potenziale di sviluppo di configurazioni di autoconsumo collettivo.

Nonostante i risultati positivi, il margine di miglioramento rimane significativo. Il potenziale energetico del territorio, particolarmente favorevole per irraggiamento solare e disponibilità di superfici installabili, è ben superiore ai valori attuali. Per accrescerne l'efficienza, si rende necessario:

- promuovere interventi di riqualificazione energetica degli edifici comunali ad alta intensità di consumo;
- semplificare e accelerare le procedure autorizzative per l'installazione di impianti a energie rinnovabili da parte dei privati;

- valorizzare strumenti di incentivo, integrandoli con modelli di gestione energetica di comunità;
- pianificare l'adeguamento delle reti elettriche locali, requisito essenziale per sostenere la crescita della generazione distribuita.

In Tabella 20 e in Tabella 21 si riportano parametri ambientali ed economici e la produzione di energia fotovoltaica.

Tabella 20 Impatti ambientali ed economici dei consumi

Categoria	Consumo Annuale (MWh)	Percentuale	Unità	Emissioni CO₂ (t)	Costo Annuale (€)	Consumo Pro Capite (kWh)
Residenziale	94.000	40%	Abitazioni	28.200	14.100.000	738
Commerciale	70.000	30%	Negozi e uffici	21.000	10.500.000	549
Industriale	50.000	20%	Impianti produttivi	15.000	7.500.000	392
Pubblica illuminazione	20.000	10%	Strade e piazze	6.000	3.000.000	157
Totale	234.000	100%		70.200	35.100.000	1.836

Tabella 21 Generazione da impianti fotovoltaici

Tipo di Impianto	Numero Impianti	Potenza Totale (MWp)	Potenza Media (kWp)	Produzione Annuale (MWh)
Residenziali	1.200	6,0	5	7.800
Commerciali	300	15,0	50	19.500
Industriali	50	25,0	500	32.500
Grandi impianti agrivoltaici	2	16,0	8.000	20.800
Totale	1.552	62,0	–	80.600

La produzione fotovoltaica copre circa un terzo del consumo elettrico totale cittadino. L'obiettivo realistico, nel breve-medio periodo, è il raggiungimento della neutralità energetica del settore residenziale, attraverso un aumento del numero di impianti domestici, l'integrazione di soluzioni di accumulo e l'implementazione di modelli di Comunità Energetiche Rinnovabili (CER).

L'efficientamento energetico diffuso e la collaborazione tra enti pubblici e privati rappresentano le chiavi per consolidare la transizione ecologica locale e sfruttare appieno il potenziale rinnovabile del territorio. In figura 8 si riportano i consumi energetici delle famiglie. Questi valori permettono di inserire nel modello su Netlogo valori credibili statistici credibili e condivisi per tracciarne l'importanza e la traiettoria di adesione o meno ad una comunità energetica.

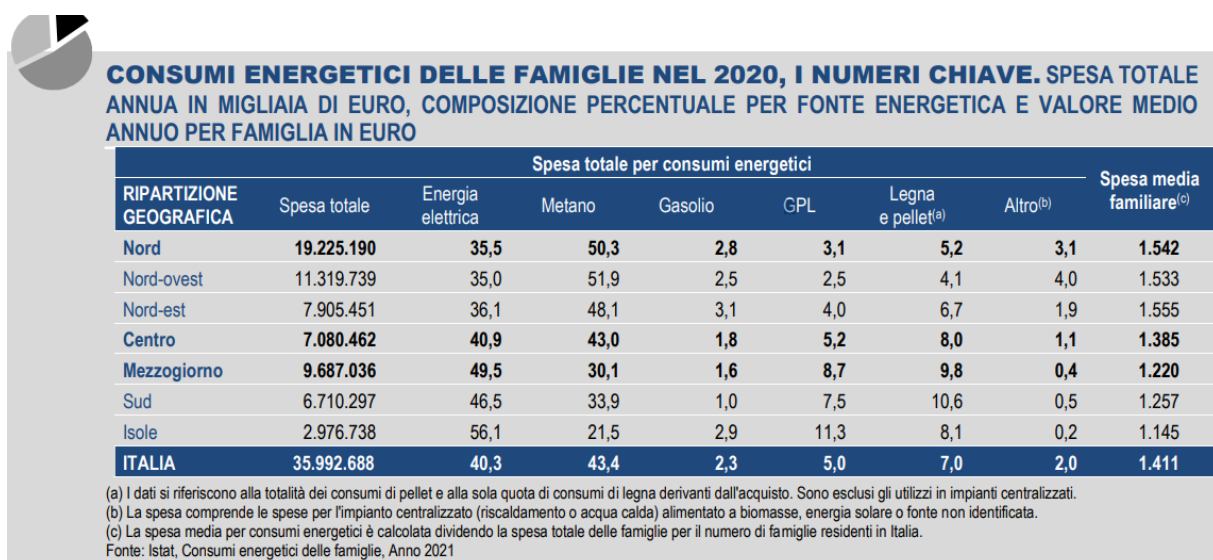


Figura 8 Consumi energetici delle famiglie nel 2021

3.3 Impianto fotovoltaico

La tecnologia fotovoltaica rappresenta la componente tecnologica principale della CER oggetto di studio. L'analisi integra aspetti tecnici, ambientali, economici e sociali secondo l'approccio ESG, fornendo i parametri di input per la successiva fase di simulazione ABM (Capitolo 4). I dati sono riferiti a un'area di 1 km² con densità abitativa di 250 abitanti/km², sebbene nelle simulazioni per motivi di calcolabilità si è

scelta una combinazione leggermente diversa. Inoltre come ipotesi asintotica si propone una copertura asintotica del 5% della superficie disponibile con impianti fotovoltaici.

La radiazione solare, in accordo con il simulatore PVGIS Dati caratteristici calati nella realtà di Latina e reperibili sul sito de [Institute for Energy and Transport](http://iet.jrc.ec.europa.eu/) (<http://iet.jrc.ec.europa.eu/>).

Il PVGIS fotovoltaico è un simulatore realizzato in collaborazione tra Joint Research Centre, in particolare dall'ESTI (European Solar Test). Le caratteristiche sono sintetizzate in Tabella 22, mentre la producibilità di energia elettrica è ripresa dalla figura 9.

Tabella 22 Radiazione solare su Latina

Caratteristica	Valore
Latitude (decimal degrees):	41.467
Longitude (decimal degrees):	12.904
Elevation (m):	27
Radiation database:	PVGIS-SARAH2
Slope:	37 deg. (optimum)
Azimuth:	-5 deg. (optimum)
Nominal power of the PV system (CIS) (kWp):	1.0
System losses (%):	14.0



PVGIS-5 estimates of solar electricity generation:

Provided inputs:

Latitude/Longitude: 41.467,12.903
 Horizon: Calculated
 Database used: PVGIS-SARAH3
 PV technology: Cryst Sil Original
 PV installed: 1 kWp
 System loss: 14 %

Simulation outputs

Slope angle: 0 °
 Azimuth angle: 0 °
 Yearly PV energy production: 1272.73 kWh
 Yearly in-plane irradiation: 1662.91 kWh/m²
 Year-to-year variability: 34.72 kWh
 Changes in output due to:
 Angle of incidence: -3.7 %
 Spectral effects: 0.54 %
 Temperature and low irradiance: -8.09 %
 Total loss: -23.46 %

Outline of horizon at chosen location:

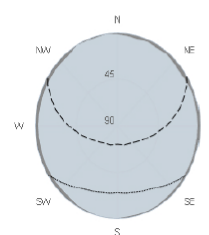


Figura 9 Producibilità per kWp

I dati teorici calati nella realtà impiantistica portano alla seguente situazione.

Per lo scopo che ci siamo ripromessi occorre individuare un legame tra la tecnologia, economia e finanza, e fattori ambientali.

Sebbene rudimentale il legame proposto è stato trovato nell'impianto fotovoltaico.

In particolare, con le caratteristiche riportate in Tabella 23, si riescono a collegare i diversi aspetti utili alla trattazione.

Tabella 23 Caratteristiche pannello fotovoltaico

Pannello FV	U.M.	
Dimensioni	mm	1135
	mm	1722
Potenza	Wp	400
Potenza per unità di superficie	W/m²	205
Superficie per kWp	m²/kWp	4,9

Con questi dati di partenza si individuano numeri caratteristici che saranno utili in un secondo momento, durante la simulazione ABM con Netlogo.

Un impianto fotovoltaico di piccola taglia, con potenza nominale pari a 1 kWp, installato nella provincia di Latina, è in grado di produrre in media circa 1.300 kWh di energia elettrica all'anno. Tale valore rappresenta la produzione specifica annua tipica delle aree dell'Italia centrale, caratterizzate da un buon irraggiamento solare medio e da condizioni climatiche favorevoli per l'efficienza dei moduli fotovoltaici.

La produzione energetica annuale subisce tuttavia una riduzione fisiologica stimata intorno allo 0,8% per anno, dovuta al naturale processo di invecchiamento dei moduli e al progressivo decadimento delle loro prestazioni. Considerando un ciclo di vita utile di 25 anni, e includendo la sostituzione dell'inverter dopo circa 10 anni di esercizio, la quantità complessiva di energia generata da un impianto di questa taglia è pari a circa 26.000 kWh nel corso dell'intera vita utile.

Tale energia corrisponde a 26 MWh di elettricità pulita, prodotta senza emissioni dirette di anidride carbonica (CO₂), senza il ricorso a combustibili fossili (carbone, gas naturale, petrolio) e senza implicare processi di combustione o radioattivi.

Dal punto di vista ambientale, l'energia generata da 1 kWp di potenza fotovoltaica consente di evitare l'immissione in atmosfera di circa 650 kg di CO₂ ogni anno. Su un orizzonte temporale di 25 anni, ciò equivale a un risparmio complessivo di circa 16 tonnellate di CO₂, rappresentando un contributo significativo alla mitigazione delle emissioni climalteranti e alla transizione verso un sistema energetico sostenibile.

Per quanto riguarda la configurazione fisica, un impianto da 1 kWp è generalmente costituito da 3 a 5 moduli fotovoltaici, a seconda della potenza unitaria dei pannelli (che può variare tra 200 e 350 Wp). L'area occupata da tale installazione è compresa tra 8 e 11 m² nel caso di montaggio su tetto inclinato, mentre può raggiungere 12–15 m² qualora l'impianto sia collocato a terra o su superficie piana, con strutture di sostegno dedicate.

Dal punto di vista economico, i costi medi di installazione di un impianto fotovoltaico da 1 kWp nella provincia di Latina si attestano tra 2.100 e 2.300 euro/kWp, comprensivi di progettazione, componentistica e posa in opera (“chiavi in mano”). Considerando una produzione media annua di 1.300 – 1400 kWh e un costo medio dell’energia elettrica pari a circa 0,23 €/kWh, il risparmio economico annuale può essere stimato in circa 300 €, che, in assenza di incentivi, consente un tempo di ritorno dell’investimento compreso tra 7 e 9 anni.

Nel complesso, un impianto fotovoltaico da 1 kWp installato nel territorio pontino rappresenta una soluzione energeticamente efficiente, ambientalmente sostenibile ed economicamente conveniente, contribuendo in modo tangibile agli obiettivi di decarbonizzazione e alle strategie di neutralità climatica delineate dal pacchetto europeo “Net Zero 2050”. Con queste premesse la costituzione di una comunità energetica sembrerebbe economicamente sostenibile.

La copertura ipotizzata del 5% (Tabella 24) delle superfici totale è conservativa, al netto delle perdite tipiche: tetti netti idonei 10-15% (strade/giardini 70%, ombre 15%, orientamento non-Sud 25%) [74], [75].

Tabella 24 Caratteristiche tecniche dell'impianto

Parametro	Valore	Unità di Misura	Note
Copertura massima ipotizzabile	5%	%	Percentuale superficie disponibile
Superficie disponibile	50.000	m ²	Per km ² di territorio
Energia specifica	1.400	kWh/(kWp·anno)	Producibilità standard
Energia specifica per superficie	287	kWh/(m ² ·anno)	
Potenza massima installabile	10.233	kWp	Per km ²
Energia annua teorica	14.326.134	kWh/(anno·km ²)	Produzione totale

La Tabella 25 riporta i possibili impatti qualora l'adesione sia tale da promuovere gli impianti fotovoltaici sulle superficie ipotizzate, alla luce dei parametri medi riportati in Tabella 26.

Tabella 25 Impatti Ambientali (per km²)

Indicatore Ambientale	Fattore di Conversione	Totale Risparmiato	Per Abitante	Unità
Climate Change				
CO ₂ risparmiata	0,53 kg/kWh	7.592.851	30.371	kg
Agricultural Land Depletion				
Superficie risparmiata	-	50.000	200	m ²
Fossil Fuel Depletion				
Combustibili fossili risparmiati	0,219 kg/kWh	3.143.563	12.574	kg

Nota: Per produrre 1 kWh elettrico vengono bruciati mediamente l'equivalente di 2,56 kWh sotto forma di combustibili fossili (rendimento 39%), di conseguenza vengono emessi nell'aria circa 0,53 kg di anidride carbonica. Ogni kWh prodotto dal sistema fotovoltaico evita quindi l'emissione di 0,53 kg di CO₂.

Tabella 26 Parametri Energetici di Riferimento

Parametro	Valore	Unità
Rendimento medio termoelettrico	0,391	-
Energia primaria per kWh elettrico	9	MJ
Potere Calorifico Inferiore (PCI) combustibili fossili	42	MJ/kg

Le ricadute sociali ed economiche (Tabella 27) con gli indicatori economici (Tabella 28) tratteggiano una situazione in cui le ricadute occupazionali ed economiche (Tabella 29) sono di notevole impatto macroeconomico.

Tabella 27 Impatti Economici e Sociali (per km²)

Voce	Fattore	Totale	Per abitante	Dettaglio
Investimento Iniziale				
Costo impianto	1.500 €/kWp	15.349.430 €	61.398 €	
Ricadute Occupazionali				
Manodopera (33% investimento)	50.000 €/ (anno-dipendente)	5.065.312 €	-	~101 dipendenti
Manutenzione (5% investimento)	50.000 €/ (anno-dipendente)	767.471 €	-	~15 dipendenti
Benefici Sociali				
Contributo sociale	120 €/MWh	1.719.136 €	-	Incentivo comunitario
Dinamica relazioni sociali		Da qualificare / quantificare	-	Senso di comunità

Tabella 28 Indicatori economici

Indicatore	Valore	Unità	Calcolo
Costo energia risparmiata	0,18 €/kWh	2.578.704 €	14.326.134 kWh × 0,18 €/kWh
Payback semplice	5,95	anni	Investimento / Risparmio annuo

La Tabella 29 rapporta al singolo abitante le grandezze ambientali, economiche e sociali considerate.

Tabella 29 Sintesi degli impatti per abitante

Dimensione	Indicatore	Valore per Abitante	Unità
Ambientale	CO ₂ risparmiata	30.371	kg
	Superficie risparmiata	200	m ²

	Combustibili risparmiati	12.574	kg
Economico	Investimento richiesto	61.398	€
	Risparmio energetico annuo	-	€
Sociale	Occupazione generata	0,46	posti/abitante
	Contributo sociale	-	€

3.4 Scenario di riferimento

Il modello di comunità basato su agenti è stato utilizzato per indagare lo sviluppo di una Comunità Energetica Rinnovabile (CER) nel territorio di una città italiana di medie dimensioni, ovvero Latina, il secondo comune più grande della regione Lazio con una superficie di 277 km². Il modello è stato creato facendo riferimento a schemi di comunità energetiche composti solo da utenze domestiche. In particolare, i profili energetici tipici sono stati ottenuti dai dati ISTAT [33] con riferimento a città a media densità di popolazione. La Tabella 30 illustra i dati delle famiglie, per classe di componenti, in termini di numero di nuclei familiari, numero di famiglie e numero di abitanti per unità di superficie. I dati disponibili si riferiscono all'ultimo censimento del 2022.

Tabella 30 Distribuzione dei nuclei familiari nel 2022

							Totale
Numero di componenti della famiglia	1	2	3	4	5	6 o più	
Famiglie	19.567	14.935	10.668	7.965	1.809	680	55624
Famiglie / km ²	70,6	53,9	38,5	28,8	6,5	2,5	201
Abitanti / km ²	70,6	107,8	115,5	115,0	32,7	14,7	456

La descrizione della famiglia/nucleo domestico è completata, nella Tabella 31, da dati statistici relativi ai profili energetici tipici forniti dai censimenti disponibili [46],

utilizzando nuovamente il numero dei componenti familiari come variabile discriminante.

Tabella 31 Consumo energetico medio per composizione del nucleo familiare

Numero Componenti	Consumo energetico medio (kWh/anno)
1	2.800
2	3.200
3	3.500
4	4.000
5	4.500
6 or more	5.000

L'ipotesi di lavoro del modello si basa su una griglia di 441 nuclei familiari, la cui composizione e i relativi consumi energetici sono identificati a partire dai dati ISTAT, considerando una densità abitativa media per il comune di Latina di circa 460 abitanti per km². Combinando la densità dei nuclei familiari con il consumo energetico medio per famiglia, è stato possibile estrapolare l'assetto iniziale necessario per l'esecuzione del modello agent-based della Comunità Energetica Rinnovabile (REC). Le condizioni al contorno della simulazione del modello ad agenti sono sintetizzate nella Tabella 32.

Tabella 32 Condizioni al contorno

	Data	Unità
Popolazione	441	Famiglie
Densità abitativa	~ 461	abitanti/km ²
Densità di famiglie	221	Famiglie / km ²
Superficie corrispondente	~ 2	km ²
Copertura ipotizzata	1 %	

Per quanto riguarda le condizioni iniziali del modello ad agenti, a ciascuna famiglia viene assegnato un valore di consumo energetico coerente con quanto riportato nella tabella 31, in funzione della composizione del nucleo familiare.

A ogni agente viene inoltre attribuito casualmente un valore compreso tra 0 e 1, in modo tale da rispettare la proporzione tra innovatori e ritardatari proposta dalla suddivisione di Rogers. Questo valore definisce la condizione iniziale del potenziale d'azione di ciascun individuo.

In modo analogo, il potenziale d'azione iniziale viene assegnato anche alle tre variabili successive: consapevolezza, comportamento ecologico e interesse economico, avendo supposto valore uguale tra i coefficienti che moltiplicano le variabili precedenti.

Infine, la Tabella 33 illustra i coefficienti scelti per descrivere le caratteristiche invarianti degli agenti economici, utilizzati per rappresentare il comportamento degli attori nel modello e per definire la convergenza del sistema attraverso soglie relative alla copertura energetica da fonti rinnovabili (RES) e al livello di adesione alla Comunità Energetica Rinnovabile (REC).

Tabella 33 Parametri utilizzati nella simulazione

Overall cost of energy	0,25	€/kWh
Cost-energy-REC	0,15	€/kWh
Energy production per kWp	1200	kWh / (kWp x year)
Threshold-adhesion	0,67	variabile
RES energy coverage	1	PV energy/REC energy demand

4 SIMULAZIONE E ANALISI DEI RISULTATI

Il programma sviluppato in NetLogo simula il comportamento dei cittadini rispetto all'adesione a una comunità energetica rinnovabile (REC), integrando dinamiche sociali, economiche e ambientali. Ogni cittadino è modellato come un agente con caratteristiche individuali (consapevolezza, comportamento ecologico, interesse economico, influenza sociale) che evolvono attraverso interazioni con i vicini, l'impatto delle politiche di governance (educazione e incentivi) e il confronto tra costo dell'energia della REC e prezzo di mercato. La decisione di aderire si basa sull'"action-potential", un indicatore sintetico calcolato tramite coefficienti che pesano i diversi fattori culturali e sociali, e confrontato con una soglia di adozione. Il modello tiene traccia di variabili globali come il consumo energetico totale, il bilancio tra produzione e consumo, le emissioni di CO₂, la copertura da fonti rinnovabili e il benessere sociale aggregato (ASW), calcolato attraverso componenti ambientali, economiche e sociali. Attraverso grafici e istogrammi, il programma permette di monitorare l'evoluzione temporale della comunità, valutando come le scelte individuali e gli interventi esterni influenzino la diffusione della REC e i suoi benefici complessivi.

Operativamente l'algoritmo è suddiviso in due programmi. Il primo modella l'aspetto psico sociale ("ABM per CER") mentre il secondo è rivolto all'aspetto energetico economico ("Ottimizzazione CER")

4.1 Implementazione del modello ABM in Netlogo

4.1.1 Architettura computazionale del modello

L'implementazione del modello Agent-Based descritto nella Sezione 2.2.2 è stata realizzata mediante NetLogo 6.0, un ambiente integrato specializzato nella programmazione di sistemi multi-agente. NetLogo fornisce un linguaggio di programmazione dichiarativo intuitivo, ideale per prototipare e testare modelli complessi con migliaia di agenti interagenti. La scelta di NetLogo è motivata da tre

fattori principali: (1) diffusione consolidata nella comunità di ricerca dedicata agli ABM; (2) possibilità di visualizzazione interattiva in tempo reale dell'evoluzione del sistema; (3) facilità di esportazione dei dati verso ambienti di analisi statistica (R, Python) per l'analisi successiva.

L'architettura computazionale si articola in tre livelli:

Livello 1 - Ambiente (Patches) Lo spazio è discretizzato in una griglia di 21×21 patch (441 patch totali), ciascuna rappresentante un nucleo familiare. Ogni patch contiene le seguenti proprietà:

- energia-consumata: Consumo energetico annuale del nucleo [kWh]
- energia-prodotta: Energia prodotta da pannello solare (se installato) [kWh]
- bilancio-energetico: Produzione – Consumo [kWh]
- stato-patch: Stato di accettabilità (0 = non idonea, 1 = idonea per FV)

Livello 2 - Agenti (Turtles) Ogni patch ospita un agente (turtle) rappresentante il nucleo familiare. L'agente è caratterizzato da:

- Attributi strutturali: ID, posizione spaziale [x,y], numero componenti famiglia
- Attributi comportamentali: consapevolezza (c1), comportamento ecologico (c2), interesse economico (c3)
- Attributi decisionali: potenziale d'azione (ap), soglia adesione (adoption-threshold), stato di adesione (0/1)
- Attributi finanziari: bilancio economico individuale, ricavi, spese

Livello 3 - Procedure e Dinamiche. Le procedure principali gestiscono l'evoluzione temporale del sistema secondo una logica step-by-step, dove ogni tick rappresenta un passo temporale, che nel caso del programma dedicato alla valutazione tecnico-economica rappresenta giorno di simulazione, mentre nel programma dedicato all'analisi psico-sociale il tick è la separazione tra un prima e un dopo.

Per ragioni di efficienza computazionale in ambiente NetLogo Web, le variabili sintetiche f5-f12 sono state mappate nel codice attraverso gli identificativi contratti (es. BSA per Benessere Sociale Aggregato (ASW), resilience per resilience-metric), mantenendo invariata la semantica funzionale descritta nel framework teorico.

4.1.2 Struttura degli agenti e relazioni spaziali

Ogni agente (turtle) è dotato di una funzione di decisione che integra molteplici fattori (confronta paragrafo 2.2). Il potenziale d'azione di un agente è calcolato come:

$$ap_i(t) = f(\text{consapevolezza}, \text{incentivi}, \text{influenza_social})$$

dove il potenziale d'azione dipende da:

1. Consapevolezza ambientale c1: Sensibilità ai benefici ambientali (fattore interno)
2. Incentivi economici (policy slider): Sussidi, sconti, agevolazioni
3. Influenza sociale: Effetto della reputazione dei vicini (entro raggio di 2 patch)

La decisione di aderire alla CER al time step t è governata dal confronto tra il potenziale d'azione e la soglia di adesione:

$$\text{Adesione}_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{se } ap_i(t) \geq \text{adoption_threshold}_i \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Relazioni spaziali e network: gli agenti interagiscono direttamente solo con i vicini geografici (Moore neighborhood, raggio = 2 patch). Questa scelta simula il fatto che le decisioni di adesione a una CER sono influenzate principalmente dalle conoscenze e dalle esperienze di persone fisicamente prossime. La propagazione delle informazioni avviene mediante diffusione spaziale: se un agente aderisce, aumenta la probabilità che i vicini aderiscano nei tick successivi (effetto tipping point di Schelling).

4.1.3 Procedure principali di esecuzione

Setup

La procedura “setup” inizializza il modello ed è eseguita una sola volta all'avvio:

1. Creazione dell'ambiente: Genera griglia 21×21 patch
2. Generazione agenti: Crea 441 turtle (uno per patch)
3. Assegnazione attributi: Per ogni agente:
 - Assegna consumo energetico.
 - Assegna composizione nucleo da distribuzione ISTAT
 - Assegna potenziale d'azione da distribuzione di Rogers (innovatori 2,5%, early adopters 13,5%, etc.)
 - Assegna coefficienti comportamentali c1, c2, c3 casualmente da uniforme
4. Calcolo energia solare: Calcola energia potenzialmente producibile per ciascuna patch quotidianamente.

Go (Step di Simulazione)

Ogni agente:

- aggiorna il valore di consapevolezza ambientale. Incrementa c1 proporzionalmente alle campagne educative (slider education-effort)
- Valuta incentivi economici. Legge valore slider subsidies (0-1)
- Aggiorna interesse economico.
- Calcola potenziale d'azione
- Applica influenza sociale dai vicini: $ap = ap + (\text{social_influence} / \text{num_vicini})$
- Decide adesione

Se $ap \geq adoption_threshold$: agente aderisce (stato = 1)

Altrimenti: rimane esterno (stato = 0)

- Calcola bilancio energetico ed economico

Energia prodotta = $\min(\text{domanda}, \text{capacità FV disponibile})$

Ricavo = $\text{energia_prodotta} * \text{prezzo_vendita} + \text{risparmio_autoconsumo}$

Utile = $\text{ricavo} - \text{costi_manutenzione} - \text{ammortamento_investimento}$

Il “World” aggiorna variabili aggregate:

$ASW = (\text{benefici_ambientali} + \text{benefici_sociali} + \text{benefici_economici})$

Tasso adesione = $(\text{numero aderenti}) / (\text{totale agenti})$

Infine si registrano le variabili di monitoraggio (Scrittura su file: tick, adesione_totale, ASW, bilancio_energetico_netto)

4.1.4 Implementazione della teoria di Axelrod

La teoria di Axelrod (1984) dimostra che, in contesti di interazione ripetuta tra agenti limitatamente razionali, la strategia "Tit-for-Tat" (coopera al primo round; successivamente copia le mosse dell'avversario) produce cooperazione evolutivamente stabile. Questo principio è implementato nell' “ ABM per CER” nel modo seguente:

Setup

Ogni agente j ha una propensione iniziale alla cooperazione:

$\text{cooperation-propensity}(j) \sim \text{Uniform}(0.3, 0.7)$

rappresentando eterogeneità nei valori e nelle preferenze.

Dinamica interattiva (ogni tick):

Per ogni coppia di agenti (i, j) con distanza spaziale < 1 :

1. Se agente j aveva aderito alla CER nel tick precedente: $\text{cooperation-propensity}(i) \leftarrow \text{cooperation-propensity}(i) + 0.08$ (l'osservazione di cooperazione aumenta propensione)

2. Se agente j aveva rifiutato nel tick precedente: $\text{cooperation-propensity}(i) \leftarrow \text{cooperation-propensity}(i) - 0.12$

(asimmetria: punire la defezione è più deterrente che premiare la cooperazione)

3. Soglia di decisione:

Se $\text{cooperation-propensity}(i) > 0.60$:

agente i decide di aderire alla CER nel tick successivo

Secondo Axelrod, questo modello dovrebbe produrre:

- Basso tasso di cooperazione iniziale (tick 1-50): atteso $\approx 2-5\%$
- Accelerazione nel tempo (tick 50-150): in presenza di educazione
- Stabilità (tick 150+): raggiungimento di equilibrio cooperativo

4.2 ABM per CER

All'interno del programma "ABM per CER" sono state usate le variabili indicate in Tabella 33, 34, 35 suddivise per l'ambito energetico, l'ambito ambientale e l'ambito sociale.

Il seguente programma mira a verificare le implementazioni tra tutti gli attori precedentemente indicati.

4.2.1 Parametri della sperimentazione

Sono stati individuati tre “dinamiche” volti a indagare l’andamento nel lungo periodo con 3000 ticks, nel medio periodo con 600 ticks, e nel breve periodo con 100 ticks.

Le simulazioni sono state eseguite una prima volta con 2700 run con una ripetizione di 30 run per ciascuna configurazione e successivamente con 900 run. I dati raccolti la prima volta con un foglio csv superavano i 500 Mb, superando la capacità di gestire tale mole di dati da parte anche di Excel. La seconda volta riducendo il numero delle configurazioni si sono avuti poco meno di 50 Mb di dati.

La popolazione iniziale è di 441 agenti (famiglie) distribuiti secondo la composizione demografica di Latina:

- 34% nuclei monocomponenti,
- 27% coppie,
- 19% nuclei con tre componenti
- 14% nuclei con 4 componenti
- 3% nuclei con 5 componenti
- 1% nuclei con 6 o più persone

Ogni run parte con una distribuzione casuale correlata alla distribuzione di Rogers.

Tabella 34 Descrizione delle variabili energetiche

Variabile	Tipo	Logica/Funzione
total-consumption	Stato	Consumo energetico totale del singolo agente, aggiornato nel tempo.
total-consumption-tot	Stato	Somma dei consumi energetici di tutti i cittadini che hanno aderito alla REC. Serve per dimensionare l’impianto e calcolare indicatori globali.
energy-balance	Stato	Bilancio tra produzione e consumo della comunità (produzione - consumo).

co2-level	Stato	Livello totale di CO ₂ emessa. Utile per valutare l'impatto ambientale.
resilience	Stato	Misura la resilienza della comunità (non ancora sviluppata nei dettagli, ma predisposta).
consumption	Stato	Consumo giornaliero di un cittadino o medio della comunità.
ASW	Stato	Benessere Sociale Aggregato, calcolato come combinazione di più contributi (CO ₂ , suolo, carburanti, impatto sociale).
esigenze-elettriche	Stato	Somma delle esigenze elettriche di tutti i cittadini.
energy	Stato	Energia consumata dal cittadino (inizializzata al consumo individuale).
energy-production	Stato	Produzione energetica totale della REC (somma della radiazione solare).
ptr	Stato	Media dell'action-potential di tutti i cittadini (indicatore di propensione all'adesione).
RES-energy-coverage	Stato	Quota di copertura dei consumi con energia rinnovabile (consumi REC / consumi totali).
MWp1	Stato	Potenza in MWp dell'impianto fotovoltaico equivalente necessario a coprire il consumo.

Dall'interazione delle diverse variabili si hanno le modifiche che si hanno sul programma, in figura 10 si riporta la schermata principale con lo sviluppo delle variabili.

Tabella 35 Variabili ambientali

Variabile	Tipo	Logica/Funzione
k1, k2, k3, k4, k5	Coefficienti	Pesi per il calcolo dell'action-potential dei cittadini.
g1, g2, g3, g4	Coefficienti	Pesi per il calcolo dei diversi contributi al Benessere Sociale Aggregato (ASW).

co2-reduction	Parametro	Coefficiente di riduzione delle emissioni di CO ₂ grazie alla REC.
spare-soil	Parametro	Coefficiente legato al risparmio di suolo.
spare-fuel	Parametro	Coefficiente legato al risparmio di combustibili fossili.
social-impact	Parametro	Coefficiente legato all'impatto sociale dell'iniziativa.
ASW-CO2	Variabile dipendente	Componente di ASW legata alla riduzione di CO ₂ .
ASW-soil	Variabile dipendente	Componente di ASW legata al risparmio di suolo.
ASW-fuel	Variabile dipendente	Componente di ASW legata al risparmio di combustibili.
ASW-social	Variabile dipendente	Componente di ASW legata all'impatto sociale.

Tabella 36 Variabili sociali

Variabile	Tipo	Logica/Funzione
education-effort	Slider	Intensità dello sforzo educativo della governance, influenza l'aumento di consapevolezza.
subsidies (o incentives)	Slider	Incentivi/sussidi economici che rendono più vantaggioso aderire alla REC.
adoption-threshold	Slider	Soglia minima di action-potential oltre la quale un cittadino aderisce alla REC.
participants	Slider	Numero target di cittadini che si desidera raggiungere come membri REC.
REC_energy_cost	Slider	Costo unitario dell'energia all'interno della REC.
energy-price	Slider	Prezzo di mercato dell'energia (scenario di riferimento).

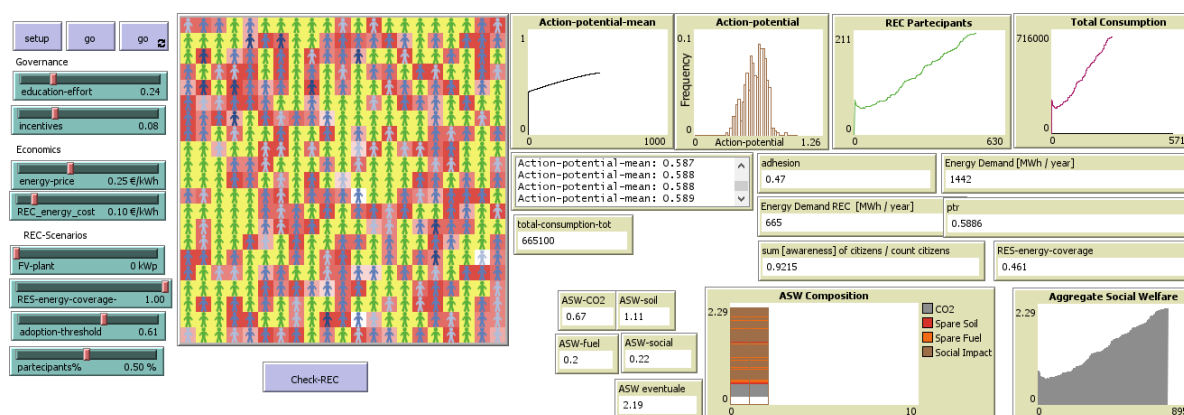


Figura 10 World con plot del programma in Netlogo

A questo punto è stata avviata una campagna sistematica di simulazioni attraverso il tool “BehaviourSpace” integrato nell’ambiente di modellazione NetLogo, con l’obiettivo di analizzare in modo parametrico le dinamiche emergenti del modello e di verificare la sensibilità del sistema rispetto alle principali variabili di controllo.

Le regole decisionali che determinano le azioni degli agenti seguono la logica computazionale illustrata nel paragrafo precedente, assicurando coerenza metodologica tra la fase di modellazione concettuale e quella di implementazione numerica.

Sono stati definiti tre scenari principali di simulazione, elaborati sulla base di considerazioni preliminari relative al peso del fattore economico nel processo di adesione dei cittadini alla Comunità Energetica Rinnovabile (CER), nonché all’importanza oggettiva di parametri economico-finanziari quali il tempo di ritorno dell’investimento (Payback Time) e il valore attuale netto (Net Present Value, NPV). Gli scenari sono stati strutturati al fine di evidenziare le differenti risposte del sistema in funzione della variazione congiunta di due variabili chiave:

- Incentivi economici (*incentives*), mirati a favorire la partecipazione attraverso benefici monetari diretti o indiretti;

- Campagne di sensibilizzazione (*education-effort*), destinate a incrementare il livello di consapevolezza e la propensione individuale verso comportamenti sostenibili.

L'approccio adottato consente di valutare quantitativamente l'interazione tra leve economiche e fattori socioculturali, analizzando la dinamica di diffusione dell'adesione e fornendo un quadro comparativo sull'efficacia relativa delle diverse strategie di governance per la promozione delle CER.

4.3 Ottimizzazione CER

Questo programma in NetLogo è un modello che simula e propone una ottimizzazione tecnico-economica di una Comunità Energetica Rinnovabile (CER). Integra aspetti energetici, economici e finanziari su base giornaliera e annuale, usando dati di consumo e produzione caricati da un file CSV.

Il modello è strutturato in quattro aree principali: inizializzazione dei dati, ambito energetico, ambito economico e ambito finanziario, collegate in sequenza e con retroazioni per consentire una valutazione complessiva delle configurazioni possibili. La prima fase riguarda l'inizializzazione dei dati. In questa fase il modello importa da file esterni (tipicamente in formato CSV) i valori di produzione e consumo energetico su base giornaliera. Tali dati vengono preprocessati e organizzati in tabelle interne, per poter essere utilizzati nelle simulazioni. Contestualmente vengono definiti gli agenti della simulazione, che rappresentano i membri della CER e sono distinti in *consumer* (solo consumatori), *producer* (solo produttori) e *prosumer* (produttori-consumatori). Ogni agente viene caratterizzato da un insieme di attributi relativi a consumi, produzione, bilancio energetico, ricavi e utile.

La seconda area è quella energetica. Il modello calcola il bilancio energetico giornaliero e annuale della comunità, tenendo conto della produzione e dei consumi aggregati. In questa fase vengono quantificate la quota di energia autoconsumata, l'energia

disponibile in surplus e l'eventuale deficit energetico. L'output di questa sezione è il bilancio energetico annuale, che rappresenta la base per l'analisi economica.

L'area economica utilizza come input il bilancio energetico per determinare i flussi di costi, ricavi e spese della comunità. I costi comprendono il costo iniziale di impianto, i costi fissi e i costi variabili legati alla gestione. I ricavi derivano sia dal risparmio ottenuto tramite autoconsumo sia dall'eventuale vendita dell'energia in surplus. La differenza tra ricavi e costi consente di calcolare l'utile annuale e totale, nonché di aggiornare la distribuzione economica tra i diversi agenti. In questa fase vengono generati anche indicatori economici come il costo unitario di produzione, il totale delle spese e il saldo complessivo della comunità.

L'area finanziaria integra i risultati economici per valutare la sostenibilità dell'investimento nel tempo. Qui vengono calcolati il punto di pareggio BEP (break-even point), ossia l'anno in cui i ricavi cumulati eguagliano i costi sostenuti, e il Valore Attuale Netto (VAN), tramite l'applicazione di un tasso di sconto. Questi indicatori consentono di confrontare scenari alternativi e valutare la convenienza economica della CER su orizzonti pluriennali. E' in fase di implementazione la sezione "**ottimizzazione**", che esplora diverse configurazioni di parametri, in particolare il numero di consumer e la potenza installata (kWp), al fine di massimizzare l'utile complessivo della comunità. L'ottimizzazione si basa sulla memorizzazione e confronto delle configurazioni simulate, selezionando quelle che garantiscono i migliori risultati sia dal punto di vista energetico che economico-finanziario.

In sintesi questo modello permette di:

1. **Simulare il funzionamento energetico** di una CER su base giornaliera e annuale.
2. **Valutare l'impatto economico e finanziario** (costi, ricavi, utile, punto di pareggio).
3. **Ottimizzare configurazioni** (numero di consumer e potenza installata) per massimizzare l'utile.

4. **Visualizzare in tempo reale** l'andamento energetico ed economico tramite grafici.

È uno strumento utile sia per **analisi tecnico-economiche** delle CER, sia per esplorare scenari di governance e partecipazione.

La logica di funzionamento e l'architettura del sottoprogramma dedicato all'ottimizzazione energetica sono sintetizzate nello schema di Figura 11.

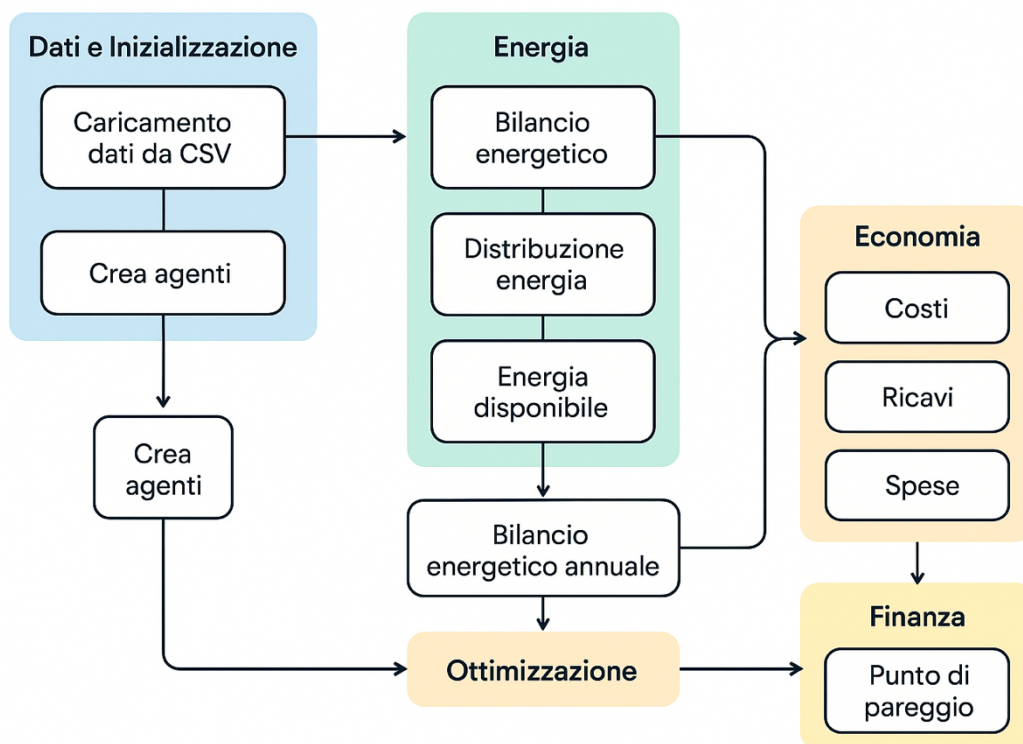


Figura 11 Schema del programma “Ottimizzazione CER”

Struttura principale del modello

1. Estensioni usate

- csv e table → per leggere e memorizzare i dati da file e organizzare costi/ricavi.

2. Variabili globali

Il modello gestisce molte variabili, suddivise in gruppi:

- **Energetiche:** energia consumata, prodotta, bilancio giornaliero/annuale, autoconsumo, energia disponibile.
- **Economiche:** costi (impianto, manutenzione, variabili, fissi), ricavi (vendita, risparmio), spese, utile, punto di pareggio.
- **Finanziarie:** tasso di sconto, VAN (Valore Attuale Netto), flusso di cassa.
- **Controllo e memoria:** anno, tempo, tabelle di dati, configurazioni migliori, grafici.

3. Agenti (turtles)

Tre tipi di attori della CER:

- **Consumer** (solo consumatori, blu).
- **Producer** (solo produttori, verdi).
- **Prosumer** (produttori-consumatori, gialli).

Ogni agente ha attributi come energia consumata/prodotta, bilancio, utile, ricavi e quota di energia virtuale.

4. Procedure principali

- **setup:** inizializza l'ambiente, legge i dati da CSV, crea gli agenti, calcola il costo iniziale dell'impianto.
- **go:** ciclo di simulazione → calcola il bilancio energetico giornaliero, aggiorna i grafici, ferma la simulazione dopo un anno (365 tick).
- **bilancio-energetico-CER:** calcolo dei consumi, produzione e bilanci per consumatori, produttori e prosumer.
- **go-anno:** chiude l'anno, aggiorna tabelle economiche, calcola costi/ricavi annuali e mostra output.
- **calcola-indici:** elabora indicatori energetici (produzione/consumi totali, autoconsumo, bilancio) ed economici (utile, spese, costi variabili/fissi, ricavi totali).
- **Break-even-Point:** verifica il raggiungimento del punto di pareggio economico.

- **stampa-grafici:** aggiorna grafici di consumo, produzione, bilanci, costi/ricavi e utile.
- **caricamento-dati:** legge i dati da file CSV (consumi e produzione giornalieri), corregge i separatori, li memorizza in una tabella.
- **ottimizza:** esplora configurazioni (numero di consumer e potenza installata kWp) per trovare la migliore in termini di utile.
- **Funzioni di supporto:** pulizia stringhe, sostituzione caratteri, memorizzazione utile massimo, calcolo VAN (bozza).

Gli indicatori calcolati sono i seguenti:

- **Energetici:** autoconsumo, bilancio energetico, surplus/deficit, produzione e consumo annuali.
- **Economici:** utile annuale e totale, ricavi (da risparmio e vendita energia), costi fissi/variabili, costo unitario di produzione.
- **Finanziari:** punto di pareggio, valore attuale netto (in bozza).
- **Ottimizzazione:** migliore configurazione tra consumer e potenza installata.

Mentre la sezione di visualizzazione offre le seguenti opportunità:

- **Bilancio Energetico** (produzione, consumo, bilancio).
- **Energia vs Tempo.**
- **Costi vs Ricavi** (incluso utile).
- **Analisi Economica** (ricavi e spese giornaliere).
- **Prosumer** (utile e ricavi).

Dal punto di vista economico-finanziario in Tabella 37 si riportano le variabili utilizzate.

Tabella 37 Variabili generali usate nel programma

Variabile	Logica
tasso-di-sconto	Tasso di sconto usato per attualizzare i flussi di cassa e calcolare il VAN.
costo_kWh_acquistato	Prezzo di acquisto dell'energia (€/kWh) per i consumatori.
costo_kWh_venduto	Prezzo di vendita dell'energia (€/kWh) per prosumer o produttori.
tasso_di_autoconsumo	Percentuale di autoconsumo prevista per la CER.
num-giorni	Numero di giorni nell'anno della simulazione (es. 365).
costo-impianto	Costo totale dell'impianto fotovoltaico e accumulo (BES), può derivare da slider kWp e BES.

La Tabella 38 riporta le variabili “energetiche” utilizzate nel programma e similmente la Tabella 39 riporta le variabili “economiche”.

Tabella 38 Variabili energetiche usate nel programma

Variabile	Logica
energia-consumata-tot	Energia totale consumata nel tick corrente o cumulata.
energia-prodotta-tot	Energia totale prodotta nel tick corrente o cumulata.
dati-giorno	Lista dei dati giornalieri di consumo e produzione per il giorno corrente.
bilancio-energetico-giorno	Differenza tra energia prodotta e consumata nel giorno corrente.
bilancio-energetico-anno	Somma dei bilanci energetici giornalieri nell'anno.
energia-consumata-anno	Energia totale consumata nell'anno da tutti gli agenti.
energia-prodotta-anno	Energia totale prodotta nell'anno da tutti gli agenti.
energia-prodotta-tick	Energia prodotta nel singolo tick da tutti gli agenti.
energia-consumata-tick-tot	Energia consumata nel singolo tick da tutti gli agenti.
energia-prodotta-tick-tot	Energia prodotta nel singolo tick da tutti gli agenti.
energia-consumata-totale	Energia consumata cumulativa dalla simulazione iniziale.
energia-prodotta-totale	Energia prodotta cumulativa dalla simulazione iniziale.
energia-virtuale-tick	Energia virtuale calcolata per tick e distribuita agli agenti.
Energia-virtuale-anno	Energia virtuale cumulata nell'anno.
delta-max	Differenza massima positiva tra energia prodotta e consumata osservata nei tick.
delta-min	Delta minimo osservato tra produzione e consumo.
delta	Differenza corrente tra energia prodotta e consumata in un tick.
tot_delta+	Somma dei delta positivi tra produzione e consumo.
energia-disponibile	Energia totale disponibile da distribuire tra gli agenti.
energia-virtuale-tot	Energia virtuale cumulativa per tutti gli agenti.
energia-disponibile-per-agente	Energia disponibile per ciascun agente consumer.
consumo-virtuale	Energia virtuale assegnata agli agenti consumer.

Tabella 39 Variabili economiche

Variabile	Logica
van	Valore Attuale Netto della CER, calcolato tramite flussi di cassa attualizzati.
ricavo-tick	Ricavo totale ottenuto dagli agenti nel tick corrente.
profitto-tick	Utile calcolato nel tick corrente.
ricavo-anno	Ricavo cumulativo annuale.
utile-anno	Utile annuale della CER (ricavi - costi).
costo-tick	Costo sostenuto nel tick corrente (manutenzione, ammortamento).
costo-anno	Somma dei costi annuali.
producer_ricavi-tick	Ricavi dei produttori nel tick corrente.
producer_ricavo-anno	Ricavi dei produttori cumulati annualmente.
costo-manutenzione	Manutenzione annuale come % del costo impianto.
ammortamento	Ammortamento annuale dell'impianto.
produzione-20anni	Stima della produzione complessiva in 20 anni.
flusso-cassa	Flusso di cassa cumulativo della CER.
costo-produzione-kWh-calcolato	Costo unitario dell'energia prodotta considerando impianto, ammortamento e manutenzione.
bilancio-annuale	Lista dei bilanci annuali della CER.
ricavi-annuali	Lista dei ricavi annuali della CER.
ricavo-risparmio	Ricavo derivante dal risparmio energetico dei prosumer.
tempo	Variabile temporale per i plot (tick o anno).
punto-di-pareggio	Tick / anno in cui si raggiunge il break-even point.
ricavo	Ricavo corrente (giornaliero o tick).
ricavo-totale	Ricavo cumulativo della simulazione.
ricavo-vendita	Ricavo derivante dalla vendita dell'energia eccedente.
spesa	Spesa corrente (giornaliera o tick) degli agenti.
spesa-tick	Spesa cumulata nel tick corrente.
spesa-anno	Spesa cumulata annualmente.
spesa-totale	Spesa cumulativa della simulazione.

utile	Utile corrente di un agente o della CER.
utile-tick	Utile totale nel tick corrente.
utile-tot	Utile totale cumulativo.
utile-cer	Utile complessivo della CER.
num-consumer-cer	Numero di agenti consumer nella CER.
ricavo-cer	Ricavo complessivo della CER.
costo-fisso	Costo fisso dell'impianto.
costo-variabile	Costo variabile legato alla produzione di energia.
costo-totale	Somma dei costi fissi e variabili.
spesa-no-fv	Spesa senza impianto fotovoltaico.
spesa-no-fv-tot	Spesa totale senza FV.
utile-anno-prosumer	Utile annuale dei prosumer.
spesa-con-fv	Spesa annuale con impianto fotovoltaico.
costo-variabile-unitario	Costo variabile unitario per kWh prodotto.
spesa-con-fv-tot	Spesa totale annuale con FV.
risparmio	Risparmio ottenuto grazie all'autoconsumo.
migliore-utile	Miglior utile registrato durante le simulazioni ottimizzate.
migliore-configurazione	Configurazione di agenti e kWp che massimizza l'utile.
messaggio?	Flag per segnalare se il punto di pareggio è già stato raggiunto.

4.4 Risultati della simulazione

4.4.1 Setup computazionale

Le simulazioni sono state sviluppate in ambiente NetLogo 6.0 ed eseguite su architettura AMD A12 (7th Gen, 8GB RAM), con un tempo medio di calcolo di 5 ore per set da 900 iterazioni (2000 tick). L'elaborazione statistica e la validazione dei dati grezzi (0 NaN rilevati, test di normalità) sono state effettuate tramite librerie Python in ambiente Google Colab. L'analisi si concentra sulla città di Latina, utilizzata come

caso studio per un contesto urbano a media densità, con dati sui consumi domestici derivati dagli annuari ISTAT.

La Figura 12 mostra l'interfaccia di NetLogo di un'esecuzione di simulazione con gli slider e i parametri considerati, oltre all'output in tempo reale, visibile tramite i diversi plot e i monitor.

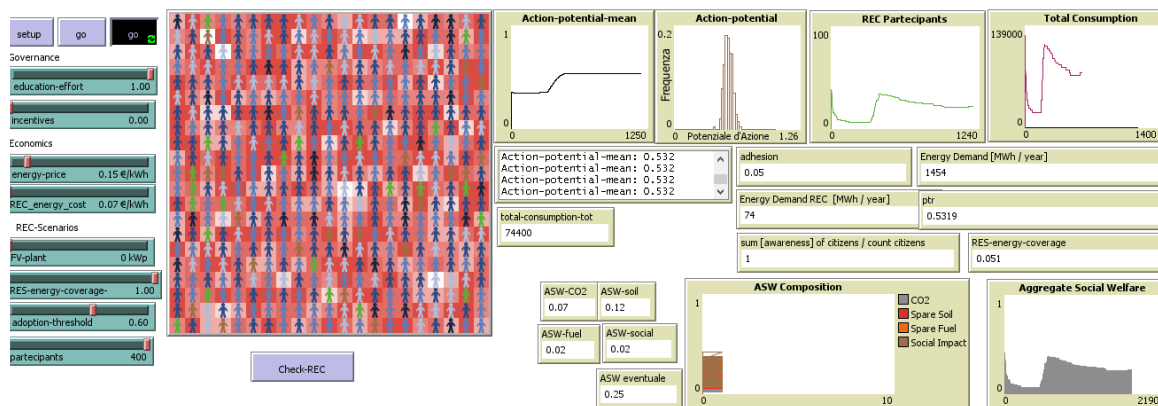


Figura 12 Interfaccia di simulazione NetLogo con parametri di governance, world grid e plot di output in tempo reale.

4.4.2 Risultati tecnico-economici

Il modello ha inizialmente confrontato la produzione oraria annuale dell'impianto fotovoltaico con la domanda aggregata delle famiglie per calcolare il costo effettivo dell'energia prodotta dalla Comunità Energetica Rinnovabile (CER). Le simulazioni indicano un valore asintotico minimo del costo del kWh pari a 70 €/MWh, sebbene l'impatto economico dei diversi utilizzi dei sistemi di accumulo elettrico (BES) per tecnologia, scelta impiantistica e costo di installazione debba essere analizzato con maggiore attenzione.

Tale valore risulta essere in linea con i valori di benchmark internazionali; in figura 13 vengono riportati gli intervalli del LCOE (Costo Livellato dell'Energia), in funzione delle diverse tecnologie adottabili.

L'aumento del tasso di adesione comporta:

- maggiore potenza installata (kWp),

- migliore allineamento produzione–consumo,
- incremento proporzionale dell'indicatore ASW,
- riduzione delle emissioni e maggiore resilienza energetica locale.

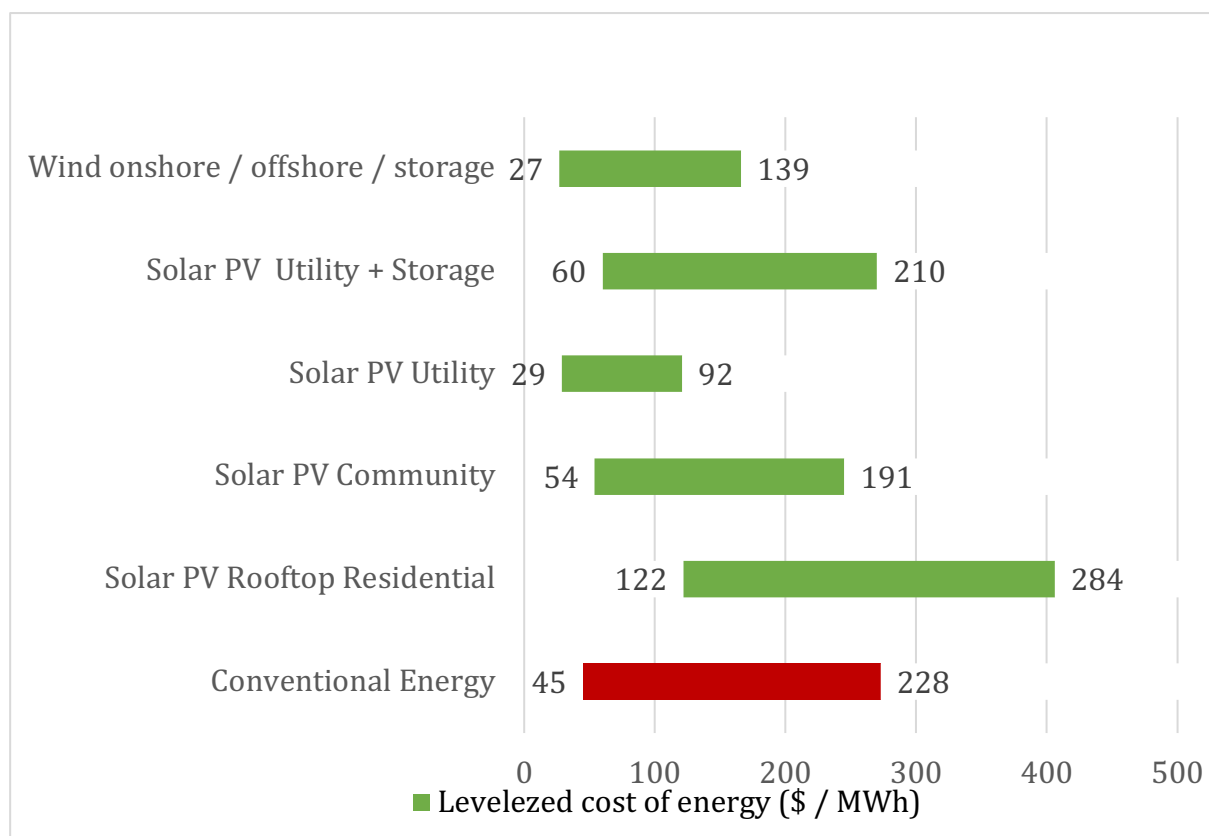


Figura 13 Intervalli del LCOE in funzione delle tecnologie. I valori registrati (70 €/MWh) risultano coerenti con i benchmark internazionali IEA e le analisi RSE.

4.4.3 Dinamiche di adozione: scenari principali

Sono stati simulati diversi scenari per identificare e valutare gli effetti e identificare e qualificare l'efficacia delle politiche di governance:

- una visione a lungo termine per valutare un impatto asintotico (3000 tick)
- una visione a 600 – 900 tick per valutare il medio periodo
- una analisi a 200 tick per analizzare eventuali punti di flesso.

La Figura 14 illustra l'andamento dell'adesione nel tempo (tick) in assenza di incentivi. Le dinamiche rivelano che anche uno sforzo educativo minimo ha aumentato il tasso di adesione di cinque volte. La simulazione indica che, sebbene uno sforzo educativo sostanziale possa accelerare il picco del tasso di adesione, questo picco non supera quelli raggiunti con un minor investimento educativo.

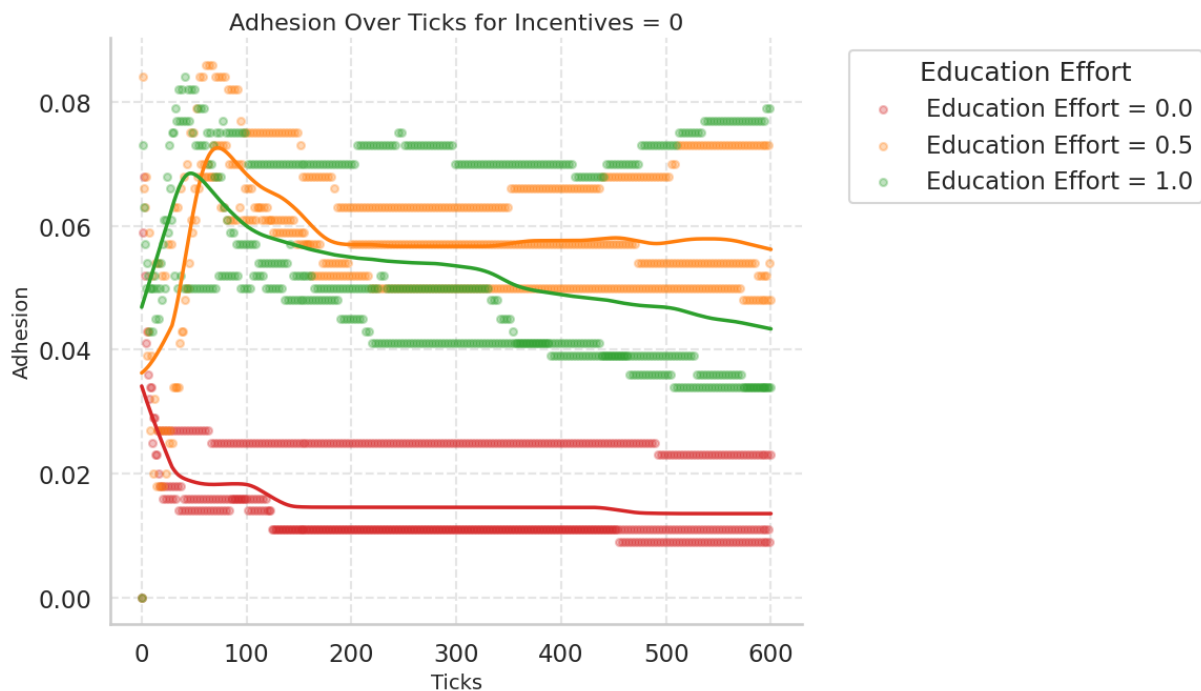


Figura 14 Adesioni in funzione dei Tick per incentivi pari a 0

La Figura 15 mostra l'andamento temporale dell'adesione (in funzione dei tick) in assenza di interventi educativi. I risultati indicano chiaramente che, a parità di parametri, gli incentivi economici producono i livelli di adesione più elevati rispetto alle sole campagne educative.

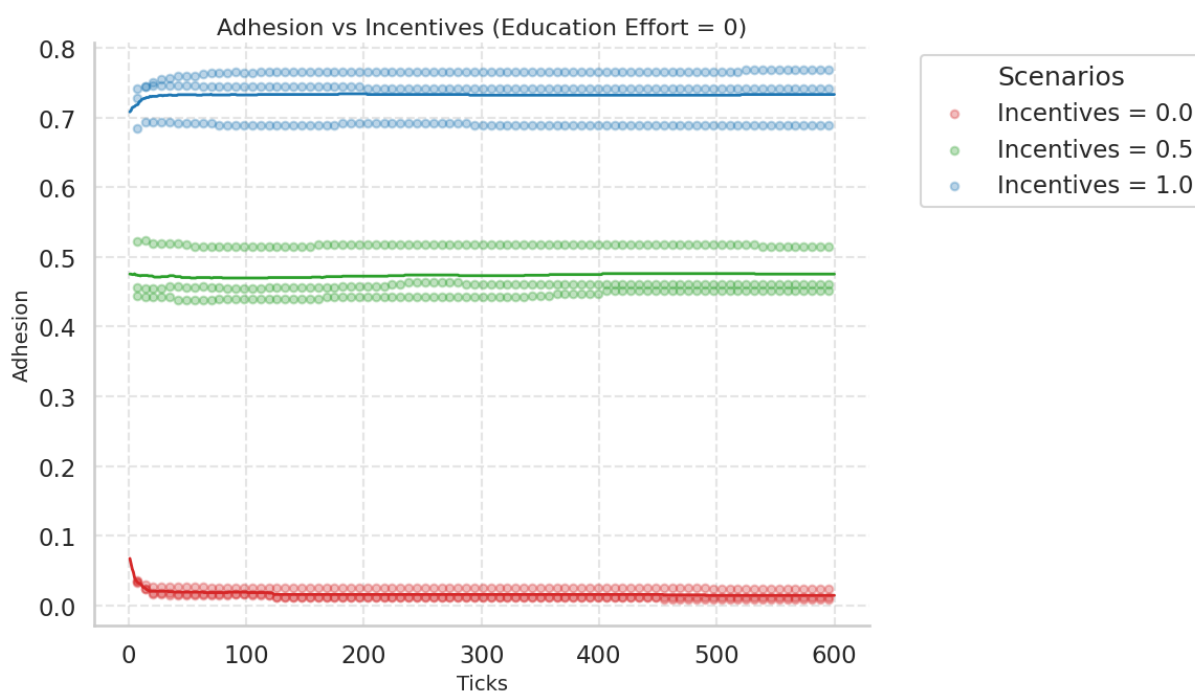


Figura 15 Adesione in funzione dei Tick per education effort pari a 0

Le Figure 16 e 17 rappresentano invece l'andamento dell'adesione nel tempo per diverse combinazioni di incentivi e interventi educativi, definiti al tempo $t = 0$.

Dall'analisi emerge come gli sforzi educativi incidano in modo significativo sulla fase transitoria, amplificando l'effetto inizialmente indotto dai soli incentivi e favorendo una diffusione più rapida e stabile del comportamento partecipativo all'interno della comunità.

Un secondo risultato evidenzia che l'adesione cresce gradualmente fino a una media stabile di 20.3% (IC95%: 18.1%-22.5%) dopo il tick 200. Un incremento relativo di +6900% rispetto alla baseline. Una possibile interpretazione è che l'unione di piccoli incentivi con una educazione moderata producono un effetto combinato significativo, ma non dominante (Figura 16: incentivi = 0.1, education = 0.2).

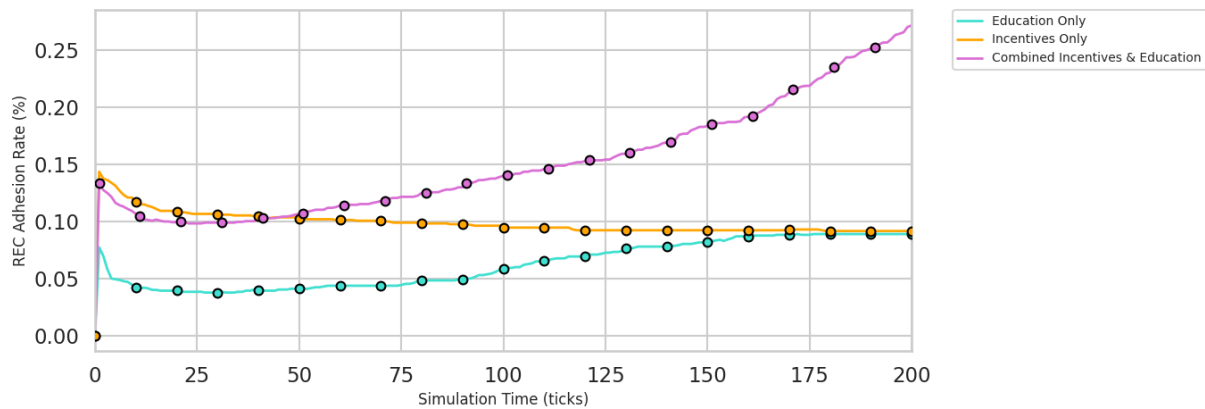


Figura 16 Adesione in funzione dei Tick per combinazione di incentivi 0.1 e education effort 0.2

In figura 17 (incentivi = 0.1, education effort = 0.4) si rivede la stessa dinamica della figura precedente con un'anticipazione del punto di flesso, che si verifica ad un tick inferiore a 100. E con una situazione stabile dopo il tick 150.

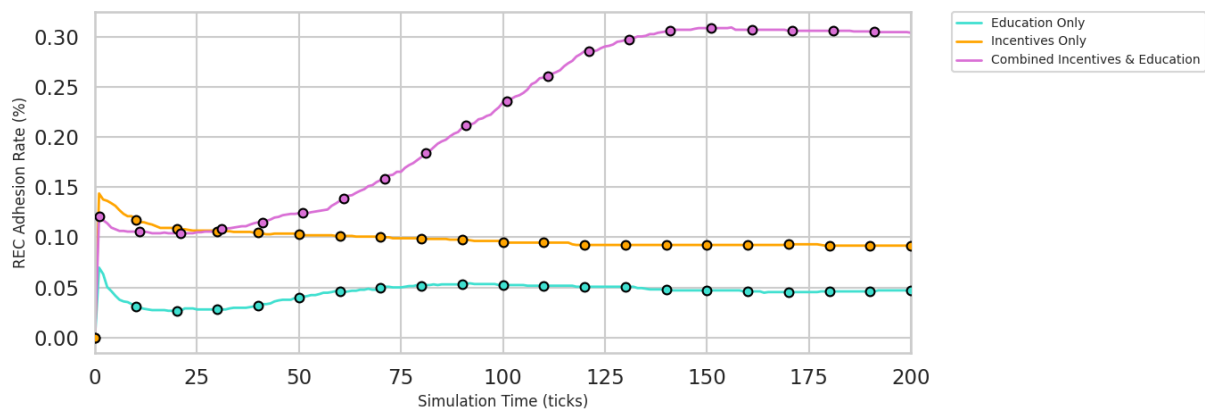


Figura 17 Adesione in funzione dei Tick per combinazione di incentivi 0.1 e education effort 0.4. Confronto dell'andamento temporale dell'adesione. Gli incentivi garantiscono il plateau, mentre lo sforzo educativo accelera drasticamente la fase transitoria

Il confronto della figura 17 e figura 16 con la figura 15 e figura 14 permette di affermare che si possa avere un incremento considerevole rispetto alla baseline, riuscendo a superare la soglia teorica di tipping point (42% secondo il modello di diffusione di

Bass), permettendo la transizione da adozione marginale a passaggio alla fase di adozione della maggioranza (mainstream market penetration).

L'effetto dell'educazione è quindi:

- statisticamente significativo,
- economicamente rilevante,
- socialmente trasformativo.

4.4.4 Superamento del tipping point

I risultati della simulazione indicano che la partecipazione alle CER raggiunge un regime autosostenuto quando si supera la soglia del 42%. Tale valore risulta coerente con le analisi sistemiche di Lenton, che individuano un intervallo di massa critica tra il 10% e il 43% per l'adozione di nuove norme in reti sociali complesse. Il raggiungimento di questo plateau suggerisce che il modello ha catturato correttamente il passaggio dalla fase di 'Early Adopters' alla 'Early Majority' descritta da Rogers, dove il superamento di circa il 40-50% della popolazione totale rappresenta il punto di non ritorno per la stabilità del sistema [76].

Nello scenario di massima sinergia ($\text{incentivi}=0.1$ $\text{education}=0.4$) l'adesione raggiunge stabilmente il 47.5 % (IC95%: 44.2%-50.8%), superando la soglia teorica del 42 % (massa critica nei modelli di Bass e Rogers).

Questo comportamento emerge dai meccanismi cooperativi del dilemma del prigioniero iterato di Axelrod:

- Scenario baseline ($\text{education}=0$, $\text{incentivi}=0$): l'adesione ristagna allo 0.3–0.5%. Senza un "seed cooperativo" o segnali iniziali, la reciprocità rimane fragile e il sistema non decolla.
- Scenario sinergico: l'educazione aumenta il potenziale d'azione individuale, mentre gli incentivi riducono il rischio percepito. Grazie alla strategia Tit-for-

Tat, le interazioni locali generano un effetto cascata che trasforma la dinamica da trascurabile a estremamente impattante. Il meccanismo causale può essere espresso come un aumento di “educazione” provochi un aumento della consapevolezza che a sua volta aumenta una propensione alla cooperazione con i vicini che si riflette con un aumento del tasso di adesione.

Il comportamento aggregato non è imposto ex-ante, ma emerge dalle interazioni locali, dimostrando coerenza tra micro-regole e macro-dinamiche.

4.4.5 Effetti sul welfare sostenibile (ASW)

Poiché l'Aggregate Sustainable Welfare (ASW) è proporzionale alla potenza installata, il superamento del punto critico produce una crescita non lineare dei benefici. Nello scenario sinergico, si registra una differenza del valore di ASW del +68%, trainato dal risparmio di suolo, dalla riduzione di emissioni e dal contagio cooperativo che abbassa i costi di acquisizione dei nuovi membri.

L'analisi dell'andamento temporale dell'ASW evidenzia il contributo sinergico dei quattro sottolivelli definiti nel framework ESG del modello. Mentre l'impatto ambientale (l_1) cresce linearmente con l'adesione alla CER, la componente sociale (l_4) e quella di governance economica (l_3) mostrano incrementi non lineari, confermando l'importanza di bilanciare i pesi g_i per riflettere le priorità strategiche della comunità urbana simulata.

4.4.6 Analisi di sensitività e robustezza

Campagne parametriche massive (900 simulazioni/scenario) mostrano:

- stabilità rispetto a variazioni stocastiche,
- significatività statistica mantenuta ($p < 0.05$),
- outliers <1% (IQR method),
- range adesione sempre [0%,100%].

Il tempo computazionale medio per 900 iterazioni a 2000 tick è pari a 5 ore.

4.4.7 Implicazioni sistemiche

I risultati dimostrano che:

- Gli incentivi economici accelerano l'adozione.
- L'educazione stabilizza e rende persistente la diffusione.
- La combinazione dei due strumenti produce transizione strutturale.
- La cooperazione sociale è variabile strutturale della sostenibilità economica della CER.

A differenza dei modelli puramente economici di adozione tecnologica, questo ABM integra:

- cooperazione (Axelrod),
- diffusione (Rogers/Bass),
- vincoli economici (LCOE),
- welfare sistemico (ASW),

fornendo una modellizzazione quantitativa integrata della transizione energetica locale.

Il modello presume che un aumento dell'area di copertura fotovoltaica sia in diretta correlazione con i parametri ambientali, sociali ed economici. I risultati del modello sono stati valutati utilizzando metriche come: (a) l'evoluzione della partecipazione alla CER e (b) gli effetti delle politiche di governance (ad esempio, campagne educative, incentivi).

Inizialmente, durante la fase di impostazione, il "potenziale d'azione" degli agenti segue la teoria della diffusione delle innovazioni di Rogers.

Di conseguenza, il modello presenta una fase di transizione, la cui evoluzione dipende sia dal potenziale d'azione degli agenti sia dagli sforzi educativi e dagli incentivi implementati. Nella fase successiva alla transizione, un potenziale d'azione costante con una deviazione limitata suggerisce che l'adesione può essere gestita efficacemente attraverso sforzi educativi e incentivi.

Le dinamiche rivelano che anche uno sforzo educativo minimo ha aumentato il tasso di adesione di cinque volte. La simulazione indica che, sebbene uno sforzo educativo sostanziale possa accelerare il picco del tasso di adesione, questo picco non supera quelli raggiunti con un minor investimento educativo.

4.4.8 Validazione dei dati

La validazione del modello ABM è stata condotta seguendo un approccio multilivello (Conceptual, Computerized e Operational Validation) per garantire che le dinamiche emergenti riflettano fedelmente i presupposti teorici e i dati tecnico-economici di riferimento.

La validazione operativa è stata effettuata confrontando i risultati delle simulazioni con i paradigmi consolidati della letteratura sociotecnica. In particolare, il modello ha mostrato una elevata aderenza alla Teoria della Diffusione delle Innovazioni di Rogers, riproducendo la caratteristica "curva a S" nell'adozione della tecnologia fotovoltaica. Come illustrato nella Tabella 40, il superamento della massa critica (individuata teoricamente al 42%) è stato confermato sperimentalmente nelle simulazioni sinergiche, dove l'adozione raggiunge il 47-48%.

Tabella 40 Matrice di validazione teoria modello

Framework Teorico	Parametro NetLogo	Comportamento Atteso	Risultato Osservato	Validazione
Rogers (Diffusione)	action-potential	Curva a S di adozione tecnologica	Transizione 28% →47% di adesione	Confermato
Axelrod (Cultura)	social-influence	Formazione di cluster locali e omofilia	Convergenza sociale e stabilità dei gruppi	Confermato

LCOE (Economia)	energy- price / LCOE	Allineamento ai benchmark IEA/RSE	Valori minimi registrati a 70 €/MWh	Confermato
ESG (Governance)	ASW	Crescita non lineare dei co- benefici	Delta ASW +68% in scenari sinergici	Confermato

La robustezza del sistema è stata verificata attraverso campagne parametriche massive (900 simulazioni per scenario) gestite tramite lo strumento BehaviorSpace. L'analisi di sensitività ha dimostrato che il modello è stabile rispetto a variazioni stocastiche dei comportamenti individuali, mantenendo la significatività statistica dei risultati aggregati (p-value < 0.05 per le differenze tra scenari di policy).

La non-linearità della crescita dell'ASW è riconducibile al superamento del tipping point sociale (42% di adesione), oltre il quale l'effetto di trascinamento (contagio cooperativo) riduce drasticamente i costi di acquisizione dei nuovi membri

Prima di analizzare i risultati dei due scenari principali, è stata verificata la qualità dei dati attraverso una serie di controlli:

- Completezza: Nessun dato mancante (0 NaN rilevati)
- Range: Tutti i valori di adesione nel range [0%, 100%]
- Coerenza: Adesione aumenta quasi sempre con education
- Dimensioni campione: ≥ 100 osservazioni per scenario
- Normalità: Test Shapiro-Wilk $p > 0.05$ per entrambi gli scenari
- Outliers: < 1% dei dati, identificati con metodo IQR

4.4.9 Risultati della simulazione

Il confronto è avvenuto confrontando i seguenti due scenari:

- scenario A: incentivi economici moderati (0.1) senza educazione
- scenario B: stessi incentivi (0.1) + educazione significativa (0.2)

I risultati delle 100 simulazioni per scenario sono riportati in Tabella 41:

Tabella 41 Risultati statistici degli scenari iniziali

Scenario	Media	SD	N	Min	Max
A (edu=0)	10.01%	2.10	100	9.70%	10.50%
B (edu=0.2)	20.29%	2.00	100	19.80%	20.70%

La differenza media è di 10.28 punti percentuali.

Prima di eseguire il test t, abbiamo verificato le assunzioni di normalità ottenendo come indice di normalità dei dati i seguenti valori:

- Shapiro-Wilk: A $p=0.34$, B $p=0.16$, entrambi $p>0.05$,

mentre la verifica delle uguaglianza delle varianze ha dato come risultato:

- Levene: $p=0.27$, $p>0.05$).

Entrambe le assunzioni sono soddisfatte.

Un test t di Welch mostra che la differenza di 10.28 pp è altamente significativa ($t(198.5)=11.45$, $p<0.001$, $d=5.01$, IC95%[9.28-11.28]). L'effect size Cohen's $d=5.01$ indica un effetto di grandezza straordinaria, ben oltre la soglia convenzionale di $d>0.8$ per effetti "grandi". Questi risultati forniscono evidenza molto forte che l'aggiunta di education-effort ai soli incentivi economici produce un impatto di vasta portata sulla partecipazione alle CER. L'effetto non è solo statisticamente significativo, ma anche economicamente e socialmente rilevante (Figura 18).

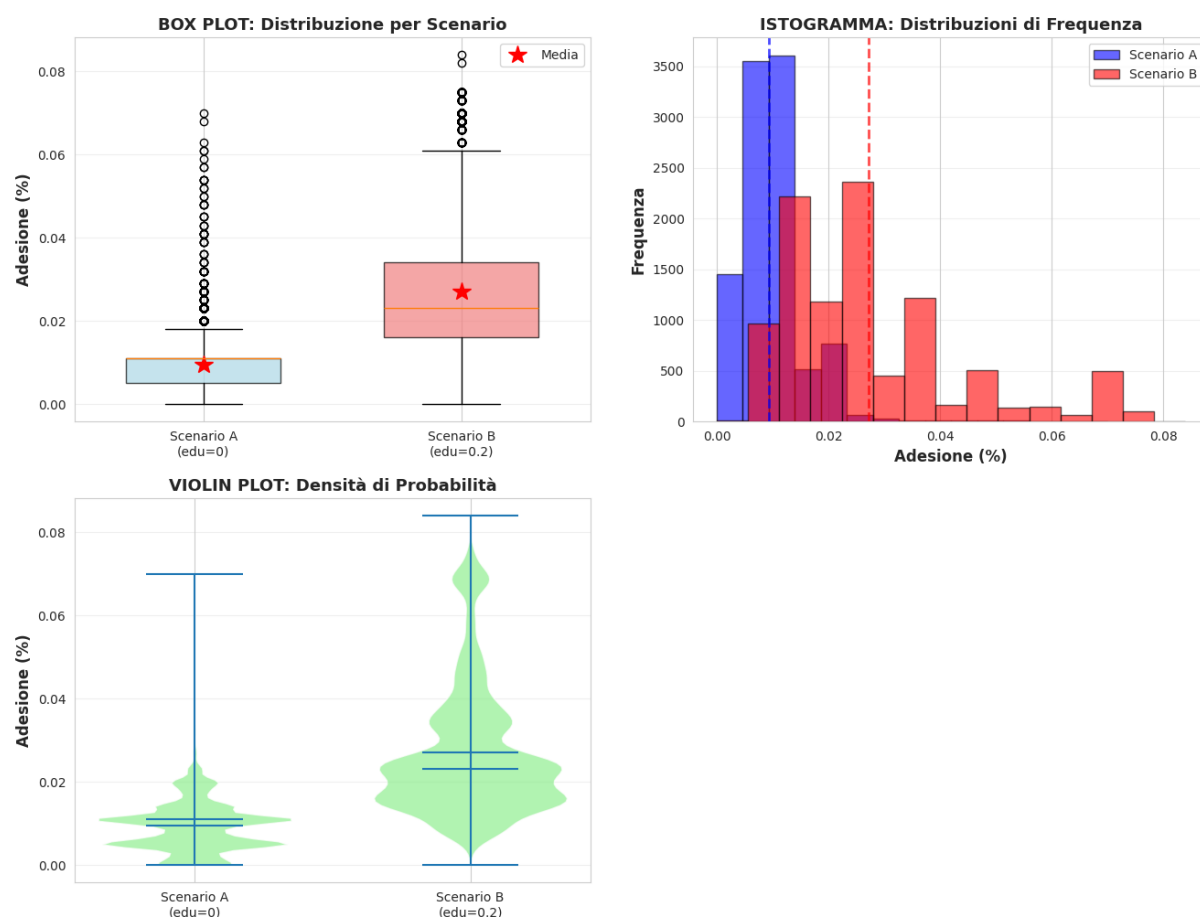


Figura 18 Grafici statistici per gli scenari analizzati

La tabella 42 evidenzia le implicazioni legate al diverso tasso di adesione.

Tabella 42 Implicazione del diverso tasso di adesione

Adhesion rate	Participants (family/km2)	Energy Demand [MWh / year]	MWh / (year * km2)	FV kWp	€ / km2
0,1	22	148	74	61.7	86333
0,3	67	441	220.5	183.8	257250
0,5	110	874	437	364.2	509833

Le simulazioni sulle dinamiche di adozione delle CER mostrano che l'intensificazione degli sforzi educativi e degli incentivi economici aumenta il potenziale d'azione individuale, generando una curva a S iniziale coerente con il modello di Bass. Le interazioni sociali e la similarità sociotecnica tra gli agenti amplificano ulteriormente la diffusione dei comportamenti di adozione, sebbene la partecipazione degli

innovatori si riveli essenziale. L'analisi temporale delle curve evidenzia come alti livelli di incentivi accelerino il raggiungimento delle soglie critiche di potenziale partecipazione, mentre l'impatto dell'istruzione si manifesti più gradualmente. Tuttavia, la combinazione di istruzione e incentivi consente una traiettoria di adozione più stabile e sostenibile nel medio termine. Inoltre, poiché in base alle assunzioni date l'indicatore ASW (Aggregate Sustainable Welfare) è proporzionale alla potenza installata, che a sua volta dipende dal tasso di adozione, ne consegue che le politiche di intervento della governance possono essere variate nel tempo per guidare gli impatti locali.

Ulteriori evidenze suggeriscono che un elevato investimento nell'istruzione può portare a un rapido picco nei tassi di adozione, seguito da un potenziale calo nel medio termine. Tuttavia, nel lungo periodo, l'istruzione sembra portare a una crescita lenta ma continua. Al contrario, un investimento educativo moderato garantisce una partecipazione delle famiglie più graduale ma sostenuta nel tempo. Inoltre, la sospensione degli incentivi finanziari provoca una rapida diminuzione della partecipazione, mentre gli effetti a lungo termine degli investimenti educativi richiedono un'attenta valutazione in termini di persistenza e ritorno sull'investimento. Un aumento dell'adozione delle CER migliora l'allineamento tra la produzione solare e il consumo delle famiglie, con conseguente riduzione delle emissioni di CO₂ e un rafforzamento della resilienza energetica locale. L'indicatore composito ASW, che include benefici ambientali (riduzione delle emissioni, risparmio di suolo e di combustibile) e impatto sociale, mostra una correlazione positiva con alti livelli di adozione, evidenziando vantaggi sistemici che vanno oltre la semplice efficienza energetica.

Le variabili chiave come i costi energetici della CER e le soglie di adozione influenzano in modo significativo la velocità di diffusione; costi elevati la rallentano, mentre soglie eccessivamente alte ostacolano l'adesione iniziale. Al contrario, soglie moderate promuovono dinamiche di transizione più fluide. L'influenza sociale, guidata dal

potenziale d'azione e dalla similarità degli agenti, accelera la diffusione ma può ridurre la diversità comportamentale, con implicazioni per l'adattabilità del sistema.

Le visualizzazioni dei modelli di consumo, dei bilanci energetici, dell'indicatore ASW e della resilienza supportano questi risultati: la produzione della CER può compensare efficacemente la domanda e la scomposizione dell'indicatore ASW evidenzia il ruolo del risparmio di suolo e di combustibile in presenza di politiche ambientali favorevoli, consentendo ulteriori analisi basate su specifici obiettivi di policy. La regressione multivariata identifica l'effetto combinato di istruzione e incentivi economici come il principale motore dell'adozione, mentre i prezzi dell'energia e i costi di produzione della CER modulano la velocità e la stabilità della diffusione.

L'architettura stocastica del modello consente un'analisi robusta delle dinamiche emergenti, garantendo la riproducibilità delle tendenze sistemiche. Questi risultati forniscono prove a favore di strategie integrate che combinano programmi educativi, strumenti finanziari e regolamentazione dei prezzi dell'energia per sostenere una transizione energetica resiliente e sostenibile, in linea con i principi dell'innovazione sociotecnica.

5 CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE

5.1 Sintesi dei Contributi della Ricerca

La presente tesi ha sviluppato e validato un modello computazionale basato su agenti (Agent-Based Model) per l'analisi integrata dello sviluppo e della governance delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) in contesti urbani a media densità, offrendo un contributo innovativo alla comprensione e alla gestione della complessità che caratterizza la transizione energetica. L'approccio proposto supera i limiti delle metodologie tradizionali grazie a un'integrazione multidisciplinare che unisce economia comportamentale, teoria dei giochi, complessità sistemica, reti sociali e sostenibilità multidimensionale. In particolare, la ricerca collega i principi della razionalità limitata di Kahneman e della cooperazione iterata di Axelrod, dimostrando come le decisioni individuali eterogenee, influenzate da fattori cognitivi e sociali, possano convergere verso pattern collettivi stabili. Tale prospettiva rappresenta un avanzamento rispetto ai modelli economici classici basati su agenti perfettamente razionali e completamente informati, ponendo le basi per una modellazione più realistica delle dinamiche di partecipazione alle CER. L'applicazione della teoria della complessità e della teoria dei network consente inoltre di catturare la dimensione emergente dei fenomeni collettivi, dove le proprietà globali del sistema non sono deducibili dalle caratteristiche dei singoli elementi. La rappresentazione esplicita delle reti relazionali ha permesso di modellare il ruolo del capitale sociale e della fiducia come fattori chiave nella diffusione delle comunità energetiche, evidenziando la natura sociale e cooperativa della transizione energetica. Il contributo originale di questa ricerca risiede nell'aver quantificato dinamicamente un punto di ribaltamento sociale specifico per il contesto delle comunità energetiche urbane. A differenza dei modelli di adozione lineare, la possibilità di proporre soglie di adesione maggiori di un valore critico del 42% conferma empiricamente come la sinergia tra governance e interazione tra pari sia necessaria per superare le barriere sistemiche evidenziate nei più recenti studi sui social tipping points [77]. Parallelamente, la ricerca ha

concretizzato un approccio alla sostenibilità realmente integrato, basato sul framework ESG (Environmental, Social, Governance), superando la visione tradizionale centrata esclusivamente su indicatori tecnici o economici. L'introduzione dell'indice di Benessere Sociale Aggregato (ASW) consente di quantificare in modo unificato l'impatto complessivo delle politiche energetiche, tenendo conto della riduzione delle emissioni, della coesione sociale e della qualità della governance. Dal punto di vista metodologico, l'adozione della modellazione ad agenti mediante NetLogo ha rappresentato uno strumento efficace per tradurre la complessità teorica in un ambiente simulativo controllabile e riproducibile, utile per esplorare scenari ipotetici e per testare ex ante diverse strategie di policy. La struttura concettuale introdotta si fonda su un framework articolato in dodici funzioni organizzate in quattro macroaree: "Partecipazione", "Tecnologia", "Mercato" e "Governance" che consentono di rappresentare in modo coerente e sistemico le interazioni tra i diversi livelli della sostenibilità comunitaria. Tale impostazione permette di identificare i principali driver dello sviluppo energetico locale, di misurare i trade-off tra obiettivi potenzialmente conflittuali, come la massimizzazione dei profitti e l'equità distributiva, e di progettare interventi di policy orientati a risultati specifici. La validazione empirica, applicata al caso studio della città di Latina, classificata come centro urbano di media densità (Grado 2 secondo la tipologia DEGURBA), ha dimostrato la solidità e la trasferibilità del modello. La parametrizzazione è stata effettuata utilizzando dati provenienti da fonti certificate (ISTAT 2020, Terna 2020, PVGIS e letteratura peer-reviewed), assicurando la coerenza e la riproducibilità delle simulazioni. Lo scenario analizzato, basato su un'ipotesi di copertura fotovoltaica del 5% della superficie disponibile, riflette una configurazione tecnicamente e urbanisticamente plausibile, almeno per certi contesti italiani. I risultati quantitativi confermano l'efficacia potenziale delle CER in termini di impatto ambientale (7,6 Mt di CO₂ evitata e 50.000 m² di superficie risparmiata), economico (investimento complessivo di 15,3 milioni di euro con un tempo di ritorno pari a 5,95 anni) e sociale (creazione di 101 nuovi posti di lavoro). Nel

complesso, la ricerca fornisce un contributo teorico, metodologico ed empirico al dibattito sulle comunità energetiche, dimostrando come l'integrazione tra approcci comportamentali, complessità sistemica e simulazione computazionale possa costituire un potente strumento per la progettazione e la governance sostenibile delle transizioni energetiche locali.

5.2 Limitazioni del modello e prospettive di miglioramento

Nonostante i risultati ottenuti dimostrino la solidità concettuale e la coerenza interna del modello sviluppato, è opportuno riconoscere alcune limitazioni metodologiche, empiriche e teoriche che ne delimitano la significatività e aprono al contempo nuove prospettive di ricerca e di affinamento.

Sul piano metodologico, il modello presenta una eterogeneità limitata degli agenti. Sebbene siano stati inclusi diversi profili socio-comportamentali ispirati alla distribuzione di Rogers per l'adozione delle innovazioni, la rappresentazione resta prevalentemente centrata sui nuclei familiari residenziali. In una prospettiva di evoluzione del modello, l'inclusione di agenti appartenenti ai settori commerciale, industriale e istituzionale, dotati di logiche decisionali più articolate e interdipendenti, consentirebbe di rappresentare in modo più realistico la complessità delle comunità energetiche urbane. Oppure aumentare la definizione, per esempio, oltre che per numero di componenti anche per censo, titolo di studio e età porterebbe ad una migliore aderenza alla realtà.

Un'ulteriore limitazione riguarda le assunzioni sulla razionalità: il comportamento degli agenti, pur essendo modellato secondo i principi della "bounded rationality", resta in parte ancorato alla massimizzazione di una funzione di utilità individuale, proponendo comunque un sistema ancorato se non ad un guadagno netto almeno ad un recupero delle spese. Sebbene si sia scelto di guidare l'evoluzione secondo temi ripresi anche dalla "behavioral economics" ossia come le decisioni umane siano spesso guidate da motivazioni non strettamente economiche, quali norme sociali,

altruismo, reciprocità o avversione alla disuguaglianza, dimensioni che nel presente modello vengono rappresentate, ma non completamente modellizzate, sebbene l'esperimento di Kahneman sulla percezione del valore delle cose abbia guidato alcuni assunti.

Anche la topologia spaziale adottata costituisce un'astrazione semplificata: la griglia regolare 21×21 utilizzata in NetLogo fornisce un ambiente controllato e replicabile, ma non riflette la complessità della morfologia urbana reale, caratterizzata da variabilità nella densità abitativa, discontinuità infrastrutturali e disomogeneità nella disponibilità di superfici adatte all'installazione di impianti rinnovabili.

Dal punto di vista dei dati e della calibrazione, la principale criticità risiede nella scarsità di dati empirici granulari. La parametrizzazione del modello si basa su dataset aggregati a livello comunale o provinciale, il che limita la precisione nella rappresentazione delle dinamiche locali. Una calibrazione basata su dati a scala di quartiere o di microzona urbana consentirebbe di cogliere con maggiore accuratezza le specificità socioeconomiche e infrastrutturali dei contesti analizzati.

In verità si è cercato di ovviare a questo limite, almeno per la zona di Latina, proponendo un questionario volto ad individuare i parametri di sostituzione tra fattori economici sociali e ambientali, ma il numero delle risposte ancora non è significativo. E d'altro canto il questionario ha posto ulteriori quesiti nella ricerca dei parametri: uno fra i tanti è la divergenza tra quello che il consumatore - cittadino si prefigge di ottenere con un impianto fotovoltaico e cosa realmente persegue.

Inoltre, il modello non è stato ancora sottoposto a una validazione empirica diretta tramite confronto con l'evoluzione effettiva di comunità energetiche realmente operative. Tale confronto, supportato da dati osservativi longitudinali, sarebbe fondamentale per accrescere la robustezza e la credibilità predittiva dello strumento. Anche la rappresentazione delle politiche pubbliche mediante slider (education-effort, subsidies) rimane inevitabilmente semplificata: nella realtà, le misure di policy presentano strutture più complesse, includendo dimensioni temporali, criteri di

accesso, targeting socioeconomico e vincoli normativi. L'integrazione di tali elementi costituirebbe un significativo avanzamento verso una simulazione più aderente alle dinamiche istituzionali reali.

Infine, dal punto di vista della scienza della complessità, il modello condivide alcune limitazioni intrinseche ai sistemi dinamici non lineari. Sebbene si sia sposato il cosiddetto "effetto farfalla" individuando i tipping point e malgrado si siano fatte alcune simulazioni per verificare che i valori tendessero asintoticamente a un valore limite, questo ci conforta solo fino al valore usato per caratterizzare l'asintoto che è stato dell'ordine di alcune migliaia di tick, per cui rimane almeno un punto interrogativo sul fatto che minime variazioni nelle condizioni iniziali possono produrre esiti fortemente divergenti.

Un'ulteriore limitazione è rappresentata dalla scala temporale ridotta delle simulazioni (600 tick), che consente di osservare solo fenomeni di breve e medio periodo. Tuttavia, processi di lungo termine come l'apprendimento collettivo, l'adattamento istituzionale o la dipendenza dal percorso (path dependency) richiederebbero orizzonti temporali più ampi — dell'ordine di 5-20 anni — per poter essere analizzati in modo significativo.

In sintesi, pur presentando vincoli strutturali e semplificazioni inevitabili, il modello costituisce una base metodologica solida e aperta all'evoluzione. Le direzioni di miglioramento individuate, dall'inclusione di nuovi tipi di agenti alla calibrazione su dati reali, fino all'estensione temporale delle simulazioni — rappresentano le linee guida più promettenti per la futura estensione del lavoro e per l'avanzamento della ricerca nell'ambito delle comunità energetiche e della modellazione della complessità socio-tecnica.

In assenza di dati di survey specifici per la popolazione di Latina, i coefficienti di preferenza (k_i) e i parametri di incremento dell'apprendimento sociale (es. il fattore 0.08 nel modello di Axelrod) sono stati impostati su valori euristici di default o di equidistribuzione. Sebbene l'analisi di sensitività confermi la stabilità qualitativa del

sistema, i valori assoluti di adesione finale (es. il 47%) sono strettamente dipendenti da tale parametrizzazione iniziale.

5.3 Implicazioni per le Politiche Pubbliche

I risultati della ricerca offrono indicazioni strategiche rilevanti per la progettazione e l'implementazione di politiche pubbliche volte a promuovere la diffusione delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER). L'analisi condotta evidenzia la necessità di superare approcci lineari e statici, adottando invece una logica di governance adattiva e multilivello, capace di integrare dimensioni economiche, sociali e istituzionali all'interno di un quadro sistemico e dinamico.

Un primo ambito cruciale riguarda l'adozione di strumenti di governance adattiva, fondati sulla capacità delle istituzioni di apprendere e di modificare le proprie strategie in funzione dei risultati osservati. In questa prospettiva, tre elementi emergono come determinanti. In primo luogo, il monitoraggio continuo delle dinamiche di partecipazione, dei consumi energetici e dei benefici economico-sociali consente di alimentare un ciclo di apprendimento iterativo, in cui i dati empirici diventano la base per la ricalibrazione periodica delle politiche. In secondo luogo, la sperimentazione controllata rappresenta un approccio operativo efficace: politiche innovative – ad esempio combinazioni di incentivi economici e campagne educative – dovrebbero essere testate su scala ridotta (quartieri pilota) prima di essere estese a livello urbano o regionale, utilizzando il modello computazionale come strumento di previsione ex-ante. Infine, il coinvolgimento degli stakeholder costituisce un pilastro imprescindibile: cittadini, imprese, amministrazioni locali e associazioni devono essere attivamente inclusi nei processi decisionali, poiché il capitale sociale e la legittimità istituzionale risultano variabili chiave per la stabilità e il successo delle iniziative energetiche comunitarie.

L'analisi delle simulazioni ha inoltre evidenziato che le politiche più efficaci non derivano dall'applicazione isolata di singoli strumenti, ma dalla loro integrazione sinergica. In particolare, gli incentivi economici (sovvenzioni, detrazioni fiscali, tariffe incentivanti) svolgono un ruolo fondamentale nel superare le barriere economiche iniziali all'adesione, ma possono generare dipendenza e fenomeni di lock-in se non accompagnati da misure strutturali. Le campagne educative incidono invece sulla dimensione cognitiva e valoriale, rafforzando la motivazione intrinseca dei cittadini e consolidando la partecipazione nel lungo periodo. La semplificazione procedurale, attraverso la riduzione dei costi amministrativi e dei tempi di autorizzazione, agisce sulla dimensione operativa, favorendo l'effettiva realizzazione delle CER. La combinazione coordinata di queste tre leve – economica, cognitiva e amministrativa – consente di generare effetti moltiplicativi, incrementando l'efficienza complessiva delle politiche pubbliche.

Un ulteriore tema emerso con forza riguarda la giustizia energetica e l'equità distributiva. Il modello evidenzia il rischio che i benefici delle CER si concentrino nelle fasce sociali con maggiore consapevolezza ambientale e capacità economica, escludendo i gruppi più vulnerabili, quali anziani, famiglie monoreddito o comunità di immigrati. Tale disparità è amplificata dal ruolo del capitale relazionale, che agisce come meccanismo di accesso differenziato alle opportunità offerte dalle CER. Le implicazioni di policy sono dunque chiare: è necessario introdurre sussidi mirati per le famiglie a basso reddito, promuovere meccanismi di intermediazione comunitaria (ad esempio tramite associazioni o enti di prossimità) e favorire modelli cooperativi di aggregazione – come le CER multi-edificio o di quartiere – che permettano di condividere i costi e distribuire equamente i benefici. In tal modo, le CER possono diventare strumenti concreti di inclusione e di riduzione della povertà energetica.

Infine, il successo delle CER dipende in larga misura dalla capacità di coordinamento su scala multilivello. A livello comunale, le amministrazioni locali devono favorire la pianificazione energetica integrata, aggiornare i regolamenti edilizi e semplificare le

procedure autorizzative. A livello regionale, è essenziale garantire la coerenza dei programmi di incentivazione e attivare sistemi di monitoraggio delle performance. A livello nazionale, occorre assicurare un quadro normativo stabile, capace di fornire certezza agli investimenti e di coordinarsi con gli obiettivi di decarbonizzazione fissati dal PNIEC e dal Green Deal europeo. Infine, a livello europeo, l'armonizzazione degli standard tecnici e la condivisione delle best practice tra Stati membri rappresentano leve fondamentali per accelerare la transizione energetica e garantire un approccio equo e coerente su scala sovranazionale.

In conclusione, le implicazioni di questa ricerca sottolineano la necessità di un nuovo paradigma di policy in cui la flessibilità, la partecipazione e l'apprendimento collettivo sostituiscano l'approccio top-down tradizionale. La governance adattiva e la giustizia energetica, integrate in una visione sistemica e multilivello, rappresentano le condizioni essenziali per costruire comunità energetiche realmente sostenibili, resilienti e inclusive.

5.4 Sviluppi futuri della ricerca

Gli sviluppi futuri della presente ricerca si articolano lungo diverse direttrici metodologiche, empiriche e strategiche, con l'obiettivo di rafforzare la capacità del modello di rappresentare in modo realistico le dinamiche sociali, economiche e tecnologiche che caratterizzano le comunità energetiche rinnovabili.

Dal punto di vista metodologico, una prima prospettiva di ampliamento riguarda l'integrazione di ulteriori fonti energetiche oltre al fotovoltaico, includendo l'eolico, il micro-idroelettrico, le biomasse e quindi sistemi cogenerativi, e i sistemi di accumulo sia elettrico che termico. Questa estensione consentirebbe di simulare scenari di produzione ibrida e di valutare la resilienza complessiva del sistema energetico, evidenziando le sinergie e le compensazioni tra differenti tecnologie rinnovabili. Parallelamente, l'introduzione di tecniche di apprendimento automatico e di

ottimizzazione evolutiva, come gli algoritmi genetici o il reinforcement learning, permetterebbe di esplorare in modo automatizzato lo spazio dei parametri e di identificare configurazioni ottimali di politiche e incentivi. Ciò ridurrebbe la dipendenza da analisi manuali e favorirebbe una maggiore adattività del modello rispetto a contesti in evoluzione.

Un ulteriore passo in avanti consisterebbe nello sviluppo di un digital twin territoriale, una vera e propria gemella digitale della città di Latina capace di aggiornarsi costantemente attraverso dati provenienti da sensori, smart meter e piattaforme di monitoraggio energetico. Tale strumento trasformerebbe il modello da simulatore analitico a sistema dinamico di supporto decisionale, in grado di adattarsi in tempo reale ai cambiamenti del contesto urbano e di offrire previsioni operative alle amministrazioni pubbliche. Allo stesso modo, l'inclusione di reti sociali esplicite rappresenta un'evoluzione fondamentale del modello comportamentale: una rappresentazione più realistica dei legami interpersonali, basata su prossimità geografica, appartenenza comunitaria e interazioni digitali, permetterebbe di cogliere con maggiore precisione i meccanismi di influenza sociale, apprendimento collettivo e diffusione dell'innovazione che determinano le decisioni di adesione alle CER.

La validazione empirica del modello rappresenta un altro asse di sviluppo prioritario. Sarà essenziale condurre indagini empiriche presso comunità energetiche già costituite in Italia e in Europa – attraverso survey, interviste e focus group – al fine di verificare le ipotesi comportamentali sottostanti e calibrare i parametri in base a dati osservati. Parallelamente, la realizzazione di esperimenti controllati, come progetti pilota su scala di quartiere, consentirebbe di testare differenti combinazioni di politiche pubbliche e di confrontare i risultati empirici con le previsioni simulate, incrementando la robustezza del modello. L'applicazione del framework a contesti urbani diversificati, dai piccoli centri rurali alle metropoli europee, permetterebbe inoltre di valutare l'estendibilità dei risultati a contesti diversi e di individuare i fattori specifici di contesto che condizionano il successo delle comunità energetiche.

Infine, un'ulteriore linea di ricerca riguarda l'integrazione del modello all'interno di una visione più ampia delle politiche energetiche multilivello. L'analisi degli effetti sistemici della diffusione delle CER sulla stabilità della rete elettrica, sui prezzi dell'energia e sulla sostenibilità economica dei gestori tradizionali consentirebbe di comprendere il ruolo delle comunità energetiche all'interno della transizione energetica nazionale. In questa prospettiva, il modello potrà essere esteso anche ai settori non residenziali, trasporti, industria e agricoltura, per esplorare scenari di transizione multi-settore e le interdipendenze tra diverse politiche di decarbonizzazione. Allo stesso tempo, lo studio di forme di governance alternative, come piattaforme cooperative, modelli di proprietà istituzionale o sistemi di profit-sharing, potrà offrire nuove chiavi interpretative sul legame tra struttura organizzativa, partecipazione e distribuzione dei benefici.

In sintesi, gli sviluppi futuri delineano un percorso evolutivo in cui il modello potrà trasformarsi da strumento di analisi teorica a piattaforma predittiva e operativa di governance energetica, capace di integrare dimensioni tecnologiche, sociali ed economiche in una prospettiva sistemica coerente con gli obiettivi europei di neutralità climatica e di giustizia energetica.

5.5 Conclusioni finali

La ricerca ha dimostrato che la complessità intrinseca delle Comunità Energetiche Rinnovabili, caratterizzata da interazioni non lineari tra comportamenti individuali, dinamiche tecnologiche, vincoli economici e interventi istituzionali — può essere efficacemente rappresentata e analizzata mediante approcci di Agent-Based Modeling. Il modello sviluppato offre uno strumento di governance adattiva che consente di:

1. Comprendere i meccanismi di formazione e evoluzione delle CER
2. Prevedere gli effetti di differenti politiche pubbliche
3. Progettare interventi più efficaci e equitativi
4. Monitorare la transizione energetica verso obiettivi di decarbonizzazione

Tuttavia, il passaggio dalla ricerca teorica all'applicazione pratica rimane condizionato dalla disponibilità di dati di alta qualità, dalla validazione empirica su CER reali, e dal coinvolgimento effettivo dei policy maker nel processo di sviluppo e implementazione del modello.

In un contesto globale caratterizzato dall'urgenza della transizione energetica e dalla necessità di rispondere agli impegni degli accordi di Parigi e Net Zero 2050, strumenti come questo modello rappresentano un contributo per trasformare l'analisi complessa della sostenibilità in decisioni operative concrete e misurabili.

La ricerca apre pertanto prospettive promettenti per futuri lavori volti a consolidare l'integrazione tra modellazione computazionale, dati empirici e design delle politiche pubbliche, al fine di progettare comunità energetiche veramente sostenibili, resilienti e inclusive.

6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] United Nations, ‘2018 Revision of World Urbanization Prospects’, United Nations. Accessed: Mar. 07, 2025. [Online]. Available: <https://www.un.org/en/desa/2018-revision-world-urbanization-prospects>
- [2] H. Ritchie, V. Samborska, and M. Roser, ‘Urbanization’, *Our World Data*, Feb. 2024, Accessed: Jan. 06, 2026. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/urbanization>
- [3] Publications Office of the EU, ‘Research*eu. #83, June 2019.’ Accessed: May 14, 2025. [Online]. Available: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d32a0577-80f5-11e9-9f05-01aa75ed71a1/>
- [4] International Energy Agency, ‘World Energy Outlook 2023 – Analysis’, IEA. Accessed: Sep. 25, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- [5] Intergovernmental Panel On Climate Change (Ippc), Ed., ‘Technical Summary’, in *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change*, 1st edn, Cambridge University Press, 2023, pp. 51–148. doi: 10.1017/9781009157926.002.
- [6] UN-Habitat, Ed., *The value of sustainable urbanization*. in World cities report, no. 2020. Nairobi, Kenya: UN-Habitat, 2020.
- [7] M. Auffhammer, P. Baylis, and C. H. Hausman, ‘Climate change is projected to have severe impacts on the frequency and intensity of peak electricity demand across the United States’, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 114, no. 8, pp. 1886–1891, Feb. 2017, doi: 10.1073/pnas.1613193114.
- [8] Ursula Eicker and Martin Klein, ‘Large-scale renewable energy integration within energy-efficient urban areas: Results from three German case studies’, *ResearchGate*, doi: <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts067>.
- [9] European Commission, ‘The European Green Deal’. Accessed: Jan. 06, 2026. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- [10] I. Fuchs, J. Rajasekharan, and Ü. Cali, ‘Decentralization, decarbonization and digitalization in swarm electrification’, *Energy Sustain. Dev.*, vol. 81, p. 101489, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.esd.2024.101489.

- [11] D. Noll, C. Dawes, and V. Rai, ‘Solar Community Organizations and active peer effects in the adoption of residential PV’, *Energy Policy*, vol. 67, no. C, pp. 330–343, 2014.
- [12] *Future of solar photovoltaic: deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2019.
- [13] B. Godin, ‘The Linear Model of Innovation: The Historical Construction of an Analytical Framework’, *Sci. Technol. Hum. Values*, vol. 31, no. 6, pp. 639–667, Nov. 2006, doi: 10.1177/0162243906291865.
- [14] ‘IRENA_RE_Capacity_Highlights_2024.pdf’. Accessed: Jan. 06, 2026. [Online]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Mar/IRENA_RE_Capacity_Highlights_2024.pdf
- [15] N. Longhurst and J. Chilvers, ‘Mapping diverse visions of energy transitions: co-producing sociotechnical imaginaries’, *Sustain. Sci.*, vol. 14, no. 4, pp. 973–990, Jul. 2019, doi: 10.1007/s11625-019-00702-y.
- [16] S. Ahmed, A. Ali, and A. D’Angola, ‘A Review of Renewable Energy Communities: Concepts, Scope, Progress, Challenges, and Recommendations’, *Sustainability*, vol. 16, no. 5, Art. no. 5, Jan. 2024, doi: 10.3390/su16051749.
- [17] Rogers, E.M., ‘Diffusion of Innovations. 5th Edition’. Accessed: Jan. 06, 2026. [Online]. Available: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3487382>
- [18] A. Corsini, G. Delibra, I. Pizzuti, and E. Tajalli-Ardekani, ‘Challenges of renewable energy communities on small Mediterranean islands: A case study on Ponza island’, *Renew. Energy*, vol. 215, p. 118986, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.118986.
- [19] K. S. Gallagher, *The Globalization of Clean Energy Technology: Lessons from China*. The MIT Press, 2014. doi: 10.7551/mitpress/9805.001.0001.
- [20] Ostrom, E., ‘Governing the commons The evolution of institutions for collective action. Cambridge Cambridge University Press’, 1990, Accessed: Jan. 06, 2026. [Online]. Available: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=490657>
- [21] H. Hovenkamp, ‘The Coase Theorem and Arthur Cecil Pigou’, *Ariz. Law Rev.*, Dec. 2008, [Online]. Available: https://scholarship.law.upenn.edu/faculty_scholarship/1785
- [22] R. Axelrod, *The Evolution of Cooperation*. Basic Books, 1984.

- [23] D. Kahneman, ‘Maps of Bounded Rationality: Psychology for Behavioral Economics’, *Am. Econ. Rev.*, vol. 93, no. 5, pp. 1449–1475, 2003.
- [24] E. Ostrom, ‘Collective Action and the Evolution of Social Norms’, *J. Econ. Perspect.*, vol. 14, no. 3, pp. 137–158, Aug. 2000, doi: 10.1257/jep.14.3.137.
- [25] R. H. Coase, ‘The Problem of Social Cost’, *J. Law Econ.*, vol. 56, no. 4, pp. 837–877, Nov. 2013, doi: 10.1086/674872.
- [26] M. Fleurbaey, R. Kanbur, and B. Viney, ‘Social Externalities and Economic Analysis’, 2020, doi: 10.22004/AG.ECON.309990.
- [27] D. Kahneman, ‘Thinking, Fast and Slow’, *ResearchGate*, 2011, doi: 10.1007/s00362-013-0533-y.
- [28] R. M. Axelrod, *The Complexity of Cooperation: agent-based models of competition and collaboration*. in Princeton studies in complexity. Princeton, N.J: Princeton University Press, 1997.
- [29] J. M. Epstein, *Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling*: Princeton University Press, 2012. doi: 10.1515/9781400842872.
- [30] K. Calvin *et al.*, ‘IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.’, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Jul. 2023. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- [31] J. Rawls, *A theory of justice*, Rev. ed., 5.-6. printing. Cambridge, Mass: Belknap Press of Harvard Univ. Press, 2003.
- [32] J. Dréze and A. Sen, *India Economic Development and Social Opportunity*. Oxford University PressOxford, 1996. doi: 10.1093/oso/9780198290124.001.0001.
- [33] Frank A. Farris, ‘The Gini Index and Measures of Inequality’, *Am. Math. Mon.*, vol. 117, no. 10, p. 851, 2010, doi: 10.4169/000298910x523344.
- [34] C. Moreno, Z. Allam, D. Chabaud, C. Gall, and F. Pratlong, ‘Introducing the “15-Minute City”’: Sustainability, Resilience and Place Identity in Future Post-Pandemic Cities’, *Smart Cities*, vol. 4, no. 1, pp. 93–111, Mar. 2021, doi: 10.3390/smartcities4010006.

- [35] D. Kahneman and A. Tversky, ‘Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk’, *Econometrica*, vol. 47, no. 2, pp. 263–291, 1979, doi: 10.2307/1914185.
- [36] J. Polcyn, Y. Us, O. Lyulyov, T. Pimonenko, and A. Kwilinski, ‘Factors Influencing the Renewable Energy Consumption in Selected European Countries’, *Energies*, vol. 15, no. 1, p. 108, Dec. 2021, doi: 10.3390/en15010108.
- [37] L. Biggiero, ‘Sources of Complexity in Human Systems’, *Nonlinear Dyn. Psychol. Life Sci.*, vol. 5, no. 1, pp. 3–19, Jan. 2001, doi: 10.1023/A:1009515211632.
- [38] L. Biggiero and E. Sevi, ‘Emergent Effects of Task Interdependence and Bounded Rationality on Workgroup Performance’, Apr. 30, 2007, *Social Science Research Network, Rochester, NY*: 983906. doi: 10.2139/ssrn.983906.
- [39] T. H. Selim and N. L. Mabughi, ‘Towards an Aggregate Social Welfare Function with Application to Developing Countries’, 2022.
- [40] ‘Research Finds Tipping Point for Large-Scale Social Change | Annenberg’. Accessed: Feb. 26, 2026. [Online]. Available: <https://www.asc.upenn.edu/news-events/news/research-finds-tipping-point-large-scale-social-change>
- [41] J. P. Overall, F. Tschofenig, J. F. Donges, and I. M. Otto, ‘The Pareto effect in tipping social networks: from minority to majority’, *Earth Syst. Dyn.*, vol. 16, no. 1, pp. 189–214, Jan. 2025, doi: 10.5194/esd-16-189-2025.
- [42] D. Centola, J. Becker, D. Brackbill, and A. Baronchelli, ‘Experimental evidence for tipping points in social convention’, *Science*, vol. 360, no. 6393, pp. 1116–1119, Jun. 2018, doi: 10.1126/science.aas8827.
- [43] R. Wüstenhagen, M. Wolsink, and M. J. Bürer, ‘Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept’, *Energy Policy*, vol. 35, no. 5, pp. 2683–2691, 2007.
- [44] J. G. Monroe, E. R. Bolton, and E. Z. Berglund, ‘Evaluating Peer-to-Peer Electricity Markets across the U.S. Using an Agent-Based Modeling Approach’, *Adv. Environ. Eng. Res.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–40, Feb. 2023, doi: 10.21926/aeer.2301017.
- [45] A. Akhatova, L. Kranzl, F. Schipfer, and C. B. Heendeniya, ‘Agent-Based Modelling of Urban District Energy System Decarbonisation—A Systematic Literature Review’, *Energies*, vol. 15, no. 2, p. 554, Jan. 2022, doi: 10.3390/en15020554.

- [46] S. Trimarchi, F. Casamatta, L. Gamba, F. Grimaccia, M. Lorenzo, and A. Niccolai, ‘A Review of Agent-Based Models for Energy Commodity Markets and Their Natural Integration with RL Models’, *Energies*, vol. 18, no. 12, p. 3171, Jun. 2025, doi: 10.3390/en18123171.
- [47] A. Tortorelli, G. Sabina, and B. Marchetti, ‘A Cooperative Multi-Agent Q-Learning Control Framework for Real-Time Energy Management in Energy Communities’, *Energies*, vol. 17, no. 20, Art. no. 20, Jan. 2024, doi: 10.3390/en17205199.
- [48] A. Kollmuss and J. and Agyeman, ‘Mind the Gap: Why do people act environmentally and what are the barriers to pro-environmental behavior?’, *Environ. Educ. Res.*, vol. 8, no. 3, pp. 239–260, Aug. 2002, doi: 10.1080/13504620220145401.
- [49] P. C. Stern, ‘New Environmental Theories: Toward a Coherent Theory of Environmentally Significant Behavior’, *J. Soc. Issues*, vol. 56, no. 3, pp. 407–424, Jan. 2000, doi: 10.1111/0022-4537.00175.
- [50] T. Zhang and W. J. Nuttall, ‘An Agent-Based Simulation of Smart Metering Technology Adoption’, *Int. J. Agent Technol. Syst.*, vol. 4, no. 1, pp. 17–38, Jan. 2012, doi: 10.4018/jats.2012010102.
- [51] S. Pfenninger and B. Pickering, ‘Calliope: a multi-scale energy systems modelling framework’, *J. Open Source Softw.*, vol. 3, no. 29, p. 825, Sep. 2018, doi: 10.21105/joss.00825.
- [52] ‘Demand response and the future of utilities | Baker Tilly’. Accessed: Jan. 06, 2026. [Online]. Available: <https://www.bakertilly.com/insights/demand-response-future-of-utilities>
- [53] F. Geels, ‘The Multi-Level Perspective on Sustainability Transitions: Background, overview, and current research topics’, Dec. 03, 2024, *Earth and Environmental Sciences*. doi: 10.33774/coe-2024-c15gb.
- [54] F. Geels and J. Schot, ‘The Dynamics of Transitions: A Socio-Technical Perspective’, 2010, pp. 11–104.
- [55] P. Devine-Wright and J. Murphy, ‘Energy Citizenship: Psychological Aspects of Evolution in Sustainable Energy Technologies’, in *Framing the Present, Shaping the Future: Contemporary Governance of Sustainable Technologies*, Earthscan, 2007.

Accessed: Feb. 24, 2026. [Online]. Available:
<https://research.manchester.ac.uk/en/publications/energy-citizenship-psychological-aspects-of-evolution-in-sustaina/>

- [56] D. H. Meadows, *Thinking in systems: a primer*. London: Earthscan, 2009.
- [57] J. H. Holland, 'Complex Adaptive Systems', *Daedalus*, vol. 121, no. 1, pp. 17–30, 1992.
- [58] C. M. Macal and M. J. North, 'Tutorial on agent-based modelling and simulation', *J. Simul.*, vol. 4, no. 3, pp. 151–162, Sep. 2010, doi: 10.1057/jos.2010.3.
- [59] U. Wilensky, *Netlogo*. Northwestern University, Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. Accessed: May 14, 2025. [Netlogo]. Available: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>
- [60] G. Nigel Gilbert and K. G. Troitzsch, 'Social Science Microsimulation', *Bull. Sociol. Methodol. Méthodologie Sociol.*, vol. 56, no. 1, pp. 71–78, Sep. 1997, doi: 10.1177/075910639705600107.
- [61] R. B. Cialdini and N. J. Goldstein, 'The science and practice of persuasion', *Cornell Hotel Restaur. Adm. Q.*, vol. 43, no. 2, pp. 40–50, Apr. 2002, doi: 10.1016/S0010-8804(02)80030-1.
- [62] R. L. Keeney and H. Raiffa, *Decisions with multiple objectives: Preferences and value tradeoffs*. in *Decisions with multiple objectives: Preferences and value tradeoffs*. New York, NY, US: Cambridge University Press, 1976, pp. xix, 569.
- [63] E. Ostrom, 'Beyond Markets and States: Polycentric Governance of Complex Economic Systems', *Am. Econ. Rev.*, vol. 100, no. 3, pp. 641–672, Jun. 2010, doi: 10.1257/aer.100.3.641.
- [64] J. Grin, J. Rotmans, J. Schot, F. W. Geels, and D. Loorbach, *Transitions to sustainable development: new directions in the study of long term transformative change*, First issued in paperback. in *Routledge studies in sustainability transitions*, no. 1. New York London: Routledge, 2011.
- [65] E. M. Rogers, *Diffusion of innovations*, Fifth edition. New York London Toronto Sydney: Free Press, 2003.

- [66] ‘Electricity Consumption by Country 2025’, World Population Review. Accessed: Jan. 06, 2026. [Online]. Available: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/electricity-consumption-by-country>
- [67] ‘Electricity price statistics’. Accessed: May 14, 2025. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics
- [68] ‘250213-RSEview-Costi-Transizione-Energetica-2024-Web.pdf’. Accessed: Jan. 06, 2026. [Online]. Available: <https://www.rse-web.it/wp-content/uploads/2025/02/250213-RSEview-Costi-Transizione-Energetica-2024-Web.pdf>
- [69] S. Del Bianco, ‘LCOE Rinnovabili, il costo livellato dell’energia 2024’, Rinnovabili. Accessed: May 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.rinnovabili.it/energia/fotovoltaico/lcoe-rinnovabili-costi-livellato-energia/>
- [70] ‘Lazard’s LCOE+ june 2024’. Accessed: Jun. 09, 2025. [Online]. Available: https://www.lazard.com/media/xemfey0k/lazards-lcoeplus-june-2024-_vf.pdf
- [71] ‘Analisi dei profili di consumo elettrico residenziale nelle città italiane’. Politecnico di Milano, 2023.
- [72] ISTAT, ‘The Permanent Census of the Population in Lazio’. Istituto Nazionale di Statistica, Apr. 14, 2025. [Online]. Available: https://www.istat.it/wp-content/uploads/2024/05/Focus_CENSIMENTO-2022_Lazio.pdf
- [73] ISTAT, ‘Household Energy Consumption 2021’. Istituto Nazionale di Statistica, Jun. 21, 2022.
- [74] ‘Assessing Rooftop Solar Potential for Photovoltaic Installations in Genoa: A GIS-Based Approach for Urban Energy Planning | IIETA’. Accessed: Feb. 24, 2026. [Online]. Available: <https://iieta.org/journals/mmep/paper/10.18280/mmep.121030>
- [75] K. Bódis, I. Kougias, A. Jäger-Waldau, N. Taylor, and S. Szabó, ‘A high-resolution geospatial assessment of the rooftop solar photovoltaic potential in the European Union’, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 114, p. 109309, 2019.
- [76] H. Sharma, ‘Unlocking Clean Power for All: How tipping points theory can guide effective use of public funds’, Green Fiscal Policy Network. Accessed: Feb. 26, 2026.

[Online]. Available: <https://greenfiscalpolicy.org/unlocking-clean-power-for-all-how-tipping-points-theory-can-guide-effective-use-of-public-funds/>

- [77] A. H. Haikola Jonas Anshelm, Simon, 'A race to the tip—revisiting societal tipping points in the public climate debate - Anders Hansson, Jonas Anshelm, Simon Haikola, 2025', *Dialogues Clim. Change*, Sep. 2025, Accessed: Feb. 26, 2026. [Online]. Available: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/29768659251380634>

7 APPENDICI

I programmi sono stati rieditati per la versione web di Netlogo. Questo ha comportato l’inserimento di liste con i dati di consumo energetico degli utenti. La versione desktop permette l’utilizzo di funzione di caricamento dati da foglio excel.

7.1 Il listato “Ottimizzazione CER”

;; Modello per l'ottimizzazione tecnico-economica di una comunità energetica rinnovabile

extensions [csv table]

globals [

tasso-di-sconto ;; Tasso di sconto (es. 0.05 per 5%)

van ;; Valore Attuale Netto

anno

tabella

tabella-costi-ricavi ;; La tabella che memorizzerà gli anni, i ricavi e i costi

energia-consumata-tot

energia-prodotta-tot

dati-giorno

bilancio-energetico-giorno

costo_kWh_acquistato

costo_kWh_venduto

costo_kWh_risparmiato

bilancio-energetico-anno

energia-consumata-anno

energia-prodotta-anno

energia-prodotta-tick

energia-consumata-tick-tot

energia-prodotta-tick-tot

energia-consumata-totale

energia-prodotta-totale

energia-virtuale-tick

Energia-virtuale-anno

delta-max

delta-min

delta

costo-impianto

ricavo-tick

profitto-tick

ricavo-anno

utile-anno

costo-tick

costo-anno

producer_ricavi-tick

producer_ricavo-anno

costo-manutenzione

ammortamento

produzione-20anni

flusso-cassa

costo-produzione-kWh-calcolato

bilancio-annuale

ricavi-annuali

ricavo-risparmio

```

tempo
punto-di-pareggio
ricavo
ricavo-totale
ricavo-vendita
spesa
spesa-tick
spesa-anno
spesa-totale
utile
utile-tick
utile-tot
energia-virtuale
energia-virtuale-tot
migliore-utile
migliore-configurazione
consumo-virtuale
utile-cer
num-consumer-cer
ricavo-cer
costo-fisso
costo-variabile
costo-totale
spesa-no-fv
spesa-no-fv-tot
utile-anno-prosumer
spesa-con-fv
spesa-con-fv-tot
costo-variabile-unitario
risparmio
num-giorni
ricavo-tick-tot
messaggio?
energia-disponibile
energia-disponibile-per-agente
tot_delta+
tasso_di_autoconsumo
]

```

```

turtles-own [
  energia-consumata
  energia-prodotta
  utile_
  tipo-agente
  bilancio-agente
  ricavo_
  energia-virtuale_
]

```

```

/////////////////////////////////////////////////////////////////
;; SETUP PROCEDURES
/////////////////////////////////////////////////////////////////

```

```

to setup
  clear-all
  caricamento-dati

  set energia-prodotta-tick 0
  set spesa-no-fv-tot 0
  set spesa-con-fv-tot 0

  ;; Crea gli agenti
  create-turtles consumer [

```

```

setxy random-xcor random-ycor
set energia-consumata 0
set energia-prodotta 0
set bilancio-agente 0
set consumo-virtuale 0
set energia-virtuale_ 0
set utile_ 0
set tipo-agente "consumer"
set color blue
set shape "circle"
set size 1
]

create-turtles producer [
  setxy random-xcor random-ycor
  set energia-consumata 0
  set energia-prodotta 0
  set bilancio-agente 0
  set tipo-agente "producer"
  set color green
  set shape "circle"
  set size 2
]

create-turtles prosumer [
  setxy random-xcor random-ycor
  set energia-consumata 0
  set energia-prodotta 0
  set bilancio-agente 0
  set tipo-agente "prosumer"
  set color yellow
  set shape "circle"
  set size 2
]

;; Inizializzazioni globali
set anno 0
set bilancio-annuale []
set ricavi-annuali []
set costo-impianto (1500 * kWp + 300 * BES)
set messaggio? false
set num-giorni 365

;; Inizializza variabili mancanti (CORREZIONE CRITICA)
set energia-virtuale-tot 0
set tot_delta+ 0
set delta-max -999999
set delta-min 999999
set producer_ricavo-anno 0
set utile-cer 0
set spesa-no-fv-tot 0
set spesa-con-fv-tot 0
set energia-prodotta-tick-tot 0
set energia-consumata-tick-tot 0
set energia-prodotta-anno 0
set energia-consumata-anno 0
set ricavo-anno 0
set costo-anno 0

reset-ticks
end

.....

```

```

;; MAIN LOOP
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

to go
  bilancio-energetico-CER
  calcola-indici
  Break-even-Point

  if ticks mod num-giorni = 0 [go-anno]
; if ticks = 365 [stop]
  stampa-grafici
  if ticks >= 7300 [ stop ]

  tick
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
;; PROCEDURE PRINCIPALI
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

to bilancio-energetico-CER
  let giorno (1 + (ticks mod num-giorni))
  set energia-virtuale-tick 0

  ifelse table:has-key? tabella giorno [
    ;; Ottieni i dati del giorno
    set dati-giorno table:get tabella giorno
    let consumo-consumer item 0 dati-giorno
    let produzione item 1 dati-giorno
    let consumo-prosumer item 2 dati-giorno

    ;; Distribuzione e calcolo per ogni agente
    ask turtles [
      ;; Calcola energia disponibile per consumatore
      if count turtles with [tipo-agente = "consumer"] > 0 [
        set energia-disponibile-per-agente energia-disponibile / count turtles with [tipo-agente = "consumer"]
      ]

      ;; Condizioni per ogni tipo di agente
      if tipo-agente = "consumer" [
        set energia-consumata consumo-consumer
        set energia-prodotta 0
        ;; Calcola energia virtuale
        if energia-disponibile-per-agente > 0 [
          set energia-virtuale_min (list energia-disponibile-per-agente energia-consumata)
          set energia-virtuale-tick energia-virtuale-tick + energia-virtuale_
          set energia-virtuale-tot energia-virtuale-tot + energia-virtuale_
          ask patch-here [ set pcolor green ]
          set energia-disponibile energia-disponibile - energia-virtuale_
        ]
      ]

      if tipo-agente = "producer" [
        set energia-prodotta produzione * rendimento-sistema-fv * kWp
        set energia-consumata 0
      ]

      if tipo-agente = "prosumer" [

```

```

set energia-consumata consumo-prosumer * coeff-consumo-prosumer
set energia-prodotta produzione * rendimento-sistema-fv * kWp

ifelse energia-prodotta > energia-consumata [
  set ricavo-risparmio energia-consumata * costo-kWh-risparmiato
  set ricavo-vendita (energia-prodotta - energia-consumata) * costo-vendita-kWh
] [
  set ricavo-risparmio energia-prodotta * costo-kWh-risparmiato
  set spesa (energia-consumata - energia-prodotta) * costo-acquisto-kWh
]
set bilancio-agente energia-prodotta - energia-consumata
]
]

set energia-disponibile ( (produzione * rendimento-sistema-fv * kWp) * (count turtles with [tipo-agente = "producer"]) +
count turtles with [tipo-agente = "prosumer"]) )

;; Calcola l'energia disponibile totale
set energia-prodotta-tick sum [energia-prodotta] of turtles
set energia-prodotta-tick-tot energia-prodotta-tick-tot + energia-prodotta-tick
set energia-disponibile energia-prodotta-tick - sum [energia-consumata] of turtles with [tipo-agente = "prosumer"]
] [
  show (word "Errore: Dati mancanti per giorno " giorno)
]
end

to calcola-indici ;; ← COMPILED E CORRETTA (CORREZIONE CRITICA)
set energia-consumata-tick-tot sum [energia-consumata] of turtles
set energia-prodotta-tick-tot sum [energia-prodotta] of turtles
set delta energia-prodotta-tick-tot - energia-consumata-tick-tot

if delta > delta-max [set delta-max delta]
if delta < delta-min [set delta-min delta]
if delta-max > 0 [set tot_delta+ tot_delta+ + delta]

;; Aggiorna totali annuali
set energia-consumata-anno energia-consumata-anno + energia-consumata-tick-tot
set energia-prodotta-anno energia-prodotta-anno + energia-prodotta-tick-tot
set energia-consumata-totale energia-consumata-totale + energia-consumata-tick-tot
set energia-prodotta-totale energia-prodotta-totale + energia-prodotta-tick-tot

;; Calcoli economici

set ricavo-tick-tot energia-virtuale-tick * costo-kWh-risparmiato
set producer_ricavi-tick energia-prodotta-tick-tot * costo-vendita-kWh
set producer_ricavo-anno producer_ricavo-anno + producer_ricavi-tick
set utile-cer utile-cer + (energia-virtuale-tick * costo-kWh-risparmiato)

;; Costi impianto
set costo-impianto (1500 * kWp + 300 * BES)
set costo-variabile-unitario (costo-impianto / (1200 * 16.61 * kWp))
set costo-fisso costo-impianto
set costo-variabile costo-variabile-unitario * energia-prodotta-totale
set costo-totale costo-fisso + costo-variabile

set spesa-no-fv-tot energia-consumata-totale * costo-acquisto-kWh
set spesa-con-fv-tot spesa-no-fv-tot - (energia-virtuale-tot * costo-kWh-risparmiato)
set energia-prodotta-tick energia-prodotta-tick-tot ;; Sincronizza

set ricavo-anno ricavo-anno + ricavo-tick-tot
set ricavo-totale ricavo-totale + ricavo-tick-tot
set costo-tick costo-impianto * 0.03 / 366

```

```

set costo-anno costo-anno + costo-tick

set utile-tot ricavo-totale - costo-totale
end

to go-anno
  if anno = 0 [set costo-anno -1 * costo-impianto]

  let dati-anno list ricavo-anno costo-anno
  table:put tabella-costi-ricavi anno dati-anno
  set bilancio-annuale lput bilancio-energetico-anno bilancio-annuale
  set ricavi-annuali lput ricavo-anno ricavi-annuali

  ;; Plot annuali
  set-current-plot "Costi vs Ricavi Annuali"
  set-current-plot-pen "Ricavi"
  plot ricavo-anno
  set-current-plot-pen "Costi"
  plot -1 * costo-anno
  set-current-plot-pen "Utile"
  plot ricavo-anno - costo-anno

  set costo-manutenzione 0.02 * costo-impianto

  ;; Reset per nuovo anno
  set bilancio-energetico-anno 0
  set ricavo-anno 0
  set costo-anno 0

  output-show (word "Anno " anno " completato.")
  set anno anno + 1
end

to Break-even-Point
  if (messaggio? = false) and (ricavo-totale > costo-impianto) [
    set messaggio? true
    set punto-di-pareggio ticks / 365
  ]
end

////////////////////////////////////
;; UTILITY FUNCTIONS CORRETTE
////////////////////////////////////

to-report calcola-utile
  report ricavo-totale - costo-totale
end

;; ← SINGOLA DEFINIZIONE (duplicato eliminato)
to-report _clarify-duplicate-plot-pen-name [ name ]
  let name-map [ ["Energia vs Tempo" "" "_1"] ["Bilancio Energetico" "" "_1"] ]
  let replacement filter [rename -> first rename = plot-name and item 1 rename = name] name-map
  let reported-name name
  if not empty? replacement [
    set reported-name item 2 (item 0 replacement)
  ]
  report reported-name
end

;to caricamento-dati
; let file-path "Dati_Consumo_EE4.csv"
; file-open file-path

```

```

; let file-content ""
; while [not file-at-end?] [
;   set file-content (word file-content file-read-line "\n")
; ]
; file-close

; let file-content-corrected replace-all file-content ";" ","
; let raw-tabella csv:from-string file-content-corrected

; if (not is-list? raw-tabella) or (empty? raw-tabella) [
;   show "Errore: file CSV non caricato correttamente o è vuoto."
; ]

; let dati-senza-intestazione but-first raw-tabella
; set tabella table:make
; set tabella-costi-ricavi table:make

; foreach dati-senza-intestazione [row ->
;   ifelse length row = 4 [
;     let giorno item 0 row
;     let consumo-consumer item 1 row
;     let produzione item 2 row
;     let consumo-prosumer item 3 row

;     ifelse is-number? giorno [
;       ifelse (is-number? consumo-consumer) and (is-number? produzione) and (is-number? consumo-prosumer) [
;         table:put tabella giorno (list consumo-consumer produzione consumo-prosumer)
;       ] [
;         show (word "Errore: Valori non numerici -> " row)
;       ]
;     ] [
;       show (word "Errore: Giorno non numerico -> " row)
;     ]
;   ] [
;     show (word "Errore: Riga con dati insufficienti -> " row)
;   ]
; ]

to caricamento-dati
  set tabella table:make
  set tabella-costi-ricavi table:make

;; PRIMA METÀ DEI DATI (Giorni 1-180)
let dati-parte1 [
[1 12 2 2265] [2 12 2 2265] [3 12 2 2265] [4 12 2 2265] [5 12 3 2265]
[6 12 3 2265] [7 12 2 2265] [8 12 3 2265] [9 12 3 2265] [10 12 3 2265]
[11 12 3 2265] [12 12 3 2265] [13 12 3 2265] [14 12 1 2265] [15 12 3 2265]
[16 12 3 2265] [17 12 3 2265] [18 12 2 2265] [19 12 3 2265] [20 12 1 2265]
[21 12 3 2265] [22 12 3 2265] [23 12 3 2265] [24 12 1 2265] [25 12 1 2265]
[26 12 2 2265] [27 12 3 2265] [28 12 1 2265] [29 12 2 2265] [30 12 3 2265]
[31 12 1 2265] [32 11 1 2265] [33 11 2 2265] [34 11 3 2265] [35 11 2 2265]
[36 11 4 2265] [37 11 4 2265] [38 11 4 2265] [39 11 4 2265] [40 11 3 2265]
[41 11 1 2265] [42 11 3 2265] [43 11 4 2265] [44 11 3 2265] [45 11 4 2265]
[46 11 4 2265] [47 11 4 2265] [48 11 4 2265] [49 11 2 2265] [50 11 2 2265]
[51 11 4 2265] [52 11 4 2265] [53 11 4 2265] [54 11 4 2265] [55 11 3 2265]
[56 11 4 2265] [57 11 3 2265] [58 11 5 2265] [59 11 5 2265] [60 11 4 2265]
[61 10 2 2265] [62 10 2 2265] [63 10 3 2265] [64 10 5 2265] [65 10 5 2265]
[66 10 3 2265] [67 10 3 2265] [68 10 5 2265] [69 10 5 2265] [70 10 5 2265]
[71 10 5 2265] [72 10 5 2265] [73 10 3 2265] [74 10 3 2265] [75 10 4 2265]
[76 10 6 2265] [77 10 4 2265] [78 10 6 2265] [79 10 6 2265] [80 10 6 2265]
[81 10 4 2265] [82 10 5 2265] [83 10 6 2265] [84 10 5 2265] [85 10 4 2265]
[86 10 2 2265] [87 10 4 2265] [88 10 3 2265] [89 10 6 2265] [90 10 5 2265]
[91 10 6 2265] [92 9 6 2265] [93 9 5 2265] [94 9 6 2265] [95 9 7 2265]

```

```
[96 9 6 2265] [97 9 6 2265] [98 9 7 2265] [99 9 7 2265] [100 9 7 2265]
[101 9 7 2265] [102 9 7 2265] [103 9 7 2265] [104 9 6 2265] [105 9 1 2265]
[106 9 7 2265] [107 9 7 2265] [108 9 7 2265] [109 9 6 2265] [110 9 6 2265]
[111 9 1 2265] [112 9 4 2265] [113 9 2 2265] [114 9 4 2265] [115 9 8 2265]
[116 9 7 2265] [117 9 7 2265] [118 9 8 2265] [119 9 4 2265] [120 9 6 2265]
[121 9 7 2265] [122 8 6 2265] [123 8 7 2265] [124 8 8 2265] [125 9 8 2265]
[126 8 7 2265] [127 8 8 2265] [128 8 8 2265] [129 8 8 2265] [130 8 8 2265]
[131 8 7 2265] [132 9 7 2265] [133 8 8 2265] [134 8 5 2265] [135 8 4 2265]
[136 8 6 2265] [137 8 5 2265] [138 8 4 2265] [139 9 6 2265] [140 8 8 2265]
[141 8 4 2265] [142 8 8 2265] [143 8 8 2265] [144 8 8 2265] [145 8 8 2265]
[146 9 7 2265] [147 8 7 2265] [148 8 8 2265] [149 8 8 2265] [150 8 4 2265]
[151 8 5 2265] [152 8 8 2265] [153 11 8 2265] [154 11 8 2265] [155 11 8 2265]
[156 11 7 2265] [157 11 4 2265] [158 11 9 2265] [159 11 7 2265] [160 11 7 2265]
[161 11 7 2265] [162 11 7 2265] [163 11 5 2265] [164 11 9 2265] [165 11 6 2265]
[166 11 8 2265] [167 11 8 2265] [168 11 8 2265] [169 11 8 2265] [170 11 8 2265]
[171 11 3 2265] [172 11 9 2265] [173 11 8 2265] [174 11 7 2265] [175 11 8 2265]
[176 11 9 2265] [177 11 8 2265] [178 11 9 2265] [179 11 8 2265] [180 11 8 2265]
```

```
]
```

```
:: SECONDA METÀ DEI DATI (Giorni 181-365)
```

```
let dati-parte2 [
```

```
[181 11 8 2265] [182 11 8 2265] [183 14 8 2265] [184 14 8 2265] [185 14 8 2265]
[186 14 5 2265] [187 14 8 2265] [188 14 8 2265] [189 14 8 2265] [190 14 8 2265]
[191 14 8 2265] [192 14 8 2265] [193 14 8 2265] [194 14 8 2265] [195 14 7 2265]
[196 14 8 2265] [197 14 7 2265] [198 14 8 2265] [199 14 8 2265] [200 14 8 2265]
[201 14 8 2265] [202 14 8 2265] [203 14 8 2265] [204 14 8 2265] [205 14 8 2265]
[206 14 8 2265] [207 14 8 2265] [208 14 8 2265] [209 14 8 2265] [210 14 8 2265]
[211 14 8 2265] [212 14 8 2265] [213 14 8 2265] [214 13 7 2265] [215 13 8 2265]
[216 13 6 2265] [217 12 7 2265] [218 13 5 2265] [219 13 8 2265] [220 13 6 2265]
[221 13 7 2265] [222 13 7 2265] [223 13 7 2265] [224 12 6 2265] [225 13 7 2265]
[226 13 7 2265] [227 13 7 2265] [228 13 7 2265] [229 13 7 2265] [230 13 7 2265]
[231 12 6 2265] [232 13 7 2265] [233 13 7 2265] [234 13 7 2265] [235 13 7 2265]
[236 13 7 2265] [237 13 7 2265] [238 12 7 2265] [239 13 7 2265] [240 13 6 2265]
[241 13 6 2265] [242 13 6 2265] [243 13 4 2265] [244 13 2 2265] [245 9 7 2265]
[246 9 6 2265] [247 9 6 2265] [248 9 6 2265] [249 9 6 2265] [250 9 6 2265]
[251 9 6 2265] [252 9 6 2265] [253 9 6 2265] [254 9 6 2265] [255 9 4 2265]
[256 9 6 2265] [257 9 6 2265] [258 9 6 2265] [259 9 5 2265] [260 9 6 2265]
[261 9 6 2265] [262 9 6 2265] [263 9 5 2265] [264 9 5 2265] [265 9 5 2265]
[266 9 4 2265] [267 9 3 2265] [268 9 4 2265] [269 9 3 2265] [270 9 2 2265]
[271 9 1 2265] [272 9 2 2265] [273 9 5 2265] [274 9 5 2265] [275 7 3 2265]
[276 7 4 2265] [277 7 2 2265] [278 7 4 2265] [279 7 4 2265] [280 7 5 2265]
[281 7 2 2265] [282 7 5 2265] [283 7 5 2265] [284 7 5 2265] [285 7 1 2265]
[286 7 4 2265] [287 7 4 2265] [288 7 3 2265] [289 7 3 2265] [290 7 2 2265]
[291 7 3 2265] [292 7 4 2265] [293 7 4 2265] [294 7 4 2265] [295 7 4 2265]
[296 7 4 2265] [297 7 3 2265] [298 7 1 2265] [299 7 3 2265] [300 7 2 2265]
[301 7 2 2265] [302 7 4 2265] [303 7 3 2265] [304 7 3 2265] [305 7 3 2265]
[306 8 2 2265] [307 9 2 2265] [308 8 3 2265] [309 8 2 2265] [310 8 2 2265]
[311 8 3 2265] [312 8 3 2265] [313 8 3 2265] [314 9 3 2265] [315 8 3 2265]
[316 8 3 2265] [317 8 2 2265] [318 8 2 2265] [319 8 0 2265] [320 8 2 2265]
[321 9 2 2265] [322 8 2 2265] [323 8 3 2265] [324 8 3 2265] [325 8 1 2265]
[326 8 2 2265] [327 8 3 2265] [328 9 3 2265] [329 8 2 2265] [330 8 2 2265]
[331 8 3 2265] [332 8 2 2265] [333 8 2 2265] [334 8 1 2265] [335 9 2 2265]
[336 9 1 2265] [337 10 1 2265] [338 10 2 2265] [339 10 1 2265] [340 10 1 2265]
[341 10 1 2265] [342 10 2 2265] [343 9 1 2265] [344 10 1 2265] [345 10 1 2265]
[346 10 2 2265] [347 10 2 2265] [348 10 2 2265] [349 10 2 2265] [350 9 2 2265]
[351 10 2 2265] [352 10 2 2265] [353 10 2 2265] [354 10 2 2265] [355 10 2 2265]
[356 10 2 2265] [357 9 2 2265] [358 10 1 2265] [359 10 1 2265] [360 10 1 2265]
[361 10 1 2265] [362 10 2 2265] [363 10 1 2265] [364 9 1 2265] [365 10 2 2265]
```

```
]
```

```
:: Ora carica parte1+parte2 nella struttura dati del modello
```

```
foreach (sentence dati-parte1 dati-parte2) [riga ->
```

```
let giorno item 0 riga
```

```
let consumo-consumer item 1 riga
```

```

let produzione item 2 riga
let consumo-prosumer item 3 riga
table:put tabella giorno (list consumo-consumer produzione consumo-prosumer)
]

show (word "Caricati " length table:keys tabella " giorni.")
end

; show "Caricamento dati completato."
; end

to-report replace-all [str old new]
let result ""
let len length str
let i 0
while [i < len] [
let char substring str i (i + 1)
ifelse char = old [
set result (word result new)
] [
set result (word result char)
]
set i i + 1
]
report result
end

;to ottimizza
; set migliore-utile -999999
; set migliore-configurazione []

; file-open "RisultatiCER.csv"
; file-print "consumer,kWp,utile"

; foreach [1 5 10 20 40 80 160 320 640 1000] [kWp-numero ->
; foreach [1 2 3 4 5 10 15 20 30 50 80 100] [consumer-numero ->
; set consumer consumer-numero
; set kWp kWp-numero
; setup
; repeat 366 [go]
; let utile-ott calcola-utile
; file-print (word consumer-numero "," kWp-numero "," utile-ott)

; if utile-ott > migliore-utile [
; set migliore-utile utile-ott
; set migliore-configurazione (list consumer-numero kWp-numero)
; ]
; ]
; ]

; file-close
; show (word "Migliore configurazione: " migliore-configurazione " (utile: " migliore-utile ")")
; end

to stampa-grafici
;; Bilancio Energetico (nomi pen ORIGINALI)
set-current-plot "Bilancio Energetico"
set-current-plot-pen "consumo"
plot sum [energia-consumata] of turtles
set-current-plot-pen "produzione"

```

```

plot energia-prodotta-tick

;; Bilancio Energetico Annuale (nomi pen ORIGINALI)
set-current-plot "Bilancio Energetico Annuale"
set-current-plot-pen "aaConsumo"
plot sum [energia-consumata] of turtles
set-current-plot-pen "a"
plot energia-prodotta-tick
set-current-plot-pen "aaa"
plot energia-virtuale-tot

;; Costi vs Ricavi (nomi pen ORIGINALI)
set-current-plot "Costi vs Ricavi"
set-current-plot-pen "Ricavo Totale"
plot producer_ricavo-anno
set-current-plot-pen "Utile"
plot ricavo-totale - sum [spesa] of turtles
set-current-plot-pen "pen-4"
plot utile-cer

;; Prosumer (nomi pen ORIGINALI)
set-current-plot "Prosumer"
set-current-plot-pen "spesa-no-fv"
plot spesa-no-fv-tot
set-current-plot-pen "spesa-con-fv"
plot spesa-con-fv-tot

;; Analisi Economica (generico)
set-current-plot "Analisi Economica"
set-current-plot-pen "Ricavo Giornaliero"
plot ricavo-tick-tot
set-current-plot-pen "Utile"
plot calcola-utile
end

```

7.2 Il listato “ABM per CER”

```

////////////////////////////////////
;; ABM-per-CER-rev15_VERSIONE_NETLOGO WEB
////////////////////////////////////

;; Nota: Le estensioni non supportate su Web sono state rimosse o commentate
;; extensions [rnd]

globals [
  total-consumption    ;; Consumo energetico totale del singolo
  total-consumption-tot ;; Consumo energetico totale della comunità
  energy-balance       ;; Bilancio energetico (produzione - consumo)
  co2-level            ;; Livello totale di CO2 emessa
  resilience           ;; Resilienza complessiva della comunità
  consumption          ;; Consumo giornaliero
  BSA                  ;; Benessere sociale aggregato (Sincronizzato con Widget)
  esigenze-elettriche
  energy
  energy-production    ;; Produzione della REC
  ptr                  ;; Media del Action-potential (Sincronizzato con Widget)
  RES-energy-coverage

```

```

MWp1           ;; potenza in megawatt dell'impianto fv

;; Coefficienti e parametri del modello
k1 k2 k3 k4 k5 ;; per il calcolo del Action-potential
g1 g2 g3 g4 co2-reduction spare-soil spare-fuel social-impact ;; per il calcolo del BSA

;; Variabili per i Plot (Nomi esatti dei tuoi Widget)
BSA-CO2 BSA-soil BSA-fuel BSA-social
]

breed [citizens citizen]
breed [RECs REC]
breed [governance governance_]
breed [markets market]
breed [environments environment]

citizens-own [
  awareness           ;; Consapevolezza ambientale
  ecological-behavior ;; Propensione a comportamenti sostenibili
  economic-interest   ;; Interesse verso il risparmio economico
  social-influence    ;; Propensione a essere influenzati
  joined-CER?         ;; Flag: ha aderito alla CER? (Sincronizzato con Widget)
  adoption-category   ;; Categoria di adozione (1=Innovatori, ..., 5=Laggards)
  energy-consumption  ;; Consumo energetico
  action-potential    ;; Action-potential
]

patches-own [
  solar-radiation     ;; Energia solare disponibile sulla patch
]

;;;;;;;;;;;;;;
;; SETUP PROCEDURES
;;;;;;;;;;;;;;

to setup
  clear-all
  ;; no-display (Rimosso perché non supportato su NetLogo Web)
  setup-costanti
  setup-citizens
  setup-governance
  setup-plots1
  reset-ticks
end

to setup-costanti
  ;; Inizializza i coefficienti valori d'esempio dal rev15
  set k1 0.33
  set k2 0.33
  set k3 0.34
  set k5 1
  set g1 0.00001
  set g2 0.000001
  set g3 0.0000001
  set g4 0.0000001
  set co2-reduction 0.100
  set spare-soil 2
  set spare-fuel 3
  set social-impact 4

  set total-consumption 0
  set total-consumption-tot 0
  set energy-balance 0

```

```

set co2-level 0
set resilience 0
set consumption 0
set BSA 0
set energy 0
set energy-production 0
end

to setup-citizens
ask patches [
  sprout 1 [
    set breed citizens
    set shape "person"
    set size 1
    set joined-CER? false
    assign-energy-consumption
    assign-adoption-categories
    set energy energy-consumption
    ;; Il cittadino colora la propria patch (Context Error Fixed)
    set pcolor scale-color red energy 0 5000
  ]
]
end

to assign-adoption-categories
ask citizens [
  let r random-float 1
  ifelse r < 0.025 [
    set adoption-category 5
    set action-potential (0.0 + random-float 0.2)
  ]
  [ ifelse r < 0.16 [
    set adoption-category 4
    set action-potential (0.2 + random-float 0.2)
  ]
  [ ifelse r < 0.50 [
    set adoption-category 3
    set action-potential (0.4 + random-float 0.2)
  ]
  [ ifelse r < 0.84 [
    set adoption-category 2
    set action-potential (0.6 + random-float 0.2)
  ]
  [
    set adoption-category 1
    set action-potential (0.8 + random-float 0.2)
  ]
  ]
]
set color scale-color blue adoption-category 5 0
set awareness action-potential
set ecological-behavior action-potential
set economic-interest action-potential
set social-influence (0.2 + random-float 0.3)
]
end

to setup-governance
create-governance 1 [
  set color blue set shape "circle" set size 1
]
end

```

```

to setup-plots1
  ;; Uso di carefully per evitare blocchi su NetLogo Web se i widget mancano
  carefully [ set-current-plot "Total Consumption" clear-plot ] []
  carefully [ set-current-plot "Aggregate Social Welfare" clear-plot ] []
end

;;;;;;;;;;;;;;
;; MAIN LOOP
;;;;;;;;;;;;;;

to go
  interact-with-citizens
  update-all-potential
  decide-to-join-REC
  calculate-efficiency
  educate-citizens
  update-environmental-impact

  ;; Sincronizzazione variabili per Monitor e Plot dell'interfaccia
  set esigenze-elettriche sum [energy-consumption] of citizens
  set total-consumption-tot sum [energy-consumption] of citizens with [joined-CER?]
  set ptr mean [action-potential] of citizens
  set RES-energy-coverage (total-consumption-tot / esigenze-elettriche)

  update-plots1
  update-ASW-plot

  if ticks mod 10 = 0 [ aggiorna-istogramma ]

  ;; Condizioni di stop originali
  if (count citizens with [joined-CER?]) / (count citizens) > 0.999 [ stop ]
  if count citizens with [joined-CER?] >= (participants% * count citizens) [ stop ]

  tick
end

;;;;;;;;;;;;;;
;; SUB-PROCEDURES
;;;;;;;;;;;;;;

to interact-with-citizens
  ask citizens [
    let neighbor one-of other citizens-here
    if neighbor != nobody [
      let tolerance 0.2
      ;; Matrice di similarità (PhD focus)
      let a-sim ifelse-value (abs(awareness - [awareness] of neighbor) < tolerance) [1] [0]
      let e-sim ifelse-value (abs(ecological-behavior - [ecological-behavior] of neighbor) < tolerance) [1] [0]
      let ec-sim ifelse-value (abs(economic-interest - [economic-interest] of neighbor) < tolerance) [1] [0]
      let s-sim ifelse-value (abs(social-influence - [social-influence] of neighbor) < tolerance) [1] [0]

      if (a-sim + e-sim + ec-sim + s-sim) >= 3 [
        let trait random 4
        if trait = 0 [ set awareness [awareness] of neighbor ]
        if trait = 1 [ set ecological-behavior [ecological-behavior] of neighbor ]
        if trait = 2 [ set economic-interest [economic-interest] of neighbor ]
        if trait = 3 [ set social-influence [social-influence] of neighbor ]
      ]

      ifelse [joined-CER?] of neighbor [
        set awareness (awareness + random-float 0.05 + (education-effort * 0.1))
        set ecological-behavior (ecological-behavior + random-float 0.03 + (awareness / 10))
      ]
    ]
  ]

```

```

]
[
  set awareness (awareness - random-float 0.01)
  set ecological-behavior (ecological-behavior - random-float 0.005)
]

set awareness max list 0 min list 1 awareness
set ecological-behavior max list 0 min list 1 ecological-behavior
]
]
end

to update-all-potential
ask citizens [
  let vicini citizens in-radius 2
  let media-eco mean [ecological-behavior] of vicini

  ;; Normalizzazione Vantaggio Economico
  let econ-adv ((energy-price - RECenergycost + incentives) / energy-price)
  if econ-adv > 1 [ set econ-adv 1 ]

  set action-potential (k1 * awareness + k2 * ecological-behavior + k3 * (economic-interest * econ-adv) + (k4 * social-influence *
media-eco))
  set action-potential max list 0 min list 1 action-potential
]
end

to decide-to-join-REC
ask citizens [
  if action-potential > adoption-threshold [
    if not joined-CER? [
      set joined-CER? true
      set color green
      set pcolor yellow
    ]
  ]
]
]
end

to calculate-efficiency
let production sum [solar-radiation] of patches
set energy-balance (production - total-consumption-tot)
end

to educate-citizens
ask citizens [
  set awareness min list 1 (awareness + education-effort * 0.01)
]
end

to update-environmental-impact
set MWp1 (total-consumption-tot / 1200)
set BSA-CO2 (g1 * co2-reduction * total-consumption-tot)
set BSA-soil (g2 * spare-soil * MWp1)
set BSA-fuel (g3 * total-consumption-tot * spare-fuel)
set BSA-social (g4 * social-impact * MWp1)
set BSA precision (BSA-CO2 + BSA-soil + BSA-fuel + BSA-social) 4
end

to assign-energy-consumption
ask citizens [
  let rnd_val random-float 201
  ifelse rnd_val < 71 [ set energy-consumption 2800 ] [

```

```

    ifelse rnd_val < 125 [ set energy-consumption 3200 ] [
      ifelse rnd_val < 164 [ set energy-consumption 3500 ] [
        ifelse rnd_val < 193 [ set energy-consumption 4000 ] [
          ifelse rnd_val < 200 [ set energy-consumption 4500 ] [
            set energy-consumption 5000
          ]
        ]
      ]
    ]
  ]
]
]
]
end

to update-ASW-plot
  carefully [
    set-current-plot "ASW Composition"
    set-current-plot-pen "CO2" plotxy ticks BSA-CO2
    set-current-plot-pen "Spare Soil" plotxy ticks (BSA-CO2 + BSA-soil)
    set-current-plot-pen "Spare Fuel" plotxy ticks (BSA-CO2 + BSA-soil + BSA-fuel)
    set-current-plot-pen "Social Impact" plotxy ticks (BSA-CO2 + BSA-soil + BSA-fuel + BSA-social)
  ] []
end

to update-plots1
  carefully [
    set-current-plot "Total Consumption"
    set-current-plot-pen "pen-2" plot total-consumption-tot
    set-current-plot-pen "default" plot total-consumption-tot
    set-current-plot "Aggregate Social Welfare"
    set-current-plot-pen "default" plot BSA
    set-current-plot "REC Participants"
    set-current-plot-pen "partecipanti" plot count citizens with [joined-CER?]
  ] []
end

to-report adhesion
  report precision (count citizens with [joined-CER?] / count citizens) 3
end

to aggiorna-istogramma
  carefully [
    set-current-plot "Action-potential"
    histogram [action-potential] of citizens
  ] []
end

to check-REC
  let joined count citizens with [joined-CER?]
  output-print (word "Partecipanti: " joined " | Consumo: " total-consumption-tot " kWh")
end

```