RdS
RICERCA DI SISTEMA

ENEA
AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA SICUREZZA ENERGETICA

Ricerca di Sistema elettrico

Valutazione e Gestione CER: Modelli e Strumenti di Valutazione delle CER (LA1.15)

L. Giannuzzo, F. D. Minuto, D. S. Schiera, A. Lanzini

Politecnico di Torino

RdS_PTR 22-24_PR1.7_LA1.15_332

Valutazione e Gestione CER: Modelli e Strumenti di Valutazione delle CER

LA 1.15 - Valutazione e Gestione CER: Modelli e Strumenti di Valutazione delle CER

L. Giannuzzo, F. D. Minuto, D. S. Schiera, A. Lanzini – Dipartimento di Energetica (DENERG), Politecnico di Torino

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: Tema di ricerca 1.7 – Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Linea di attività: 1.15

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work Package: Angelo Frascella, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Andrea Lanzini, Politecnico di Torino

Mese inizio previsto: 13

Mese inizio effettivo: 13

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: Studio e sviluppo di strumenti, processi e modelli a supporto delle comunità energetiche.

Indice

1 Risultati attesi 4
2 Risultati ottenuti 5
3 Prodotti attesi 6
4 Prodotti sviluppati 7
5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati 8
6 Sintesi delle attività svolte 9
7 Dettaglio delle attività svolte 10
7.1 KPIs per le CER 10
7.2 KPIs per benchmarking esterno 15
7.3 KPIs per benchmarking interno 18
8 Pubblicazioni scientifiche 20

Indice delle figure

Figura 1 – Metodologia per l'individuazione degli articoli scientifici contenenti KPIs definiti tramite formulazioni matematiche ben definite 10

Figura 2 – Volumi di controllo per il calcolo dei KPIs delle CER. 11

1 Risultati attesi

Questa attività è svolta dal Dipartimento di Energia "Galileo Ferraris" (DENERG) del Politecnico di Torino riguarda l'analisi degli strumenti di valutazione delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) da fornire come supporto ad ANCI o altre organizzazioni governative. Ad integrazione degli strumenti sviluppati in precedenza da ENEA (CRUISE e SIMUL), lo scopo di questo lavoro è quello di identificare gli strumenti e gli indicatori che meglio permettono di analizzare e confrontare due o più comunità su molteplici aspetti tecnici. Questi strumenti, come i Key Performance Indicators (KPIs), hanno lo scopo di permettere il confronto tra CER in maniera semplice e intuitiva, in modo che siano chiare sia le problematiche sia le eventuali opportunità sia per il gestore della comunità che per un eventuale decisore politico. L'identificazione di questi parametri deve mettere in luce: i dati necessari per la loro valutazione, le modalità di elaborazione matematica degli strumenti, l'insieme dei valori plausibili e il significato dei differenti range di risultato. L'output finale di questo lavoro sarà rappresentato da uno strumento software e da un report dettagliato contenente:

- Un insieme di KPIs definiti e identificati correttamente, in particolare per la loro rilevanza, il loro significato come indicatori di performance della comunità, il loro range di variabilità e le informazioni che forniscono in base al valore;
- Per ogni KPI, l'insieme di dati che ne permette il calcolo e la valutazione, e il metodo di calcolo.

Nello specifico, verranno sviluppati i seguenti contenuti:

- Un insieme di KPIs effettivamente rilevanti e rilavabili per le comunità energetiche che permettano il confronto tra le performance delle singole comunità oltre che l'identificazione dei fattori critici e di successo;
- Uno strumento di calcolo che, a partire dai dati delle comunità raccolti attraverso differenti metodologie, permetta il calcolo dei singoli KPI e la loro pubblicazione.

2 Risultati ottenuti

Sono stati realizzati un report tecnico dettagliato e un articolo di ricerca scientifica contenenti i seguenti risultati:

- Identificazione dei KPIs a supporto della valutazione delle CER attraverso un'analisi della letteratura tramite i motori di ricerca "Scopus" e "Web Of Science". Il processo di raccolta dei KPIs ha previsto la revisione di ben 251 articoli scientifici inerenti al tema delle CER, con lo scopo di individuare gli articoli contenenti le formulazioni e definizioni matematiche dei KPIs utili all'analisi delle prestazioni delle comunità energetiche;
- Raccolta dei KPIs a supporto della valutazione delle CER dagli articoli individuati dalla letteratura per l'analisi delle prestazioni delle CER in ambito energetico, economico, sociale ed ambientale;
- Creazione di una nomenclatura comune e realizzazione di un insieme di indicatori rilevanti in grado di fornire un quadro completo delle performance delle CER;
- Classificazione e categorizzazione degli indicatori in funzione del loro utilizzo, del loro campo di applicazione, del perimetro entro il quale vengono calcolati, e della tipologia di utenti a cui sono rivolti;
- Definizione delle procedure di calcolo dei KPIs – Definizione delle formule matematiche e degli strumenti di calcolo per la valutazione dei KPIs e dei loro range ammissibili;
- Modellazione delle metodologie di confronto (benchmarking) tra CER – Analisi della letteratura relativa alle tecniche di confronto (benchmarking) di tipo interno ed esterno in relazione ai propri dati storici;
- Analisi e definizione di KPIs a supporto del benchmarking interno ed esterno.

Gli indicatori individuati sono stati in parte utilizzati ed implementati negli strumenti computazionali CRUISE e SIMUL sviluppati da ENEA a supporto delle Comunità Energetiche.

3 Prodotti attesi

I prodotti attesi sono rappresentati da un report tecnico dettagliato contenente l'insieme di KPI definiti e identificati correttamente, effettivamente rilevanti e rilevabili per le comunità energetiche, che permettano la valutazione delle performance della comunità e il confronto tra comunità, e uno strumento di calcolo che, a partire dai dati delle comunità raccolti attraverso differenti metodologie, permetta il calcolo dei singoli KPI e la loro pubblicazione.

4 Prodotti sviluppati

Il lavoro svolto ha permesso di ottenere, oltre al presente report tecnico, i seguenti prodotti:

- documentazione tecnica di dettaglio con una discussione estensiva sull'identificazione e la definizione dei KPI, e relative relazioni matematiche (formule di calcolo) per analizzare e confrontare efficacemente un insieme di Comunità Energetiche Rinnovabili da diverse prospettive, al fine di rilevare le eventuali opportunità di sviluppo e crescita, e le possibili criticità;
- set di alcuni KPI implementati nel codice di calcolo utilizzato da ENEA nell'ambito degli strumenti a supporto delle comunità energetiche che sono stati sviluppati;
- paper scientifico disponibile in forma "pre-print" accessibile gratuitamente sull'archivio SSRN tramite il seguente link: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4991932.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

In relazione ai risultati attesi, non è stato realizzato uno strumento software specifico per i KPIs identificati. Tuttavia, è stato ampliato il perimetro dell'analisi riguardante le metodologie di valutazione delle performance delle CER, estendendo il confronto ai principali articoli scientifici della letteratura internazionale e alle metodologie di benchmarking più diffuse nella ricerca. Durante lo svolgimento delle attività, si è ritenuto infatti opportuno espandere l'analisi oltre i confini nazionali, con l'obiettivo di identificare strumenti e indicatori che si rivelassero più efficaci e pertinenti per la valutazione. Tale ampliamento di prospettiva ha consentito di scoprire indicatori e strumenti generalmente poco utilizzati e conosciuti nel contesto italiano, ma che si sono dimostrati estremamente utili per l'analisi delle performance delle CER a livello internazionale. Inoltre, l'esplorazione delle metodologie di confronto e delle tecniche di benchmarking ha permesso di delineare le modalità di utilizzo più efficaci dei KPIs identificati, in un'ottica di confronto e valutazione delle prestazioni di molteplici CER.

6 Sintesi delle attività svolte

L'attività è stata svolta in stretta collaborazione con ENEA tramite confronto e aggiornamento periodico sui diversi aspetti affrontati.

È stata condotta un'analisi della letteratura finalizzata all'identificazione dei KPIs più significativi per la valutazione delle prestazioni delle CER suddivisi per ciascun ambito di analisi (energetico, economico, sociale e ambientale). Successivamente, gli indicatori identificati sono stati classificati in base al loro scopo, utilizzo, ambito di calcolo e tipologia di utenti a cui sono destinati. Inoltre, gli indicatori raccolti dalla letteratura sono stati ridefiniti attraverso formulazioni matematiche all'interno di una nomenclatura comune. In parallelo, sono state esplorate le modalità di raccolta dei dati necessari per il calcolo dei KPIs e sono state elencate e descritte le tecniche di trattamento dei dati, finalizzate a garantire l'integrità delle informazioni raccolte. È stata inoltre condotta un'analisi della letteratura sulle tecniche di benchmarking interno ed esterno, identificando i modelli matematici utili per il confronto delle performance delle CER. In aggiunta, sono stati identificati i KPIs a supporto dei principali modelli di benchmarking interno ed esterno ed è stato proposto in modo dettagliato un modello di benchmarking esterno mirato al confronto delle prestazioni delle CER nel tempo.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 KPIs per le CER

È stata fatta un'analisi approfondita della letteratura al fine di identificare i KPIs più rilevanti per la valutazione delle prestazioni delle CER attraverso i motori di ricerca "Scopus" e "Web Of Science", secondo la metodologia illustrata in Figura 1.

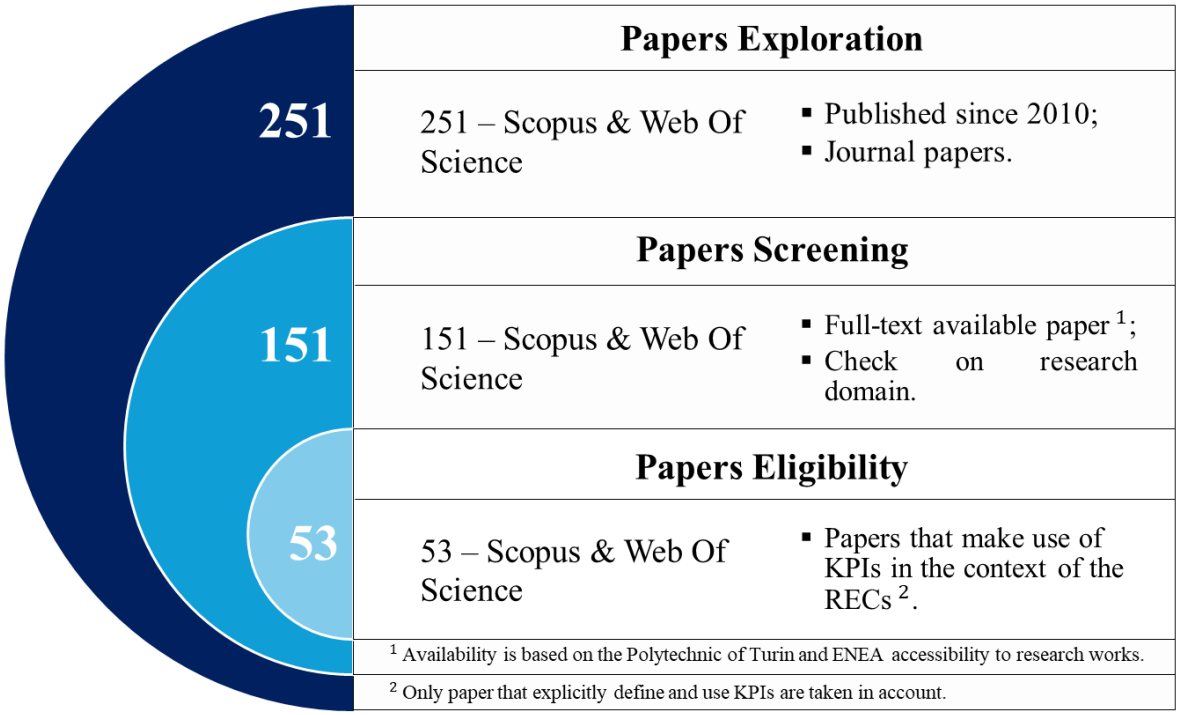

Figura 1 – Metodologia per l'individuazione degli articoli scientifici contenenti KPIs definiti tramite formulazioni matematiche ben definite

Tramite opportuni criteri di selezione sono stati identificati inizialmente 251 articoli scientifici relativi al tema delle CER e all'utilizzo di KPIs. Tali articoli, sono stati poi ulteriormente ispezionati al fine di identificare gli articoli che contengono e fanno uso in modo esplicito di KPIs tramite formulazioni matematiche ben definite. Gli indicatori così individuati, sono stati raccolti e ulteriormente categorizzati in funzione del loro ambito, scopo, modalità utilizzo, tipologia di utenti a cui sono rivolti, e perimetro fisico entro il quale vengono calcolati (volume di controllo). Il termine "ambito", utilizzato per categorizzare i KPIs estratti dalla letteratura, fa riferimento alle aree operative specifiche in cui opera una CER. Da un'attenta analisi vengono individuate quattro diverse tipologie di ambito: energetico, economico, ambientale e sociale. Parallelamente al concetto di ambito, il termine "utilizzo" riferito ai KPIs per la valutazione delle prestazioni delle CER, identifica lo scopo per cui gli indicatori vengono impiegati. In letteratura, i principali utilizzi associati ai KPIs sono:

- Planning – Attività che riguardano il processo di dimensionamento e creazione di una CER attraverso simulazioni e algoritmi di ottimizzazione basati su dati sintetici o reali, e che non fanno riferimento al monitoraggio di dati in tempo reale;

- Operation – Attività legate alla gestione e all'ottimizzazione dei processi reali che coinvolgono CER già costituite;
- Benchmarking – Attività riguardanti il confronto delle prestazioni delle CER nei loro diversi ambiti, sia nei contesti di simulazione di comunità che in contesti di casi studio reali;
- Monitoring – Attività che includono l'osservazione e il controllo continuo dei processi e delle prestazioni all'interno delle CER per un determinato periodo di tempo.

In seguito, si definiscono "Targets" i soggetti ai quali sono destinati i KPIs. Essi si suddividono in:

- Policymakers – Funzionari governativi e autorità di regolamentazione responsabili della creazione e dell'attuazione di politiche, leggi e regolamenti che riguardano le CER;
- Stakeholders – Individui o gruppi con un interesse ad una partecipazione nelle CER. Tra questi vi sono gli aggregatori, gli investitori e le istituzioni finanziarie che finanziano il progetto, le organizzazioni ambientaliste che promuovono pratiche sostenibili, le utility e i fornitori coinvolti nella distribuzione e nella gestione dell'energia;
- CER Members – Individui, famiglie, aziende o organizzazioni che configurano come membri effettivi di una CER;
- CER or CER Manager – Entità o persona responsabile della gestione quotidiana delle CER.

Infine, vengono definiti tre perimetri entro il quale possono essere calcolati i KPIs (volumi di controllo), raffigurati in Figura 2.

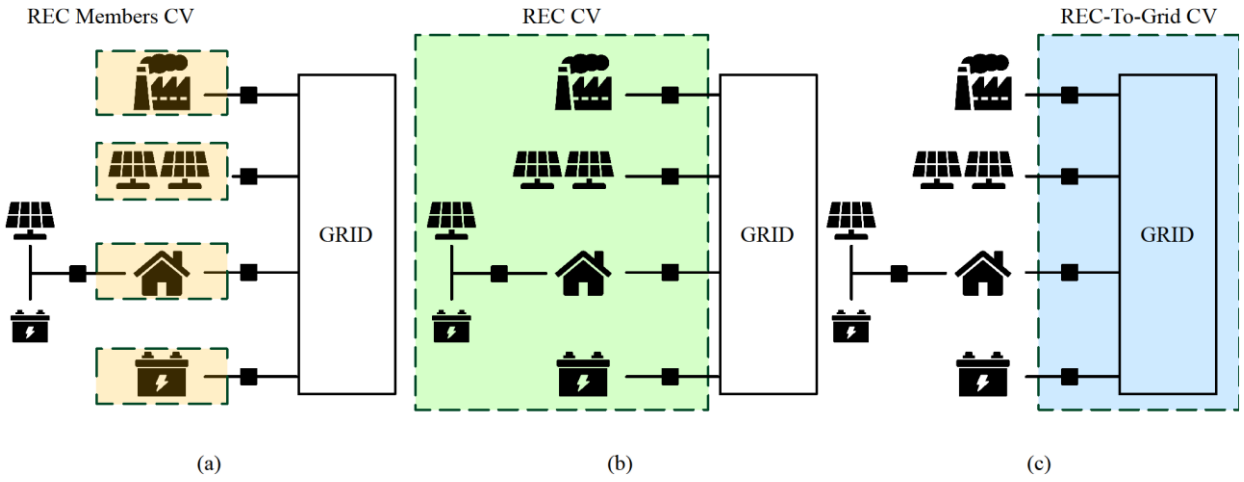

Figura 2 – Volumi di controllo per il calcolo dei KPIs delle CER.

In seguito a ciò, sono state ridefinite le formule matematiche e gli strumenti di calcolo relativi alla valutazione dei KPIs, attraverso la definizione di una nomenclatura comune, creando una lista di indicatori che fornisce un quadro chiaro per l'analisi delle performance delle CER in ogni ambito, rappresentata in Tabella 1.

Tabella 1 – KPIs selezionati dalla letteratura per l'analisi delle performance di una CER.

KPI	Ambito	Formula	Definizione	Utilizzo	Target	Volume di Controllo
Shared Energy (SE)	Energetico	$SE = \min\left(E_{withdrawn}, E_{feed\ into}\right)$	Valore minimo, in ogni time step, tra l'energia prelevata da rete ($E_{withdrawn}$) e quella immessa in rete ($E_{feed\ into}$) (kWh).	Planning, Monitoring	CER, Policymakers, Stakeholders	CER-To-Grid
Self – Consumption Rate (SCR)	Energetico	$SCR = \frac{\sum_{t=1}^{T}(SC_{dir,t} + SE_t)}{\sum_{t=1}^{T} E_{generated,t}}$	Rapporto tra l'energia elettrica autoconsumata direttamente (SC_{dir}) più la *Shared Energy* (SE) e l'energia elettrica prodotta ($E_{generated}$) all'interno della CER (%). *T* rappresenta l'estensione temporale in cui l'indicatore viene calcolato.	Planning, Monitoring, Benchmarking	CER, Policymakers, Stakeholders	CER
Self – Sufficiency Rate (SSR)	Energetico	$SSR = \frac{\sum_{t=1}^{T}(SC_{dir,t} + SE_t)}{\sum_{t=1}^{T} E_{demand,t}}$	Rapporto tra l'energia elettrica autoconsumata direttamente (SC_{dir}) più la *Shared Energy* (SE) e la domanda di energia elettrica della CER (E_{demand}) (%). *T* rappresenta l'estensione temporale in cui l'indicatore viene calcolato.	Planning, Monitoring, Benchmarking	CER, Policymakers, Stakeholders	CER
Electrical Self – Production Rate (ESP)	Energetico	$ESP = \frac{\sum_{t=1}^{T} E_{generated,t}}{\sum_{t=1}^{T} E_{demand,t}}$	Rapporto tra l'energia elettrica prodotta dalla CER ($E_{generated}$) e la domanda di energia della comunità (E_{demand}) (%). *T* rappresenta l'estensione temporale in cui l'indicatore viene calcolato.	Planning, Monitoring, Benchmarking	CER, Policymakers, Stakeholders	CER
Grid Energy Interaction Factor (GEIF)	Energetico	$GEIF = \frac{\sum_{t=1}^{T}\left(E_{withdrawn,t} + E_{feed\ into,t}\right)}{\sum_{t=1}^{T} E_{demand,t}}$	Rapporto tra l'energia elettrica prelevata da rete ($E_{withdrawn}$) più l'energia elettrica immessa in rete ($E_{feed\ into}$) e la domanda di energia elettrica della CER (E_{demand}). (%). *T* rappresenta l'estensione temporale in cui l'indicatore viene calcolato.	Operation, Monitoring	CER, Policymakers	CER
Energy Storage Opportunity (ESO)	Energetico	$ESO = \sum_{t=1}^{T} \max\left(0, min\left(E_{REC\ sur,t}, E_{REC\ def,t}\right) - E_{REC\ storage,t}\right)$	Quantifica la necessità di installazione di energy storage all'interno della CER in relazione al surplus di energia elettrica ($E_{REC\ sur,t}$), al deficit di energia elettrica ($E_{REC\ def,t}$), e l'energia caricata o scaricata dagli energy storage già presenti in comunità ($E_{REC\ storage,t}$) (kWh).	Operation	CER, Stakeholders	CER
Flexibility Activated (FA)	Energetico	$FA = \sum_{i=1}^{T} E_{flex,t}$	Energia annuale usata all'intero della CER per fornire servizi di flessibilità ($E_{flex,t}$) (kWh). *T* rappresenta l'estensione temporale in cui l'indicatore viene calcolato.	Monitoring	CER, Policymakers	CER-To-Grid
Payback Time (PBT)	Economico	$PBT = \frac{C_0}{\overline{Inc_y} - \overline{Exp_y}}$	Periodo richiesto per uguagliare i ricavi generati dalla CER agli investimenti iniziali (y). I ricavi e le spese annuali devono essere attualizzati utilizzando un opportuno tasso di sconto.	Planning	CER, CER Members, Stakeholders	CER

Energy Bills Reduction (EBR)	Economico	$EBR = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T} C_{bill,ex-REC,t}}{\sum_{t=1}^{T} C_{bill,REC,t}}$	Rapporto tra i costi dovuti all'approvvigionamento di energia prima della creazione della CER ($C_{bill,ex-REC}$) e dopo la sua realizzazione ($C_{bill,REC}$). T rappresenta l'estensione temporale in cui l'indicatore viene calcolato.	Monitoring, Benchmarking	CER Members	CER Members
Levelized Cost of Energy Consumed (LCOEC)	Economico	$LCOEC = \frac{\sum_{n=1}^{N} \frac{I_n + M_n}{(1+a)^n}}{\sum_{n=1}^{N} \frac{E_n}{(1+a)^n}}$	Si riferisce al costo medio per unità di energia consumata dalla comunità in una determinate finestra temporale di lunghezza N (€/kWh). Questo indicatore comprende al suo interno i costi capitali, i costi operativi e di manutenzione.	Planning, Benchmarking	CER, Stakeholders	CER
Share of Individual Savings (SIS)	Economico	$SIS = \frac{\sum_{i=1}^{N} (P_i - P_i^*)}{\sum_{i=1}^{N} P_i}$	Percentuali di ricavi sviluppata da un singolo prosumer o consumer all'interno della CER per aver scambiato e acquistato energia con gli altri utenti della comunità (P_i), rispetto a quanto avrebbe speso in assenza della comunità (P_i^*)(%).	Operation, Monitoring	CER, CER Members	CER Members
Community Share of Market Savings (CSMS)	Economico	$CSMS = \frac{\sum_{i=1}^{N} (P_{DSO,i} - P_{DSO,i}^*)}{\sum_{i=1}^{N} P_{DSO,i}}$	Somma dei ricavi sviluppata da ogni singolo agente locale (DSO) all'interno della CER per effetto dello scambio e acquisto di energia nella CER (P_{DSO}) rispetto a quanto avrebbe speso in assenza della comunità (P_{DSO}^*) (%).	Operation, Monitoring	CER, CER Members	CER Members
Revenues from Flexibility (RF)	Economico	$R_{flex} = \sum_{t=1}^{T} p_{flex,t} * E_{flex,t}$	Rappresenta I ricavi generate dalla messa in atto di servizi ancillari di flessibilità (€). $p_{flex,t}$ è il costo unitario espresso in $€/kWh_{flex}$ e $E_{flex,t}$ è l'energia utilizzata nel timestep t ai fini della flessibilità, comprensivo sia della quota per messa in disponibilità che per quella di attivazione.	Monitoring	CER, CER Members, Policymakers	CER-To-Grid
Internal Rate of Return (IRR)	Economico	$0 = NPV = -CAPEX + \sum_{i=1}^{N} \frac{CF_i}{(1-IRR)^n}$	Rappresenta il discount rate per il quale il net present value (NPV), relativo a tutti i flussi di cassa (CF_i), si annulla.	Planning	CER; CER Members, Stakeholders	CER
Environmental Impact (ENVI)	Ambientale	$ENVI = \frac{\sum_{t=1}^{T} X_{poll,REC,t}}{\sum_{t=1}^{T} X_{poll,ex-REC,t}}$	Impatto ambientale in termini di tonnellate annue di uno specifico inquinante X (X_{poll}) evitate per effetto della realizzazione della CER (%). T rappresenta l'estensione temporale in cui l'indicatore viene calcolato.	Planning, Monitoring, Benchmarking	CER, Policymakers	CER
Low carbon Public Transportation Vehicles deployment rate (LPTV)	Ambientale	$LPTV = \frac{N_{LPTV}}{N_{REC\ public\ vehicles}}$	Quantificazione dell'adozione di veicoli a basso impatto emissivo per il trasporto pubblico all'interno della CER (%), dove $N_{REC\ public\ vehicles}$ è la somma di tutti i veicoli per il trasporto pubblico in comunità, e N_{LPTV} è il numero di veicoli a basso impatto emissivo utilizzati.	Monitoring, Benchmarking	CER, CER Members, Policymakers	CER
Use of Land (UoL)	Ambientale	$UoL = \sum_{i=1}^{I} A_{no\ more\ avail,i}$	Area non più utilizzabile per l'agricoltura o la cura della biodiversità per via della realizzazione della CER e delle sue	Planning, Monitoring	CER, Policymakers	CER

			attività (m2). $A_{no\ more\ avail,i}$ è la i-esima superficie della comunità non più utilizzabile, e *I* è il numero totale di aree non più utilizzabili.			
GHG Emissions (GHGE)	Ambientale	$GHGE = \sum_{i=1}^{T} (CO2_{eq,prod.t} + CO2_{eq,oper,t} + CO2_{eq,trans,t})$	Emissioni di GHG (carbon footprint) nella comunità (kg of CO2-eq.) espresso come la somma delle emissioni di CO2 dovute alla produzione di energia ($CO2_{eq,pord}$), alle attività operative ($CO2_{eq,oper}$) e alla trasmissione dell'energia ($CO2_{eq,trans}$) all'interno della CER. *T* rappresenta l'estensione temporale in cui l'indicatore viene calcolato.	Operation, Monitoring	CER, Policymakers	CER
Social Energy Empowerment (SEE)	Sociale	$SEE = \frac{N_{resp,REC}}{N_{REC}}$	Percentuale della popolazione facente parte la CER che si ritiene conscia e responsabile ($N_{resp,REC}$) del proprio consumo energetico (%).	Monitoring	CER Members	CER
Social Business Development (SBD)	Sociale	$SBD = B_{EP} + B_{FP}$	Numero di business e attività a carattere sociale sviluppati all'interno della CER, incluse le attività relative alla povertà energetica (B_{EP}) e alla *fuel poverty* (B_{FP}).	Monitoring	CER, CER Members	CER
Energy Poverty Help (EPH)	Sociale	$EPH = \frac{REC_{Inc}}{MUC * Bp_{grid}}$	Rapporto tra i ricavi della CER (REC_{Inc}) e il consumo medio di un singolo utente all'interno della CER (MUC) moltiplicato per il proprio prezzo medio di acquisto dell'energia da rete (BP_{grid}). Questo indicatore rappresenta quanti utenti della CER potrebbero essere aiutati se in condizioni di povertà energetica.	Monitoring, Benchmarking	CER, CER Members	CER
Open Data Access (ODA)	Sociale	$ODA = \frac{REC_{open\ data}}{REC_{data}}$	Percentuale di dati anonimizzati monitorati all'interno della CER che sono pubblicamente accessibili attraverso API ($REC_{open\ data}$), rispetto ai dati complessivamente raccolti all'interno della comunità (REC_{data}) (%).	Monitoring, Benchmarking	CER, CER Members, Policymakers	CER
Local Data Governance (LDG)	Sociale	$LDG = Yes/No$	Indica se è stato istituito un comitato di cittadini e stakeholder (industriali, accademici, esperti sociali, ecc.) per lavorare su diversi aspetti relativi alla raccolta dei dati (accordi di condivisione, accordi di monitoraggio, supporto GDPR, trasparenza, ecc.)	Planning	CER, CER Members, Stakeholders	CER
Local Representation (LR)	Sociale	$LR = \frac{N_{rep,REC}}{N_{REC}}$	Valuta la rappresentatività delle persone in relazione a coloro che costituiscono il gruppo di governance locale della CER (%). $N_{rep,REC}$ è il numero di membri della CER che si sentono rappresentati dal team di governance, mentre N_{REC} è il numero totale di membri della CER.	Monitoring, Benchmarking	CER, CER Members	CER

Successivamente, sono state esplorate e descritte diverse modalità di raccolta dei dati necessarie per il calcolo dei KPIs. Il processo di raccolta dei dati può avvenire su diverse scale temporali in funzione della tipologia di utenti e delle loro apparecchiature di misura. In generale, in presenza di dati mancanti o anomali, anche se in quota minoritaria, è possibile migliorare la qualità dei dati a disposizione attraverso l'utilizzo di algoritmi di analisi dati, come ad esempio algoritmi di pre-processing ed analisi statistica. Il processo di raccolta dati è generalmente divisibile in due fasi:

- Raccolta dati – Campionamento del consumo elettrico dei membri della CER su scala quartoraria, oraria, mensile o annuale;
- Elaborazione dati – Eliminazione dei valori mancanti o anomali; ricostruzione del profilo orario anche a partire da dati mensili o annuali; utilizzo di profili standard.

La fase di raccolta dati coinvolge la cattura, l'archiviazione e la gestione delle informazioni relative alla produzione e al consumo di energia all'interno di una comunità. La fase di elaborazione, invece, si articola in diversi casi a seconda della risoluzione temporale dei dati collezionati durante la fase precedente. Per i dati relativi al consumo dei membri all'interno della CER, in presenza di dati orari reali, rilevabili ad esempio attraverso l'ausilio degli smart meter, è necessario intraprendere un processo di finitura dei dati attraverso algoritmi di pre-processing ed analisi statistica, come menzionato in precedenza. In situazioni in cui è presente il solo dato del consumo elettrico mensile, diviso nelle varie fasce di consumo (F1, F2 e F3), o i dati di consumo annuali, è necessario intraprendere un processo di ricostruzione del profilo orario, con lo scopo di ottenere i profili di carico idonei per valutazione delle performance della CER. In caso di assenza di dati di produzione, è necessario l'utilizzo di strumenti di simulazione.

7.2 KPIs per benchmarking esterno

È stata condotta un'analisi della letteratura sulle tecniche di benchmarking, sia interne che esterne, in relazione ai dati storici delle CER, con lo scopo di facilitare l'identificazione delle eventuali aree di miglioramento e valutare l'andamento delle prestazioni nel tempo. In generale, il processo di benchmarking interno ha le proprie fondamenta nei KPIs relativi alla valutazione delle performance della singola CER. Il benchmarking esterno prevede invece confronto delle prestazioni di un sistema con quelle di sistemi diversi. Lo scopo principale di tale processo è quello di valutare il comportamento di un sistema in relazione allee performance di altri sistemi, e di identificare le pratiche o gli standard che differenziano i sistemi più efficienti da quelli meno performanti, nel corso del tempo. Diversamente, il benchmarking esterno mira al confronto delle prestazioni di un sistema con quelle di sistemi diversi. Lo scopo principale di tale processo è quello di valutare l'evoluzione di un sistema in relazione alle prestazioni di altri, così da poter identificare le pratiche e gli standard che differenziano i sistemi più efficienti da quelli meno performanti. Il modello di benchmarking esterno proposto per il confronto tra CER distiene si basa sulle metodologie di tipo *Data Envelope Analysis* (DEA). Tale modello si configura come uno dei più semplici e più flessibili da applicare ed è un modello di tipo matematico che concerne la valutazione dei *Performance Indicators* (PI) e del *Global Performance Indicator* (GPI) per le comunità di cui si desidera effettuare il confronto. I PI sono definiti per ciascun ambito di attività delle CER e riassumono le prestazioni della comunità per ciascuno di essi. I PI si basano sui KPI di primo

livello utilizzati per l'analisi delle performance della singola CER. Essendo essi non tutti esprimibili in forma percentuale, o comunque in un range univoco per tutti, è necessario uniformare il calcolo dei KPI su una scala comune. I KPI vengono quindi normalizzati secondo la seguente equazione:

$$KPI_{x,i}^{p} = \frac{KPI_{x,i}^{CER_j} - \min(A_{x,i})}{\max(A_{x,i}) - \min(A_{x,i})} \ [\%] \quad ; A_{x,i} = \left\{KPI_{x,i}^{CER_1}, KPI_{x,i}^{CER_2}, \dots, KPI_{x,i}^{CER_n}\right\} \ (1)$$

dove:

- $KPI_{x,i}^{p}$ rappresenta l'*i*-esimo KPI normalizzato nell'ambito *x;*
- $KPI_{x,i}^{CER_j}$ è l'*i*-esimo KPI nell'ambito *x*, della *j*-esima CER;
- $A_{x,i}$ è l'insieme di tutti gli *i*-esimi KPI calcolati per tutte le CER analizzate, nell'ambito *x*;
- n è il numero totale di CER.

In sintesi, un generico KPI appartenente ad uno dei quattro ambiti viene rielaborato attraverso una normalizzazione di tipo "min-max", dove il valore del singolo KPI viene riproporzionato in funzione del valore massimo e minimo calcolato tra tutte le CER in esame riferito del medesimo KPI. Dopo aver dunque riproporzionato i KPI in modo da poter confrontare sulla stessa scala di valori, è possibile definire i PI per ciascuno degli ambiti operativi di una CER. In generale, i PI vengono definiti in modo flessibile attribuendo dei pesi specifici ad ognuno dei KPI coinvolti nel calcolo. In questo modo, è possibile operare sui pesi dei singoli KPI per poter accentuare il peso di alcuni KPI specifici per gli scopi successivi dell'analisi. Il PI riferito all'ambito energetico è definito dall'Equazione 2 e viene quindi calcolato sulla base dei KPI energetici descritti per l'analisi delle performance della singola CER.

$$ENPI_j = \frac{\sum_{i=1}^{N_{KPI,energy}} \alpha_i * KPI_{energy,i}^{p}}{\sum_{i=1}^{N_{KPI,energy}} \alpha_i} \ [\%] \quad ; \quad \alpha_i \in [0;1] \qquad (2)$$

dove:

- *ENergy Performance Indicator* ($ENPI_j$) è l'indicatore riferito alla *j*-esima CER descrittivo delle performance energetiche;
- $KPI_{x,i}^{p}$ rappresenta l'*i*-esimo KPI normalizzato nell'ambito *x;*
- α_i rappresenta l'*i*-esimo peso associato all'*i*-esimo percentile dell'*i*-esimo KPI;
- $N_{KPI,energy}$ è il numero di KPI energetici.

Il PI riferito all'ambito economico, invece, è definito dall'Equazione 3 e viene calcolato sulla base dei KPI economici di primo livello.

$$ECPI_j = \frac{\sum_{i=1}^{N_{KPI,economic}} \alpha_i * KPI_{economic,i}^{p}}{\sum_{i=1}^{N_{KPI,economic}} \alpha_i} \ [\%] \quad ; \quad \alpha_i \in [0;1] \qquad (3)$$

dove:

- *EConomic Performance Indicator* ($ECPI_i$) è l'indicatore di prestazioni della *j*-esima CER in ambito economico;
- $KPI_{x,i}^{p}$ rappresenta l'*i*-esimo KPI normalizzato nell'ambito *x;*
- $KPI_{x,i}^{CER_i}$ è l'*i*-esimo KPI nell'ambito *x*, dell'*i*-esima CER;
- α_i rappresenta l'*i*-esimo peso associato all'*i*-esimo percentile dell'*i*-esimo KPI;
- $N_{KPI,economic}$ è il numero di KPI economici.

Analogamente, il PI riferito all'ambito sociale è calcolato secondo l'Equazione 4.

$$SPI_j = \frac{\sum_{i=1}^{N_{KPI,social}} \alpha_i * KPI_{social,i}^{p}}{\sum_{i=1}^{N_{KPI,social}} \alpha_i} \ [\%] \quad ; \quad \alpha_i \in [0;1] \tag{4}$$

dove:

- *Social Performance Indicator* (SPI_j) è l'indicatore di prestazioni della *j*-esima CER in ambito sociale;
- $KPI_{x,i}^{p}$ rappresenta l'*i*-esimo KPI normalizzato nell'ambito *x;*
- α_i rappresenta l'*i*-esimo peso associato all'*i*-esimo percentile dell'i-esimo KPI;
- $N_{KPI,social}$ è il numero di KPI sociali.

Infine, il PI riferito all'ambito ambientale è calcolato tramite l'Equazione 5.

$$EPI_j = \frac{\sum_{i=1}^{N_{KPI,environmental}} \alpha_i * KPI_{environmental,i}^{p}}{\sum_{i=1}^{N_{KPI,environmental}} \alpha_i} \ [\%] \quad ; \alpha_i \in [0; \tag{5}$$

dove:

- *Environmental Performance Indicator* (EPI_j) è l'indicatore di prestazioni della *j*-esima CER in ambito ambientale;
- $KPI_{x,i}^{p}$ rappresenta l'*i*-esimo KPI normalizzato nell'ambito *x;*
- α_i rappresenta l'*i*-esimo peso associato all'*i*-esimo percentile dell'i-esimo KPI;
- $N_{KPI,environmental}$ è il numero di KPI ambientali.

Come ribadito in precedenza, i PI sono descrittivi del comportamento generale di una CER nell'ambito energetico, economico, sociale ed ambientale, e la loro scala temporale è funzione della risoluzione temporale con la quale vengono calcolati i singoli KPI del primo livello. I pesi utilizzati per ponderare i singoli KPI per il calcolo di ciascun PI (α_i) variano a seconda dell'importanza che si desidera attribuire a ciascun KPI durante la fase di calcolo. Il parametro relativo alle prestazioni globali della singola (GPI) è calcolato come segue.

$$GPI = \frac{\beta_1 * ENPI + \beta_2 * ECPI + \beta_3 * SPI + \beta_4 * EPI}{\sum_{i=1}^{4} \beta_i} \ [\%] \quad ; \quad \beta_{1,2,3,4} \in [0; 1] \qquad (6)$$

dove:

- GPI rappresenta il global performance indicator;
- β_i rappresenta l'*i*-esimo peso associato al generico settore del PI.

Così come per il calcolo dei singoli PI, anche per la valutazione del GPI vengono utilizzati dei pesi specifici. Essi possono essere utilizzati per ponderare i singoli *Performance Indicator,* e possono quindi essere utilizzati per enfatizzare l'importanza delle prestazioni della CER in uno o più ambiti. Infine, il GPI può essere usato per effettuare un ranking di diverse CER o per fare un confronto mirato delle prestazioni delle CER su finestre temporali specifiche.

7.3 KPIs per benchmarking interno

È stato svolto un lavoro che ha permesso di definire alcune delle metriche utili ai processi di benchmarking interno (Tabella 2). Nello specifico sono state definite le metriche relative alle:

- Prestazioni di comunità registrate nel mese precedente;
- Prestazioni complessivamente registrate dalla CER negli ultimi 12 mesi;
- Prestazioni della CER nello stesso mese riferite all'anno precedente;
- Prestazioni mensili migliori, in senso assoluto, registrate dalla CER nel corso degli anni di misurazione dei dati.

Tabella 2 – Metriche a supporto del benchmarking interno.

Metriche	Formula	Definizione	Utilizzo
Confronto con il mese precedente	$P_{KPI,x,m} = \frac{KPI_{x,m}}{KPI_{x,m-1}}$	$P_{KPI,m,x}$ rappresenta l'aumento o la diminuzione percentuale di un generico KPI nel *m*-esimo mese in relazione al mese precedente; $KPI_{x,m}$ rappresenta il generico KPI "x" valutato nel *m*-esimo mese; $KPI_{x,m-1}$ rappresenta il generico KPI "x" valutato nel mese *m-1*. Tale valutazione necessita quindi dei dati storici relativi al mese *m*-esimo e al suo precedente.	Monitoraggio delle prestazioni nel tempo.
Confronto con l'ultimo anno	$P_{KPI,x,y} = \frac{KPI_{x,m}}{KPI_{x,y}}$	$P_{KPI,x.y}$ rappresenta l'aumento o la diminuzione percentuale di un generico KPI nel *m*-esimo mese in relazione alle prestazioni medie degli ultimi 12 mesi; $KPI_{x,m}$ rappresenta il generico KPI "x" valutato nel *m*-esimo mese; $KPI_{x,y}$ rappresenta la media del generico KPI "x" valutato negli ultimi 12 mesi. Tale valutazione necessita quindi dei dati storici relativi al mese *m*-esimo e agli ultimi 12 mesi.	Monitoraggio delle prestazioni nel tempo.
Confronto con lo stesso mese dell'anno precedente	$P_{KPI,x,m-y} = \frac{KPI_{x,m}}{KPI_{x,m-y}}$	$P_{KPI,x.m-y}$ rappresenta l'aumento o la diminuzione percentuale di un generico KPI nel *m*-esimo mese in relazione alle prestazioni registrate nello stesso mese dell'anno precedente; $KPI_{x,m}$ rappresenta il generico KPI "x" valutato nel *m*-esimo mese; $KPI_{x,y}$ rappresenta il generico KPI "x" valutato nello stesso mese dell'anno precedente. Per poter effettuare questo tipo di confronto è necessario disporre dei dati storici relativi al mese *m*-esimo e allo stesso mese dell'anno precedente.	Monitoraggio delle prestazioni nel tempo.
Confronto con le prestazioni migliori	$P_{KPI,x,best} = \frac{KPI_{x,m}}{KPI_{x,best}}$	$P_{KPI,x.best}$ rappresenta l'aumento o la diminuzione percentuale di un generico KPI nel *m*-esimo mese in relazione alle prestazioni più elevate della CER registrate in assoluto; $KPI_{x,m}$ rappresenta il generico KPI "x" valutato nel *m*-esimo mese; $KPI_{x,y}$ rappresenta il generico KPI "x" riferito al mese in cui presenta il suo valore più alto. Tale valutazione necessita quindi di dati storici quanto più estesi possibile, in quanto è necessario identificare le prestazioni migliori della CER in senso assoluto.	Monitoraggio delle prestazioni nel tempo.

8 Pubblicazioni scientifiche

Dal lavoro svolto è stato scritto un articolo scientifico attualmente disponibile in forma "pre-print" accessibile gratuitamente sull'archivio SSRN tramite il seguente link: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4991932 . Inoltre, l'articolo è stato sottomesso, ed è ad oggi in fase di revisione scientifica, presso la rivista "Applied Energy" (https://www.sciencedirect.com/journal/applied-energy).