

Ricerca di Sistema elettrico



Studio LCA e dei costi di tipo "cradle-to-grave" di reti termiche a bassa temperatura di nuova generazione basate sull'impiego di pompe di calore elettriche "booster" condensate ad acqua: analisi di diversi casi studio definiti sulla base della rete termica realizzata presso il Centro Ricerche ENEA Portici (LA5.4)

Claudio Zuffi, Adalgisa Sinicropi, Maria Laura Parisi



UNIVERSITÀ
DI SIENA
1240



DIPARTIMENTO DI BIOTECNOLOGIE,
CHIMICA E FARMACIA

Studio LCA e dei costi di tipo "cradle-to-grave" di reti termiche a bassa temperatura di nuova generazione basate sull'impiego di pompe di calore elettriche "booster" condensate ad acqua: analisi di diversi casi studio definiti sulla base della rete termica realizzata presso il Centro Ricerche ENEA Portici (LA5.4)

C. Zuffi¹, A. Sinicropi², M. L. Parisi².

¹Università degli Studi di Firenze

²Università degli Studi di Siena

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: Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica

Linea di attività: 5.4

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: Luigi Mongibello, ENEA

Responsabile Linea di Attività: UNISI_DBCF

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: Si ringrazia per la collaborazione alle attività svolte

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti.....	5
3	Prodotti attesi	8
4	Prodotti sviluppati	9
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	10
6	Sintesi delle attività svolte	13
7	Dettaglio delle attività svolte.....	14
7.1	Definizione dei casi studio	14
7.2	Definizione dell'ambito e inventario del ciclo di vita	14
7.3	Valutazione degli impatti del ciclo di vita	17
7.4	Analisi economica	20
7.5	Confronto sistemi di accumulo elettrico	21
7.6	Confronto sistemi di accumulo termico	21
7.7	Linee Guida	22
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	23
9	Pubblicazioni scientifiche	24
10	Eventi di disseminazione	25

Indice delle figure

Figura 7.1: Analisi dell'impatto ambientale del sistema geotermico nelle configurazioni ad anello/albero e 25°C/45°C	18
Figura 7.2: Valutazione dell'impatto ambientale di diverse tecnologie di generazione di calore (GEO, ST e PVT).....	19
Figura 7.3: Confronto tra scenari a diversa penetrazione di energia rinnovabile (Indicatore ambientale Climate Change).....	20
Figura 7.4: Costo di investimento per vari scenari di rete termica	20
Figura 7.5: Confronto ambientale ed economico di diverse tipologie di batterie	21
Figura 7.6: Confronto ambientale ed economico di sistemi per l'accumulo termico	22

Indice delle tabelle

Tabella 1: Fase di costruzione lato utenza	15
Tabella 2: Fase di costruzione lato rete.....	16

1 Risultati attesi

Il capitolato vigente del Progetto 1.5 "Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica" prevede che l'attività di ricerca relativa avente come obiettivo quello di definire delle potenziali linee di sviluppo per il miglioramento delle caratteristiche di sostenibilità economica e ambientale per reti termiche a bassa temperatura sia implementata nell'ambito della linea di attività LA5.4 (periodo da Gennaio 2023 a Dicembre 2024).

Di seguito sono riportati i risultati attesi, come da capitolato di Progetto, per l'attività oggetto della LA5.4 "Analisi LCA di reti termiche a bassa temperatura di nuova generazione basate sull'impiego di pompe di calore elettriche "booster" condensate ad acqua: analisi di diversi casi studio definiti sulla base della rete termica a bassa temperatura realizzata presso il centro Ricerche ENEA Portici", cui si riferisce il presente report.

- Analisi critica dello stato dell'arte relativo all'analisi LCA e alla stima dei costi relativi al ciclo di vita per reti termiche di teleriscaldamento/teleraffrescamento;
- Raccolta e gestione dei dati per la costruzione degli inventari del ciclo di vita;
- Definizione dei casi studio;
- Analisi LCA di tipo "cradle-to-grave" e stima dei costi per i diversi casi studio;
- Valutazione degli effetti sull'impatto ambientale e sui costi delle differenti tecnologie di generazione energetica e di accumulo impiegate nella rete termica a bassa temperatura;
- Individuazione di soluzioni progettuali per reti termiche a bassa temperatura che consentano di ridurre sensibilmente sia l'impatto ambientale che i costi rispetto a soluzioni convenzionali;
- Valutazione dell'impatto ambientale e dei costi di sistemi di accumulo di energia elettrica da fonte rinnovabile, con batterie agli ioni di litio (Li-ion) o di altro tipo;
- Confronto con accumulo termico innovativo o convenzionale;
- Definizione delle linee guida per la progettazione e la realizzazione di reti termiche a bassa temperatura;
- Definizione di potenziali linee di sviluppo per il miglioramento delle caratteristiche di sostenibilità economica ed ambientale.

Di seguito sono riportati gli elementi per la verifica dell'esito dell'attività di sostenibilità economica e ambientale per reti termiche a bassa temperatura (LA5.4), come da capitolato di Progetto.

- Raccolta e gestione dei dati per la costruzione degli inventari del ciclo di vita;
- Analisi LCA di tipo "cradle-to-grave" e stima dei costi per i diversi casi studio;
- Valutazione degli effetti sull'impatto ambientale e sui costi delle differenti tecnologie di generazione energetica e di accumulo impiegate nella rete termica a bassa temperatura;
- Individuazione di soluzioni progettuali per reti termiche a bassa temperatura che consentano di ridurre sensibilmente sia l'impatto ambientale che i costi rispetto a soluzioni convenzionali;
- Valutazione dell'impatto ambientale e dei costi di sistemi di accumulo di energia elettrica da fonte rinnovabile, con batterie agli ioni di litio (Li-ion) o di altro tipo;
- Definizione delle linee guida per la progettazione e la realizzazione di reti termiche a bassa temperatura;
- Definizione di potenziali linee di sviluppo per il miglioramento delle caratteristiche di sostenibilità ambientale ed economica.

2 Risultati ottenuti

I risultati ottenuti per la LA5.4 nel periodo da Gennaio 2023 a Dicembre 2024 si attengono ai risultati attesi, riportati nel paragrafo precedente.

In particolare, sono stati analizzati diversi articoli scientifici per conoscenza dello stato dell'arte in materia di reti termiche a bassa temperatura. Tra questi i maggiori riferimenti presi in considerazione sono i seguenti:

- Buffa, S., Cozzini, M., D'antoni, M., Baratieri, M., & Fedrizzi, R. (2019). 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 504-522. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.059>
- Ruesch, F., Rommel, M., & Scherer, J. (2015). Pumping power prediction in low temperature district heating networks. In *Proceedings of International Conference CISBAT 2015 Future Buildings and Districts Sustainability from Nano to Urban Scale* (pp. 753-758). LESO-PB, EPFL.
- Ruesch, F., & Haller, M. (2017). Potential and limitations of using low-temperature district heating and cooling networks for direct cooling of buildings. *Energy Procedia*, 122, 1099-1104. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.443>
- Lund, H., Østergaard, P. A., Chang, M., Werner, S., Svendsen, S., Sorknæs, P., ... & Möller, B. (2018). The status of 4th generation district heating: Research and results. *Energy*, 164, 147-159. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.206>
- Mahmud, M. P., Huda, N., Farjana, S. H., & Lang, C. (2018). Environmental impacts of solar-photovoltaic and solar-thermal systems with life-cycle assessment. *Energies*, 11(9), 2346. <https://doi.org/10.3390/en11092346>
- Joshi, S. S., & Dhoble, A. S. (2018). Photovoltaic-Thermal systems (PVT): Technology review and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 848-882. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.067>
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2014). General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. *Energy and buildings*, 70, 441-454. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.068>
- Lin, H., Clavreul, J., Jeandaux, C., Crawley, J., & Butnar, I. (2021). Environmental life cycle assessment of heating systems in the UK: Comparative assessment of hybrid heat pumps vs. condensing gas boilers. *Energy and Buildings*, 240, 110865. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110865>
- Greening, B., & Azapagic, A. (2012). Domestic heat pumps: Life cycle environmental impacts and potential implications for the UK. *Energy*, 39(1), 205-217. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.028>

Dopo di che sono stati ripresi i documenti e i modelli relativi alla rete termica a bassa temperatura installata presso il centro Ricerche ENEA Portici. Questi si riferiscono alle linee di attività dell'accordo di Programma Ministero dello sviluppo Economico -ENEA Piano triennale 2019-2021 nella II e III annualità:

- LA4.18 REALIZZAZIONE E IMPLEMENTAZIONE SPERIMENTALE DI UNA RETE TERMICA A BASSA TEMPERATURA PRESSO IL C.R. ENEA DI PORTICI
- LA4.20 SVILUPPO DI UN TOOL DI SIMULAZIONE E OTTIMIZZAZIONE ECONOMICA FINALIZZATO AL DIMENSIONAMENTO E ALLA LOCALIZZAZIONE DEI COMPONENTI DI RETI TERMICHE

Sono stati realizzati quindi degli inventari del ciclo di vita (LCI) utilizzando dati primari e secondari (dalle fonti reperite in letteratura) su software LCA specifico utilizzando il database

Ecoinvent 3.10. L' LCI realizzato sul software è di tipo parametrico in modo da consentire di selezionare rapidamente molteplici scenari.

L'analisi degli impatti ambientali (LCIA) è stata svolta utilizzando la metodologia Environmental Footprint (EF) 3.1 la quale è composta da 16 indicatori ambientali quali: 1) Acidification (Ac) espressa in mol H⁺ eq; 2) Climate Change (CC) espressa in kg CO₂ eq; 3) Ecotoxicity: freshwater (Ecf) espressa in CTUe; 4) Energy resources: non-renewable (Er) espressa in MJ; 5) Eutrophication: freshwater (Euf) espressa in kg P eq; 6) Eutrophication: marine (Eum) espressa in kg N-Eq; 7) Eutrophication: terrestrial (Eut) espressa in kg N-Eq; 8) Human toxicity: carcinogenic (Htc) espressa in CTUh; 9) Human toxicity: non-carcinogenic (Htnc) espressa in CTUh; 10) Ionising radiation: human health (Irh) espressa in kBq U235-Eq; 11) Land use (LU) espressa in numero adimensionale; 12) Material resources: metals/minerals (Mr) espressa in kg Sb-Eq; 13) Ozone depletion (OD) espressa in kg CFC-11-Eq; 14) Particulate matter formation (Pmf) espressa in disease incidence; 15) Photochemical oxidant formation: human health (PO) espressa in kg NMVOC-Eq; 16) Water use (WU) espressa in m³ world Eq deprived.

A seguito della normalizzazione e della pesatura dei risultati ottenuti, sono stati analizzati nel dettaglio soltanto gli indicatori ambientali più significativi, ovvero: CC, Ecf, Er, Htc, Htnc, Mr e Wu. In particolare, l'attenzione si è concentrata principalmente sull'indicatore CC, che si è rivelato il più gravoso in termini di impatto ambientale e caratterizzato da una minore incertezza nella qualità dei risultati.

I casi studio definiti per l'attività LA5.4 analizzano scenari che considerano quattro aspetti principali. Il primo riguarda il generatore di calore, con tre opzioni: una pompa di calore geotermica (GEO), un sistema solare termico (ST) e un sistema ibrido fotovoltaico-termico (PVT). Il secondo aspetto esamina la configurazione della rete di distribuzione, confrontando uno schema ad albero. Il terzo aspetto analizza due livelli di temperatura del fluido termovettore, 25°C e 45°C. Infine, il quarto aspetto valuta la percentuale di energia elettrica da fonti rinnovabili, con scenari che variano dallo 0% al 100%. È stato condotto un confronto tra sistemi di accumulo elettrico (batterie al litio: LFP, LiMn2O₄, NCA, NMC111) e termico (serbatoio ad acqua e materiali a cambiamento di fase, come Rubiterm15 e Puretemp15).

L'analisi iniziale ha confrontato configurazioni di rete e livelli di temperatura del fluido in un sistema con pompa di calore geotermica, considerando rete ad anello e ad albero e temperature di 25°C e 45°C. I sei indicatori ambientali scelti nella definizione dello scopo dell'analisi LCA sono stati valutati per le fasi del ciclo di vita di costruzione, esercizio, manutenzione, fine vita. I risultati mostrano che le differenze tra le configurazioni di rete sono minime: la rete ad albero ha un impatto ambientale leggermente inferiore (circa 1%) grazie alla minore lunghezza delle tubazioni. Tuttavia, il confronto tra i livelli di temperatura di alimentazione evidenzia differenze significative. Lo scenario a 45°C presenta un impatto ambientale maggiore rispetto a quello a 25°C, a causa del maggiore consumo elettrico richiesto per raggiungere la temperatura più elevata.

Il confronto è proseguito con un focus tra le varie configurazioni che impiegano generatori di calore diversi (GEO, ST, PVT). Il sistema PVT si distingue come il meno impattante, grazie alla produzione combinata di energia termica ed elettrica che riduce il consumo elettrico della rete. Al contrario, il sistema ST mostra un maggiore impatto ambientale su indicatori come Cambiamento climatico e Tossicità, mentre il sistema GEO risulta più impattante sul consumo di risorse minerali, a causa dei materiali ad alta impronta ambientale utilizzati, come gli acciai specifici. Significativamente, lo scenario a 45°C con tecnologia PVT presenta impatti ambientali inferiori rispetto agli scenari a 25°C con GEO e ST, dimostrando l'importanza dell'energia rinnovabile nella sostenibilità dei sistemi di teleriscaldamento. La tecnologia PVT

si conferma come la soluzione più sostenibile considerato lo schema di impianto definito per i vari scenari.

Il confronto finale mostra che tutte le tecnologie (GEO, ST, PVT) hanno un impatto ambientale inferiore rispetto ad un sistema standard di rete di teleriscaldamento. Tuttavia, nello scenario a 45°C senza rinnovabili, la riduzione è limitata (6% per ST, 14% per GEO). L'integrazione del 25% di rinnovabili riduce gli impatti mediamente del 10,24% a 25°C e del 9,53% a 45°C, evidenziando il ruolo cruciale delle energie rinnovabili per migliorare la sostenibilità del teleriscaldamento.

L'analisi economica mostra che il sistema PVT ha il costo di investimento più alto, superando GEO e ST rispettivamente dell'11,5% e del 16,2%, a causa del costo della tecnologia. Non ci sono differenze significative nei costi per utenze, tubazioni e accumulo tra i sistemi, ma la configurazione ad albero riduce i costi delle tubazioni del 25% rispetto alla configurazione ad anello. Le temperature di 25°C e 45°C non influenzano i costi di investimento.

Le batterie LFP risultano le migliori per impatto ambientale (60,67 kg CO₂ eq/kWh) e costo (64-68 €/kWh), superando NCA, LiMn e NMC. Tuttavia, sono caratterizzate da una densità energetica inferiore, rendendole più pesanti e ingombranti.

Il confronto tra i sistemi di accumulo termico evidenzia differenze nell'impatto ambientale e nei costi. Il sistema con PCM Rubitherm15 è il meno impattante, con 3,5 g CO₂ eq/kWh, rispetto ai 4,6 g CO₂ eq/kWh del sistema standard e ai 5,7 g CO₂ eq/kWh del sistema con PureTemp15. Tuttavia, il sistema standard è il più economico (11,5 c€/kWh), mentre Rubitherm15 e PureTemp15 costano rispettivamente 13,9 c€/kWh e 19,0 c€/kWh. Sebbene i materiali a cambiamento di fase offrano vantaggi ambientali, il loro maggiore costo potrebbe limitarne la competitività rispetto ai sistemi tradizionali.

3 Prodotti attesi

I prodotti attesi della linea di attività LA5.4, come da capitolato vigente del Progetto 1.5 "Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica", sono costituiti da n° 1 rapporto tecnico:

- Rapporto tecnico: "Analisi LCA di reti termiche a bassa temperatura di nuova generazione basate sull'impiego di pompe di calore elettriche "booster" condensate ad acqua" (Dicembre 2024).

4 Prodotti sviluppati

I prodotti sviluppati nell'ambito della linea di attività LA5.4 del Progetto 1.5 "Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica" sono costituiti dal presente rapporto tecnico:

- C. Zuffi, A. Sinicropi, M.L. Parisi, "Analisi LCA di reti termiche a bassa temperatura di nuova generazione basate sull'impiego di pompe di calore elettriche "booster" condensate ad acqua", Dicembre 2024.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

5.1 Analisi di eventuali scostamenti tecnici rispetto al capitolato di Progetto e criticità riscontrate

Le attività svolte e i risultati ottenuti da Gennaio 2023 a Dicembre 2024 nell'ambito della LA5.4 sono coerenti con lo stato di avanzamento della ricerca e sostanzialmente in linea con le attese, anche in adempienza con gli "elementi per il test di verifica" previsti dal capitolato di Progetto.

Con riferimento al Piano di Rischio del capitolato di Progetto, questo prevedeva per la LA5.4 che un'eventuale disponibilità limitata di informazioni precise e ad alta rappresentatività sui materiali e le specifiche di processo potesse determinare una bassa precisione dei calcoli LCA. Con riferimento all'effettiva esecuzione delle attività della LA5.4, la scelta degli scenari da analizzare è stata effettuata sulla base dei casi studio definiti e valutati nelle LA 4.18 e 4.20 per cui il rischio in oggetto non è occorso e non è stato necessario implementare azioni di mitigazione.

5.2 Analisi di eventuali scostamenti economici rispetto al capitolato di Progetto e criticità riscontrate

In merito agli scostamenti economici, il costo totale (escluse le spese generali) effettivamente sostenute per l'esecuzione della LA5.4, pari a 104,361.67€, è sostanzialmente in linea con quello preventivato nel capitolato vigente di Progetto, pari a 104,350.00 €, con una diversa ripartizione sulle categorie di spesa. Il dettaglio degli scostamenti economici tra consuntivo e preventivo è riportato nella Tabella seguente.

LA 5.4 - Analisi LCA di reti termiche a bassa temperatura di nuova generazione basate sull'impiego di pompe di calore elettriche "booster" condensate ad acqua: analisi di diversi casi studio definiti sulla base della rete termica a bassa temperatura realizzata presso il Centro Ricerche ENEA Portici							
Categoria A Costi di personale		Categoria B Costi per strumenti, attrezzature, software specifico		Categoria C Costi di esercizio		Costi totali	
Rendiconto	Preventivo	Rendiconto	Preventivo	Rendiconto	Preventivo	Rendiconto	Preventivo
99,523.40€	90,350.00 €	756.00 €	6,000.00 €	4,082.27 €	8,000.00 €	135,670.17 €	135,655.00 €
Descrizione: costi di sub- categoria A.1	Descrizione: costi di sub- categoria A.1	Descrizon e:	Descrizon e:	Descrizon e:	Descrizon e:		

relativi a 1406 ore di 2 Professori Associati (fascia di costo standard "Livello Medio") e 1034 ore di assegnisti e borsisti di ricerca (fascia di costo standard "Livello Basso")	relativi a 300 ore di 2 Professori Associati (fascia di costo standard "Livello Medio") e 2450 ore di assegnisti e borsisti di ricerca (fascia di costo standard "Livello Basso")	costi realmente imputabili con quota di ammortamento per software specifico per LCA e LCC con licenza annuale e monoutente	costi di acquisto per software specifico per LCA e LCC con licenza annuale e monoutente	- costi di sub-categoria C.2, pari a 1.533,00 €, per l'iscrizione a n° 3 conferenze (2 nazionali e 1 internazionale) - costi di sub-categoria C.3, pari a 2.549,27 €, per viaggi e missioni per partecipazioni a conferenze, workshop, comitati e riunioni	- costi di sub-categoria C.2 per iscrizione a congressi/conferenze/workshop, organizzazione eventi, pubblicazione articoli scientifici, materiale divulgativo - costi di sub-categoria C.3 per viaggi e missioni per attività di informazione, comunicazione e disseminazione		
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--

Per quanto attiene alle maggiori spese di categoria A sostenute rispetto a quelle preventivate, con un incremento di circa 6,2 k€ ($\approx +10,2\%$), le motivazioni sono da ricondursi a:

- L'impegno di ore personale dipendente era stato sottostimato nel preventivo rispetto alle reali necessità palesate per l'efficace esecuzione dell'attività di analisi LCA e dei costi del ciclo di vita richiesta per il Progetto (LA5.4), anche in considerazione del fatto che le ore di personale non dipendente sono state inferiori rispetto a quanto preventivato per la tipologia e la durata dei contratti attivati.
- Nel computo a consuntivo del numero di ore di personale dipendente impegnate per lo svolgimento della LA5.4 sono incluse, tra l'altro, ore per: (i) partecipazione a riunioni organizzative, inclusa organizzazione delle riunioni e preparazione delle presentazioni; (ii) redazione del presente report relativo alla LA5.4.

Per quanto attiene alle minori spese di categoria B sostenute rispetto a quelle preventivate, con un decremento di circa 5,244,00 € ($\approx -87\%$), le motivazioni sono da ricondursi alla quota di ammortamento per l'uso effettivo che è stato fatto di n° 2 licenze annuali a singolo utente di software specifico imputabile al progetto.

Per quanto attiene alle minori spese di categoria C sostenute rispetto a quelle preventivate, con un decremento di circa 3,9 k€ ($\approx -49\%$), le motivazioni sono da ricondursi a:

- La partecipazione di una unità di personale UNISI impegnato nel Progetto a n° 3 conferenze, di cui una su invito, ha comportato costi inferiori rispetto a quanto previsto.

- Le missioni, relativamente numerose, hanno comportato spese in genere piuttosto limitate, soprattutto in caso di missioni sul territorio nazionale (in maggioranza).
- Non sono state sostenute spese per pubblicazione di articoli scientifici.

In conclusione, considerate le motivazioni sopra esposte degli scostamenti economici della LA5.4 rispetto all'articolazione delle spese preventivate nel capitolato di Progetto e considerato, comunque, il valore "assoluto" limitato degli importi che concorrono a detti scostamenti, è possibile affermare che nell'esecuzione della LA5.4 non sono state rilevate vere e proprie criticità dal punto di vista economico ma solo fisiologiche variazioni e riallineamenti tra preventivo e consuntivo di spesa.

6 Sintesi delle attività svolte

Il sistema analizzato è una rete termica a bassa temperatura installata al centro ENEA di Portici, che simula una rete di teleriscaldamento, che fornisce calore a bassa temperatura a 8 utenze, ciascuna dotata di uno scambiatore di calore acqua-acqua (9,8 kW), una pompa di calore acqua-acqua (12,3 kW) e un serbatoio di accumulo (100 l). La rete include un generatore di calore (pompa di calore aria-acqua da 105 kW), un serbatoio di accumulo (25 m³) e una rete di tubazioni. Lo studio si concentra sull'analisi di scenario di questo schema a partire da inventari del ciclo di vita compilati con dati primari e dati secondari provenienti dalla letteratura.

A partire dall'identificazione della configurazione di rete più vantaggiosa a livello ambientale, è stata valutata l'eco-efficienza dei diversi generatori di calore, tenendo conto anche dell'influenza delle fonti rinnovabili sull'impatto ambientale complessivo.

È stato inoltre analizzato il costo di investimento dei vari sistemi. Il confronto delle prestazioni ambientali ed economiche tra i sistemi di accumulo termico ed elettrico ha permesso di determinare quale fosse la soluzione più efficiente per il sistema.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Definizione dei casi studio

I casi studio definiti sono articolati su più livelli e considerano sia gli aspetti legati alla rete di distribuzione, sia quelli relativi agli utenti finali. Il primo aspetto riguarda il tipo di generatore di calore utilizzato nella rete, per cui sono state prese in esame tre opzioni. La prima opzione è rappresentata dalla pompa di calore acqua-acqua geotermica (GEO). La seconda opzione è il sistema solare termico (ST), che sfrutta l'energia solare attraverso collettori termici per la produzione di calore. Infine, la terza opzione è costituita dal sistema ibrido fotovoltaico-termico (PVT), che combina la produzione di energia elettrica e termica per migliorare l'efficienza complessiva del sistema.

Il secondo aspetto riguarda la configurazione della rete di distribuzione alle utenze, per la quale sono stati analizzati due schemi distinti. La configurazione ad albero è caratterizzata da una distribuzione radiale delle tubazioni, con una lunghezza totale pari a 401 m. Al contrario, la configurazione ad anello presenta una struttura circolare delle tubazioni, con una lunghezza complessiva di 538 m.

Il terzo aspetto considerato è il livello di temperatura del fluido termovettore utilizzato per alimentare le utenze. Sono stati analizzati due livelli di temperatura: il primo a 25°C, rappresentativo di un sistema a bassa temperatura che massimizza l'efficienza del generatore e minimizza le perdite termiche nella rete; il secondo a 45°C, che rappresenta una temperatura più tradizionale, compatibile con diversi sistemi di riscaldamento degli edifici.

Infine, il quarto aspetto preso in esame riguarda la percentuale di energia elettrica proveniente da fonti rinnovabili utilizzata per alimentare il sistema. Sono stati definiti quattro scenari distinti, caratterizzati da una quota di energia rinnovabile rispettivamente pari a 0%, 25%, 50% e 100%.

7.2 Definizione dell'ambito e inventario del ciclo di vita

Nel contesto di un'analisi del ciclo di vita (LCA), l'ambito e l'obiettivo sono definiti seguendo la struttura proposta dagli standard ISO 14001 e ISO 14040. L'obiettivo specifico dell'analisi è valutare gli impatti ambientali della rete di teleriscaldamento descritta nei paragrafi precedenti, identificando lo scenario operativo più promettente. L'unità funzionale scelta per il confronto è il kWh termico fornito alle utenze. I confini del sistema includono il generatore di calore della rete, l'intera rete di distribuzione e le componenti impiantistiche installate presso le utenze. L'approccio scelto è di tipo "cradle to grave", che include le fasi di costruzione, esercizio, manutenzione e smaltimento. Non rientrano nei confini del sistema le opere civili (come gli edifici delle abitazioni) e i trasporti dei materiali durante la fase di costruzione. L'inventario del ciclo di vita (LCI) è strutturato per quanto segue:

- Fase di costruzione lato utenza (C-UT)
- Fase di costruzione lato rete (C-RETE)
- Fase di esercizio lato utenza (E-UT)
- Fase di esercizio lato rete (E-RETE)
- Manutenzione lato utenza (M-UT)
- Manutenzione lato rete (M-RETE)
- Fine vita/smaltimento (EoL)

C-UT è composto da alcune componenti meccaniche: uno scambiatore di calore di 9-82 kW, una pompa di calore di 12.3 kW, un serbatoio di 100 l e una pompa da 20 W. È presente anche il

sistema di tubazioni, il quale è composto da 5 m di tubi con diametro interno di 2" e 20 m da tubi con diametro di 1". Inoltre, sono considerati 15 kg di dispositivi elettronici per il controllo (rappresentativi di valvole, misuratori di portata, saracinesche) e l'acqua all'interno dell'impianto di distribuzione. I provider utilizzati sono riportati in Tabella 1.

Tabella 1: Fase di costruzione lato utenza

Input	Quantità	Unità	Processo
Dispositivi elettronici	15	kg	market for electronics, for control units electronics, for control units Cutoff, S - GLO
Scambiatore di calore	9.82	kW	HE_alfalaval
Pompa di calore	1.23	Item(s)	market for heat pump, brine-water, 10kW heat pump, brine-water, 10kW Cutoff, S - GLO
Serbatoio	0.16667	Item(s)	market for hot water tank, 600l hot water tank, 600l Cutoff, S - GLO
Tubazione 2"	5	m	Piping_2"
Tubazione 1"	20	m	Piping_1"
Pompa	20	W	market for pump, 40W pump, 40W Cutoff, S - GLO
Acqua	121.6	kg	market for tap water tap water Cutoff, S - Europe without Switzerland
Output			
C-Utenza	1	items	

I dati utilizzati per LCI provengono principalmente dal database Ecoinvent 3.10, ad eccezione di due componenti: HE_alfalaval e le tubazioni (piping). Per il modello HE_alfalaval, i dati sono stati ricavati da specifiche di catalogo e rappresentano un elemento costituito da 21,20 kg di acciaio inossidabile. Le tubazioni sono composte principalmente da acciaio basso legato, acciaio inossidabile e lana di roccia.

C-RETE, come riportato in Tabella 2, segue la stessa struttura con le componenti meccaniche: generatore di calore 105 kW, serbatoio di accumulo 25 m³, e una pompa di distribuzione di taglia variabile rispetto allo scenario selezionato. Quest'ultime sono di circa 22-23 kW nello scenario a 25°C e di circa 8-9 kW per i 45°C. Le tubazioni adottano lo stesso LCI del processo descritto precedentemente, ma variano le loro lunghezze. La tubazione da 1" ha una lunghezza fissa di 291 m, mentre le tubazioni da 2" variano rispetto lo scenario ad anello, 247 m, e ad albero, 110 m.

Tabella 2: Fase di costruzione lato rete

Input	Amount	Unit	Provider
Dispositivi elettronici	150	kg	market for electronics, for control units electronics, for control units Cutoff, S - GLO
Generatore di calore	105	kW	Heat Generator
Serbatoio	12.5	Item(s)	market for heat storage, 2000l heat storage, 2000l Cutoff, S - GLO
Tubazione 1"	291	m	Piping_1"
Tubazione 2"		m	Piping_2"
Pompa		kW	Pump RETE
Acqua		kg	market for tap water tap water Cutoff, S - Europe without Switzerland
Output			
C-Rete	1	items	

Le fasi E-RETE ed E-UT rappresentano rispettivamente il consumo elettrico della rete di distribuzione e quello delle 8 utenze. Tali consumi variano sensibilmente in funzione della temperatura di alimentazione selezionata. Nello specifico, per la rete si stima un consumo elettrico annuo di circa 9900 kWh nello scenario a 25°C e di 18700 kWh nello scenario a 45°C. Per quanto riguarda le utenze, il consumo medio per ciascun edificio è di 1700 kWh/anno a 25°C e di 1550 kWh/anno a 45°C. Questa inversione nel consumo tra rete e utenze è attribuibile alle differenti esigenze di pompaggio e trasferimento del calore nelle diverse condizioni operative. I contributi M-RETE e M-UT si riferiscono alla sostituzione annuale dei materiali nei processi di costruzione (C-RETE e C-UT), stimata al 2% annuo, il che implica che circa il 60% dei materiali verrà sostituito durante la vita utile del sistema. Questo dato considera la manutenzione programmata e la sostituzione dei componenti usurati. La fase EoL è modellata considerando il trattamento, il riciclo e lo smaltimento dei materiali. Inoltre, è stato effettuato un confronto tra i sistemi di accumulo elettrico e termico, con un'analisi parallela di ciascun sistema. Per l'accumulo elettrico, l'unità funzionale considerata è una capacità di 1 kWh di accumulo, confrontando quattro tipologie di batterie al litio:

- Li-ion, LFP
- Li-ion, LiMn2O4
- Li-ion, NCA
- Li-ion, NMC111

Ogni tipologia di batteria presenta una capacità specifica di energia diversa: 0,159 kWh/kg per le celle LFP; 0,114 kWh/kg per le celle LiMn2O4; 0,224 kWh/kg per le celle NCA; 0,197 kWh/kg per le celle NMC111.

Per quanto riguarda l'accumulo termico, l'unità funzionale è il kWh termico di accumulo, e si confrontano i sistemi standard (boiler ad acqua) con sistemi innovativi che sfruttano PCM, in particolare i seguenti: Rubiterm15 e Puretemp15.

7.3 Valutazione degli impatti del ciclo di vita

Il confronto iniziale presentato nell'analisi mira a evidenziare le differenze tra gli scenari considerati in termini di configurazione della rete di distribuzione e livello di temperatura del fluido di alimentazione delle utenze. Sono stati analizzati sei indicatori ambientali relativi al sistema basato su una pompa di calore geotermica, considerando le configurazioni di rete ad anello e ad albero, nonché i livelli di temperatura di alimentazione a 25°C e 45°C. I risultati (Figura 7.1) mostrano il contributo di ciascuna fase del ciclo di vita – costruzione (C), esercizio (E), manutenzione (M) e fine vita (EoL) – a ciascun indicatore. L'analisi evidenzia che le differenze tra le configurazioni di rete sono marginali: l'impatto ambientale della configurazione ad albero è di poco inferiore, con una riduzione di circa l'1% rispetto alla configurazione ad anello. Questo risultato deriva principalmente dalla minore lunghezza delle tubazioni nella configurazione ad albero.

Al contrario, il confronto tra i due livelli di temperatura di alimentazione rivela differenze significative. Lo scenario a 45°C risulta meno favorevole rispetto a quello a 25°C, con un incremento degli impatti ambientali dovuto principalmente al maggiore consumo elettrico necessario per raggiungere la temperatura più alta. Questo aspetto è particolarmente evidente negli indicatori CC e Er, in cui il consumo elettrico rappresenta oltre il 70% dell'impatto totale. In questi due casi, lo scenario a 45°C comporta un incremento rispettivamente del 20% per CC e del 30% per Er rispetto allo scenario a 25°C. Per gli indicatori in cui le fasi di costruzione e manutenzione incidono maggiormente, come Htc, Mr, Htnc e Ecf, l'aumento degli impatti tra i due scenari di temperatura è meno marcato, ma comunque significativo. Gli impatti aumentano del 7-8% per Htc e Mr, mentre per Htnc ed Ecf si registra un incremento compreso tra il 10% e il 12%. In questi casi, il contributo maggiore deriva dalle componenti metalliche, in particolare dall'acciaio utilizzato, che rappresentano una quota rilevante degli impatti ambientali associati alle fasi di costruzione e manutenzione. È interessante notare che il contributo EoL è trascurabile per tutti gli indicatori analizzati, suggerendo che gli impatti complessivi del sistema sono dominati dalle fasi C, E e M.

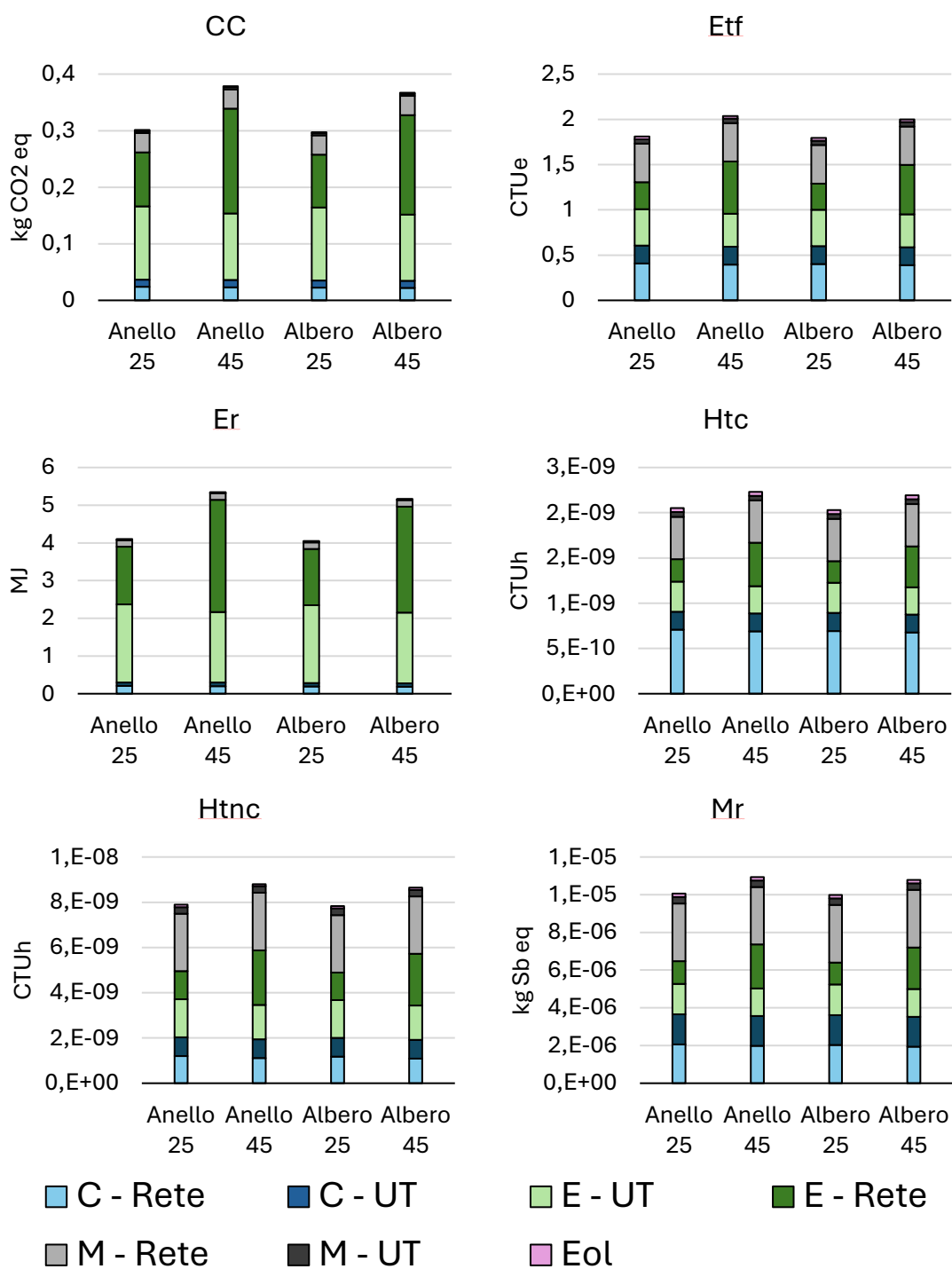


Figura 7.1: Analisi dell'impatto ambientale del sistema geotermico nelle configurazioni ad anello/albero e 25°C/45°C

Sulla base dei risultati ottenuti, i grafici successivi mostrano esclusivamente la configurazione ad albero, poiché rappresenta, anche se di poco, la soluzione meno impattante dal punto di vista ambientale. La Figura 7.2 illustra il confronto tra le diverse tecnologie di generazione di calore per la rete, utilizzando sette indicatori ambientali di maggiore rilevanza, riferiti al valore percentuale, per garantire una comparabilità efficace. Anche in questo caso, emergono differenze significative tra i vari scenari, con particolari evidenze per le tecnologie di

generazione considerate. Il sistema ibrido PVT si distingue per la capacità di mitigare l'impatto ambientale derivante dal consumo elettrico della rete, grazie alla produzione diretta di parte dell'energia elettrica attraverso i pannelli fotovoltaici integrati. L'analisi degli indicatori evidenzia che per CC, Er, Htc e Wu la tecnologia più impattante è ST. Per l'indicatore Ecf la differenza tra Geo e ST è minima, circa lo 0.5%. Tuttavia, per gli indicatori Htnc e Mr. la soluzione geotermica mostra un impatto maggiore rispetto al solare termico. Questo risultato è attribuibile all'impiego di materiali altamente impattanti, come acciai specifici, necessari per la costruzione della pompa di calore geotermica e del pozzo. Al contrario, i materiali utilizzati per i pannelli solari termici risultano più influenti su CC, Er e Htc. Da sottolineare che, in ogni indicatore analizzato, la tecnologia PVT emerge come la meno impattante. In particolare, lo scenario a 45°C per la tecnologia PVT presenta impatti ambientali inferiori rispetto allo scenario a 25°C per le altre due tecnologie (Geo e ST). Questo dato evidenzia ulteriormente l'importanza dell'impiego di energia rinnovabile per migliorare le prestazioni ambientali complessive dei sistemi di teleriscaldamento. La tecnologia PVT, grazie alla sua capacità di combinare produzione termica ed elettrica, si configura come la soluzione più promettente dal punto di vista della sostenibilità ambientale.

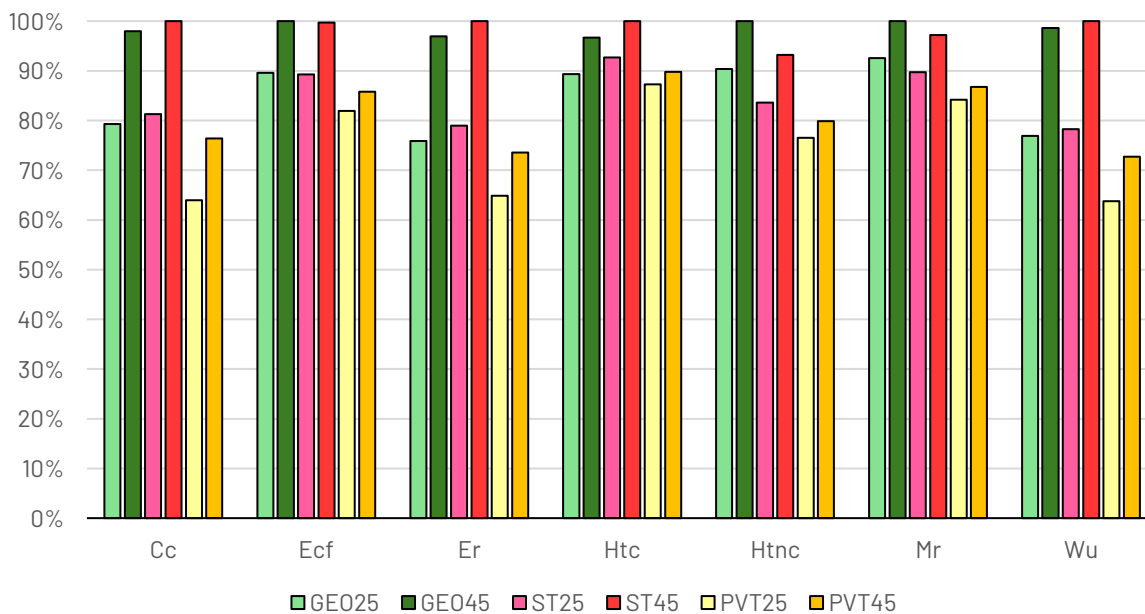


Figura 7.2: Valutazione dell'impatto ambientale di diverse tecnologie di generazione di calore (GEO, ST e PVT)

Il confronto finale tra le tre tecnologie di generazione di calore è stato effettuato utilizzando l'indicatore di impatto ambientale CC, prendendo in considerazione diversi livelli di penetrazione di RE e considerando gli scenari di temperatura di alimentazione dell'utenza a 25°C e 45°C. Come punto di riferimento è stato utilizzato il caso di una rete termica alimentata da un generatore di calore a caldaia (Boiler + DH).

In generale (Figura 7.3) tutte e tre le tecnologie analizzate presentano un impatto ambientale inferiore rispetto a Boiler+DH. Tuttavia, nello scenario a 45°C, l'assenza di penetrazione di RE non consente di osservare vantaggi significativi, con una riduzione dell'impatto ambientale limitata al 6% per ST e al 14% per il sistema GEO. L'integrazione di RE, tuttavia, comporta una riduzione significativa degli impatti per tutte le tecnologie esaminate. In particolare, con una penetrazione del 25% di energia rinnovabile, si ottiene una riduzione media degli impatti pari al 10.24% per lo scenario 25°C e del 9,53% per lo scenario a 45°C. Questo evidenzia il beneficio derivante dall'impiego di fonti rinnovabili nell'ottimizzazione delle performance ambientali dei sistemi di teleriscaldamento.

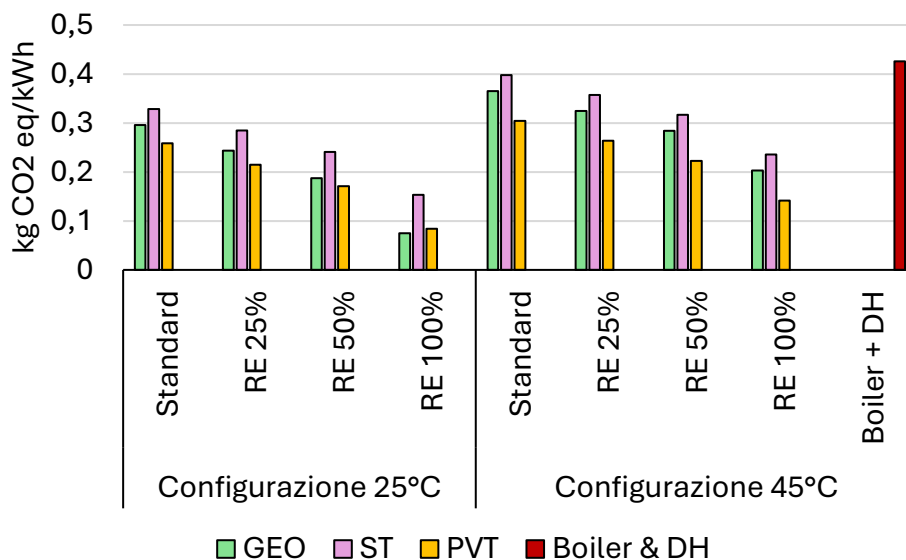


Figura 7.3: Confronto tra scenari a diversa penetrazione di energia rinnovabile (Indicatore ambientale Climate Change)

7.4 Analisi economica

Nell'analisi economica, è stato valutato il costo di investimento dei sistemi con i tre differenti tipi di generatori di calore, considerando le configurazioni di rete ad anello (An) e ad albero (Al). È importante sottolineare che le configurazioni a 25°C e 45°C non influenzano il costo di investimento. In Figura 7.4 si mostra che, a differenza dei risultati ottenuti per gli aspetti ambientali, il sistema PVT presenta il costo di investimento più elevato. Questo è dovuto esclusivamente al costo della tecnologia stessa, poiché sia il sistema GEO che quello ST risultano avere un costo inferiore rispetto al PVT, rispettivamente del 11,5% e del 16,2%. Per quanto riguarda gli altri costi, relativi a utenze, tubazioni e accumulo, non si riscontrano differenze significative tra i vari sistemi. Si nota un considerevole differenza di costi per quanto riguardano le tubazioni nelle configurazioni An e Al, in cui il costo di Al è ridotto del 25% rispetto ad An.

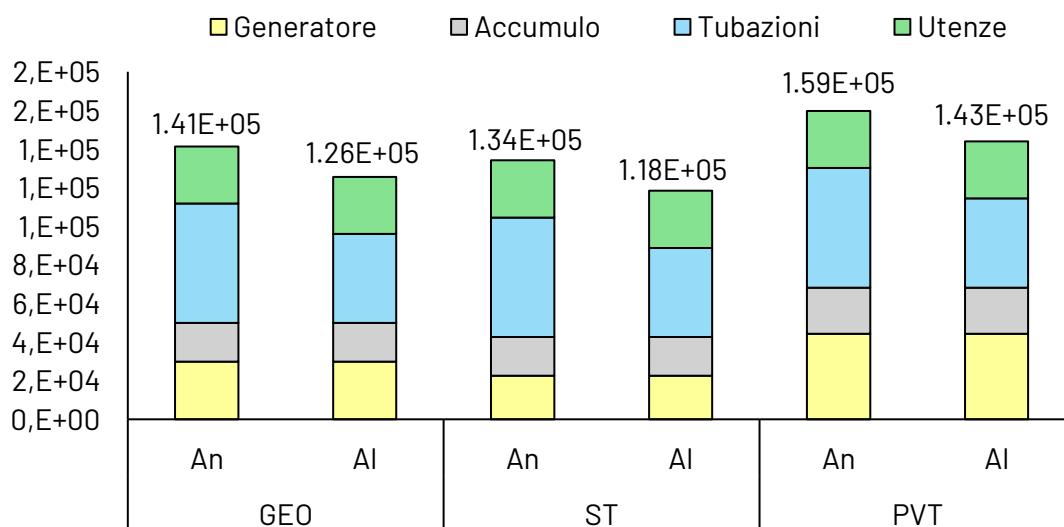


Figura 7.4: Costo di investimento per vari scenari di rete termica

7.5 Confronto sistemi di accumulo elettrico

L'analisi dell'accumulo elettrico si è focalizzata sull'indicatore ambientale CC e sul costo per unità di capacità (1 kWh). I risultati (Figura 7.5) indicano che le batterie LFP presentano l'impatto ambientale più contenuto, con un valore di 60,67 kg CO₂ eq per kWh installato. In confronto, le batterie NCA, LiMn e NMC mostrano aumenti rispettivi nell'impatto del 24,37%, 34,68% e 58,76% rispetto alle LFP.

Per quanto riguarda il costo, le batterie LFP, NCA e NMC hanno un prezzo compreso tra 64 e 68 €/kWh, mentre le batterie LiMn risultano significativamente più costose, con un sovrapprezzo di circa 15 €/kWh. Questi dati evidenziano come le batterie LFP siano le più vantaggiose sia dal punto di vista ambientale che economico. Le LFP, utilizzando materiali abbondanti e meno costosi come il ferro e il fosfato, offrono vantaggi economici e ambientali, ma hanno una densità energetica inferiore rispetto alle NMC e NCA, il che le rende più pesanti e ingombranti per la stessa capacità.

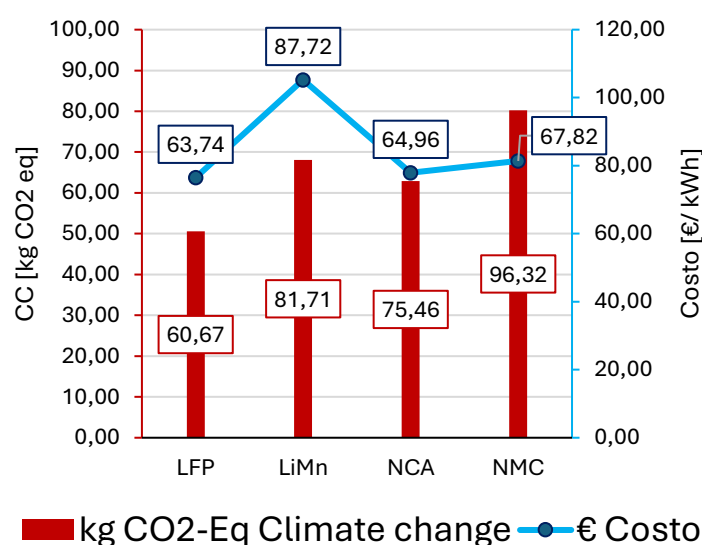


Figura 7.5: Confronto ambientale ed economico di diverse tipologie di batterie

7.6 Confronto sistemi di accumulo termico

Il confronto tra i sistemi di accumulo termico per la rete si concentra sull'analisi dell'indicatore CC e del costo economico per kWh di accumulo. I tre sistemi esaminati includono un serbatoio standard che ospita acqua, e due sistemi basati su PCM: Rubitherm15 e PureTemp15. I sistemi PCM sono composti dal materiale fase-cambiabile e da altre componenti necessarie, come valvole e misuratori.

In Figura 7.6 è evidenziato come l'impatto ambientale derivante dalla costruzione del serbatoio vari in base alle dimensioni del serbatoio, che devono essere adattate per ospitare acqua o PCM. Inoltre, la scelta del PCM influisce significativamente sugli impatti ambientali, con Rubitherm15 che presenta un impatto di 0,8 g CO₂ eq/kWh e PureTemp15 che impatta di 3,4 g CO₂ eq/kWh. Dall'analisi complessiva emerge che il sistema con PCM Rubitherm15 è il meno impattante dal punto di vista ambientale, con un valore di 3,5 g CO₂ eq/kWh, rispetto ai 4,6 g CO₂ eq/kWh del sistema standard e ai 5,7 g CO₂ eq/kWh del sistema con PureTemp15. Per quanto riguarda il costo economico, il sistema standard risulta essere il più conveniente, con un costo di 11,5 c€/kWh, mentre i sistemi con Rubitherm15 e PureTemp15 presentano costi rispettivamente di 13,9 c€/kWh e 19,0 c€/kWh. Questo evidenzia che, sotto il profilo

economico, il sistema standard risulta essere la soluzione più vantaggiosa. In sintesi, il confronto mette in evidenza come la convenienza, sia dal punto di vista ambientale che economico, possa variare notevolmente a seconda del tipo di PCM utilizzato nel sistema di accumulo. Sebbene i PCM possano offrire vantaggi ambientali, l'impatto economico più elevato potrebbe limitare la loro competitività rispetto ai sistemi tradizionali a serbatoio d'acqua.

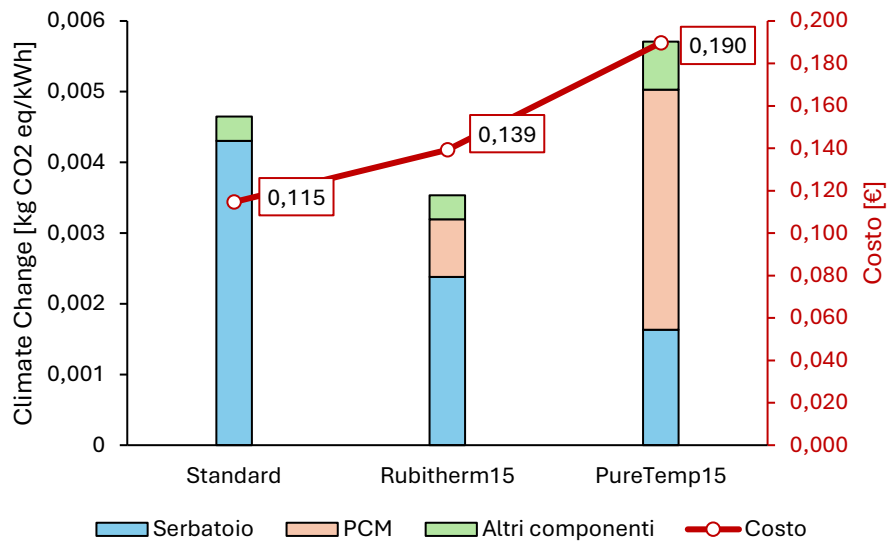


Figura 7.6: Confronto ambientale ed economico di sistemi per l'accumulo termico

7.7 Linee Guida

I risultati ottenuti dall'analisi indicano che, a livello ambientale, il fattore principale che incide su tutti gli scenari è il contributo energetico. Questo sottolinea l'importanza di ridurre il consumo elettrico per ottenere le migliori performance dai sistemi termici. Inoltre, si evidenzia che significativi benefici ambientali si ottengono con un'elevata integrazione di fonti rinnovabili. La diversa configurazione della rete di teleriscaldamento ha un impatto minimo sugli indicatori ambientali (circa 1%), mentre incide in modo più rilevante sui costi economici, con una differenza di circa il 25%. Un fattore decisivo nell'analisi è il livello di temperatura di alimentazione: infatti, i consumi energetici e, di conseguenza, gli impatti ambientali aumentano significativamente nell'operatività a 45°C. Tuttavia, questa variazione dipende strettamente dalla progettazione impiantistica e dalle specifiche esigenze delle utenze.

Per quanto riguarda il tipo di generatore di calore, il sistema più ambientalmente sostenibile risulta essere il sistema ibrido PVT, sebbene associato al costo più elevato. D'altro canto, il sistema ST, pur risultando il più impattante dal punto di vista ambientale per molti indicatori, è anche quello con il costo più basso. La soluzione intermedia tra questi due estremi è rappresentata dal sistema GEO, che ha un costo economico superiore rispetto al sistema ST di circa il 30%, ma che risulta meno impattante in specifici indicatori come il CC, l'Er, l'Htc e il Wu. Infine, per quanto riguarda l'accumulo elettrico, i sistemi più sostenibili risultano essere le batterie di tipo LFP, mentre per l'accumulo termico, la tecnologia PCM basata su Rubitherm15 mostra il miglior impatto ambientale. Tuttavia, per i sistemi di accumulo termico, il costo economico continua a favorire le soluzioni tradizionali basate su serbatoi standard.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Per la linea di attività LA5.4 "Studio LCA e dei costi di tipo "cradle-to-grave" di reti termiche a bassa temperatura di nuova generazione basate sull'impiego di pompe di calore elettriche "booster" condensate ad acqua: analisi di diversi casi studio definiti sulla base della rete termica realizzata presso il Centro Ricerche ENEA Portici" non era prevista nel capitolato vigente di Progetto, né è stata utilizzata in fase di esecuzione, alcuna consulenza.

9 Pubblicazioni scientifiche

Non è stata portata a termine ancora alcuna pubblicazione scientifica sull'attività svolta, ma è in fase di scrittura.

10 Eventi di disseminazione

Con riferimento al periodo da Gennaio 2023 a Dicembre 2024, si riportano di seguito gli eventi di disseminazione (workshop, congressi, conferenze, meeting, seminari ecc.) a cui si è partecipato o che sono stati organizzati:

- Conferenza "MATSUS 2024 (The Materials for Sustainable Development Conference), Barcellona, Spagna, 4-8 Marzo 2024, partecipazione con presentazione orale su invito.
- Congresso Nazionale della Società Chimica Italiana "Chimica Elementi di futuro", Milano, Italia, 26-30 Agosto 2024, partecipazione.
- Conferenza Nazionale della Rete Italiana Fotovoltaico, Bolzano, Italia, 11-12 Giugno 2024, partecipazione; relativamente a questa missione, le Proff. Parisi e Sinicropi, in qualità rispettivamente di responsabile scientifico della LA 5.4 e di Referente per l'Università di Siena nel Cluster Tecnologico Nazionale Energia, 2023-2028, hanno entrambe presenziato alla conferenza della Rete Italiana del Fotovoltaico per partecipare con un contributo durante la riunione di due tavoli di lavoro dell'associazione.
- Convegno dell'Associazione Rete Italiana LCA "Life Cycle Thinking a Supporto di Modelli di Produzione e di Consumo Sostenibili", Pescara, Italia, 3-5 Luglio 2024, partecipazione
- Sono stati organizzati due seminari nell'ambito del corso Sustainable & Efficient Energy tenuto dalla Prof. Maria Laura Parisi nell'ambito del Corso di Laurea in Chemistry, a.a. 23-24 e a.a. 24-25