

# Ricerca di Sistema elettrico



Modelli di dimensionamento delle principali soluzioni di  
efficientamento energetico nel settore industriale

L. Branchini, M.C. Bignozzi, A. De Pascale, F. Melino, M.A. Ancona, B. Cavuoti, M. Bianchi,  
A. Fregni



Modelli di dimensionamento delle principali soluzioni di efficientamento energetico nel settore industriale (LA3.5)

L. Branchini, A. De Pascale, F. Melino, M.A. Ancona, B. Cavuoti, M. Bianchi *DIN- Dipartimento di Ingegneria Industriale, Alma Mater Studiorum, Università di Bologna.*

M.C. Bignozzi, A. Fregni *DICAM- Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Alma Mater Studiorum, Università di Bologna.*

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: 1.6 "Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali"

Linea di attività: 3.5 "Modelli di dimensionamento delle principali soluzioni di efficientamento energetico nel settore industriale"

Responsabile del Progetto: Miriam Benedetti, ENEA

Responsabile del Work Package: Fabrizio Martini, ENEA

Responsabile Linea di Attività: ENEA

Mese inizio previsto: gennaio 2023

Mese inizio effettivo: marzo 2023

Mese fine previsto: dicembre 2024

Mese fine effettivo: dicembre 2024

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 .....	5
2	Risultati ottenuti.....	6
2.1	Analisi dei consumi energetici del settore industriale e individuazione dei processi energivori.....	6
2.2	Individuazione delle tecnologie, più promettenti, per l'efficientamento energetico del settore industriale manifatturiero .....	6
2.3	Modelli di calcolo per il dimensionamento preliminare delle tecnologie di efficientamento energetico.....	7
2.4	Verifica dei modelli sviluppati .....	9
3	Prodotti attesi .....	10
4	Prodotti sviluppati .....	11
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	12
6	Sintesi delle attività svolte .....	13
7	Dettaglio delle attività svolte.....	14
7.1	Analisi dei consumi energetici del settore industriale e individuazione dei processi manifatturieri più energivori.....	14
7.2	Individuazione delle tecnologie, più promettenti, per l'efficientamento energetico del settore industriale manifatturiero .....	16
7.3	Modelli di calcolo per il dimensionamento preliminare delle tecnologie di efficientamento energetico.....	16
7.3.1	Modulo COGEN.....	17
7.3.2	Modulo ORC .....	21
7.3.3	Modulo HT HP .....	26
7.3.4	Modulo PV.....	31
7.4	Verifica e validazione dei modelli sviluppati.....	34
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	35
9	Pubblicazioni scientifiche.....	36
10	Eventi di disseminazione .....	37
11	Bibliografia.....	38

## Indice delle figure

Figura 1: diagramma di flusso qualitativo dei modelli di calcolo sviluppati.

Figura 2: Andamento dei consumi di energia del settore industriale in Italia, suddiviso per fonte, dal 2010 al 2021 [1].

Figura 3: Ripartizione percentuale del consumo energetico finale nei settori industriali in Italia, anno 2021 [2].

Figura 4: Schema logico della metodologia di individuazione della taglia ottimale del motore primo cogenerativo.

Figura 5: efficienza elettrica di TG commerciali in funzione della taglia elettrica.

Figura 6: efficienza elettrica per MCI commerciali in funzione della taglia elettrica.

Figura 7: andamento dell'indice elettrico per TG cogenerative in funzione della taglia elettrica.

Figura 8: andamento dell'indice elettrico per MCI cogenerativi in funzione della taglia elettrica.

Figura 9: Confronto tra produzione separata e cogenerativa nella valutazione dell'indice ESI.

Figura 10: layout semplificato del ciclo ORC recuperato.

Figura 11: diagramma di flusso del modello ORC sviluppato.

Figura 12: diagrammi qualitativi di scambio termico T-Q relativi all'evaporatore (EVA) ed al condensatore (K).

Figura 13: costo di investimento specifico di un sistema ORC in funzione della taglia elettrica.

Figura 14: layout semplificato di una pompa di calore a compressione in ciclo semplice.

Figura 15: diagramma di flusso del modello HT HP sviluppato.

Figura 16: diagrammi qualitativi di scambio termico T-Q tra sorgenti e fluido di lavoro relativi all'evaporatore (EVA) ed al condensatore (K).

Figura 17: costo di investimento specifico per il sistema HT HP in funzione della taglia elettrica.

Figura 18: diagramma di flusso del modello PV sviluppato.

## **Indice delle tabelle**

Tabella 1: consumi finali suddivisi per fonte, nel settore industriale Italiano, nel 2010 e 2021 e variazione percentuale [1].

Tabella 2: Fattori di emissione input e output based utilizzati per il calcolo dell'ESI [4].

Tabella 3: equazioni utilizzate nella modellazione del ciclo ORC per il calcolo delle principali grandezze termodinamiche

Tabella 4: equazioni utilizzate nella modellazione del ciclo HT HP per il calcolo delle principali grandezze termodinamiche.

Tabella 5: valori di riferimento per le diverse tipologie di celle fotovoltaiche considerate nel modello di calcolo.

Tabella 6: Casi studio utilizzati per la validazione del MODULO ORC.

## 1 Risultati attesi

I risultati attesi, così come previsto dall'accordo di collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIN) dell'Alma Mater Studiorum - Università di Bologna - ed ENEA, sono:

- analisi dei consumi energetici del settore industriale ed individuazione dei processi manifatturieri che possono maggiormente beneficiare dall'implementazione di tecnologie di efficientamento energetico;
- individuazione delle tecnologie più promettenti, tra quelle disponibili sul mercato, per l'efficientamento energetico delle aziende manifatturiere italiane;
- definizione di un modello di calcolo, per ciascuna tecnologia individuata, in grado di prevederne le prestazioni, la taglia ottimale da installare, il risparmio energetico ed ambientale conseguibile;
- verifica e validazione dei modelli sviluppati attraverso applicazione a casi studio o confronto con risultati da letteratura.

Le attività svolte nell'ambito della collaborazione ed i risultati ottenuti sono sinteticamente riportati all'interno del rapporto sintetico e dettagliatamente descritti all'interno del rapporto tecnico esteso.

## 2 Risultati ottenuti

I risultati ottenuti nello svolgimento dell'attività di ricerca, coerentemente con quelli attesi, sono:

### 2.1 Analisi dei consumi energetici del settore industriale e individuazione dei processi energivori

L'analisi svolta nella prima fase dell'attività di ricerca ha permesso di individuare i consumi finali del settore industriale italiano, con riferimento agli utili dati disponibili, la ripartizione di tali consumi tra le diverse fonti e l'individuazione delle categorie manifatturiere maggiormente energivore. Nel 2021, il consumo finale di energia del settore industriale ammonta a 25,3 Mtep, soddisfatto prevalentemente attraverso l'utilizzo di energia elettrica e gas naturale (79% dei consumi), non trascurabile è anche l'utilizzo diretto di calore (8,1%), del petrolio e dei suoi derivati (8,8%). L'apporto delle fonti rinnovabili e dei rifiuti, per il soddisfacimento dei consumi del settore industriale, si attesta invece come marginale. Le attività industriali minerali non metallifere hanno assorbito il 17,7% dei consumi finali dell'industria, seguiti da metallurgia (15,6%), chimica (15,2%), industria meccanica (13,0%), della carta (11,7%) ed alimentare (10,3%). I settori ad alta intensità energetica, nel 2021, hanno complessivamente assorbito circa il 60% dei consumi finali dell'industria [1]. A completamento dell'analisi energetica del settore di produzione della ceramica condotta nell'ambito della precedente Ricerca di Sistema (Report RdS/PTR2021/184), sono state esaminate le diagnosi energetiche presentate nel 2023 dai produttori di sanitari e dai produttori di laterizi e tegole presenti sul territorio italiano, al fine di mappare i loro consumi energetici specifici e determinare, di conseguenza, gli indicatori di prestazione energetica in funzione della produzione. L'analisi è utile sia per l'industria manifatturiera che per il settore ceramico come benchmark aggiornato e potrà essere usata anche per valutare l'effetto dell'introduzione di nuove BAT settoriali.

### 2.2 Individuazione delle tecnologie, più promettenti, per l'efficientamento energetico del settore industriale manifatturiero

Nell'anno 2022, il numero dei Certificati Bianchi (CB o Titoli di Efficienza Energetica, TEE) riconosciuti al settore industriale è stato pari a 420.804 (64,3% dei TEE complessivamente riconosciuti dal GSE nell'anno). Di questi, circa il 72% si riferisce ad interventi relativi alla generazione e al recupero di calore; il 24% all'ottimizzazione energetica dei processi produttivi e dei layout di impianto, il 3% per interventi relativi ai sistemi di azionamenti efficienti, automazione e rifasamento e l'1% alla generazione di energia elettrica da fonti rinnovabili o cogenerazione [2]. L'analisi degli interventi di efficienza energetica nell'ambito del meccanismo dei Certificati Bianchi insieme a quella effettuata sulle diagnosi energetiche a disposizione di ENEA, ha permesso di individuare alcune tecnologie che per applicabilità, replicabilità, disponibilità a livello commerciale ed economicità sono risultate particolarmente promettenti. Le soluzioni di efficienza energetica che sono state scelte rientrano inoltre nella categoria "cross cutting technologies": tecnologie applicabili trasversalmente a settori manifatturieri diversi. Le quattro soluzioni individuate, oggetto di modellazione dettagliata nella terza fase dell'attività di ricerca condotta, sono:

- installazione di un sistema di produzione combinata di elettricità e calore – Motore primo cogenerativo;
- valorizzazione del calore di scarto da processo industriale per produzione di elettricità attraverso un Ciclo Rankine a fluido Organico;
- valorizzazione di calore di scarto da processo industriale per produzione di calore attraverso l'installazione di pompa di calore ad alta temperatura;
- produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile: installazione di pannelli solari fotovoltaici.

### 2.3 Modelli di calcolo per il dimensionamento preliminare delle tecnologie di efficientamento energetico

I modelli di calcolo sono stati concepiti e sviluppati con l'obiettivo comune di fornire indicazioni preliminari circa la taglia ottimale della tecnologia da installare ed una prima valutazione energetico, economica ed ambientale delle prestazioni conseguibili, permettendo quindi alle aziende di incrementare le possibilità di realizzare interventi di efficientamento energetico abbattendo barriere prevalentemente di tipo conoscitivo e informativo. I modelli di calcolo sviluppati sono pensati per essere utilizzati da utenti - come *energy manager* ed *energy consultants* - che siano alla ricerca di un supporto decisionale per l'individuazione della taglia ottimale da installare e l'identificazione preliminare delle grandezze tecnico/economiche della soluzione di interesse.

I quattro modelli di calcolo sviluppati nell'ambito della terza fase dell'attività di ricerca sono:

- **MODULO COGEN:** modello di calcolo per il dimensionamento preliminare di un sistema cogenerativo di autoproduzione dell'energia elettrica e termica con motore primo di tipo turbina a gas o motore a combustione interna alternativo.
- **MODULO ORC:** modello di calcolo per dimensionamento preliminare di un sistema di produzione elettrica - Ciclo Rankine a fluido Organico- mediante valorizzazione del calore di scarto del processo industriale.
- **MODULO HT HP:** modello di calcolo per dimensionamento preliminare di un sistema di produzione termica - di tipo pompa di calore ad alta temperatura - tramite valorizzazione del calore di scarto del processo industriale.
- **MODULO PV:** modello di calcolo per dimensionamento preliminare di un sistema di autoproduzione dell'energia elettrica tramite pannelli solari fotovoltaici.

Ogni modello di calcolo sviluppato è strutturato secondo lo schema qualitativamente riportato in **Figura 1**, e si compone di tre sezioni principali:

- "Definizione input";
- "Modello di calcolo";
- "Output".

Per ciascuna soluzione individuata, all'interno del report esteso, sono dettagliate le informazioni richieste in input, le logiche di calcolo implementate all'interno dei modelli di calcolo sviluppati e le principali grandezze (energetico, economiche ed ambientali) restituite in output al termine della simulazione.

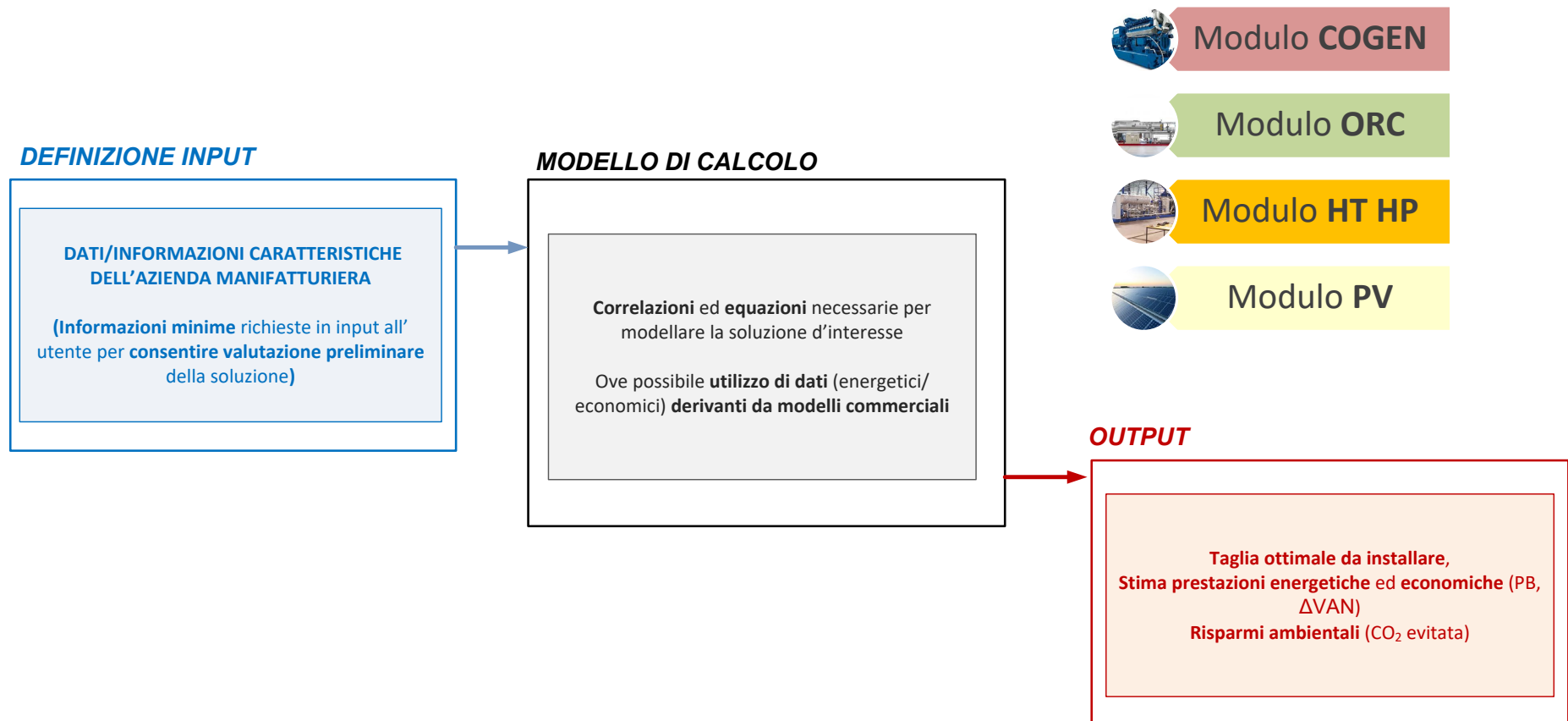


Figura 1: diagramma di flusso qualitativo dei modelli di calcolo sviluppati.

## 2.4 Verifica dei modelli sviluppati

L'ultima fase dell'attività di ricerca condotta ha riguardato la messa a punto, verifica ed applicazione dei modelli di calcolo sviluppati. La verifica è stata effettuata applicando i modelli di calcolo sviluppati, ove possibile, a casi studio di applicazione reali delle tecnologie in oggetto o, in alternativa, confrontando i risultati ottenuti con dati e software disponibili in letteratura. Il confronto ha evidenziato un'ottima corrispondenza dei risultati ottenuti.

### 3 Prodotti attesi

Il deliverable della ricerca consiste in un report (sia di sintesi che esteso) contenente una descrizione di tutte le attività svolte, dei modelli di calcolo sviluppati e dei risultati conseguiti nella fase di verifica e validazione dei modelli sviluppati.

## 4 Prodotti sviluppati

Come previsto, il prodotto atteso e conseguito è il report (sia di sintesi che esteso) contenente la descrizione dettagliata di tutte le attività svolte, dei modelli di calcolo sviluppati, delle verifiche effettuate per attestarne la validità e dei principali risultati conseguiti durante l'attività di collaborazione. I quattro modelli di calcolo sviluppati permettono di effettuare una valutazione preliminare della taglia ottimale e delle performance energetiche, economiche ed ambientali delle seguenti tecnologie applicate all'interno di utenze industriali manifatturiere:

- Tecnologie di produzione combinata di elettricità e calore (MODULO COGEN);
- Tecnologie di recupero dei cascami termici e valorizzazione mediante produzione di energia elettrica (MODULO ORC);
- Tecnologie volte ad incrementare l'elettrificazione diretta dei settori d'uso finale (MODULO HT HP);
- Sistemi di produzione dell'energia elettrica da fonte rinnovabile (MODULO PV).

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non risultano scostamenti tra quanto previsto e quanto realizzato.

## 6 Sintesi delle attività svolte

L'attività di ricerca condotta, articolata in quattro fasi, ha come obiettivo principale lo sviluppo di modelli di calcolo per il dimensionamento preliminare delle soluzioni di efficientamento energetico più promettenti nel contesto industriale manifatturiero. La prima fase ha esaminato i consumi energetici delle principali attività manifatturiere italiane, individuando le categorie industriali che possono beneficiare maggiormente dall'implementazione di tecnologie di efficientamento energetico. La seconda fase ha analizzato le soluzioni disponibili, selezionando quelle più promettenti per applicabilità, economicità e disponibilità a livello commerciale. Le quattro soluzioni selezionate includono: sistemi cogenerativi, cicli Rankine a fluido organico, pompe di calore a compressione ad alta temperatura e impianti fotovoltaici. Per ciascuna soluzione è stato definito un modello di calcolo in grado di fornire indicazioni preliminari sul dimensionamento ottimale della tecnologia e sulle prestazioni energetiche, economiche ed ambientali conseguibili, in base alle caratteristiche del sito industriale di installazione definite in input dall'utente. I modelli sviluppati sono stati verificati e validati tramite applicazione a casi studio reali o confronto con dati di letteratura.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

### 7.1 Analisi dei consumi energetici del settore industriale e individuazione dei processi manifatturieri più energivori

Il settore industriale italiano, nel 2021, ha consumato 25,3 Mtep di energia, con un incremento del 6% rispetto al 2020. In **Figura 2** è riportato l'andamento dei consumi finali del settore industriale, nel periodo 2010-2021, suddiviso per fonte. Analizzando l'andamento si osserva una riduzione nei consumi di tutte le fonti energetiche ad esclusione delle rinnovabili e biocombustibili e dei rifiuti non rinnovabili. Le variazioni, nel periodo analizzato per ciascuna fonte, sono riportate in **Tabella 1**. Nel 2021 i consumi finali di energia nel settore industriale sono soddisfatti al 79% mediante l'utilizzo di energia elettrica (circa 44%) e gas naturale (35%). Non trascurabile risulta anche l'utilizzo diretto di calore (8,1%), del petrolio e suoi derivati (8,8%). L'apporto delle fonti rinnovabili e dei rifiuti si attesta invece come marginale (circa 3%) [1]. Come evidenziato nel diagramma di Sankey riportato in **Figura 3**, nel 2021 i minerali non metalliferi hanno assorbito il 17,7% dei consumi finali dell'industria, seguiti da metallurgia (15,6%), chimica (15,2%), meccanica (13,0%), carta (11,7%) ed alimentare (10,3%). I settori ad alta intensità energetica nel 2021 hanno assorbito circa il 60% dei consumi finali dell'industria, in linea con l'andamento decrescente a partire dagli ultimi anni novanta (nel 1990 il loro peso era del 66%)[2].

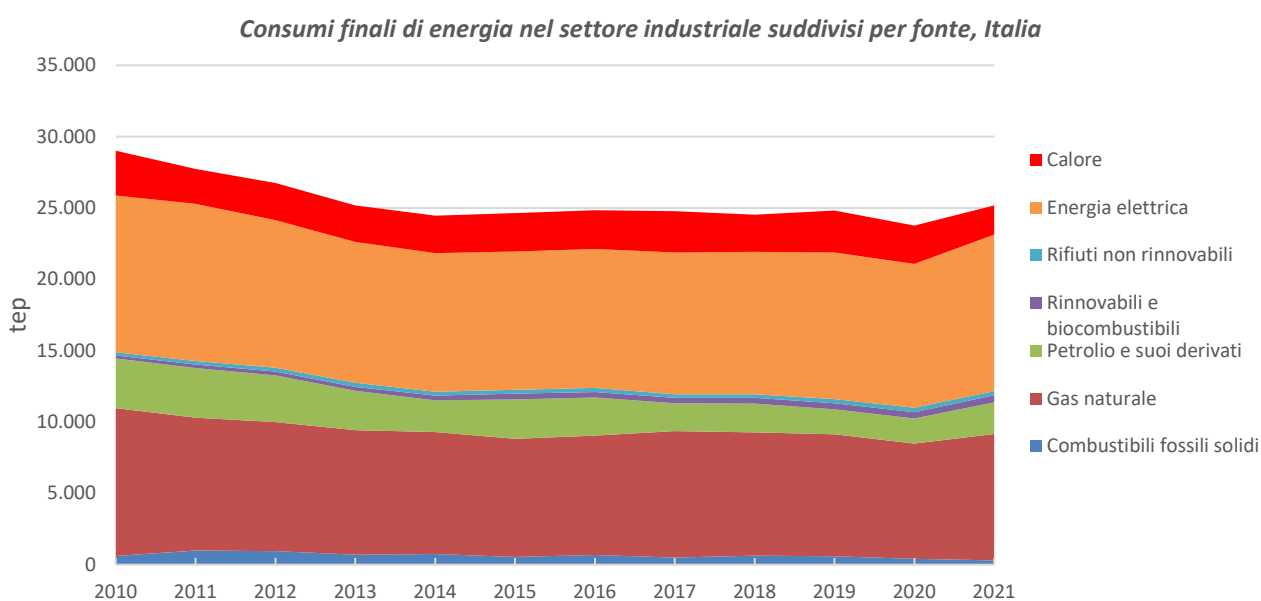


Figura 2: Andamento dei consumi di energia del settore industriale in Italia, suddiviso per fonte, dal 2010 al 2021 [1].

Tabella 1: consumi finali suddivisi per fonte, nel settore industriale Italiano, nel 2010 e 2021 e variazione percentuale [1].

Fonte	2010 [tep]	2021 [tep]	Variazione
Combustibili fossili solidi	619,684	302,273	-51,2%
Gas naturale	10.350,408	8.862,501	-14,4%
Petrolio e suoi derivati	3.480,620	2.225,481	-36,1%
Rinnovabili e biocombustibili	217,206	494,155	127,5%
Rifiuti non rinnovabili	222,724	285,641	28,2%
Energia elettrica	10.994,669	10.972,260	-0,2%
Calore	3.129,407	2.041,594	-34,8%

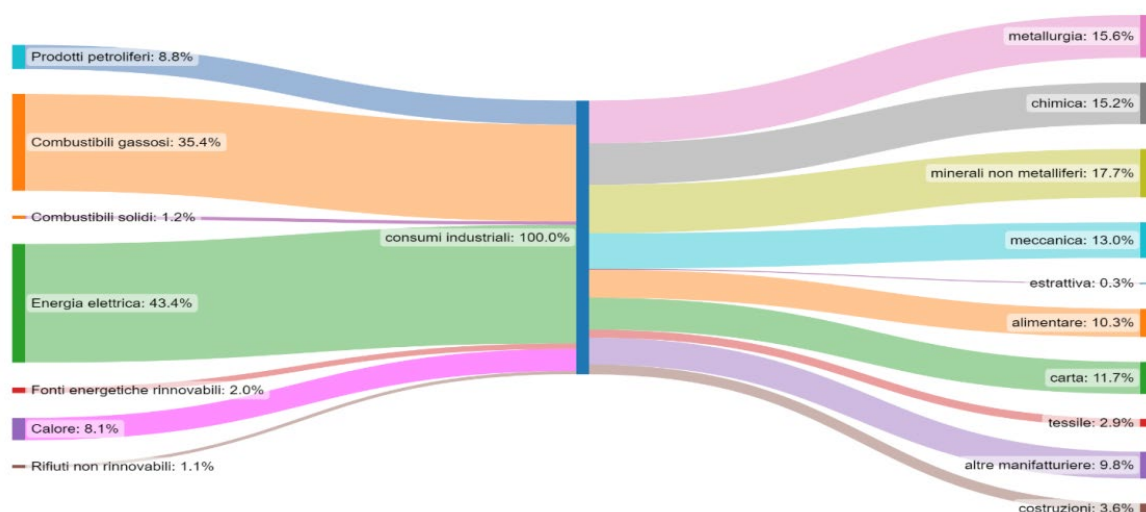


Figura 3: Ripartizione percentuale del consumo energetico finale nei settori industriali in Italia, anno 2021 [2].

### Completamento analisi settore ceramica: indici di prestazione energetica per aziende di produzione sanitari, laterizi e tegole

Il settore dell'industria ceramica è energivoro e rientra tra i settori "hard to abate" in quanto i processi di sinterizzazione necessari per la produzione richiedono alte temperature e conseguenti elevate quantità di emissioni di anidride carbonica. Il settore è attualmente coinvolto nell'aggiornamento del BREF [1] (Ceramic Manufacturing Industry, ultimo draft pubblicato novembre 2024), in cui viene fatta una revisione delle "best available techniques" (BAT) per l'efficientamento energetico e la riduzione delle emissioni. In questo contesto sono state esaminate le diagnosi energetiche presentate nel 2023 dai produttori di sanitari (16 aziende, codice ATECO 234200) e dai produttori di laterizi e tegole (52 aziende, codice ATECO 233200), presenti sul territorio italiano, così da mappare i loro consumi energetici specifici. L'attività è stata svolta seguendo lo stesso approccio utilizzato per le piastrelle di ceramica [2]

con l'individuazione di indici di prestazione energetici generali e specifici e, quando possibile, è stato fatto un confronto con l'indice di prestazione energetico di riferimento del settore presente in letteratura. Sono stati determinati gli andamenti dei consumi e degli indici in funzione della produzione; tuttavia, il minor numero di diagnosi analizzate e la loro diversificazione in termini di prodotto ha generato una certa dispersione dei dati. L'analisi è utile sia per l'industria manifatturiera che per il settore ceramico come benchmark aggiornato e potrà essere usata anche per valutare l'effetto dell'introduzione di nuove BAT settoriali.

## 7.2 Individuazione delle tecnologie, più promettenti, per l'efficientamento energetico del settore industriale manifatturiero

Nell'anno 2022, il numero dei Titoli di Efficienza Energetica (TEE o Certificati Bianchi, CB) riconosciuti al settore industriale è stato pari a 420.804 (64,3% dei TEE riconosciuti complessivamente dal GSE) di cui circa il 72% riconosciuti per interventi relativi alla generazione e al recupero di calore; il 24% per interventi legati all'ottimizzazione energetica dei processi produttivi e dei layout di impianto, il 3% per interventi relativi ai sistemi di azionamenti efficienti, automazione e rifasamento, e l'1% per interventi di generazione di energia elettrica da recuperi di calore, fonti rinnovabili o cogenerazione [2]. Nell'ambito dei risparmi di energia primaria stabiliti nel PNIEC al 2030 il ruolo dell'industria è rilevante con un contributo del settore, nel periodo 2021-2030, pari a 5,5 Mtep. Per conseguire tale obiettivo, il contributo atteso dal regime d'obbligo dei Certificati Bianchi è particolarmente rilevante pari a circa 4 Mtep [5].

L'analisi delle azioni di efficienza energetica, realizzate nell'ambito del meccanismo dei Certificati Bianchi, insieme all'analisi delle diagnosi energetiche ha permesso di classificare gli interventi (effettuati ed individuati) in base alla loro specificità e complessità e di individuare le tecnologie più promettenti per applicabilità, economicità e disponibilità a livello commerciale. Le soluzioni di efficienza energetica che sono state scelte, oggetto di studio e modellazione nella presente attività di ricerca, rientrano all'interno della categoria **cross cutting technologies** - tecnologie e soluzioni che possono essere applicate trasversalmente a settori manifatturieri diversi- sono:

- installazione di un sistema di produzione combinata di elettricità e calore - motore primo cogenerativo;
- recupero e valorizzazione del calore di scarto da processo industriale per produzione di elettricità mediante cicli Rankine a fluido organico;
- recupero del calore di scarto da processo industriale per produzione di calore mediante installazione di pompa di calore a compressione ad alta temperatura.
- produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile: installazione di pannelli solari fotovoltaici.

## 7.3 Modelli di calcolo per il dimensionamento preliminare delle tecnologie di efficientamento energetico

Per ciascuna soluzione individuata è stato sviluppato un modello di calcolo specifico con l'obiettivo di fornire indicazioni preliminari circa la taglia ottimale della tecnologia da installare ed una prima valutazione energetico/economica/ambientale delle prestazioni conseguibili. Ciascun modello di calcolo si compone di tre sezioni distinte:

- **Definizione input**: sezione in cui sono indicati i dati richiesti in input all'utente per la definizione delle condizioni al contorno necessarie al dimensionamento preliminare della tecnologia scelta.
- **"Modello di calcolo"**: sezione contenente le logiche di calcolo, le correlazioni e le equazioni utilizzate per simulare la tecnologia scelta.
- **"Output"**: sezione in cui sono restituiti in output all'utente i risultati energetico, economici ed ambientali della modellazione effettuata.

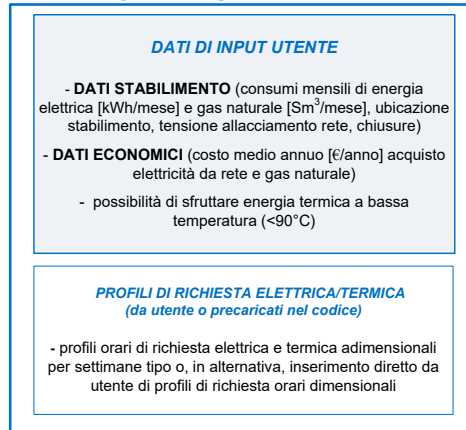
### 7.3.1 Modulo COGEN

Il modello di calcolo per la valutazione preliminare della taglia ottimale e delle prestazioni di un motore primo cogenerativo è illustrato in **Figura 4**. Questo sistema è pensato come alternativa all'acquisto di elettricità da rete e all'uso di caldaie per la produzione di calore. Sono modellati due tipi di motori primi cogenerativi: motore alternativo a combustione interna (MCI) e turbina a gas (TG).

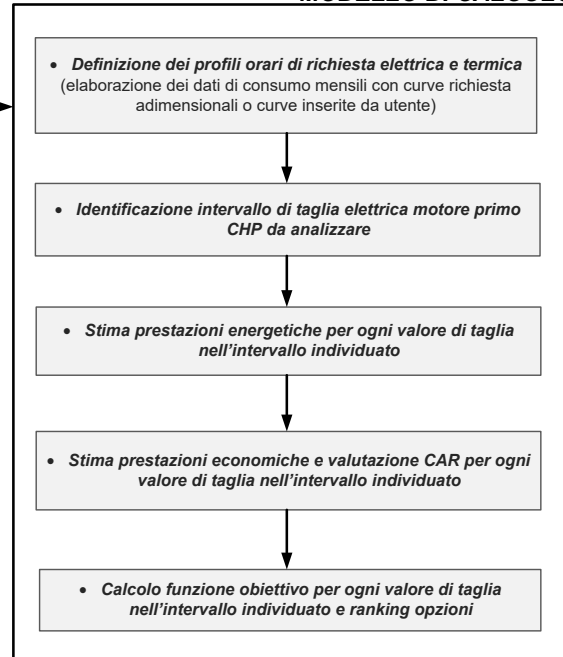
La sezione "definizione input" include tutte le informazioni energetiche ed economiche del sito industriale. I fabbisogni energetici mensili inseriti dall'utente sono elaborati per stimare le potenze elettriche e termiche medie orarie richieste durante l'anno. I profili orari di richiesta sono determinati tenendo conto delle chiusure del sito di produzione. Il codice di calcolo identifica l'intervallo di taglia del sistema cogenerativo da investigare e valuta iterativamente le prestazioni energetico/economiche per ogni valore di taglia elettrica considerato. Le prestazioni elettriche del cogeneratore sono valutate con riferimento ai dati reali di efficienza elettrica di modelli commerciali (**Figura 5 e Figura 6**) mentre le prestazioni termiche sono stimate utilizzando l'indice elettrico (**Figura 7 e Figura 8**). Per ciascuna taglia elettrica analizzata, è possibile determinare l'energia elettrica producibile, l'energia primaria in ingresso con il combustibile e l'energia termica recuperabile. Il confronto tra la produzione del motore primo CHP ed i profili di richiesta elettrica e termica dell'utenza permette di quantificare l'elettricità da acquistare o cedere alla rete e l'energia termica da produrre mediante caldaia ausiliaria o in eccesso. Il codice di calcolo procede alla valutazione delle performance economiche, quantificando costi e ricavi associati al funzionamento del cogeneratore. I costi considerati includono l'investimento, il costo del combustibile e di manutenzione, mentre i ricavi derivano dalla vendita di energia elettrica, dai costi evitati per l'acquisto di elettricità e gas naturale, e dai ricavi legati all'emissione dei CB.

La funzione obiettivo valuta il Valore attuale netto differenziale ( $\Delta VAN$ ) della soluzione cogenerativa rispetto alla soluzione separata. La taglia ottimale risultante è quella che massimizza il  $\Delta VAN$ . Il modello di calcolo fornisce quindi l'indicazione della taglia ottimale da installare e suggerisce i modelli di motore primo commercialmente disponibili sul mercato. La valutazione delle prestazioni ambientali confronta le emissioni di CO<sub>2</sub> della soluzione cogenerativa rispetto alla produzione separata (**Figura 9**), utilizzando l'indice ESI (Emission Saving Index) valutato con riferimento ai fattori di emissione riportati in **Tabella 2**.

## DEFINIZIONE INPUT



## MODELLO DI CALCOLO



## OUTPUT

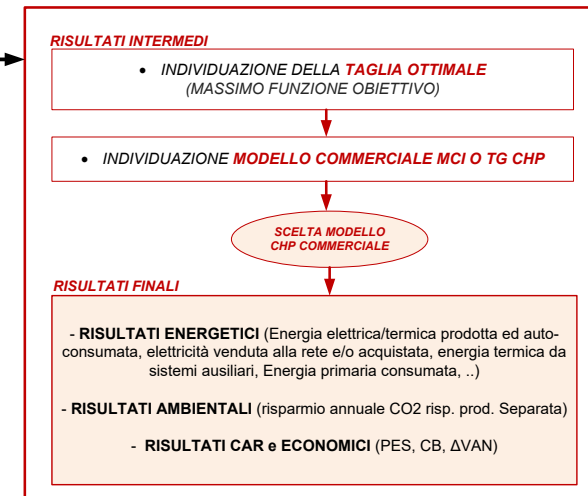


Figura 4: Schema logico della metodologia di individuazione della taglia ottimale del motore primo cogenerativo sviluppata.

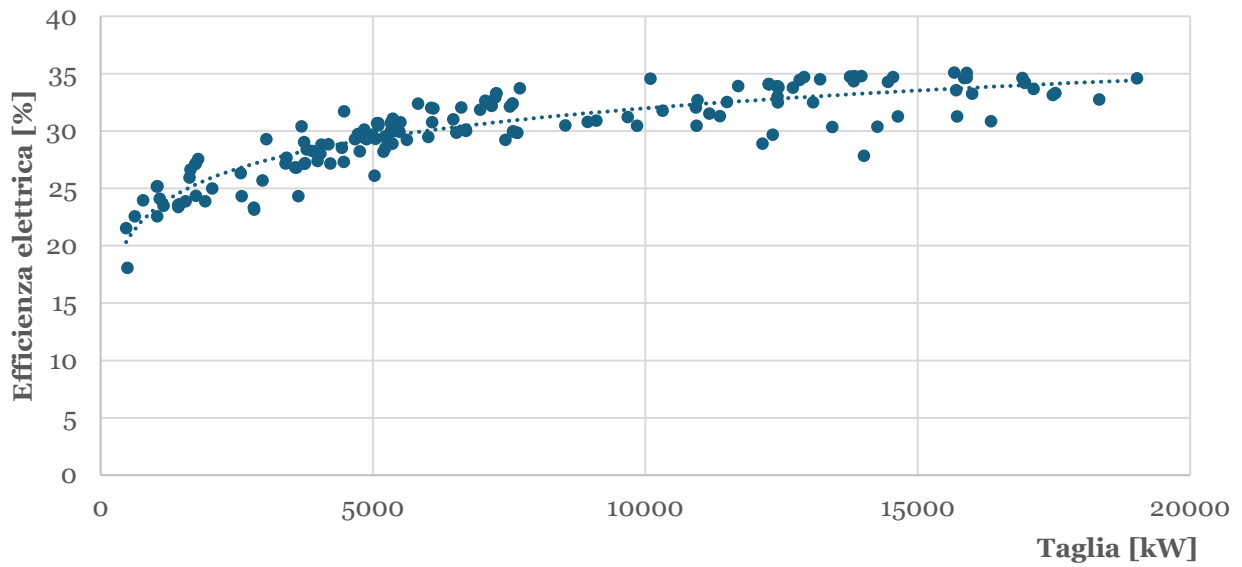


Figura 5: efficienza elettrica di TG commerciali in funzione della taglia elettrica.

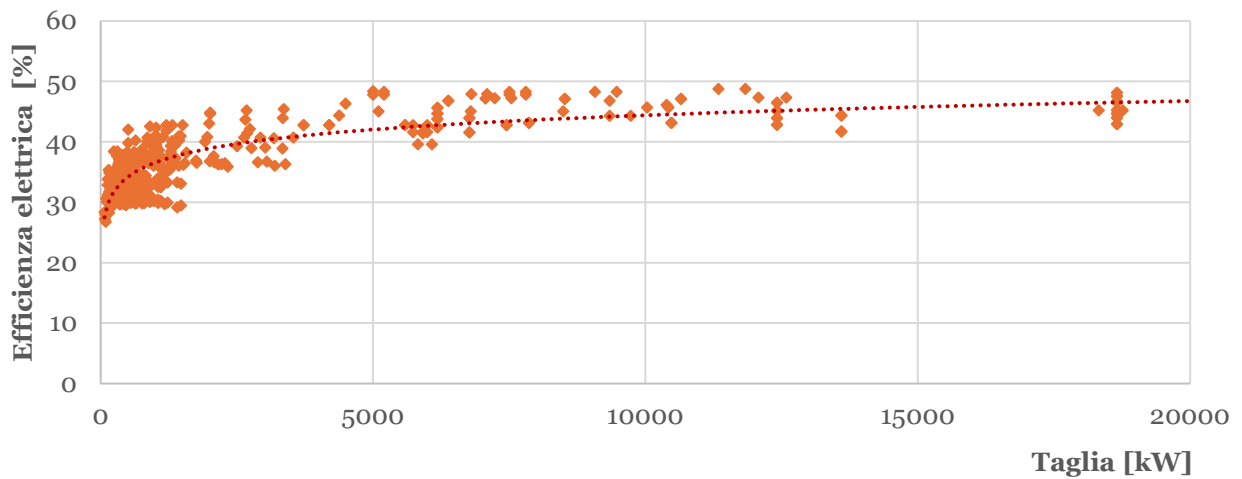


Figura 6: efficienza elettrica per MCI commerciali in funzione della taglia elettrica.

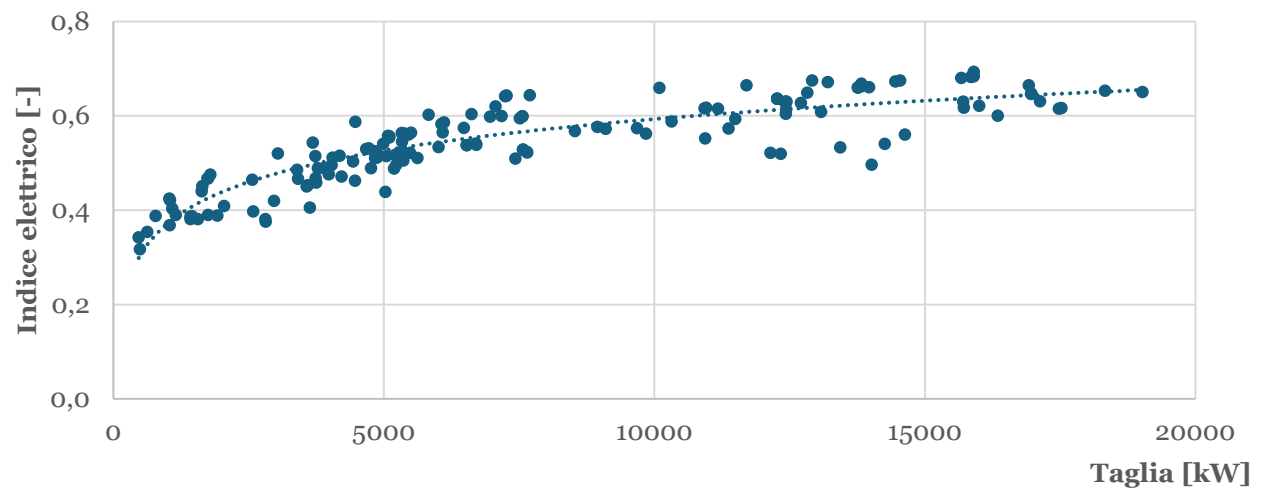


Figura 7: andamento dell'indice elettrico per TG cogenerative in funzione della taglia elettrica.

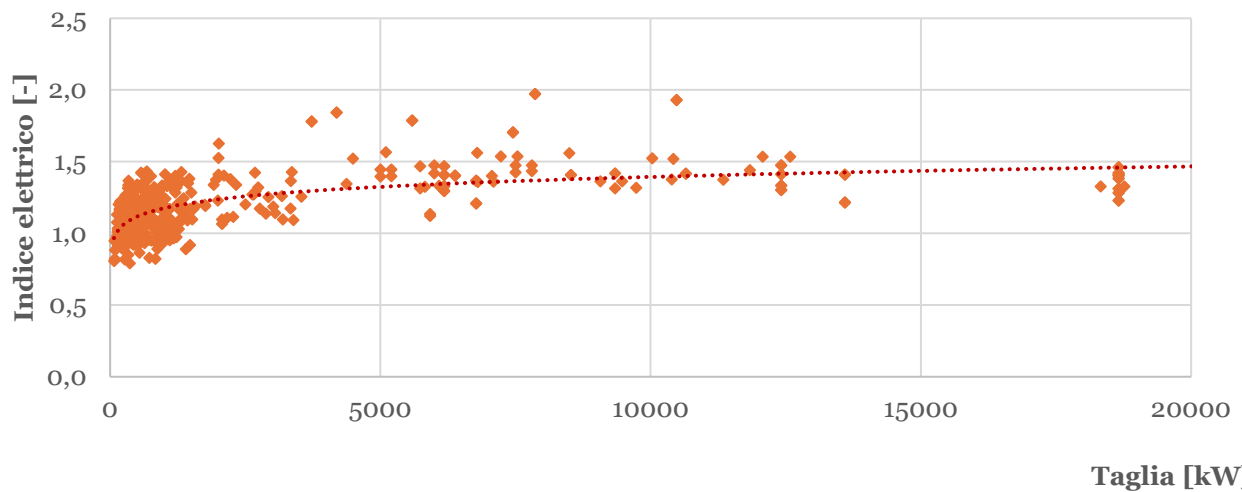


Figura 8: andamento dell'indice elettrico per MCI cogenerativi in funzione della taglia elettrica.

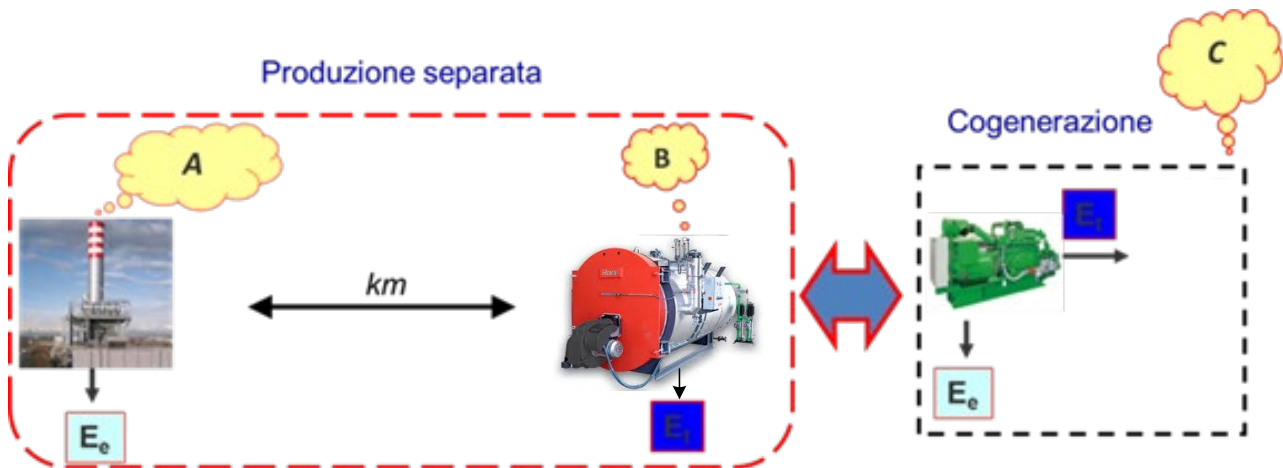


Figura 9: Confronto tra produzione separata e cogenerativa nella valutazione dell'indice ESI.

Tabella 2: Fattori di emissione input e output based utilizzati per il calcolo dell'ESI [6].

Fattore emissione <b>output-based del parco termoelettrico</b>	Fattore emissione <b>output-based della caldaia industriale</b>	Fattore emissione <b>input-based del cogeneratore</b>
462,2 g/kWh	233,0 g/kWh	199,5 g/kWh

### 7.3.2 Modulo ORC

La modellazione sviluppata permette di valutare la taglia ottimale e le prestazioni energetiche, economiche e ambientali di un Ciclo Rankine a fluido Organico (ORC) per la produzione di energia elettrica recuperando il calore di scarto del processo industriale. Il sistema ORC modellato è un ciclo semplice subcritico (**Figura 10**) con pompa, espansore e due scambiatori di calore (evaporatore e condensatore). La modellazione esplora anche una configurazione recuperata, che utilizza uno scambiatore di calore per preriscaldare il fluido organico. L'energia elettrica generata contribuisce a soddisfare il fabbisogno elettrico del sito industriale, riducendo l'acquisto di elettricità dalla rete. La produzione netta è calcolata sottraendo i consumi della pompa dalla produzione dell'espansore. La routine di calcolo sviluppata (**Figura 11**) determina il fluido organico ottimale e le principali variabili operative (temperature, pressioni del ciclo termodinamico) per massimizzare la produzione di potenza elettrica. La sezione "definizione input" stabilisce le caratteristiche della sorgente calda da sfruttare, della sorgente fredda e delle principali grandezze economiche. La procedura di modellazione realizza preliminarmente una preselezione, tra tutti i fluidi organici disponibili nel database Coolprop, in base a caratteristiche termodinamiche ed ambientali. A valle di questa preselezione, la routine di calcolo determina, per ciascun fluido organico risultante dal pre-screening, i parametri termodinamici ottimali del ciclo al fine di massimizzare la potenza elettrica netta producibile in base alle caratteristiche della sorgente calda indicate in input dall'utente. La modellazione sviluppata si basa sulla pinch analysis - metodologia di minimizzazione delle irreversibilità legate allo scambio di calore - e le equazioni riportate in **Tabella 3**. I diagrammi di cambio termico T-Q tra fluido organico e le sorgenti di calore sono riportati, qualitativamente, in **Figura 12**. Per ciascun fluido organico analizzato e per entrambe le configurazioni di ciclo proposto (semplice e con recupero) è pertanto individuata la massima potenza elettrica producibile. Le opzioni sono ordinate individuando quindi la configurazione del ciclo ORC ottimale (fluido di lavoro, layout ciclo, pressioni e temperature, potenza e rendimento elettrico ottenibili) da accoppiare alla sorgente di calore definita in input dall'utente. Le prestazioni economiche sono determinate considerando il costo di investimento della tecnologia ORC (**Figura 13** ricavato a partire da dati reali relativi a modelli commerciali), i costi di manutenzione, i ricavi legati al mancato acquisto di elettricità da rete e quelli derivanti dalla vendita dei certificati bianchi. I risultati ambientali sono espressi in termini di CO2 evitata, calcolata moltiplicando l'energia elettrica annualmente prodotta dal ciclo ORC per il fattore di emissione del parco termoelettrico italiano (**Tabella 2**).

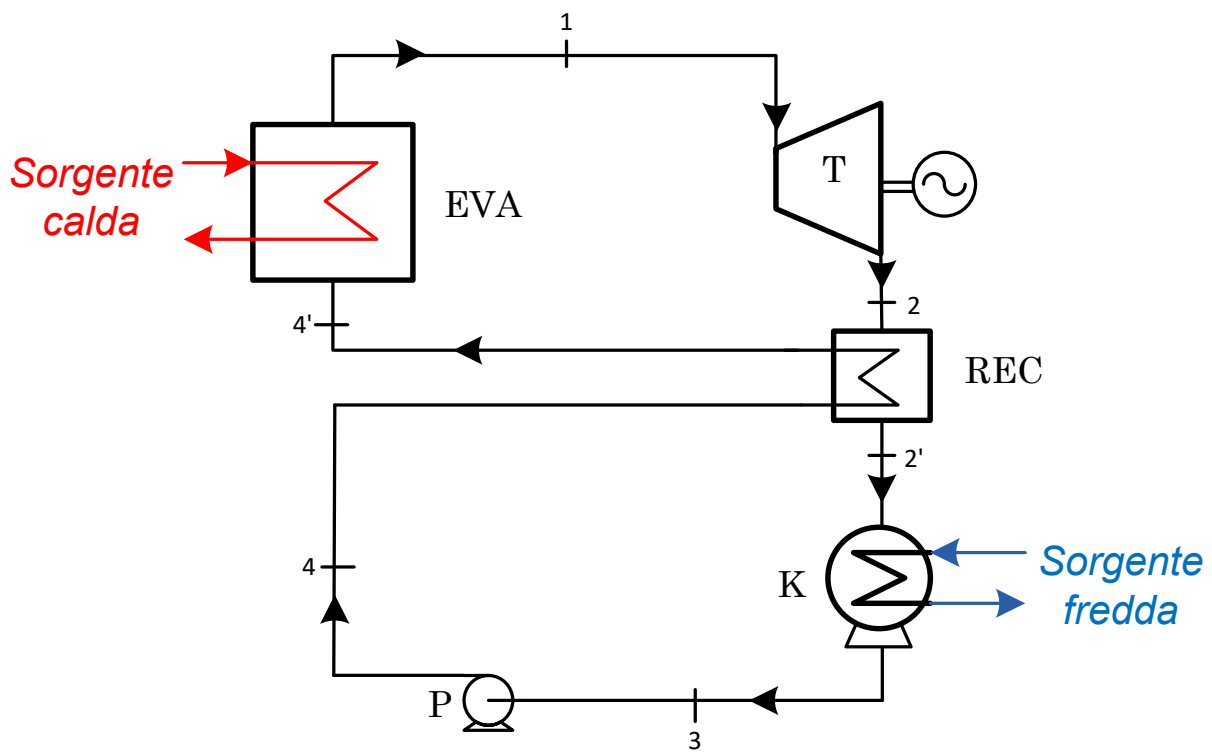
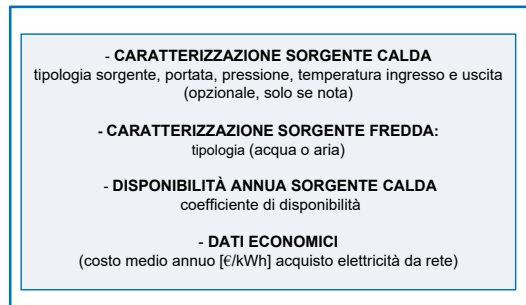
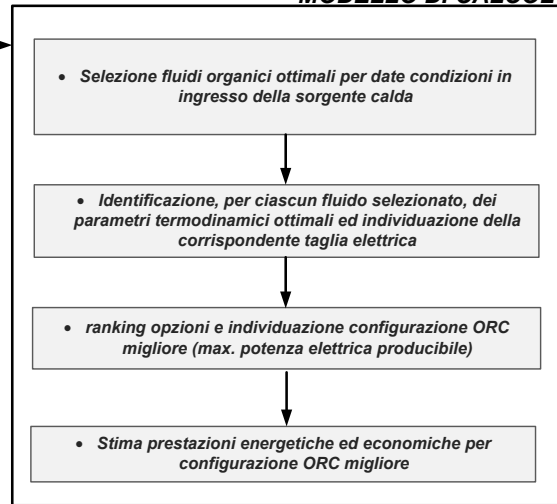


Figura 10: layout semplificato del ciclo ORC recuperato.

## DEFINIZIONE INPUT



## MODELLO DI CALCOLO



## OUTPUT

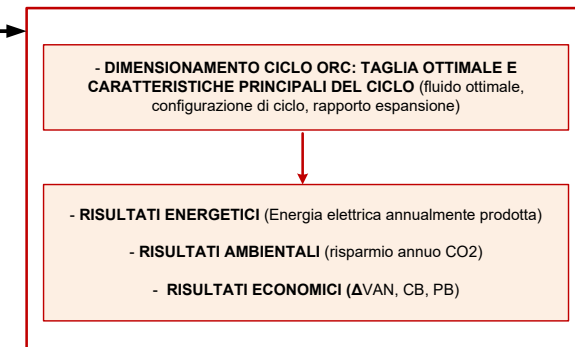


Figura 11: diagramma di flusso del modello ORC sviluppato.

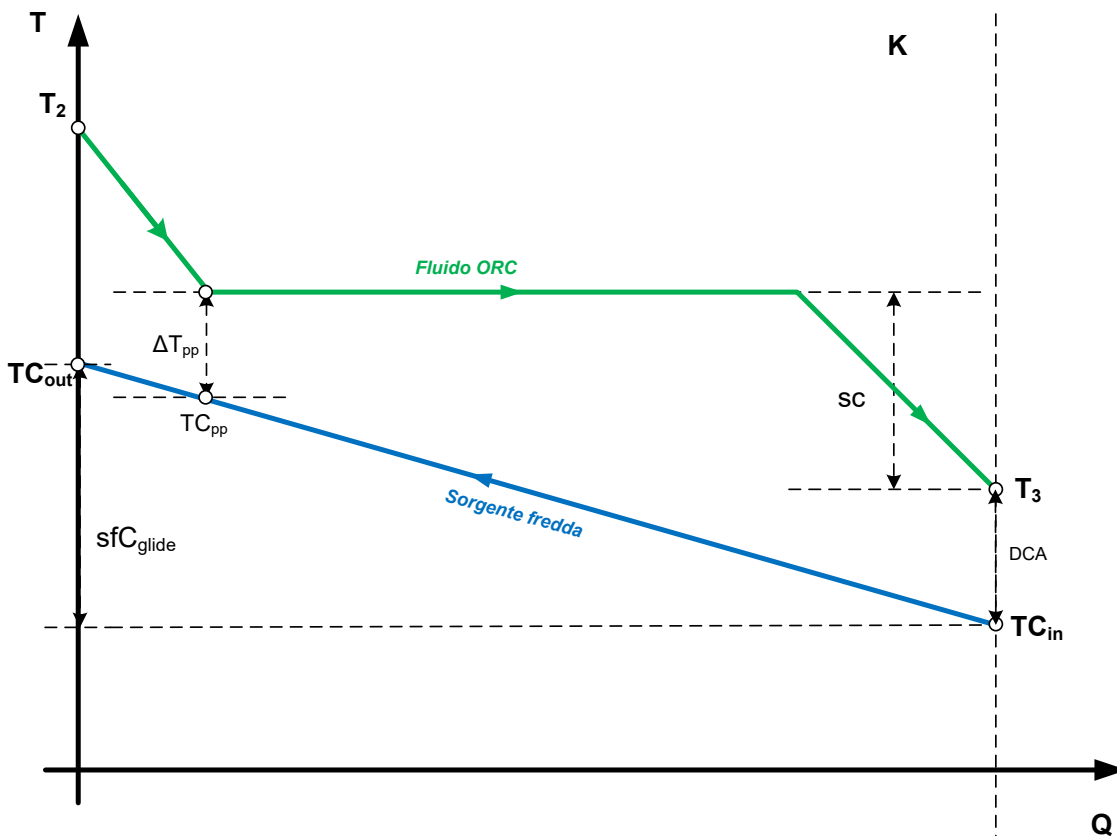
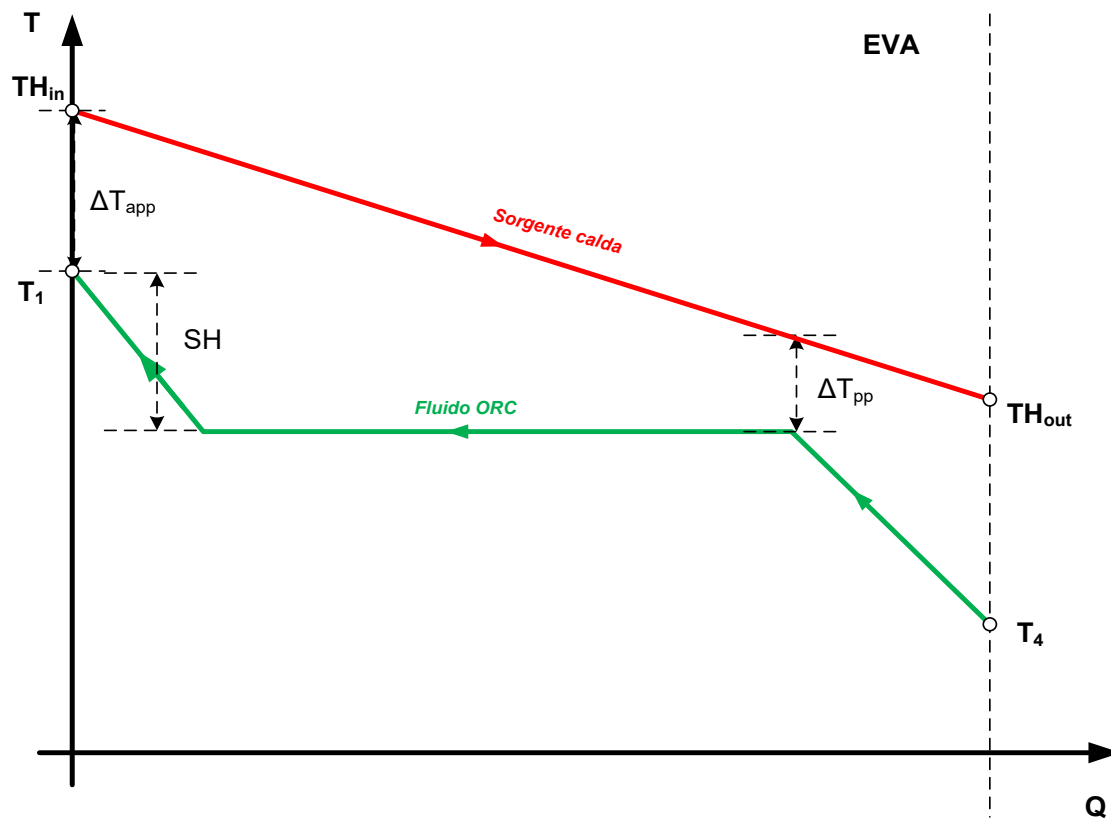


Figura 12: diagrammi qualitativi di scambio termico T-Q relativi all'evaporatore (EVA) ed al condensatore (K).

Tabella 3: equazioni utilizzate nella modellazione del ciclo ORC per il calcolo delle principali grandezze termodinamiche.

Variabile	Equazione/relazione implementata
Temperatura di uscita della sorgente fredda	$TC_{out} = TC_{in} + sfC_{glide}$
Temperatura fluido ORC uscita condensatore	$T_3 = TC_{in} + DCA$
Temperatura di condensazione	$T_K = T_3 + SC$
Entalpia uscita condensatore (p.to 3 in Figura 10)	$h_3 = h(p_k, T_3)$
Entropia uscita condensatore (p.to 3 in Figura 10)	$s_3 = h(p_k, h_3)$
Temperatura di vaporizzazione	$T_v = TH_{in} - \Delta T_{app} - SH$
Temperatura uscita evaporatore	$T_1 = T_v + SH$
Entalpia uscita evaporatore/ingresso espansore (p.to 1 in Figura 10)	$h_1 = h(p_v, T_1)$
Entropia uscita evaporatore/ingresso espansore (p.to 1 in Figura 10)	$s_1 = h(p_v, h_1)$
Entalpia isoentropica uscita espansore/ingresso condensatore (p.to 2 in Figura 10)	$h_{2,is} = h(p_k, s_1)$
Entalpia reale uscita espansore/ingresso condensatore (p.to 2 in Figura 10)	$h_2 = h_1 - \eta_{is,exp}(h_1 - h_{2,is})$
Entalpia isoentropica uscita pompa/Ingresso evaporatore (p.to 4 in Figura 10)	$h_{4,is} = h(p_v, s_3)$
Entalpia reale uscita pompa/Ingresso evaporatore (p.to 4 in Figura 10)	$h_4 = h_3 + (h_{4,is} - h_3)/\eta_{is,pump}$
Temperatura uscita pompa	$T_4 = T(p_v, h_4)$
Efficienza scambio termico recuperatore	$\mathcal{E} = (T_2 - T_{2'})/(T_2 - T_4)$
Portata in massa di fluido ( $\dot{m}_{ORC}$ )	$\dot{m}_{ORC} = \dot{m}_H(h_{H,in} - h_{H,out})/(h_1 - h_4)$
Portata in massa di sorgente fredda ( $\dot{m}_{cool}$ )	$\dot{m}_C = \dot{m}_{ORC}(h_2 - h_3)/(h_{C,out} - h_{C,in})$
Efficienza termodinamica	$\eta_{ORC,th} = [(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)]/(h_1 - h_4)$
Potenza elettrica netta prodotta	$P_{ORC} = \dot{m}_{ORC}[(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)]\eta_{em}$
Efficienza ORC	$\eta_{ORC} = P_{ORC}/[\dot{m}_H(h_{H,in} - h_{H,out})]$
Potenza termica al condensatore	$\dot{Q}_C = \dot{m}_{ORC}(h_2 - h_3)$

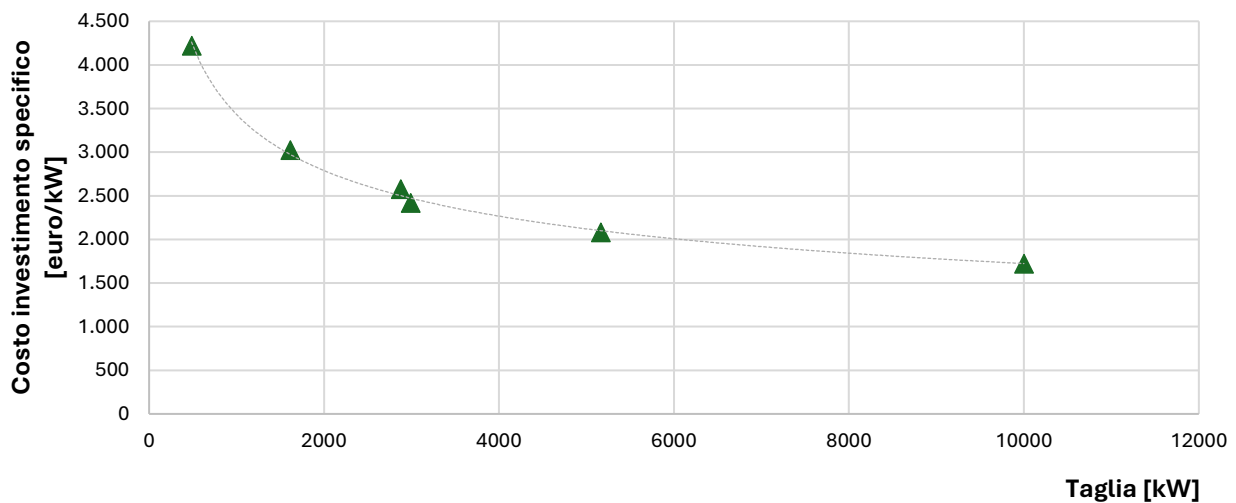


Figura 13: costo di investimento specifico di un sistema ORC in funzione della taglia elettrica.

### 7.3.3 Modulo HT HP

La modellazione sviluppata per il calcolo delle prestazioni energetiche, economiche e ambientali di una pompa di calore elettrica a compressione ad alta temperatura (HT HP) è analoga a quella sviluppata per il modulo ORC. Il sistema HT HP considerato è un ciclo semplice subcritico (**Figura 14**) con compressore, valvola di laminazione e due scambiatori di calore (evaporatore e condensatore). La modellazione sviluppata, schematizzata nel diagramma di **Figura 15**, permette di stabilire la taglia ottimale, le prestazioni conseguibili (definite attraverso il Coefficient of Performance -COP) e le caratteristiche del ciclo termodinamico del sistema HT HP da accoppiare alle sorgenti di calore (pozzo caldo e freddo) definite in input dall'utente. Sinteticamente, la modellazione sviluppata, basata sulla pinch analysis (diagrammi di scambio termico qualitativamente riportati in **Figura 16**) e le equazioni indicate in **Tabella 4**, determina le caratteristiche ottimali del ciclo termodinamico (pressioni, temperature) ed il tipo di fluido organico per massimizzare il valore del COP. Le prestazioni minime che la pompa di calore deve garantire per essere vantaggiosa rispetto a una caldaia tradizionale sono calcolate in funzione del rapporto tra il prezzo medio annuo di acquisto dell'elettricità e del gas naturale (definiti in input dall'utente). La valutazione del VAN differenziale considera i flussi di cassa, il costo di investimento (**Figura 17** dati da modelli commerciali), i costi di manutenzione ed il costo di acquisto di elettricità da rete. I ricavi derivano dal mancato acquisto di gas naturale e dalla vendita dei CB. I risultati ambientali sono espressi in termini di CO2 evitata, calcolata con riferimento ai consumi di gas naturale evitati (assumendo il fattore emissione output-based di una caldaia standard come indicato in **Tabella 2**).

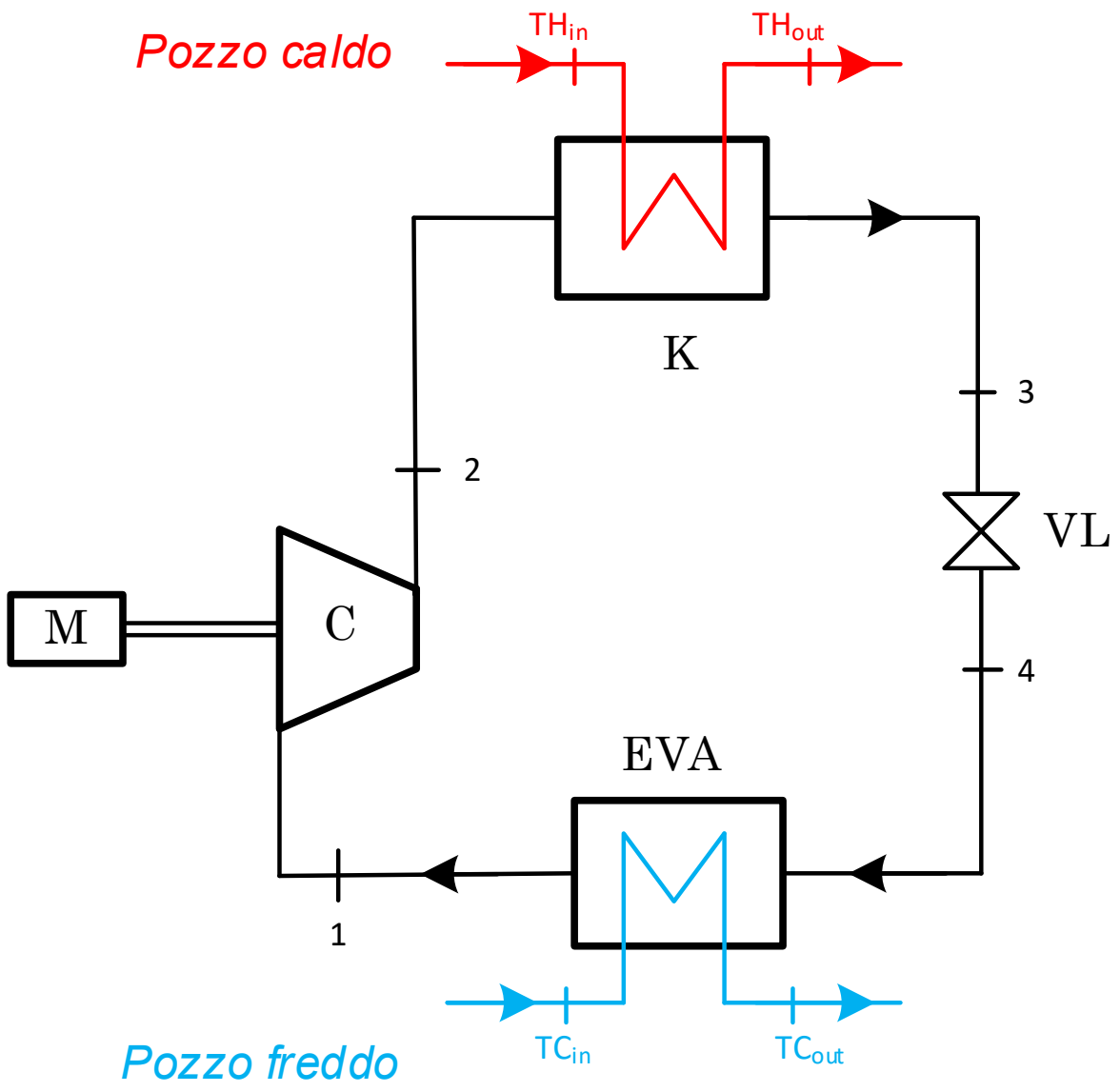
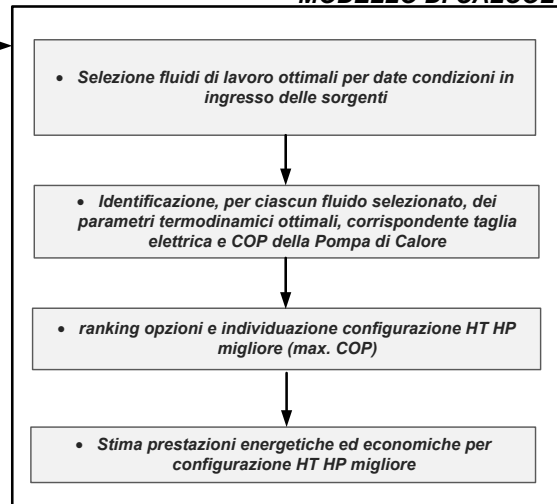


Figura 14: layout semplificato di una pompa di calore a compressione in ciclo semplice.

## DEFINIZIONE INPUT



## MODELLO DI CALCOLO



## OUTPUT

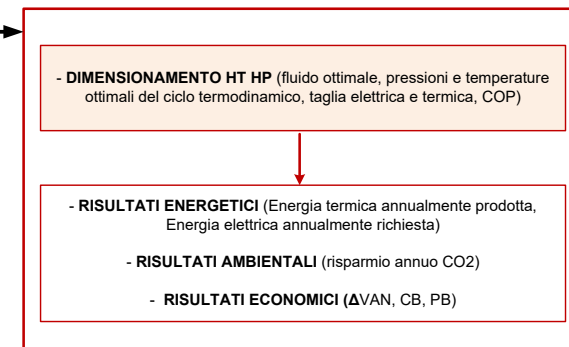


Figura 15: diagramma di flusso del modello HT HP sviluppato.

Tabella 4: equazioni utilizzate nella modellazione del ciclo HT HP per il calcolo delle principali grandezze termodinamiche.

Variabile	Equazione/relazione implementata
Temperatura fluido HP uscita evaporatore	$T_1 = TC_{in} - \Delta T_{app}$
Temperatura vaporizzazione fluido HP	$T_v = T_1 - SH$
Entalpia uscita evaporatore (p.to 1 in Figura 14)	$h_1 = h(p_v, T_1)$
Entropia uscita evaporatore (p.to 1 in Figura 14)	$s_1 = s(p_v, T_1)$
Temperatura di condensazione	$T_k = TH_{in} + \Delta T_{app} + SC$
Temperatura uscita condensatore (p.to 3 in Figura 14)	$T_3 = T_k - SC$
Entalpia uscita condensatore (p.to 3 in Figura 14)	$h_3 = h(p_k, T_3)$
Entropia uscita condensatore (p.to 3 in Figura 14)	$s_3 = s(p_k, T_3)$
Entalpia uscita valvola laminazione (p.to 4 in Figura 14)	$h_4 = h_3$
Temperatura uscita valvola laminazione (p.to 4 in Figura 14)	$T_4 = T(p_k, h_4) = T_v$
Entalpia isoentropica uscita compressore (p.to 2 in Figura 14)	$h_{2,is} = h(p_k, s_1)$
Entalpia reale uscita compressore (p.to 2 in Figura 14)	$h_2 = h_1 + \frac{(h_{2,is} - h_1)}{\eta_{is,c}}$
Portata in massa di fluido ( $\dot{m}_{HP}$ )	$\dot{m}_{HP} = \dot{m}_H(h_{H,out} - h_{H,in}) / (h_2 - h_3)$
Entalpia uscita pozzo caldo	$hC_{out} = hC_{in} - \frac{\dot{m}_{HP}}{\dot{m}_C} (h_1 - h_4)$
Potenza elettrica necessaria	$P_{el} = [\dot{m}_{HP}(h_2 - h_1)] / \eta_{em}$
Capacità termica della HP	$\dot{Q}_C = [\dot{m}_{HP}(h_2 - h_3)]$
COP	$COP = \dot{Q}_C / P_{el}$
$\Delta TLIFT$	$\Delta TLIFT = TH_{out} - TC_{in}$

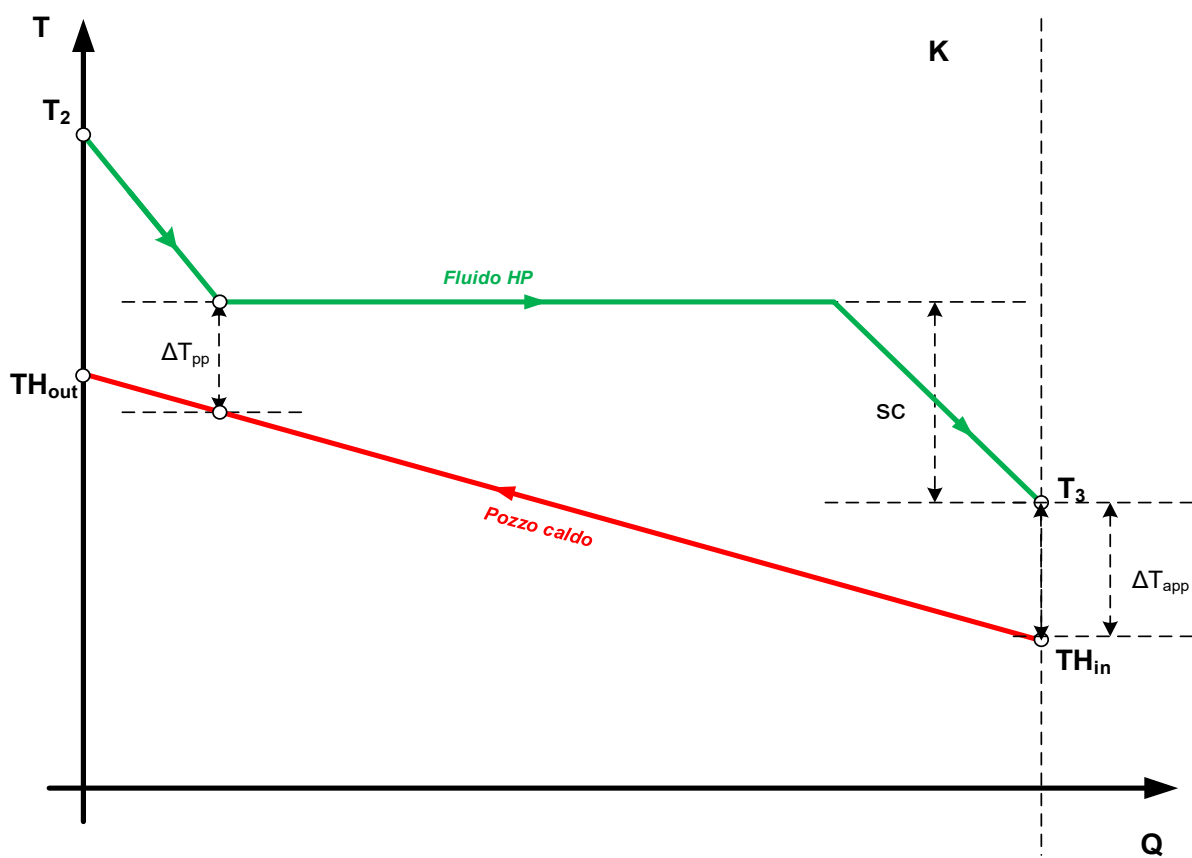
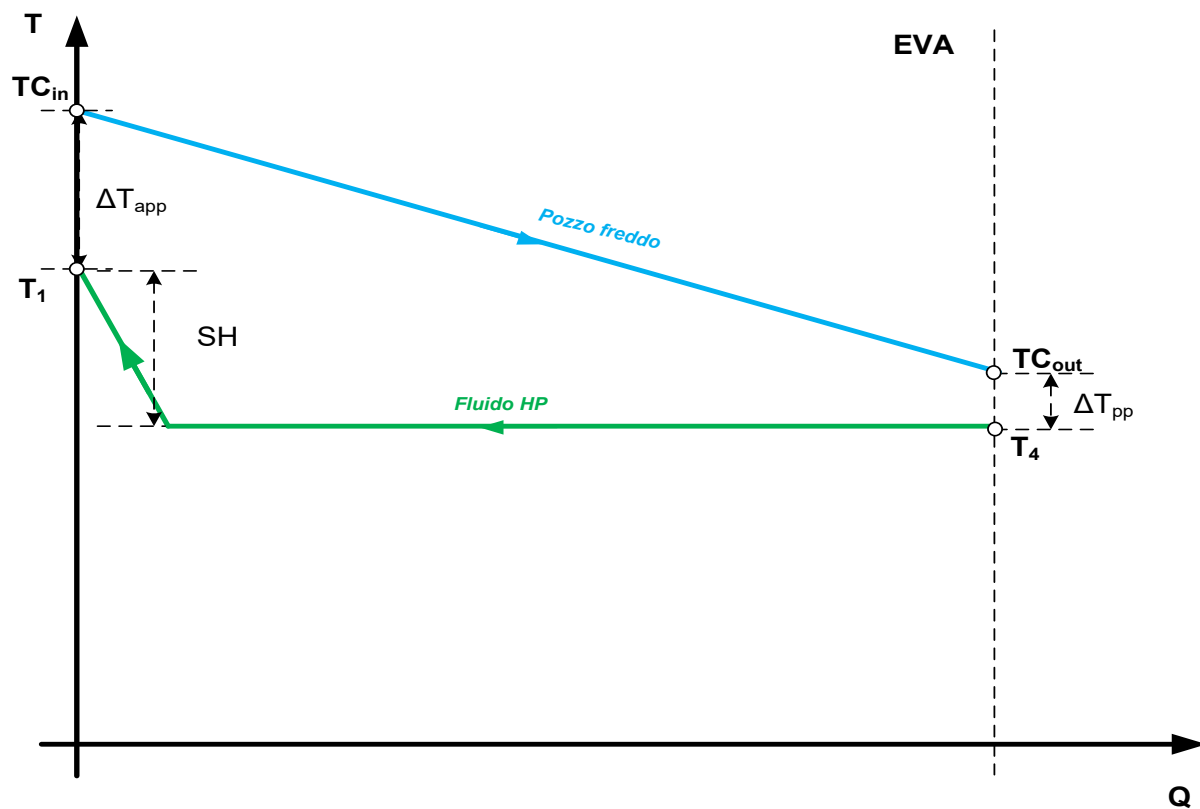


Figura 16: diagrammi qualitativi di scambio termico T-Q tra sorgenti e fluido di lavoro relativi all'evaporatore (EVA) ed al condensatore (K).

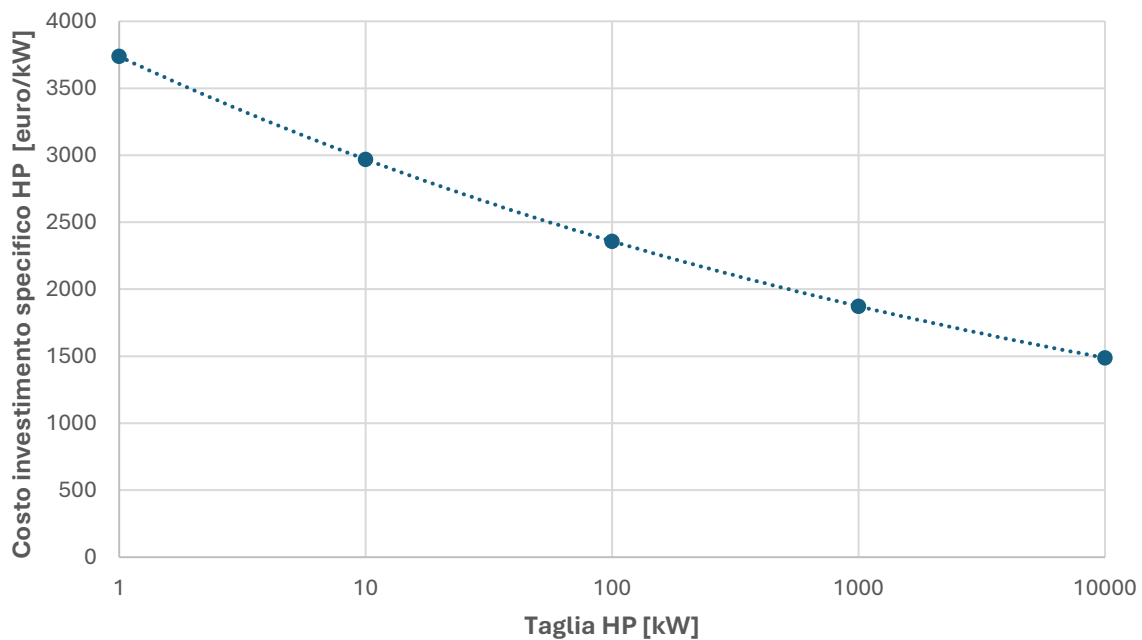


Figura 17: costo di investimento specifico per il sistema HT HP in funzione della taglia elettrica.

#### 7.3.4 Modulo PV

Il modello di calcolo sviluppato per valutare la producibilità di un sistema fotovoltaico presso utenze industriali, schematicamente riportato in **Figura 18**, coniuga due diverse finalità, in base all'opzione selezionata dall'utente:

- OPZIONE #1: quantificazione dell'energia elettrica producibile per data area a disposizione per l'installazione.
- OPZIONE #2: definizione della superficie di installazione necessaria a soddisfare un dato fabbisogno elettrico.

Sono state considerate cinque differenti tipologie di pannelli solari: celle a silicio monocristallino, policristallino, amorfo (a-Si), CdTe (Telluriuro di Cadmio) e CIGS (rame, indio, gallio e selenite) e due differenti tipologie di montaggio: Free-standing o Building-added/integrated. Per entrambe le opzioni, la stima della producibilità annua tiene conto sia della perdita delle prestazioni legata alle reali condizioni di funzionamento dei pannelli (i.e. temperatura di funzionamento della cella, condizioni di irraggiamento) sia alla degradazione delle prestazioni nel tempo.

All'interno del modello di calcolo sviluppato i dati meteorologici orari annuali (radiazione solare, temperatura dell'aria e velocità del vento) sono estratti dal database ENEA per la località di installazione selezionata in input dall'utente. La radiazione solare globale incidente sul piano orizzontale viene corretta per tener conto dell'inclinazione e dell'orientamento del pannello ottenendo quindi il valore della radiazione globale incidente sul piano dell'array per ogni ora dell'anno. L'efficienza di conversione nominale ( $\eta_{std}$ ), (valori assunti in **Tabella 5** derivanti dall'elaborazione dei dati provenienti da circa 20.000 modelli commerciali) è corretta per tener conto delle reali condizioni di funzionamento della cella e, di conseguenza del modulo, al variare della temperatura assumendo il fattore di decadimento delle prestazioni ( $\gamma$ ) indicato in **Tabella 5** [7, 8]. Le perdite di efficienza per effetto dell'irraggiamento sono modellate

attraverso la relazione logaritmica descritta in [9]. L'approccio adottato per modellare le altre voci perdite (ombreggiamento, sporcizia, riflessione, mismatch, conversione) è il "Performance Ratio Method" [10], con un valore di PR assunto pari a 0,83.

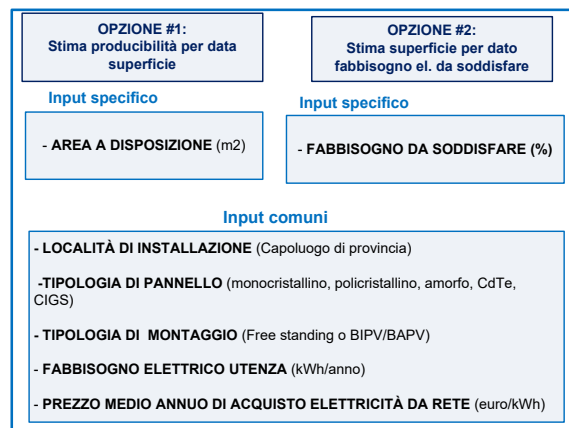
Per il calcolo della superficie captante è considerato un fattore riduttivo rispetto all'area disponibile, dipendente dal tipo di montaggio. La determinazione dell'energia elettrica prodotta durante la vita utile dell'impianto tiene conto del tasso di invecchiamento annuale,  $A_r$ , dipendente dalla tecnologia PV scelta (valori assunti in **Tabella 5**).

Per il calcolo delle grandezze economiche sono considerati i costi d'investimento specifici (valori assunti in **Tabella 5** derivanti dall'elaborazione di dati reali) e i costi di manutenzione. Il costo medio annuo di acquisto dell'elettricità da rete, definito dall'utente, moltiplicato per l'energia elettrica annualmente prodotta, costituisce la voce di ricavo dell'impianto. Si suppone che l'energia prodotta sia interamente auto-consumata o valorizzata tramite scambio sul posto. I risparmi ambientali in termini di CO<sub>2</sub> annualmente evitata sono stati valutati con riferimento all'energia elettrica prodotta ed al fattore di emissione output-based della rete elettrica nazionale riportato in **Tabella 2**.

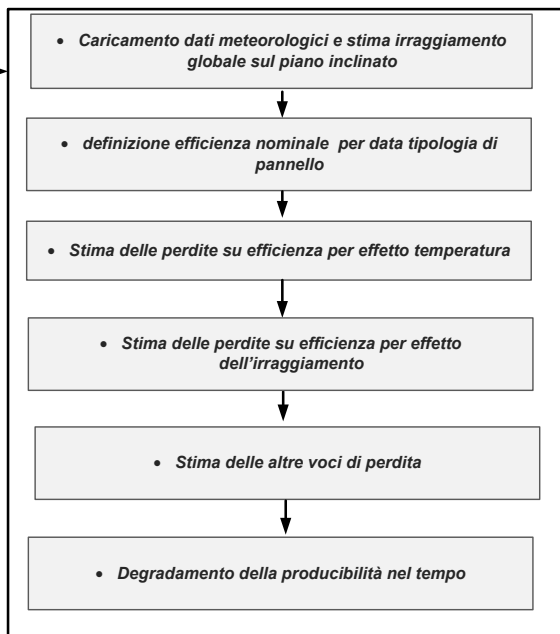
Tabella 5: valori di riferimento per le diverse tipologie di celle fotovoltaiche considerate nel modello di calcolo.

Tipologia di cella	$\eta_{std}[\%]$	$\gamma[\%/^{\circ}\text{C}]$	$A_r[\%/y]$	Costo investimento specifico [euro/Wp]
MONO-Si	19,0	0.40	-0,36	0,70
POLI-Si	16,0	0.40	-0,64	0,67
A-Si	8,0	0.22	-0,87	0,54
CdTe	17,0	0.25	-0,40	0,60
Cl(G)S	15,0	0.38	-0,96	0,60

### SCELTA MODALITÀ DI CALCOLO E DEFINIZIONE INPUT



### MODELLO DI CALCOLO



### OUTPUT

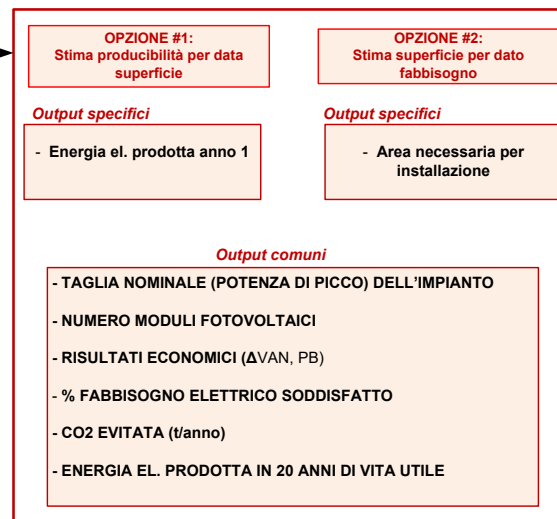


Figura 18: diagramma di flusso del modello PV sviluppato.

## 7.4 Verifica e validazione dei modelli sviluppati

L'ultima fase dell'attività di ricerca condotta ha riguardato la messa a punto, verifica ed applicazione dei modelli di calcolo sviluppati. La verifica è stata effettuata applicando gli strumenti di calcolo sviluppati, ove possibile, a casi studio di applicazione reali delle tecnologie in oggetto o, in alternativa, confrontando i risultati ottenuti con dati da letteratura. A titolo di esempio, in **Tabella 6** si riportano i risultati ottenuti nell'ambito della validazione del modello di calcolo "Modulo ORC". La validazione è stata eseguita utilizzando dati relativi ad installazioni reali [11-13]: quattro casi studio rappresentativi di installazioni di sistemi ORC all'interno di aziende manifatturiere. I quattro casi studio analizzati si caratterizzano per sorgenti di calore differenti in termini di tipologia, portata e temperatura:

- Caso studio 1: recupero del calore di scarto dal processo di lavorazione del vetro (installazione ORC in Bulgaria, 2015, azienda Exergy);
- Caso studio 2: recupero del calore di scarto da un cementificio (installazione ORC in Italia, 2020, azienda Exergy);
- Caso studio 3: recupero del calore di scarto dal processo di lavorazione del vetro (installazione ORC in Italia, 2021, azienda Zuccato Energia);
- Caso studio 4: recupero del calore proveniente dal processo di lavorazione dell'acciaio, (recupero da forno elettrico con installazione ORC in Italia, 2016, azienda Turboden).

Il confronto tra la taglia elettrica dei sistemi ORC installati ed il dimensionamento ottimale ottenuto mediante il modello di calcolo sviluppato (confronto tra taglie in **Tabella 6**) sono in perfetto accordo mostrando minimi scostamenti.

Tabella 6: Casi studio utilizzati per la validazione del MODULO ORC e risultati ottenuti.

Caso studio	Tipologia di sorgente calda	Portata sorgente calda [kg/s]	Temperatura di ingresso sorgente calda [°C]	Temperatura di uscita sorgente calda [°C]	Taglia del sistema ORC installato [MW]	Taglia ottimale ottenuta con MODULO ORC [MW]
<b>Caso studio 1- Vetreria</b>	Olio Diatermico	58,0	300	150	<b>5,00</b>	<b>5,00</b>
<b>Caso studio 2- Cementificio</b>	Olio Diatermico	38,4	280	100	<b>3,50</b>	<b>2,82</b>
<b>Caso studio 3- Vetreria</b>	Acqua pressurizzata (10 bar)	22,8	160	145	<b>0,20</b>	<b>0,25</b>
<b>Caso studio 4- acciaieria</b>	Vapore condensante (16 bar)	5,0	204	201	<b>2,20</b>	<b>2,19</b>

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate consulenze esterne.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

Maria Ancona; Lisa Branchini; Saverio Ottaviano; Maria Bignozzi; Benedetta Ferrari; Barbara Mazzanti; Marcello Salvio; Claudia Toro; Fabrizio Martini; Miriam Benedetti, *Energy and Environmental Assessment of Cogeneration in Ceramic Tiles Industry*, *Energies*, 2023, 16(1), 182; DOI: 10.3390/en16010182

## 10 Eventi di disseminazione

Giornata presentazione dei risultati PTR2022-2024 della Ricerca di Sistema elettrico nazionale, Progetto 1.6 Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali- Roma 26/11/2024.

## 11 Bibliografia

- [1] Eurostat database <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/data/database>
- [2] ENEA, Rapporto annuale efficienza energetica, analisi e risultati delle policy di efficienza energetica del nostro paese, 2023, <https://www.energiaenergetica.enea.it/component/jdownloads/?task=download.send&id=616&catid=9&itemid=101>
- [3] BREF *Ceramic Manufacturing Industry*, <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference> consultato a gennaio 2025.
- [4] Caratterizzazione energetica e strategie d'intervento per il settore delle piastrelle di ceramica, B. Ferrari, B. Mazzanti, M.C. Bignozzi, A. Fregni, L. Branchini, A. De Pascale, F. Melino, [https://www2.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2019-2021/efficienza-energetica-dei-prodotti-e-dei-processi-industriali/report-rds\\_ptr2021\\_184.pdf](https://www2.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2019-2021/efficienza-energetica-dei-prodotti-e-dei-processi-industriali/report-rds_ptr2021_184.pdf).
- [5] Ricerca sul Sistema Energetico – RSE SpA, L'industria efficiente – Le opportunità delle imprese nella transizione energetica, 2020, ISBN 978-88-943145-2-6.
- [6] Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale – ISPRA, Fattori di emissione atmosferica di gas ad effetto serra nel settore elettrico nazionale e nei principali Paesi Europei, Edizione 2020, Rapporti 317-2020, ISBN 978-88-448-0992-8.
- [7] J.A. Kratochvil D.L. King, W.E. Boyson. Photovoltaic array performance model. Technical Report SAND2004-3535, Sandia National Laboratories, August 2004. <https://energy.sandia.gov/wp-content/gallery/uploads/043535.pdf>.
- [8] Energy Hunters. Il noct e l'effetto della temperatura sui moduli fotovoltaici. <https://www.energyhunters.it/il-noct-e-leffetto-della-temperatura-sui-moduli-fotovoltaici/>, 28 settembre 2011
- [9] Joint Research Centre of the European Commission. Pvgis: Photovoltaic geographical information system. [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/)
- [10] GSE. Monitoraggio nazionale, obiettivo complessivo. <https://www.gse.it/dati-e-scenari/monitoraggio-fer/monitoraggio-nazionale/obiettivo-complessivo>
- [11] <https://www.exergy-orc.com/it/referenze/casi-studio/filtro/?jsf=jet-engine&tax=casi-studio-categories:16>
- [12] <https://zuccatoenergia.it/it/applicazioni/recupero-termico-da-processi-industriali/>
- [13] <https://www.turboden.com/it/soluzioni/1053/recupero-di-calore-di-scarto>