



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,  
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

Validazione conclusiva degli strumenti  
sviluppati attraverso casi di studio e  
perfezionamento dell'utilizzabilità del  
database di tecnologie

Vito Introna, Luca Andreassi, Daniele Dadi



## CONTESTUALIZZAZIONE DEL DATABASE DI TECNOLOGIE DI RECUPERO AL MERCATO ITALIANO E VALIDAZIONE CONCLUSIVA DEGLI STRUMENTI ATTRAVERSO CASI STUDIO

Vito Introna, Luca Andreassi, Daniele Dadi  
(UNIROMA2)

Dicembre 2021

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: N. 1 - Tecnologie

Progetto: 1.6 - Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali

Work package: 3 - Sviluppo di tecniche e soluzioni impiantistiche per l'efficientamento di processi industriali ad alta e bassa temperatura

Linea di attività: LA 3.23 – Validazione conclusiva degli strumenti sviluppati attraverso casi di studio e perfezionamento dell'utilizzabilità del database di tecnologie

Responsabile del Progetto: Miriam Benedetti, ENEA

Responsabile del Work package (LA3.1-3.7, LA3.18-3.28): Miriam Benedetti, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *“Progettazione, sviluppo di un database di tecnologie di recupero e di una metodologia per l'identificazione e l'analisi dei flussi energetici”*

Responsabile scientifico ENEA: Miriam Benedetti

Responsabile scientifico Università di Roma Tor Vergata: Vito Introna

## Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE.....	6
1.1 OUTPUT DEL PROGETTO.....	7
2 ANALISI DELLE RISULTANZE DELLE INTERVISTE.....	9
2.1 IL SECONDO CICLO DI INTERVISTE.....	9
2.1.1 <i>Fornitori di tecnologie di recupero di calore</i> .....	11
2.1.2 <i>Progetti di ricerca internazionali</i> .....	17
2.1.3 <i>Altre aziende interessate</i> .....	20
2.2 CONCLUSIONI.....	21
3 CONTESTUALIZZAZIONE DEL DATABASE DI TECNOLOGIE DI RECUPERO.....	23
3.1 CONTESTUALIZZAZIONE DEL DATABASE.....	23
3.2 VALIDAZIONE DEFINITIVA DELLA STRUTTURA DEL DATABASE.....	24
3.2.1 <i>Struttura finale del database</i> .....	24
3.2.2 <i>Query e consultazione del database</i> .....	25
3.3 POPOLAMENTO FINALE DEL DATABASE E PROTOCOLLO DI INDAGINE.....	26
3.4 MODALITÀ DI UTILIZZO DEL DATABASE.....	30
4 SVILUPPO DEFINITIVO DI UNA METODOLOGIA PER L'IDENTIFICAZIONE E L'ANALISI DEI FLUSSI ENERGETICI E DEGLI INTERVENTI DI EFFICIENTAMENTO.....	35
4.1 LE FASI DELLA METODOLOGIA.....	35
4.2 MODULO DI VALUTAZIONE PRELIMINARE.....	39
4.2.1 <i>Generazione di energia elettrica: ORC</i> .....	41
4.2.2 <i>Generazione di energia termica: pompe di calore</i> .....	43
4.2.3 <i>Generazione di energia frigorifera: frigoriferi ad assorbimento</i> .....	45
4.2.4 <i>Scambio termico: scambiatori di calore a piastre</i> .....	47
4.3 FOGLI DI CALCOLO E MODALITÀ DI UTILIZZO.....	53
4.3.1 <i>Foglio di calcolo: input dati</i> .....	54
4.3.2 <i>Foglio di calcolo: ORC</i> .....	55
4.3.3 <i>Foglio di calcolo: pompe di calore</i> .....	57
4.3.4 <i>Foglio di calcolo: frigoriferi ad assorbimento</i> .....	59
4.3.5 <i>Foglio di calcolo: scambiatori di calore</i> .....	60
4.4 STRUMENTI DI RAPPRESENTAZIONE DI FLUSSI ENERGETICI E DI INTERVENTI DI EFFICIENTAMENTO.....	62
5 ANALISI DEI CASI DI STUDIO.....	65
5.1 GRANDE AZIENDA DEL SETTORE CASEARIO.....	66
5.1.1 <i>Analisi del contesto</i> .....	67
5.1.2 <i>Individuazione del calore di scarto</i> .....	68
5.1.3 <i>Valutazione preliminare</i> .....	69
5.2 GRANDE AZIENDA DEL SETTORE ALIMENTARE.....	72
5.2.1 <i>Analisi del contesto</i> .....	72
5.2.2 <i>Individuazione del calore di scarto</i> .....	75
5.2.3 <i>Valutazione preliminare</i> .....	78
5.3 GRANDE AZIENDA DEL SETTORE DELLA PRODUZIONE DI ARTICOLI IN CARTA E CARTONE.....	81
5.3.1 <i>Analisi del contesto</i> .....	82
5.3.2 <i>Individuazione del calore di scarto</i> .....	83
5.3.3 <i>Valutazione preliminare</i> .....	84
5.4 DISCUSSIONI.....	87
6 CONCLUSIONI.....	89
7 ATTIVITÀ DI DISSEMINAZIONE.....	91

8	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	92
9	BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO .....	95
10	APPENDICE .....	96
10.1	IL DATABASE.....	96
10.2	SINTESI SCHEMATICA DELLA METODOLOGIA PER L'IDENTIFICAZIONE E L'ANALISI DEI FLUSSI ENERGETICI E DEGLI INTERVENTI DI EFFICIENTAMENTO .....	108

## Sommario

Il lavoro presentato nel seguente report è il risultato dell'attività condotta dal gruppo di ricerca dell'Università di Roma "Tor Vergata" nell'ambito della terza annualità del progetto di ricerca focalizzato sul recupero di calore di scarto.

L'attività è stata strutturata in quattro macrofasi descritte all'interno del presente report:

1. Contestualizzazione del database di tecnologie di recupero al mercato e al settore ricerca e sviluppo italiano e internazionale: sulla base delle risultanze relative a interviste ad aziende del mercato delle tecnologie e a gruppi di ricerca, e in base alle risultanze dei casi studio esaminati è stata definitivamente validata la struttura del database e ne è stato terminato il popolamento;
2. Sviluppo definitivo di una metodologia per l'identificazione e l'analisi dei flussi energetici e degli interventi di efficientamento recependo le risultanze delle sperimentazioni effettuate durante i casi studio;
3. Analisi di casi studio e identificazione della soluzione ottimale per il recupero del calore a bassa temperatura: grazie ai casi studio identificati, è stata terminata la sperimentazione e validazione della metodologia per identificazione e l'analisi dei flussi energetici e degli interventi di efficientamento, nonché del database di tecnologie di recupero;
4. Redazione della relazione di conclusione della specifica Linea di Attività del progetto.

Gli output consistono nella versione definitiva del database di tecnologie (disponibile sia in Excel sia in Access per la consultazione dell'utente), della metodologia da applicare per l'identificazione di interventi di efficientamento, e degli strumenti di rappresentazione dei flussi di calore. Inoltre, vengono rese disponibili le analisi delle risultanze delle interviste svolte nel corso della terza annualità e l'analisi di ogni caso studio effettuato. In ultimo, è stata prodotta la relazione di conclusione della specifica Linea di Attività del progetto che è rappresentata dal presente report.

## 1 Introduzione

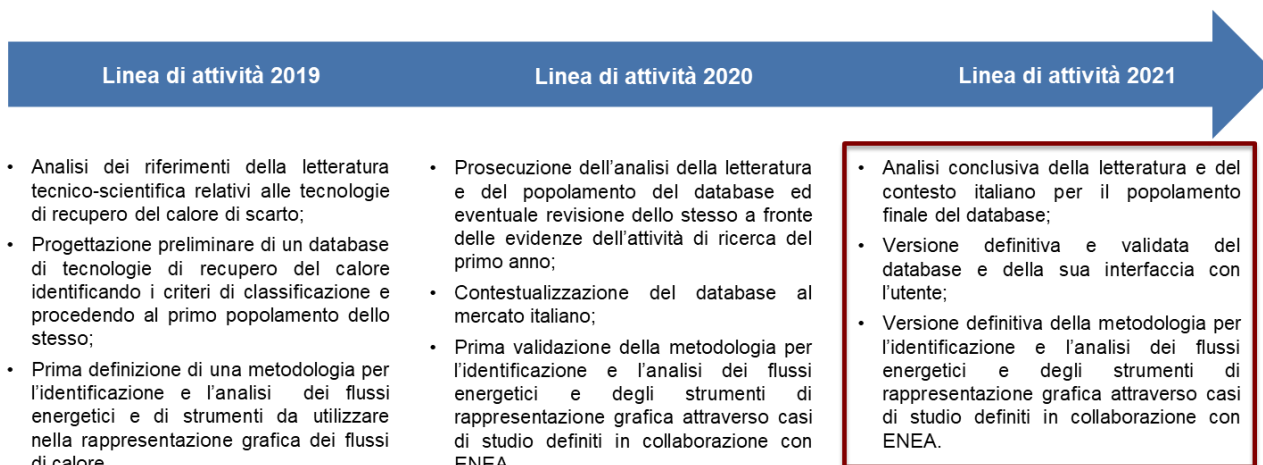
Il lavoro descritto nel presente report è il risultato delle attività svolte dal gruppo di ricerca dell'Università di Roma "Tor Vergata" nella terza e conclusiva annualità di un progetto di ricerca triennale focalizzato sul recupero di calore di scarto a bassa e bassissima temperatura.

Più in generale il progetto di ricerca ha visto la collaborazione dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" con l'Università degli Studi dell'Aquila e l'Università degli Studi di Udine sotto il coordinamento di ENEA nell'ambito di Ricerca di Sistema. L'obiettivo finale è quello di fornire strumenti di supporto alle aziende al fine di incrementare la diffusione dei progetti di recupero del calore a bassa temperatura nel settore industriale. Tale risultato permetterebbe di superare le barriere attualmente presenti, rappresentate prevalentemente da impedimenti di natura informativa e conoscitiva, che non consentono l'adeguato sfruttamento della risorsa termica. Il calore di scarto, infatti, possiede un'elevata potenzialità e il suo sfruttamento si configura come un mezzo chiave nella lotta alla decarbonizzazione per raggiungere i sempre più sfidanti obiettivi nazionali e internazionali.

Più specificatamente le attività svolte dal gruppo di ricerca dell'università di Roma "Tor Vergata" hanno portato allo sviluppo di un database contenente tecnologie di recupero termico a basse e bassissime temperature, sia consolidate sia relative a tecnologie e ad applicazioni innovative, e allo sviluppo di una metodologia da applicare per l'identificazione di interventi di efficientamento, e degli strumenti di rappresentazione dei flussi di calore.

Si precisa che, ai fini del progetto di ricerca, vengono considerate innovative anche soluzioni che, seppur tecnologicamente mature, abbiano un basso grado di penetrazione e per le quali manchi a livello nazionale know how su: settori industriali potenzialmente beneficiari; strumenti per facilitarne una prima valutazione di fattibilità e convenienza; dati circa prestazioni tecnico-economiche.

In Figura 1 sono schematizzati gli obiettivi del triennio di ricerca, suddivisi per linee di attività, previsti per l'Università di Roma "Tor Vergata", con un focus sulle attività di questa terza e ultima annualità di ricerca oggetto del presente report.



**Figura 1 Descrizione attività del triennio di ricerca con in evidenza le attività del terzo anno**

Mentre le prime due annualità sono state dedicate allo sviluppo preliminare di un database contenente tecnologie e di una metodologia di supporto per le aziende nell'implementazione di un progetto di recupero termico, unitamente alle prime interazioni con le parti interessate, in quest'ultima annualità l'obiettivo è stato quello di finalizzare gli strumenti sviluppati validandoli e contestualizzandoli sul campo.

Coerentemente con quanto previsto dal capitolato del progetto di ricerca l'attività della terza annualità del progetto è stata suddivisa in quattro fasi principali, descritte nei capitoli corrispondenti del report:

- Il capitolo “**Analisi delle risultanze delle interviste**” è dedicato alla descrizione delle attività volte alle interazioni con i rappresentanti del mercato di tecnologie di recupero di calore a basse e bassissime temperature e con i progetti di ricerca internazionali. Tale attività è stata avviata al fine di cogliere le richieste e le innovazioni legate agli aspetti tecnologici ed ottenere importanti feedback volti al miglioramento e alla finalizzazione degli strumenti sviluppati nell’ambito di questo progetto di ricerca. Nel capitolo sono riportate le relazioni generali delle risultanze di ogni incontro svolto in collaborazione con le aziende ed i progetti di ricerca, nonché i principali risultati ottenuti.
- Nel capitolo “**Contestualizzazione del database di tecnologie di recupero**” vengono descritte tutte le attività che hanno portato al rilascio della versione definitiva del database di tecnologie con la contestualizzazione dello stesso al mercato e al settore ricerca e sviluppo italiano e internazionale. In particolare, è stata confermata e ulteriormente validata la struttura del database e delle query a disposizione dell’utente ed è stato concluso il suo popolamento. La versione conclusiva del database sviluppato è stata realizzata sia su foglio di calcolo Excel, sia nella versione Access destinata alla consultazione dell’utente.
- Nel capitolo “**Sviluppo definitivo di una metodologia per l’identificazione e l’analisi dei flussi energetici e degli interventi di efficientamento**” viene riportata la versione definitiva della metodologia da applicare per l’identificazione e la mappatura dei flussi energetici e degli strumenti di rappresentazione dei flussi di calore coinvolti. In particolare, viene descritta la realizzazione di modelli per la valutazione preliminare di quattro tecnologie di riferimento (ORC, pompe di calore, frigoriferi ad assorbimento, scambiatori di calore a piastre), nonché la struttura del foglio di calcolo utilizzato per la loro applicazione.
- Nel capitolo “**Analisi di casi studio**” viene riportato, per ogni caso di studio, una relazione delle attività effettuate, contenente, oltre alla descrizione generale del caso stesso, l’applicazione degli strumenti proposti e la discussione dei risultati ottenuti con i feedback ricevuti dai rappresentanti delle aziende chiamate in causa.

Infine, nella parte conclusiva del report, è riportata una breve descrizione delle attività di disseminazione scientifica sulle tematiche affrontate nel progetto di ricerca che hanno visto coinvolta l’università di Roma “Tor Vergata” per l’annualità 2021.

## 1.1 Output del progetto

In questo paragrafo vengono riepilogati gli output dell’ultimo anno delle attività, che rappresentano gli output finali del progetto:

### 1. **Analisi delle risultanze delle interviste svolte in sinergia con la LA3.20 ad aziende del mercato**

Le analisi delle risultanze delle interviste ad aziende del mercato e a progetti di ricerca nazionali ed internazionali svolte nel corso della terza annualità del progetto sono riportate nel capitolo 2 “Analisi delle risultanze delle interviste” del presente report.

### 2. **Versione definitiva del foglio di calcolo interrogabile contenente l’elenco definitivo delle tecnologie di recupero di calore incluse nel database**

La versione definitiva del database di tecnologie sviluppato dal gruppo di ricerca dell’Università degli studi di Roma “Tor Vergata” è stata realizzata sia su un foglio di calcolo Excel sia in una versione Access, quest’ultima destinata alla consultazione dell’utente esterno che verrà resa disponibile per il download gratuito da ENEA. Nel capitolo 3 “Contestualizzazione del database di tecnologie di recupero” del presente report vengono descritte le attività oggetto della terza annualità che hanno portato al rilascio della versione finale del database (contestualizzazione, validazione e popolamento finale). Inoltre, in appendice nel paragrafo 10.1 “Il database” è riportato un estratto del database.

**3. Versione definitiva del documento di sintesi contenente la descrizione della metodologia da applicare per l'identificazione e mappatura dei flussi energetici, degli strumenti di rappresentazione dei flussi di calore**

La descrizione della versione definitiva della metodologia per l'identificazione e l'analisi dei flussi energetici e degli interventi di efficientamento nonché gli strumenti di rappresentazione di calore, è riportata nel capitolo 4 "Sviluppo definitivo di una metodologia per l'identificazione e l'analisi dei flussi energetici e degli interventi di efficientamento" del presente report. Inoltre, in appendice nel paragrafo 10.2 "*Sintesi schematica della metodologia per l'identificazione e l'analisi dei flussi energetici e degli interventi di efficientamento*" è riportata una sintesi della stessa.

**4. Analisi di ogni caso studio effettuato, riportante descrizione del caso, implementazione della metodologia, risultati ottenuti e indicazione di eventuali modifiche da apportare alla metodologia o al database nell'ottica del suo miglioramento:**

Le analisi di ogni caso di studio condotto nel corso della terza annualità del progetto di ricerca sono riportate nel capitolo 5 "Analisi dei casi di studio" del presente report.

**5. Relazione di conclusione della specifica Linea di Attività del progetto**

La relazione di conclusione della LA3.23 oggetto del lavoro del gruppo di ricerca dell'Università degli studi di Roma "Tor Vergata" è rappresentata dal presente report.



## 2 Analisi delle risultanze delle interviste

Il terzo anno ha previsto la conclusione del progetto. Nel corso dell'anno è stata portata a termine la sperimentazione degli strumenti già iniziata nell'anno precedente. Tale attività, svolta in sinergia con la LA3.20 di responsabilità ENEA, ha previsto l'interazione con i principali attori coinvolti nello scenario di recupero di calore: aziende fornitrici di tecnologie, progetti di ricerca nazionali e internazionali e aziende possibili utilizzatrici degli strumenti sviluppati.

In questo capitolo vengono descritte le risultanze delle interviste con i fornitori di tecnologie e i progetti di ricerca, mentre all'interazione con le aziende industriali verrà dedicato un successivo capitolo (Capitolo 5 "Analisi dei casi di studio").

Nella presente annualità, come previsto da capitolato, sono state continuate e concluse le interviste con i fornitori di tecnologie di recupero di calore, anche in virtù degli ottimi risultati e preziosi feedback raccolti, che hanno permesso di migliorare notevolmente gli strumenti. Al fine di cogliere gli aspetti più innovativi sulla tematica del recupero di calore di scarto e delle tecnologie emergenti per il suo sfruttamento, le interviste sono state estese anche a progetti di ricerca nazionali e internazionali.

Al fine di realizzare queste interviste, sono state applicate modalità analoghe seguite per lo scorso anno, che sono descritte nel precedente report (LA3.22). Mediante flyer di presentazione dedicati e questionari delle interviste, sono state contattate le aziende e le parti interessate. La selezione delle aziende è stata basata sia su rapporti già esistenti con i partner del progetto, ma principalmente tramite ricerche online. Per quanto riguarda il coinvolgimento di progetti di ricerca internazionali, una delle attività portata avanti nel corso dell'anno è stata quella di adattare sia il questionario sia i flyer e di tradurli in lingua inglese.

Il gruppo di ricerca ENEA si è occupato del primo contatto con tutte le aziende e i progetti individuati, principalmente a mezzo e-mail. Ulteriori informazioni sui documenti utilizzati e sulle metodologie di contatto sono riportate con maggiore dettaglio nel report ENEA relativo alle LA3.19 e LA3.20, in quanto quest'ultimo è stato coordinatore di tale attività. Le interviste sono state svolte dal gruppo di ricerca dell'Università di "Tor Vergata" e il gruppo di ricerca ENEA, che hanno condiviso il materiale con gli altri partner del progetto.

### 2.1 Il secondo ciclo di interviste

La conduzione delle interviste è avvenuta mediante l'ausilio di un questionario redatto in collaborazione con ENEA e gli altri partner del progetto, al fine di sistematizzare la qualità e la quantità delle informazioni da reperire. Le informazioni raccolte possono essere sintetizzate in:

- a) Informazioni generali sul fornitore o progetto di ricerca;
- b) Descrizione, specifiche e caratteristiche di innovazione delle tecnologie proposte;
- c) Campi di applicazione e principali settori coinvolti;
- d) Barriere percepite circa la diffusione delle tecnologie di recupero di calore;
- e) Dati tecnici ed economici delle tecnologie proposte.

Il format di tabella utilizzato nelle interviste e la tipologia delle informazioni raccolte circa i parametri tecnici ed economici, particolarmente interessanti per le linee di attività che coinvolgono l'Università di Roma "Tor Vergata", sono riportati in Tabella 1.

**Tabella 1 Format per la raccolta dei parametri tecnici ed economici durante la conduzione delle interviste**

Tecnologie	PARAMETRI TECNICI					PARAMETRI ECONOMICI		
	Range di temperatura del calore di scarto	Range di potenza installate	Efficienza	Ingombro Specifico	Vita utile	Costo specifico	Costi di gestione e manutenzione	PayBack Period tipici
Tecnologia1	(es. 70°C-160°C)	(es. 1kW <sub>e</sub> -1MW <sub>e</sub> )	(es. η <sub>totale</sub> )	(m <sup>2</sup> /kW <sub>ce</sub> )	(es.20 anni)	(es. €/kW <sub>e</sub> )	(es. €/kWh <sub>e</sub> )	(es.4 anni)
Tecnologia2	(es. 70°C-160°C)	(es. 1kW <sub>e</sub> -1MW <sub>e</sub> )	(es. COP)	(m <sup>2</sup> /kW <sub>ce</sub> )	(es.20 anni)	(es. €/kW <sub>e</sub> )	(es. €/kWh <sub>e</sub> )	(es.4 anni)

**Note per la compilazione della tabella:** viste le diverse unità di misura utilizzabili (es. kW<sub>e</sub>, kW<sub>t</sub>, ...) riportare sempre l'unità di misura in tabella.

Lo scopo principale delle informazioni raccolte e riportate in Tabella 1 è quello di consolidare ulteriormente la conoscenza delle diverse tecnologie ed incrementare l'affidabilità dei modelli sviluppati nell'ambito del progetto di ricerca (vedi paragrafo 4.2 "Modulo di valutazione preliminare"). Un altro contributo importante è stato quello di permettere l'inserimento di nuove tecnologie nel database.

Nell'ambito di questa annualità sono state contattate un totale di 15 fornitori di tecnologia nazionali ed internazionali, con la realizzazione di 7 interviste. Sono stati inoltre contattati 13 progetti di ricerca attivi nella tematica del recupero di calore con la realizzazione di 4 interviste, per un totale di 11 interviste realizzate, che sommate alle 9 realizzate nella precedente annualità portano il totale a 20.

Si precisa come anche l'attività selezione delle aziende da contattare ha richiesto un notevole impegno al gruppo di ricerca in quanto non è stato sempre immediato capire se le attività e le tecnologie proposte dalle aziende fossero coerenti con gli obiettivi e i confini del progetto di ricerca. L'elevato tasso di risposta delle aziende alle interviste è dovuto sia all'interesse e attualità delle tematiche del progetto di ricerca, ma anche ad una attenta selezione delle stesse.

In Tabella 2 è riportato il calendario delle interviste realizzate con le aziende produttrici di tecnologie di recupero di calore, i progetti di ricerca nazionali ed internazionali e altre aziende interessate.

**Tabella 2 Calendario delle interviste realizzate con aziende produttrici di tecnologie di recupero di calore, progetti di ricerca internazionali ed altre aziende interessate per l'annualità 2021.**

Categorie	Data Intervista	Azienda	Principali tecnologie
Fornitore di tecnologie di recupero di calore	04 maggio 2021	THERMOKEY S.P.A.	Scambiatori di calore
	05 maggio 2021	TECNEUROPA S.R.L.	Frigoriferi ad assorbimento, pompe di calore
	20 settembre 2021	FORNITORE X	Scambiatori di calore, sistemi di accumulo, pompe di calore
	22 settembre 2021	TEON S.R.L.	Pompe di calore
	06 dicembre 2021	BLAUWER S.P.A.	Pompe di calore, scambiatori di calore a piastre
	07 dicembre 2021	TECHNO SYSTEM S.R.L.	Scambiatori di calore a piastre ispezionabili
Progetti di ricerca	28 settembre 2021	HighLift Project (by Olvondo Technology)	Pompe di calore ad alta temperatura
	30 settembre 2021	UncorrelaTEd Project	Sistemi termoelettrici solido-liquido
	25 ottobre 2021	SoWhat Project	Sistema informativo
	10 novembre 2021	BAMBOO	Sistema informativo
Altre aziende interessate	29 novembre 2021	AB ENERGY S.P.A.	Sistemi di cogenerazione

Sotto la voce “Altre aziende interessate” sono riportate le aziende che, pur non producendo tecnologie specifiche per il recupero di calore di scarto, svolgono comunque un ruolo cruciale nel contesto del recupero di calore. Sono stati contattati ad esempio alcuni produttori di sistemi di cogenerazione, in quanto questi impianti rappresentano una delle applicazioni più importanti del recupero e riutilizzo di cascami termici di scarto.

Sempre in riferimento alla Tabella 2, l’azienda riportata come “Fornitore X”, sebbene abbia partecipato attivamente e con massimo interesse al progetto, per motivazioni di politica interna ha preferito la pubblicazione dei dati in forma anonima. Anche le loro tecnologie nel database figureranno sotto la voce di “Fornitore X”.

Le interviste sono state condotte dall’Università di Roma “Tor Vergata” con il supporto di ENEA. Per ogni intervista a fornitori di tecnologie e progetti di ricerca, dalla durata di circa un’ora ciascuna, è stato redatto un report dettagliato che successivamente è stato condiviso con ENEA e con le altre Università cobeneficiarie.

Di seguito viene fornita una breve descrizione delle aziende intervistate e delle principali informazioni ottenute ai fini delle attività di ricerca del gruppo di lavoro dell’Università di Roma “Tor Vergata”. Le informazioni raccolte riguardanti i casi di studio e le barriere percepite dalle aziende circa la diffusione delle loro tecnologie di recupero non sono state volutamente riportate in questa sede in quanto sono descritte nel report ENEA relativo alla LA3.20.

### 2.1.1 Fornitori di tecnologie di recupero di calore

In questa sezione specifica sono riportate le interviste svolte ai fornitori di tecnologie.

#### *THERMOKEY S.P.A.*

*Thermokey S.P.A.* è un’azienda che offre soluzioni per lo scambio termico standard e su misura per applicazioni commerciali ed industriali. Gli scambiatori di calore prodotti utilizzano sul lato primario acqua, glicole o gas refrigerante e sul lato secondario aria. Tra le diverse applicazioni possibili, questi possono essere usati come condensatori all’interno di macchine termiche ORC (Organic Rankine Cycle), oppure come recuperatori di calore da un flusso d’aria.

Recentemente l’azienda ha sviluppato un particolare scambiatore di calore microcanale che ospita sul lato primario gas refrigerante o acqua di processo ad alta temperatura, mentre sul lato secondario aria ambiente oppure un terzo circuito ad acqua o miscela di acqua/glicole a bassa temperatura. L’utilizzo è finalizzato al recupero di calore da processi industriali ad alta temperatura da destinare ad altre applicazioni.

Tra le tecnologie più innovative che l’azienda sta proponendo ai propri clienti troviamo: scambiatori di calore microcanale condensanti, cooler, heater ed ibridi (utilizzo contemporaneo di tre fluidi ad alta, media e bassa temperatura).

Tra i processi di maggiore interesse per l’applicazione delle tecnologie dell’azienda Thermokey S.P.A. troviamo: air-conditioning, process cooling, refrigerazione, recupero di calore di scarto, applicazioni per ORC.

La Tabella 3 riporta la descrizione dei principali parametri raccolti durante l’intervista

**Tabella 3 Parametri tecnici ed economici rilevati durante la conduzione dell’intervista al fornitore THERMOKEY S.P.A.**

PARAMETRI TECNICI	Tecnologie	Scambiatori di calore
	Range di temperatura del calore di scarto	Primario: $T < 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ Secondario: $T < 90\text{ }^{\circ}\text{C}$
	Range di potenza installate	$Q_t < 250\text{ kW}_t$ (dipende dalle condizioni di calcolo)

	<b>Efficienza</b>	≈ 90% (dipende dalle condizioni di calcolo)
	<b>Ingombro Specifico</b>	0,04 m <sup>2</sup> /kWt
	<b>Vita utile</b>	10 + 15 anni
<b>PARAMETRI ECONOMICI</b>	<b>Costo specifico</b>	Dato non disponibile
	<b>Costi di gestione e manutenzione</b>	Dato non disponibile
	<b>PayBack Period tipici</b>	Dato non disponibile

**TECNEUROPA S.R.L.**

Tecneuropa S.R.L. è Distributore Esclusivo per l'Italia di frigoriferi e pompe di calore ad assorbimento a Bromuro di Litio *Shuangliang Eco-Energy* e di gruppi frigoriferi e pompe di calore a compressione *Dunham-Bush*. Tecneuropa segue il cliente dalle prime fasi di studio, progetto esecutivo, fino alla fornitura in sito con contratti di manutenzione dedicati.

La tecnologia dei frigoriferi e delle pompe di calore ad assorbimento permette il recupero di calore da flussi di scarto come acqua calda, acqua surriscaldata, fumi, vapore, con un ampio range di potenze installate (da 20 kW<sub>f</sub> a più di 11 MW<sub>f</sub>). La tecnologia dei gruppi frigoriferi e delle pompe di calore a compressione sfrutta l'energia di una sorgente termica intesa come aria o acqua per produrre energia frigorifera o termica.

A fronte di una crescente richiesta all'interno del mercato italiano, una delle tecnologie più innovative proposte negli ultimi anni è quella relativa alle pompe di calore ad assorbimento per la produzione di energia termica. Tale tecnologia si divide in due tipologie principali: Prima Categoria e Seconda Categoria.

Le pompe di calore ad assorbimento serie "Prima Categoria" sono in grado di produrre acqua calda utile ad una temperatura massima di +100 °C. Esse sono alimentate da due sorgenti di calore: una sorgente ad alta temperatura (vapore, acqua, gas, biomasse ecc.), e una sorgente di calore a temperatura più bassa, ad esempio acqua calda di scarto derivante da processi industriali. La potenza termica prodotta sarà quindi la somma delle potenze termiche prodotte dalle due sorgenti di calore.

Le pompe di calore ad assorbimento serie "Seconda Categoria" consentono di produrre acqua calda utile ad una temperatura generalmente compresa tra i +100 e i +170 °C circa. Esse sono alimentate da una sorgente di calore ad esempio derivante da processi industriali (vapore, acqua, gas, ecc.).

A differenza della serie "Prima Categoria", questa tipologia prevede anche la presenza di un circuito di raffreddamento. L'acqua di raffreddamento circolante può essere ricavata da torri evaporative, oppure da falde acquifere, laghi, ecc. La potenza termica prodotta sarà quindi la differenza tra la potenza termica prodotta dalla sorgente di calore e la potenza dissipata dal circuito di raffreddamento.

Molte sono le forniture di Tecneuropa in ambito ospedaliero, aeroportuale, terziario, industriale, impianti di teleriscaldamento/teleraffrescamento, ecc.

La Tabella 4 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** riporta la descrizione dei principali parametri raccolti durante l'intervista.

**Tabella 4 Parametri tecnici ed economici rilevati durante la conduzione dell'intervista al fornitore TECNEUROPA S.R.L.**

	<b>Tecnologie</b>	<b>Frigoriferi ad Assorbimento</b>	<b>Pompe di Calore</b>	<b>Pompe di Calore ad assorbimento</b>
<b>PARAMETRI TECNICI</b>	<b>Range di temperatura del calore di scarto</b>	65 + 160 °C (Acqua calda) 0,15 + 0,8 Mpa (Vapore) ≥ 250 °C (Fumi)	0 + 50 °C (aria) 15 + 50 °C (acqua)	Tipo I: 15 + 60°C (Acqua T <sub>out</sub> < 100°C) Tipo II: 70°C + 130°C (Acqua T <sub>out</sub> > 100°C)
	<b>Range di potenza installate</b>	20 kW <sub>f</sub> + 11 MW <sub>f</sub> (Acqua) 300 kW <sub>f</sub> + 11 MW <sub>f</sub> (Vapore) 200 kW <sub>f</sub> + 11 MW <sub>f</sub> (Fumi)	30 + 2500 kW (aria) 30 + 2500 kW (acqua)	Tipo I: 300 MWt - 70 MWt Tipo II: 500 kWt - 8 MWt

	<b>Efficienza</b>	0,7 ÷ 0,84 (Acqua) 1,3 ÷ 1,61 (Vapore) 1,3 ÷ 1,45 (Fumi)	3,25 (aria) 5,84 (acqua)	Tipo I: 1,65 ÷ 1,8 Tipo II: 0,44 ÷ 0,48
	<b>Ingombro Specifico</b>	Variabilità molto ampia in quanto fortemente influenzato dalle condizioni operative del singolo caso	Dato non disponibile	Dato non disponibile
	<b>Vita utile</b>	20 anni	20 anni	20 anni
<b>PARAMETRI ECONOMICI</b>	<b>Costo specifico</b>	Dato non disponibile	Dato non disponibile	Dato non disponibile
	<b>Costi di gestione e manutenzione</b>	Dato non disponibile	Dato non disponibile	Dato non disponibile
	<b>PayBack Period tipici</b>	Dato non disponibile	Dato non disponibile	Dato non disponibile

Vengono inoltre riportate alcune interessanti considerazioni emerse durante l'intervista relative alle tecnologie dei frigoriferi e pompe di calore ad assorbimento:

- Sezioni di scambio termico: gli scambiatori lato acqua calda (generatore) e acqua refrigerata (evaporatore) sono realizzati con tubi diritti in acciaio inox SS304 (versione standard), mentre gli scambiatori lato acqua di raffreddamento (condensatore ed assorbitore) sono realizzati con tubi diritti in acciaio inox SS316L (versione standard), con accesso da entrambi i lati. L'impiego dell'SS316L per quanto riguarda il circuito acqua di raffreddamento consentirà una maggior resistenza a fronte di eventuali fenomeni di corrosione dovuti alla qualità dell'acqua. Possibilità di prevedere tubi degli scambiatori in Titanio per utilizzo con acqua di mare;
- Scambiatori a fascio tubiero (soluzione diluita/concentrata): le macchine sono dotate di scambiatore di calore (n. 2 nella versione a doppio stadio) per il recupero di energia/raffreddamento della soluzione diluita/concentrata. Data la specificità e l'importanza di tale fase del ciclo, questi scambiatori sono rigorosamente a "fascio tubiero", consentendo così di avere minori perdite di carico, un miglior flusso, e riducendo eventuali possibili rischi di cristallizzazione della soluzione concentrata;
- Fattore di sporramento: tutti gli scambiatori (generatore, condensatore, evaporatore e assorbitore) sono dimensionati con elevato fattore di sporramento (fouling factor) pari a 0,086 m<sup>2</sup>K/kW (0,0001 m<sup>2</sup>h°C/kW) a garanzia delle performance nel tempo;
- Raccolta e scarico automatico dei gas incondensabili: sistema di raccolta e spurgo automatico dei gas incondensabili ad altissima efficienza. La macchina è in grado di rimuovere automaticamente non solo idrogeno, ma tutti i gas incondensabili mediante l'attivazione della pompa di spurgo, garantendo in tal modo i corretti valori di pressione e quindi la migliore efficienza della macchina. Lo spurgo è totalmente automatico e gestito da PLC. Per eventuali prove di verifica il sistema può essere attivabile anche manualmente;
- Ermeticità/tenuta al vuoto: le macchine sono sottoposte a prove di tenuta al vuoto, eseguite in fabbrica dapprima su ogni singolo elemento e poi applicate sull'intera macchina. Le prove sono fatte con l'ausilio di speciali vasche, pressurizzate alla pressione di prova con gas Elio, tenute internamente in depressione e monitorate con speciali "Helium Leak Detector" (spettrometri di massa). Le macchine sono testate per garantire un flusso di perdita < 1 x10<sup>-10</sup>Pa\*m<sup>3</sup>/s. Lo stato di vuoto è costantemente controllato mediante PLC attraverso sensori di pressione, con possibilità di indicazione remota;
- Sistema di regolazione dell'acqua di raffreddamento: per applicazioni dove il sistema di raffreddamento preveda l'utilizzo di "acqua di falda" e per tutti i casi dove l'attivazione dell'assorbitore potrebbe avvenire con basse temperature dell'acqua di raffreddamento (ad esempio <18°C), il sistema di regolazione può essere implementato con un algoritmo in grado di controllare direttamente la temperatura di condensazione. Con tale opzione il PLC è fornito con modulo integrativo in grado di trasmettere un segnale 4-20mA verso dispositivi esterni alla macchina.

## FORNITORE X

Il *Fornitore X* produce diverse soluzioni per il recupero e il riutilizzo di cascami termici di scarto: scambiatori di calore a piastre ispezionabili, sistemi di accumulo con scambiatore di calore integrato, sistemi a pompe di calore per applicazioni di climatizzazione o produzione di acqua calda sanitaria.

Tra le tecnologie più innovative che il fornitore sta proponendo ai propri clienti si citano scaldacqua a pompa di calore e sistemi di accumulo con stratificazione del calore.

I settori di maggiore interesse per l'azienda produttrice sono quello civile e residenziale, ospedaliero e terziario.

La Tabella 5 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** riporta la descrizione dei principali parametri raccolti durante l'intervista.

**Tabella 5 Parametri tecnici ed economici rilevati durante la conduzione dell'intervista al fornitore "FORNITORE X".**

	Tecnologie	Pompe di calore	Scambiatori di calore a piastre	Accumulatori di calore (con scambiatore integrato)
<b>PARAMETRI TECNICI</b>	<b>Range di temperatura del calore di scarto</b>	Da -20 a +60°C (acqua calda)	Fino a110°C (acqua-acqua)	Fino a110°C (acqua-acqua) Fino a170°C (vapore acqua)
	<b>Range di potenza installate</b>	7÷16kW <sub>t</sub> (clima) 1÷2kW <sub>t</sub> (produzione acs)	Da 1 kW <sub>t</sub> a500 kW <sub>t</sub>	Da 5 kW a50kW
	<b>Efficienza</b>	COP: 3÷4,5 (clima) COP: 2.6÷2.9 (produzione acs)	Dato non disponibile	Dato non disponibile
	<b>Ingombro Specifico</b>	0,03 ÷ 0,07 m <sup>2</sup> /kW <sub>t</sub> (clima) 0,16 m <sup>2</sup> /kW <sub>t</sub> (produzione acs)	Dato non disponibile	Dato non disponibile
	<b>Vita utile</b>	10 anni	10 anni	10 anni
	<b>Costo specifico</b>	750 ÷ 1200 €/kWt	Dato non disponibile	Dato non disponibile
<b>PARAMETRI ECONOMICI</b>	<b>Costi di gestione e manutenzione</b>	Dato non disponibile	Dato non disponibile	Dato non disponibile
	<b>PayBack Period tipici</b>	2 ÷ 5 anni	Molto variabile, dipende fortemente dalle condizioni operative	Molto variabile, dipende fortemente dalle condizioni operative

## TEON S.R.L.

*Teon S.R.L.* è un fornitore attivo nel recupero di calore di scarto con la produzione di pompe di calore che riescono a raggiungere temperature di output di 80°C e, con alcune applicazioni, anche superiori ai 90°C. Tecnicamente la macchina è in grado di raggiungere temperature anche di 125 °C; in tali condizioni il COP (Coefficient Of Performance) non è particolarmente "premiante", il che ha portato il fornitore a specializzarsi su macchine con temperature medie di output di circa 80 °C, che riescono a garantire un COP elevato (COP stagionale medio di circa 4,5). La tipica applicazione delle pompe di calore *Teon* prevede l'utilizzo di cascami di scarto in input alla pompa di calore, utilizzabile sia in assetto termico sia frigorifero.

Il fornitore propone due linee di prodotto: residenziale e professionale, sia monociclo che doppio ciclo. In generale la tipologia monociclo è la più utilizzata per recupero da cascami termici.

Applicazioni tipiche prevedono il recupero di cascami termici dissipati dalle torri di raffreddamento, applicazioni in abbinamento con cogeneratore dove si riescono a valorizzare i circuiti di raffreddamento a più bassa temperatura, applicazioni in abbinamento con assorbitori.

L'innovazione proposta dal *Teon S.R.L* risiede nella produzione di pompe di calore in grado di funzionare con elevati  $\Delta T$ .

Il fornitore è attivo in diversi settori industriali come ad esempio birrifici, prosciuttifici, lattiero-caseario, pneumatici, produzione di cioccolata, cantine vinicole. Si registrano applicazioni anche nel settore residenziale dove si utilizza acqua di falda o geotermico (temperature dai 16-18 gradi).

La Tabella 6 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** riporta la descrizione dei principali parametri raccolti durante l'intervista.

**Tabella 6 Parametri tecnici ed economici rilevati durante la conduzione dell'intervista al fornitore TEON S.P.A.**

PARAMETRI TECNICI	Tecnologie	Pompe di calore
	Range di temperatura del calore di scarto	20 + 60°C (con output a 94°C)
Range di potenza installate	Singole macchine da 10 kW <sub>t</sub> a 500 kW <sub>t</sub> si arriva in serie con applicazioni da oltre 3000 kW <sub>t</sub>	
Efficienza	COP= 3,5 + 5,5	
Ingombro Specifico	Informazione disponibile a catalogo	
Vita utile	20 anni	
PARAMETRI ECONOMICI	Costo specifico	Molto variabile dalla situazione impiantistica. In genere il costo macchina non supera il 50% del costo totale d'impianto.
	Costi di gestione e manutenzione	Dato non disponibile
	PayBack Period tipici	Dato non disponibile

Vengono inoltre riportate alcune interessanti considerazioni emerse durante l'intervista:

- La tecnologia a livello di funzionamento rimane invariata dalle piccole alle grandi taglie. L'unica differenza rilevante è la tipologia di compressore utilizzato: per le piccole taglie si utilizzano compressori alternativi, mentre per le grandi compressori a vite;
- Si lavora a pressioni non eccessivamente elevate comprese tra 2-13 bar, il che si traduce in minori problemi di fughe e sollecitazioni, con aumento della vita utile della macchina;
- Il fluido vettore è nella grande maggioranza dei casi acqua o acqua-glicole. Come refrigerante vengono utilizzati R290 (propano) e (R600a) isobutano.

#### **BLAUWER S.P.A.**

*Blauwer S.P.A.* è una società del gruppo Pegaso Industries specializzata nella produzione di soluzioni tecnologiche con un particolare focus nel settore della produzione delle materie plastiche. Per il recupero di cascami termici l'azienda produce diversi tipi di pompe di calore che si diversificano sia per tipologie di fluidi di scambio (acqua-acqua o acqua-aria), sia per tipologia di fluidi di lavoro (CO<sub>2</sub>, idrocarburi, refrigeranti, ecc.). Le tecnologie proposte dal fornitore permettono di raggiungere temperature di output dai 70 a 110°C con  $\Delta T$  anche di 80-85°C.

Inoltre, l'azienda progetta soluzioni di recupero di calore con utilizzo diretto del calore tramite scambiatori di calore a piastre ispezionabili (riscaldamento locali industriali).

Tra le tecnologie più innovative che il fornitore sta proponendo vi sono le pompe di calore ad alta temperatura acqua/aria per applicazioni industriali con gas refrigerante naturale R744 (CO<sub>2</sub>).

Il settore principale è quello della trasformazione di materie plastiche. Applicazioni tipiche riguardano il processo di preriscaldamento della resina e il processo di essiccazione, comune a diversi settori industriali.

La Tabella 7 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** riporta la descrizione dei principali parametri raccolti durante l'intervista.

**Tabella 7 Parametri tecnici ed economici rilevati durante la conduzione dell'intervista al fornitore BLAUWER S.P.A.**

PARAMETRI TECNICI	Tecnologie	Pompe di calore	Pompe di calore a CO <sub>2</sub>	Scambiatori di calore a piastre
	Range di temperatura del calore di scarto	30°C + 60°C	0°C + 30°C	25°C + 70°C
	Range di potenza installate	90 kW <sub>t</sub> + 340 kW <sub>t</sub>	40 kW <sub>t</sub> + 200 kW <sub>t</sub>	50 kW <sub>t</sub> + 1500 kW <sub>t</sub>
	Efficienza	COP = 3,5 + 4,6	COP = 2,6 + 3,5	600 + 8000 W/(m <sup>2</sup> K)
	Ingombro Specifico	0,04 + 0,014	0,08	Dato non disponibile
	Vita utile	10 anni	10 anni	Dato non disponibile
PARAMETRI ECONOMICI	Costo specifico	300 + 400 €/kW <sub>t</sub>	600 + 700 €/kW <sub>t</sub>	Dato non disponibile
	Costi di gestione e manutenzione	0,6 + 1 €/kWh	Trascurabili	Dato non disponibile
	PayBack Period tipici	1 + 2 anni	1 anno	Dato non disponibile

**TECHNO SYSTEM S.R.L**

*Techno System S.R.L* è un produttore di scambiatori di calore a piastre ispezionabili. La tecnologia è particolarmente adatta al recupero termico di cascami di scarto per fluidi con temperature fino a 150°C. Gli scambiatori *Techno System* prevedono un ampio range di portate elaborabili (da DN32 fino al DN250) con potenze che variano dalle decine di kW<sub>t</sub> fino ad alte potenze nell'ordine delle decine di MW<sub>t</sub>.

Tra le tecnologie più innovative che il fornitore sta proponendo ai propri clienti si evidenzia la realizzazione di un modulo ad hoc per il recupero di calore da grandi piscine con flussi termici a bassa entalpia (fluido caldo a circa 32 °C).

Il fornitore è attivo in diversi settori: settore industriale con un focus sull'alimentare (ad es. il processo di pastorizzazione è una tipica applicazione dello scambiatore a piastre), settore civile e applicazioni per teleriscaldamento.

La Tabella 8 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** riporta la descrizione dei principali parametri raccolti durante l'intervista.

**Tabella 8 Parametri tecnici e economici rilevati durante la conduzione dell'intervista al fornitore TECHNO SYSTEM S.R.L**

PARAMETRI TECNICI	Tecnologie	Pompe di calore
	Range di temperatura del calore di scarto	Da -15°C a +150°C
	Range di potenza installate	Da decine di kW <sub>t</sub> a decine di MW <sub>t</sub>
	Efficienza	Si riescono a raggiungere efficienze prossime al 99% con differenze di temperature tra i fluidi coinvolti anche di 1°C
	Ingombro Specifico	Dipende da molti fattori (temperature in gioco, ΔT medio). A parità di prestazione uno scambiatore a piastre è circa un quarto di uno scambiatore a fascio tubiero



	<b>Vita utile</b>	5 ÷ 10 anni
<b>PARAMETRI ECONOMICI</b>	<b>Costo specifico</b>	Dipende da molti fattori. Come driver principali possiamo considerare la superficie di scambio e le perdite di carico
	<b>Costi di gestione e manutenzione</b>	Macchina statica, non è caratterizzata da particolari esigenze. Dipende dai fluidi in gioco. Si passa da ispezioni giornaliere o settimanali (fluidi sporchi) ad ispezioni con frequenze di diversi anni.
	<b>PayBack Period tipici</b>	1 ÷ 2 anni

Vengono inoltre riportate alcune interessanti considerazioni emerse durante l'intervista:

- Tra gli scambiatori di calore a piastre, gli ispezionabili sono adatti alle alte potenze; più si sale di taglia più diventa mandatorio preferirli a scambiatori a piastre saldobrasate, soprattutto se si lavora con fluidi sporchi;
- Tendenzialmente si lavora con fluidi liquido-liquido, anche se sono possibili applicazioni con gas (es. refrigerazione con ammoniaca, evaporatori e condensatori, ecc.);
- In termini di pressioni di esercizio, il limite fisiologico dello scambiatore a piastre sono i classici 16 bar. In applicazioni particolari si arriva anche a 25 bar. Per pressioni superiori ai 25 bar si utilizza prevalentemente lo scambiatore a fascio tubiero;
- Una discriminante importante nella scelta dello scambiatore è il  $\Delta T_{ML}$  (differenza di temperatura media logaritmica tra le due sezioni di uno scambiatore di calore). Tale parametro in uno scambiatore di calore a piastre può essere notevolmente ridotto fino ad arrivare a  $\Delta T_{ML}$  di 1°C;
- Importante limitazione è rappresentata dalle temperature dei fluidi di scambio; lo scambiatore a piastre, a meno di applicazioni speciali, vede come limite i 150 °C.

### 2.1.2 Progetti di ricerca internazionali

In questa sezione specifica sono riportate le interviste svolte ai progetti di ricerca internazionali, coinvolti allo scopo di intercettare elementi più innovativi delle tecnologie di recupero di calore.

Come già anticipato, è stato seguito un approccio analogo a quello utilizzato per le interviste ai fornitori di tecnologie, rivedendo i moduli di presentazione e adattando il questionario dell'intervista.

In questa sezione ci si limiterà a dare una breve descrizione del progetto di ricerca e delle informazioni più rilevanti emerse durante le interviste realizzate. Per una descrizione più esaustiva dei progetti di ricerca, nonché per informazioni come barriere e casi di studio, si rimanda al report ENEA, relativo alla LA3.20.

#### *Il progetto HighLift (by Olvondo Technology)*

Il progetto *HighLift*<sup>1</sup> è un progetto di ricerca Europeo H2020 coordinato dall'azienda norvegese Olvondo Technology AS e supportato da diversi partner internazionali. La tecnologia oggetto del progetto di ricerca è una pompa di calore industriale ad alta temperatura basata su un ciclo Stirling inverso. Il motore utilizza elio (gas refrigerante R-704) come mezzo di lavoro. L'R-704 è un fluido di lavoro ecologico, poiché non è tossico, non infiammabile e con un potenziale di riscaldamento globale (GWP) pari a 0. Il fluido vettore è l'acqua sia nel lato caldo che in quello freddo della pompa di calore ad alta temperatura.

Il progetto di ricerca affronterà e implementerà le roadmap tecniche e commerciali per consentire una commercializzazione rapida e di successo della tecnologia HighLift.

Le pompe di calore hanno una potenza nominale fino a 700 kW<sub>t</sub>. La tecnologia è progettata per applicazioni con temperature fino a 200°C, utilizzando fonti di calore di scarto da 0°C a 100°C.

Attualmente sono in esecuzione diverse installazioni pilota in Scandinavia (a fine 2021 sono state raggiunte circa 80000 ore di funzionamento). Le fasi finali dei test sono in corso e il rilascio della tecnologia sul mercato è previsto per l'anno 2022.

<sup>1</sup> HighLift Project by Olvondo Technology - <http://highlift.olvondotech.no>

I campi di applicazione riguardano qualsiasi settore industriale in cui è disponibile calore di scarto a una temperatura compresa tra 0°C e 100°C e una richiesta termica compresa tra 100°C e 200°C. Ad esempio, l'industria alimentare e delle bevande, del legno, chimiche e farmaceutiche.

La Tabella 9 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** riporta la descrizione dei principali parametri raccolti durante l'intervista.

**Tabella 9 Parametri tecnici e economici rilevati durante la conduzione dell'intervista al progetto HighLift**

	<b>Tecnologie</b>	<b>Pompe di calore ad alta temperatura</b>
<b>PARAMETRI TECNICI</b>	<b>Range di temperatura del calore di scarto</b>	0 ÷ 100°C (anche al di sotto di 0°C ma in tal caso è necessario un ciclo di sbrinamento)
	<b>Range di potenza installate</b>	Fino a 700 kW <sub>th</sub>
	<b>Efficienza</b>	COP = 1,7 ÷ 3,5 a seconda del tipo di applicazione (il COP diminuisce all'aumentare del ΔT) Nel caso fosse necessario anche il raffreddamento, il COP totale sarebbe di circa 2,5
	<b>Ingombro Specifico</b>	13 tonnellate di metallo (acciaio), 3,4 m <sup>2</sup> (pavimento) * 1.5 m (altezza)
	<b>Vita utile</b>	20 anni
<b>PARAMETRI ECONOMICI</b>	<b>Costo specifico</b>	Dato non disponibile per l'attuale stato di sviluppo della tecnologia
	<b>Costi di gestione e manutenzione</b>	Dato non disponibile per l'attuale stato di sviluppo della tecnologia
	<b>PayBack Period tipici</b>	Dato non disponibile per l'attuale stato di sviluppo della tecnologia

### *Il progetto UncorrelaTEd*

UncorrelaTEd<sup>2</sup> è l'acronimo del progetto Europeo Horizon 2020 *Solid-liquid thermoelectric (TE) systems with uncorrelated properties*. Lo scopo del progetto è quello di ottenere sensibili miglioramenti nell'efficienza di conversione dell'energia da calore a elettricità mediante l'utilizzo di materiali termoelettrici. Il progetto sta sviluppando un sistema ibrido, formato da un solido termoelettrico poroso permeato da un elettrolita liquido che interagisce tatticamente con il solido per aumentare l'efficienza del sistema. Miglioramenti dell'efficienza senza precedenti (oltre 35 volte) sono già stati osservati dai membri del progetto, pur utilizzando un materiale con proprietà termoelettriche modeste. UncorrelaTEd mira ad estendere questi miglioramenti a diversi materiali come leghe di tellururo di bismuto, ossidi e polimeri con proprietà termoelettriche all'avanguardia, portando potenzialmente ad ottenere una tecnologia in grado di fornire efficienze oltre quattro volte maggiori rispetto allo stato dell'arte dei materiali termoelettrici per temperature medio-basse (<150 °C).

La tecnologia è stata testata in laboratorio ed è stata presentata la domanda di brevetto. È prevista la realizzazione di un prototipo (in laboratorio) e di test in un ambiente reale nel successivo triennio.

La tecnologia potrebbe essere applicata per recuperare calore da microprocessori, processi produttivi, domestici e biologici. Un'altra applicazione interessante è l'Internet of Things (IoT); in questo caso, il recupero del calore disperso (dal corpo umano, dal calore di scarico, dall'ambiente) può essere utilizzato per alimentare i sensori, eliminando così la necessità di batterie (sensori autoalimentati).

<sup>2</sup> UncorrelaTEd Project - <http://uncorrelated.uji.es>

La Tabella 10 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** riporta la descrizione dei principali parametri raccolti durante l'intervista.

**Tabella 10 Parametri tecnici e economici rilevati durante la conduzione dell'intervista al fornitore progetto UncorrelaTEd**

	<b>Tecnologie</b>	<b>Generatori Termoelettrici</b>
<b>PARAMETRI TECNICI</b>	<b>Range di temperatura del calore di scarto</b>	Da -50°C a +150°C
	<b>Range di potenza installate</b>	Da $\mu\text{W}_e$ a $\text{mW}_e$
	<b>Efficienza</b>	10 ÷ 12 anni
	<b>Ingombro Specifico</b>	$\approx 4 \text{ cm}^2/\text{mW}$
	<b>Vita utile</b>	5 ÷ 10 anni o più (questo è vero per i materiali termoelettrici convenzionali; per questa tecnologia la durata sarà probabilmente più breve a causa della soluzione di ioni)
<b>PARAMETRI ECONOMICI</b>	<b>Costo specifico</b>	Dato non disponibile per l'attuale stato di sviluppo della tecnologia
	<b>Costi di gestione e manutenzione</b>	Dato non disponibile per l'attuale stato di sviluppo della tecnologia
	<b>PayBack Period tipici</b>	Dato non disponibile per l'attuale stato di sviluppo della tecnologia

### *I progetti SOWHAT e BAMBOO*

Il progetto SO WHAT<sup>3</sup> (Supporting new Opportunities for Waste Heat And cold valorisation Towards EU decarbonization) è un progetto Europeo finanziato nell'ambito del programma Horizon 2020. Tale progetto, a differenza dei precedenti, non è focalizzato sullo sviluppo di una tecnologia di recupero di calore, ma si pone l'obiettivo di sviluppare un software integrato a supporto delle aziende nella selezione, simulazione e confronto di tecnologie alternative di sfruttamento del calore e del freddo di scarto, anche attraverso l'integrazione delle fonti di energia rinnovabile. Pertanto, tale progetto di ricerca risulta fortemente allineato con gli obiettivi del progetto di ricerca oggetto di questo report.

Lo strumento proposto da SOWHAT sarà progettato per supportare le industrie e le società di servizi energetici in diversi aspetti [1]:

- 1) auditing del processo industriale per capire dove si potrebbero valorizzare i cascami termici;
- 2) mappare il potenziale delle fonti di energia rinnovabili disponibili localmente, da integrare con il potenziale calore e freddo di scarto;
- 3) mappatura della domanda locale prevista per riscaldamento e raffrescamento;
- 4) definire e simulare scenari alternativi economicamente vantaggiosi basati su tecnologie di recupero di calore e freddo di scarto, sfruttando anche l'introduzione delle fonti di energia rinnovabili;
- 5) valutare gli impatti in termini di KPI (Key Performance Indicator) energetici, economici e ambientali, che l'adozione dei nuovi scenari genererà rispetto alla situazione attuale (i.e. baseline) sia a livello industriale che locale;
- 6) promuovere accordi contrattuali e modelli di finanziamento innovativi per garantire soluzioni economicamente valide e investimenti meno rischiosi.

<sup>3</sup> SO WHAT Project - <https://sowhatproject.eu>

Emerso durante l'intervista, e di particolare interesse per le linee di attività di responsabilità dell'Università di Roma "Tor Vergata" (LA 3.21-3.23), è il lavoro svolto dall'Università di Birmingham nell'ambito del progetto SOWHAT presentato nel Deliverable 1.6 "Report on H/C recovery/storage technologies and renewable technologies" [2]. Tale lavoro presenta una descrizione dell'ampia gamma delle tecnologie di recupero del calore e del freddo di scarto nell'industria in termini di principi di funzionamento, applicazioni, fase di sviluppo, costi e benefici. La Figura 2 riporta una panoramica delle tecnologie considerate nel progetto SOWHAT e discusse in [2].

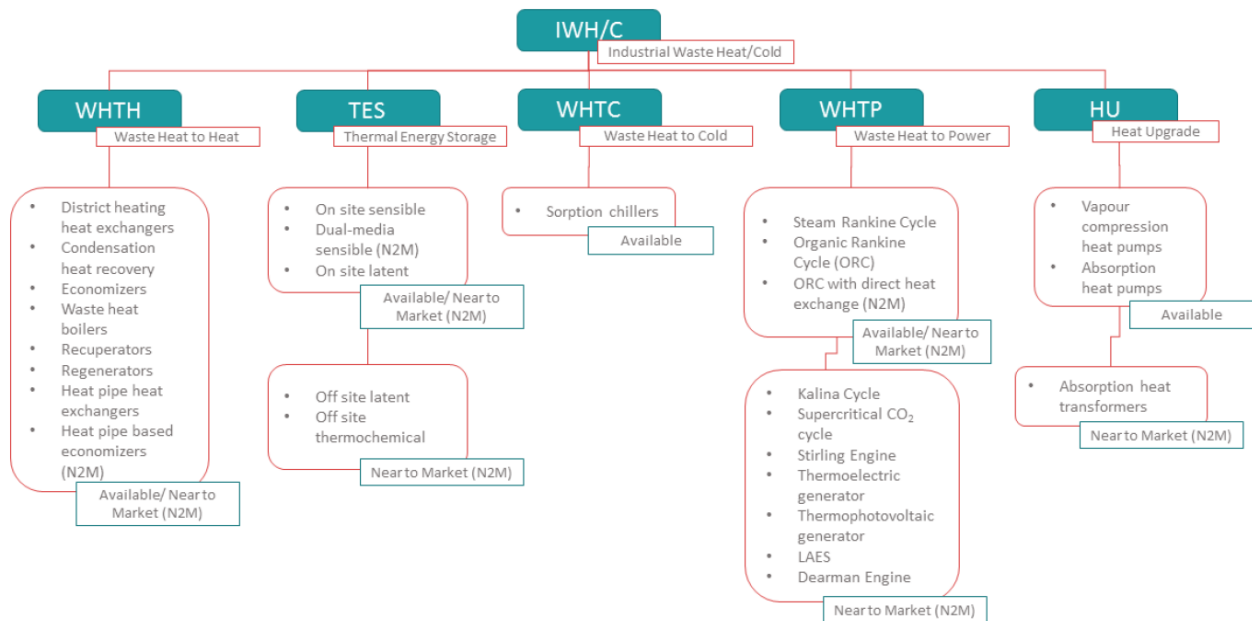


Figura 2 Tecnologie di recupero di calore/freddo considerate nell'ambito del progetto SoWhat [2]

La consultazione di tale lavoro ha permesso di:

- consolidare la conoscenza sulle tecnologie di recupero di calore disponibili ed in fase di sviluppo;
- verificare la rispondenza delle tecnologie intercettate dal progetto SOWHAT con quelle considerate in questo lavoro di ricerca triennale, trovando pertanto un'ottima corrispondenza;
- validare ulteriormente parametri tecnici ed economici utilizzati per la realizzazione di un modello di valutazione preliminare delle opportunità di recupero termico oggetto della sezione "Sviluppo definitivo di una metodologia per l'identificazione e l'analisi dei flussi energetici e degli interventi di efficientamento" di questo documento.

Il progetto BAMBOO<sup>4</sup> (Boosting new Approaches for flexibility Management By Optimizing process Off-gas and waste use) è un progetto finanziato dall'Unione Europea (programma Horizon 2020) che si pone l'obiettivo di sviluppare e testare soluzioni innovative per l'energia e le risorse in quattro settori industriali energivori (industria siderurgica, mineraria, cartaria e petrolchimica). Queste soluzioni tecnologiche verranno sviluppate, testate e convalidate tramite dei casi di studio dimostrativi, focalizzando l'attenzione su tre pilastri: recupero di calore residuo, flessibilità elettrica e valorizzazione dei rifiuti.

L'output di maggiore interesse ottenuto durante l'intervista è la descrizione dei quattro casi di studio dimostrativi, uno per ogni settore industriale di interesse del progetto. Così come per le altre interviste, per le informazioni raccolte riguardante i casi di studio si rimanda al report ENEA relativo alla LA3.20.

### 2.1.3 Altre aziende interessate

Nel presente paragrafo verrà brevemente riportata l'attività di interazione avvenuta con un'azienda che pur non producendo tecnologie specifiche per il recupero di calore di scarto, svolge in ogni caso un ruolo cruciale

<sup>4</sup> BAMBOO Project - <http://bambooproject.eu>

in questo contesto. Per tale azienda è stato seguito un approccio differente da quello precedentemente esposto: non è stato seguito un questionario specifico, ma è stata impostata un'intervista libera.

#### *AB ENERGY S.P.A.*

AB Energy S.P.A. è un'azienda italiana leader nel settore della cogenerazione. La leadership AB nel settore della cogenerazione si è allargata anche ai biocombustibili, con sistemi per la purificazione e la liquefazione del biometano e per il trattamento delle emissioni in atmosfera.

I prodotti proposti sono adatti a molteplici settori industriali, del terziario e dei servizi, in quanto la cogenerazione risponde in modo efficace alle esigenze delle realtà energivore, caratterizzate da elevati consumi di calore e di energia elettrica.

Vengono riportate le considerazioni emerse durante l'intervista:

- L'azienda ha confermato che nelle loro applicazioni cogenerative è indispensabile l'ottimizzazione dei flussi dei cascami termici a temperature più basse (buona parte del calore è disponibile sotto forma di acqua calda), perché l'utilizzo di questi, anche nell'ottica CAR (Cogenerazione Alto Rendimento), incide molto sulla convenienza economica dell'intervento. Una delle maggiori difficoltà risiede appunto nel trovare degli utilizzi adeguati a questi vettori a più basso contenuto entalpico;
- Quando si trova difficoltà nell'utilizzare in modo utile il calore disponibile dall'impianto di cogenerazione, si ricorre all'utilizzo dell'acqua calda in un assorbitore (trigenerazione) sia a bromuri di litio (per temperature positive) che ad ammoniaca (per temperature negative); L'azienda ha confermato la diffusione sempre più crescente di queste tipologie di applicazioni;
- Un altro aspetto importante per l'applicazione di queste tecnologie (cogeneratore stesso, e frigoriferi ad assorbimento) è la conoscenza esatta dei fabbisogni dello stabilimento. Sebbene le aziende siano sempre più frequentemente dotate di sistemi di misura per gli assorbimenti elettrici, questo avviene di rado per i carichi termici e frigoriferi. Pertanto, la maggiore difficoltà nella valutazione di queste tipologie di interventi è ricostruire il profilo di consumo energetico con un adeguato livello di dettaglio, per cui solitamente è necessario ricorrere a stime.

## *2.2 Conclusioni*

Nell'ambito di questa attività, iniziata nella precedente annualità di ricerca, sono state contattate un totale di circa 45 fornitori di tecnologia nazionali ed internazionali, con la realizzazione di 16 interviste (9 nell'annualità 2020 e 7 nell'annualità 2021). Sono stati inoltre contattati 13 progetti di ricerca attivi nella tematica del recupero di calore con la realizzazione di 4 interviste (tutte realizzate nella terza annualità) per un totale di 20 interviste realizzate.

I risultati di queste interazioni, che già avevano dimostrato la loro validità nel corso della precedente annualità del progetto, hanno ulteriormente contribuito al perfezionamento e alla validazione degli strumenti proposti. In particolare, hanno permesso di:

- Revisionare, validare e finalizzare la struttura del database di tecnologie, nello specifico, verificando l'adeguatezza del database nel contenere tutte le informazioni necessarie a caratterizzare esaurientemente le tecnologie identificate (vedi paragrafo 3.1 "Contestualizzazione del database");
- Completare il popolamento del database di tecnologie. Il 47% dei report presenti nel database proviene dalle interviste con fornitori e progetti di ricerca, le quali rappresentano, per la completezza delle informazioni, i rilievi migliori, in quanto si è riusciti ad ottenere un alto livello di dettaglio e ad intercettare alcune tecnologie che non erano presenti a catalogo o sul sito online (vedi paragrafo 3.3 "Popolamento finale del database e protocollo di indagine");
- Raccogliere ulteriori informazioni tecniche ed economiche sulle tecnologie analizzate per lo sviluppo finale della metodologia di valutazione di interventi di recupero di calore di scarto (vedi paragrafo 4.2 "Modulo di valutazione preliminare").

Particolarmente importante è risultata la rilevazione dei parametri economici, che sono stati raccolti con l'obiettivo di definire delle specifiche funzioni di costo per le principali tecnologie di recupero termico ed ottenere degli strumenti che siano di fornire informazioni realistiche sulla fattibilità dell'intervento. Tali dati sono, inoltre, di difficile reperibilità in letteratura e spesso non al passo con gli aggiornamenti tecnologici presenti nello scenario di recupero di calore, che risulta in rapido sviluppo.

È doveroso sottolineare come tutte le aziende intervistate si siano mostrate estremamente disponibili nel fornire dati sia tecnici sia economici, ritenuti indispensabili dal gruppo di ricerca per il miglioramento degli strumenti in fase di sviluppo. Anche l'interazione con i progetti di ricerca ha permesso di verificare l'allineamento della tematica della nostra ricerca con il panorama scientifico nazionale ed internazionale.

Particolarmente significativi sono stati i riscontri positivi ricevuti circa gli strumenti sviluppati all'interno del progetto di ricerca, ritenuti un utile supporto nel superamento delle barriere non tecnologiche riconosciute come principale ostacolo per la diffusione delle tecnologie di recupero di calore.

### 3 Contestualizzazione del database di tecnologie di recupero

Nel presente capitolo vengono descritte tutte le attività legate alla progettazione ed all'implementazione di un database di tecnologie di recupero di calore di scarto. La struttura del database era stata approfonditamente revisionata nel corso della precedente annualità di ricerca sulla base delle prime risultanze della sua contestualizzazione nello scenario industriale italiano, pertanto, lo scopo principale di questa annualità è stato quello di portare a compimento la validazione e la contestualizzazione del database e completare il suo popolamento.

Tra le linee di attività più rappresentative sviluppate nel corso della terza annualità del progetto troviamo:

- Contestualizzazione del database di tecnologie di recupero al mercato e al settore di ricerca e sviluppo italiano e internazionale, effettuata sulla base delle risultanze relative alle interviste svolte in sinergia con la LA3.20 (descritta nel precedente capitolo) e ai casi studio esaminati;
- Validazione definitiva della struttura del database e verifica della sua rispondenza al contesto e al mercato italiano e internazionale;
- Completamento del popolamento del database con tecnologie non ancora individuati nelle precedenti ricerche, con particolare attenzione a tecnologie e ad applicazioni innovative.

Sulla base di tali linee di attività, l'output principale consiste nella versione finale del database contenente l'elenco definitivo delle tecnologie di recupero di calore. Tale versione finale è stata validata tramite l'interazione con i fornitori di tecnologie e i progetti di ricerca internazionali e tramite il suo utilizzo nei casi di studio. Il database è stato realizzato sia su un foglio di calcolo Excel sia in una versione Access, quest'ultima destinata alla consultazione dell'utente esterno e verrà resa disponibile per il download gratuito da ENEA. Inoltre, in appendice nel paragrafo 10.1 "Il database" è riportato un estratto del database.

#### 3.1 Contestualizzazione del database

L'interazione con i rappresentanti del mercato italiano delle tecnologie e i progetti di ricerca nazionali e internazionali ha fornito un contributo fondamentale alla realizzazione della versione finale del database e alla sua contestualizzazione e validazione nello scenario industriale italiano. Mentre il primo ciclo di interviste ha avuto come scopo principale una revisione strutturale del database, il secondo ciclo, oggetto di questa annualità, ha avuto l'obiettivo principale di validarne la versione finale.

In particolare, durante le interviste, in stretta collaborazione con i referenti aziendali, è stato testato il funzionamento del database tramite l'inserimento delle tecnologie nel database usando format preimpostati e condivisi con le aziende. Tale attività non ha generato criticità, permettendo quindi di confermare la struttura del database. Inoltre, sono stati ricevuti feedback positivi da parte delle aziende circa l'adeguatezza a descrivere le tecnologie all'interno dello strumento e la facile reperibilità delle informazioni richieste. Questa attività ha permesso quindi di ottenere uno strumento validato e contestualizzato al mercato e al settore di ricerca e sviluppo italiano e internazionale.

Le interviste con i fornitori hanno avuto un ruolo cruciale anche nel completare il popolamento del database di tecnologie. Il 47% dei report presenti nel database, infatti, proviene dalle interviste con fornitori e progetti di ricerca. È bene sottolineare come, in assenza di queste interviste, non sarebbe stato possibile rilevare alcune tecnologie se non interagendo con il fornitore stesso, in quanto alcuni dei fornitori intervistati presentano delle tecnologie di recupero di calore a bassa temperatura non descritte a catalogo.

Nel complesso, l'interazione con i fornitori ha permesso di:

- I. Validare e contestualizzare la versione finale del database;
- II. Arricchire il popolamento del database con le tecnologie proposte dai fornitori intervistati grazie ai dati raccolti durante le interviste;

- III. Verificare l'esistenza sul mercato italiano delle tecnologie precedentemente identificate in letteratura e consolidarne la conoscenza tramite approfondimenti tecnici dedicati;
- IV. Individuare tecnologie presenti nel mercato non riscontrate durante le ricerche di letteratura, con particolare attenzione a tecnologie e ad applicazioni innovative.

### 3.2 Validazione definitiva della struttura del database

Nel corso della precedente annualità di ricerca la struttura del database è stata profondamente revisionata grazie al contributo di diversi fattori. In particolare, le riflessioni interne del gruppo di ricerca e degli altri partner del progetto, le osservazioni dei revisori esterni, l'attività di analisi dei database disponibili e della letteratura scientifica significativa sul tema, completata nella seconda annualità (LA3.22), nonché le risultanze del primo ciclo di interviste svolte e delle prime applicazioni del database hanno permesso di comprendere quali dovessero essere le caratteristiche necessarie a sviluppare uno strumento adeguato alle richieste e alle possibilità di utilizzo dei fruitori. Pertanto, l'impegno già portato avanti nel completare lo sviluppo del database, anche anticipatamente rispetto a quanto originariamente previsto, ha consentito di ottenere al termine della seconda annualità una struttura consistentemente validata.

Il secondo ciclo di interviste, oggetto di questa annualità in sinergia con la LA3.20, ha ulteriormente confermato la conformità della struttura del database, pertanto, è stato ritenuto opportuno confermare la struttura che era stata proposta durante la precedente annualità.

Comunque, per completezza, anche in questo report si riportano le caratteristiche più importanti del database in termini di struttura, query e modalità di utilizzo.

#### 3.2.1 Struttura finale del database

Il database, sia nella versione Excel che in formato Access, presenta una struttura tabulare. La struttura finale del database è organizzata come segue: ad ogni riga corrisponde una tecnologia di recupero di calore, proveniente da diverse tipologie di fonti (cataloghi e siti web di fornitori, articoli scientifici, report di progetto, interviste). Ad ogni fonte possono essere associate più tecnologie di recupero (ad esempio, uno stesso fornitore può avere diverse tecnologie di recupero nel proprio catalogo).

Le informazioni contenute all'interno del database sono organizzate in cinque macrocategorie:

1. *Identificazione*: contiene i campi che permettono di localizzare la tecnologia all'interno del database in termini di fornitore e fonte;
2. *Fonte*: contiene le informazioni necessarie a definire la fonte utilizzata e a garantirne la reperibilità;
3. *Fornitore di tecnologie*: contiene le informazioni necessarie a identificare il fornitore di tecnologie in considerazione. Se disponibili, fornisce anche informazioni di contatto;
4. *Informazioni sulla tecnologia*: identifica la tecnologia, il suo stato di maturità e la tipologia di recupero di calore che permette di ottenere (es. produzione di energia elettrica, termica o frigorifera). Inoltre, contiene le principali caratteristiche tecniche e i campi di applicazione per la tecnologia considerata;
5. *Altre informazioni*: altre informazioni di natura tecnica ed economica non raccolte nei precedenti campi ma che possono essere utili a valutare e comprendere la tecnologia.

In Tabella 11 è riportata una descrizione dei campi inclusi nella versione rivista del database.

**Tabella 11 Campi e descrizione del database di tecnologie**

CATEGORIE	CAMPI	DESCRIZIONE
IDENTIFICAZIONE	ID Fonte	Codice numerico che identifica univocamente la fonte nel database.
	ID Tecnologia	Codice numerico che identifica univocamente la tecnologia nel database.
FONTE	Tipologia fonte	Tipologia di fonte dalla quale è stato reperita la tecnologia di recupero (es. articolo in letteratura, progetti/database simili, catalogo, intervista, ecc.).



	Fornitore/autore	Nome del fornitore di tecnologie o degli autori della fonte.
	Link	Informazioni identificative della fonte per garantirne il reperimento (es. DOI, URL, ecc.).
	Anno	Anno di riferimento (es. anno di realizzazione dell'intervista o pubblicazione della fonte).
FORNITORE DI TECNOLOGIE	Riferimento geografico	Paese di riferimento del fornitore di tecnologie.
	Informazioni di contatto	Informazioni utili per contattare il fornitore di tecnologie (es. indirizzo e-mail).
	Tipologia di fornitore	Produttore, rivenditore o entrambi.
INFORMAZIONI SULLA TECNOLOGIA	Destinazione recupero	Indica la tipologia di recupero termico in base alla destinazione di utilizzo del calore recuperato (es. produzione di calore, produzione di freddo, produzione di energia elettrica, scambio termico ecc.).
	Tecnologia	Tecnologia di recupero di calore (es. pompa di calore, frigorifero ad assorbimento, scambiatore di calore, ORC ecc.).
	Descrizione tecnologia	Descrizione della tecnologia e informazioni aggiuntive.
	Stato di maturità	Definisce lo stato di maturità della tecnologia (tecnologia consolidata, in fase di sviluppo, ecc.).
	Campi di applicazione	Descrive i principali campi di applicazione della tecnologia (es. applicazioni per cogenerazione a solare, processi o settori principali, ecc.).
	Modello	Identifica il modello (se la tecnologia può essere identificata con uno specifico modello).
	Fluido vettore	Tipologia di fluido vettore in ingresso alla tecnologia di recupero (es. acqua calda, olio diatermico, vapore).
	Temperatura di input	Range di temperatura ammissibile di input del fluido vettore.
	Minima temperatura di input	Minima temperatura ammissibile di input del fluido vettore.
	Portata fluido vettore	Range di portata elaborabile del fluido vettore.
	Fluido di lavoro	Fluido di lavoro utilizzato dalla tecnologia (es. idrocarburi, refrigeranti, ecc.).
	Potenza termica in ingresso	Range di potenza termica nominale in input alla tecnologia di recupero (potenza termica del calore discarto).
	Tipo di output	Tipologia di vettore energetico (es. elettricità, energia termica, energia frigorifera) in output (effetto utile).
	Potenza di Output	Range di potenza nominale in output.
	Temperatura di output	Range di temperatura di output del fluido in uscita (effetto utile).
	Efficienza	Parametro di performance caratteristico della tecnologia (es. rendimento, efficienza di scambio, COP, ecc.).
Dimensioni	Dimensione richiesta dalla tecnologia (es. $m^2/kW_{calore}$ ).	
ALTRE INFORMAZIONI	Vita utile attesa	Vita utile di progetto della tecnologia.
	PBP atteso	Misura il tempo di ritorno dell'investimento atteso per l'implementazione della tecnologia considerata.
	Note	Altre informazioni rilevanti sulla tecnologia di recupero di calore.

La definizione dei 29 campi riportati in Tabella 11 è frutto delle approfondite indagini della letteratura circa le principali tecnologie di recupero a bassa temperatura e dei database simili esistenti, completate nella precedente annualità, e dei preziosi feedback ricevuti dai fornitori di tecnologie.

### 3.2.2 Query e consultazione del database

Così come avvenuto per la struttura, anche le query non hanno subito modifiche rispetto a quanto proposto lo scorso anno. Sono state previste due tipologie di utilizzo del database di tecnologie in base alle informazioni disponibili al momento della consultazione dello stesso:

- A. **Conoscenza delle caratteristiche del calore di scarto** - L'utente, in seguito all'identificazione del calore di scarto e alla definizione delle sue caratteristiche, consulta il database in cerca di tecnologie utili al riutilizzo del flusso termico considerato;
- B. **Informazioni sulla tipologia di recupero** - L'utente, nel caso avesse già individuato la tipologia di recupero o la tecnologia da adottare (ad esempio ha già effettuato una valutazione preliminare o ha analizzato casi di studio analoghi) può ricercare informazioni più dettagliate sulla specifica tecnologia o sulle altre tecnologie adatte alla tipologia di recupero da approfondire;

In Tabella 12 sono riportate le nuove due possibilità di utilizzo individuate e i campi selezionati con una breve descrizione degli stessi.

**Tabella 12 Query a disposizione dell'utente per la consultazione del database**

QUERY		DESCRIZIONE
<b>A. Conoscenza delle caratteristiche del calore di scarto</b>	<b>Temperatura sorgente</b>	Indica la temperatura alla quale è disponibile il calore destinato al recupero (per definiti range di temperatura selezionabili).
	<b>Potenza termica di scarto disponibile</b>	Indica la potenza termica di scarto disponibile al recupero (per definiti range di potenza selezionabili).
<b>B. Informazioni sulla tipologia di recupero tecnologia</b>	<b>Tipologia di Recupero</b>	Indica l'output di interesse dall'applicazione della tecnologia di recupero termico (Produzione di energia elettrica, Produzione di energia termica, Produzione di energia frigorifera, Scambio termico).
	<b>Tecnologia</b>	Indica la tecnologia di interesse per il recupero termico
	<b>Stato di maturità tecnologia</b>	Tipologia di progetto/tecnologia da consultare (es. progetto implementato, fornitori di tecnologie, applicazione teorica ecc.)

Nella versione finale del database le query sono state definite ripercorrendo i processi logici che guidano la ricerca e l'implementazione di progetti di efficientamento energetico di recupero di calore:

- La query A rappresenta l'esempio comune di un utente che ha già individuato un calore di scarto da utilizzare ed è intento alla consultazione del database per ottenere informazioni circa le tecnologie da poter implementare per recuperarlo;
- La query B invece rappresenta l'esempio di un utente che è già a conoscenza delle tecnologie implementabili (ad esempio a valle di una valutazione preliminare) ma è alla ricerca di informazioni più dettagliate sulle stesse.

All'interno del database le informazioni richieste per la sua consultazione sono costituite da un campo chiuso, attraverso il quale l'utente può scegliere tra opzioni multiple predefinite. In Tabella 13 sono riportate alcune delle voci di compilazione selezionate per ogni campo.

**Tabella 13 Voci di compilazione delle query per la consultazione del database**

Query A		Query B		
Temperatura sorgente	Potenza termica di scarto disponibile	Tipologia di Recupero	Tecnologia	Stato di maturità tecnologia
$\leq 100^{\circ}\text{C}$	$P_t \leq 50 \text{ kW}_t$	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Formulazione teorica
$100^{\circ}\text{C} < T \leq 150^{\circ}\text{C}$	$50 \text{ kW}_t < P_t \leq 500 \text{ kW}_t$	Produzione di energia termica	Pompa di calore	Tecnologia in fase di sviluppo
$150^{\circ}\text{C} < T \leq 200^{\circ}\text{C}$	$500 \text{ kW}_t < P_t \leq 2000 \text{ kW}_t$	Produzione di Energia Frigorifera	Frigorifero ad assorbimento	Tecnologia disponibile sul mercato
$200^{\circ}\text{C} < T \leq 250^{\circ}\text{C}$	$P_t > 2000 \text{ kW}_t$	Scambiotermico	Scambiatore di calore a piastre	Tecnologia consolidata
-	-	-	Altro	-

### 3.3 Popolamento finale del database e protocollo di indagine

Definita la struttura finale del database, è stato continuato e portato a termine il popolamento del database.

Per la ricerca e quindi l'inserimento delle tecnologie all'interno del database, è stato seguito il protocollo sistematico di indagine della letteratura definito nella precedente annualità e riportato nel report relativo alla LA3.22. Tale procedura è importante per garantire la replicabilità del processo di popolamento e garantire una adeguata qualità e completezza delle informazioni incluse nel database.

Seguendo il protocollo di ricerca, sono stati consultati articoli scientifici, report di progetti e cataloghi disponibili online sul sito web dei fornitori. Inoltre, per i fornitori di tecnologie individuati, si è tentato di instaurare un contatto tramite mail o tramite apposito modulo di contatto disponibile sul sito web, al fine di organizzare un'intervista. Quest'ultima, anche se più dispendiosa in termini di tempo, è stata ritenuta la modalità più efficace di reperimento di informazioni, in grado di intercettare e censire anche le tecnologie di recupero di calore non disponibili su catalogo.

Per tutte le fonti rilevate è stata effettuata una prima valutazione, verificando la conformità del contenuto del documento con i confini del progetto:

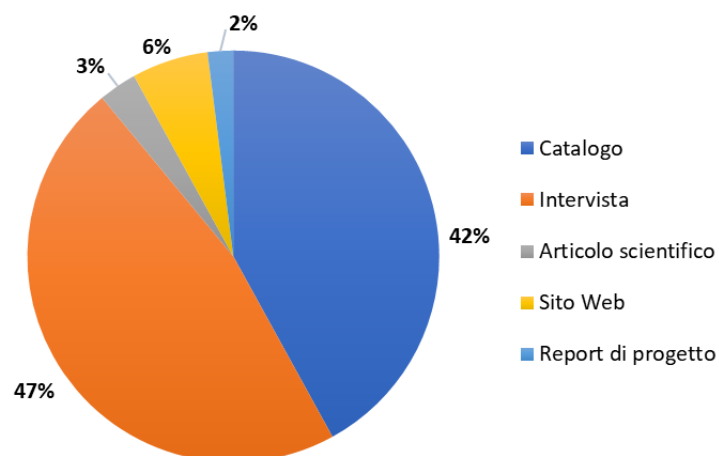
- Tecnologie di recupero a bassissime e basse temperature (temperatura inferiore a 250 ° C);
- Rilevanza e applicabilità al settore industriale (ad esempio, non sono state considerate tecnologie per applicazioni puramente nel settore residenziale).

Successivamente, è stato effettuato un ulteriore screening per valutare la quantità e la qualità dei dati disponibili. Sono state quindi identificate le informazioni minime che la fonte deve necessariamente contenere per essere inserita nel database. Queste informazioni sono riconducibili a:

- Tipologia di recupero (produzione di energia elettrica, produzione di energia termica, produzione di energia frigorifera, scambio termico);
- Descrizione della tecnologia;
- Range di temperatura in ingresso;
- Range di potenza di output.

Al termine della seconda annualità il database conteneva informazioni provenienti da 22 diverse fonti per un totale di 65 record. L'attività di completamento del popolamento svolto in questa terza ed ultima annualità del progetto ha portato ad una versione finale del database contenente informazioni provenienti da 37 diverse fonti per un totale di 100 record.

Il popolamento del database ha visto l'analisi di cinque tipologie di fonti: articoli scientifici, report di progetto, interviste con i fornitori di tecnologie e progetti di ricerca, cataloghi online e siti web di fornitori di tecnologie. Come mostrato in Figura 3, le tecnologie identificate derivano principalmente dalle interviste realizzate (47%) e dalla consultazione dei cataloghi dei fornitori (42%).

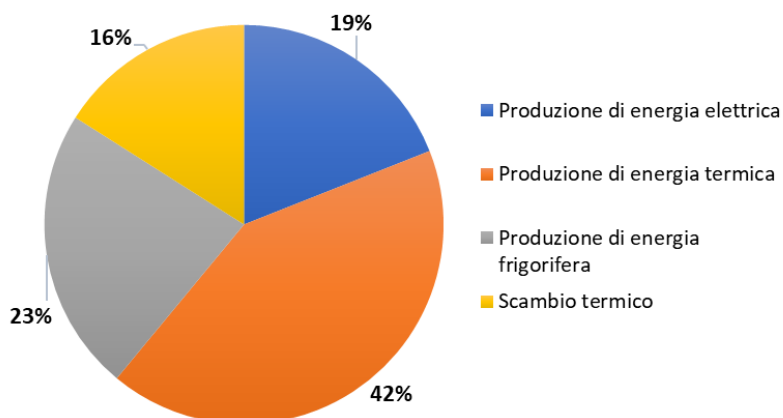


**Figura 3 Risultati del popolamento finale del database: il tipo di fonte**

Come già anticipato, le interviste realizzate, oltre a rappresentare circa un terzo dei record presenti nel database, sono, per la completezza delle informazioni, i rilievi “migliori”, in quanto si è riusciti ad ottenere un alto livello di dettaglio e ad intercettare alcune tecnologie che non erano presenti a catalogo o sul sito online. Al contrario le tecnologie contenute in articoli scientifici, report di progetto, cataloghi dei fornitori e siti web, non risultano sempre caratterizzate sempre da una quantità e qualità di informazioni idonee da poter essere inserite nel database. A tale riguardo, si vuole sottolineare come i record contenuti nel database rappresentano solo una minima parte delle fonti totali analizzate in quanto molte di queste, approssimativamente una percentuale superiore al 50%, conteneva informazioni non adeguate a poter essere inserite con successo nel database.

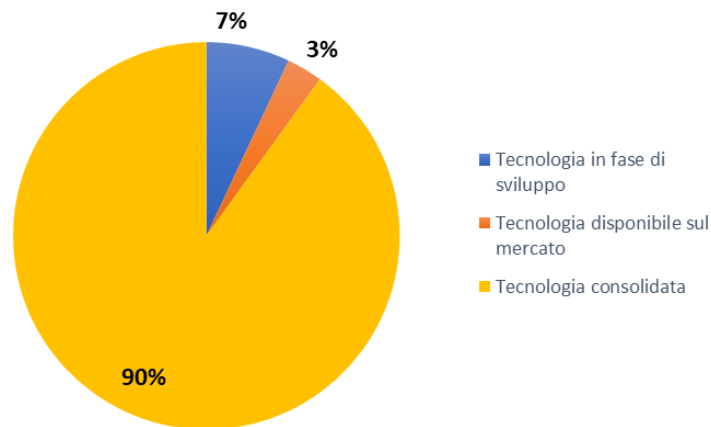
Un'altra criticità, già espressa nelle precedenti fasi di popolamento, è rappresentata dall'assenza di schede tecniche o cataloghi per le tecnologie proposte da numerose aziende. Laddove possibile, si è provato ad instaurare un primo contatto con fornitori di tecnologie e i progetti di ricerca che non sempre è stato possibile finalizzare; al termine del progetto sono state contattate un totale di circa 60 tra fornitori e progetti di ricerca riuscendo a realizzare un totale di 20 interviste, ottenendo comunque un soddisfacente tasso di risposta.

La Figura 4 mostra la suddivisione dei record del database per tipologia di recupero di calore. Questa risulta essere equamente distribuita per le quattro macrocategorie individuate, con la percentuale maggiore attribuibile al recupero di calore per produzione di energia termica (42%) imputabile alla grande diffusione della tecnologia pompa di calore.



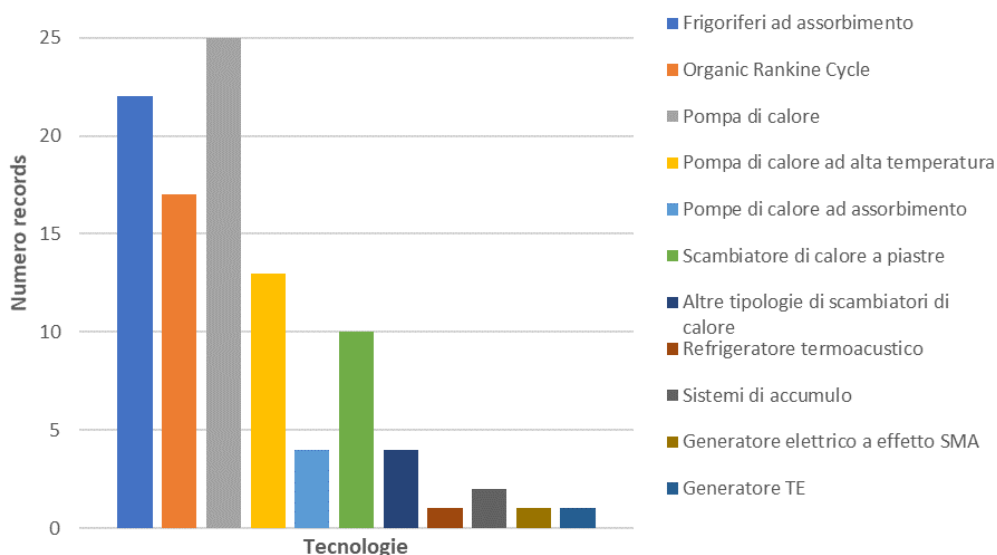
**Figura 4 Risultati del popolamento finale del database: la tipologia di recupero termico**

In Figura 5 è invece riportata la distribuzione delle differenti tecnologie in base allo stato di maturità tecnologica. La quasi totalità delle tecnologie contenute nel database è consolidata. Per tecnologia consolidata si intende una tecnologia che il fornitore tratta e rende disponibile ai clienti da diversi anni; nonostante ciò, il livello di diffusione di tali tecnologie non sempre risulta ampio. Uno degli obiettivi di questo progetto è proprio quello di dare visibilità a queste tecnologie ed incentivarne la diffusione. Inoltre, al fine di cogliere gli aspetti più innovativi del recupero di calore, sono state incluse le tecnologie riscontrate di più recente sviluppo, che rappresentano il 10% dei record totali.



**Figura 5 Risultati del popolamento finale del database: lo stato di maturità della tecnologia**

Infine, in Figura 6 viene riportata la suddivisione per tecnologie. È possibile constatare come le pompe di calore (25%), i frigoriferi ad assorbimento (22%), gli ORC (17%), le pompe di calore ad alta temperatura (13%) e gli scambiatori di calore a piastre (10%) siano le tecnologie maggiormente rappresentate.



**Figura 6 Risultati del popolamento finale del database: le tecnologie identificate**

Rispetto al precedente stato di popolamento del database, la versione finale è stata estesa non solo in termini quantitativi ma soprattutto in termini di varietà di tecnologie, includendo anche aspetti innovativi.

Si ritiene interessante rilevare come ORC, pompe di calore, frigoriferi ad assorbimento e scambiatori di calore a piastre rappresentino una parte rilevante dei record contenuti nel database. Tale aspetto è dovuto sicuramente ad un'importante presenza di queste tecnologie sul mercato e alle loro caratteristiche tecniche ed economiche molto interessanti, in quanto, se ben dimensionati, possono generare investimenti con tempi di ritorno molto ridotti.

Una menzione particolare va riservata alle pompe di calore, che, suddivise in pompe di calore "tradizionali", ad alta temperatura e ad assorbimento, rappresentano oltre il 40% dei record. La suddivisione in pompe di calore "tradizionali" e ad alta temperatura è basata sulla temperatura di output raggiungibile. In letteratura è possibile trovare differenti classificazioni come, ad esempio, quella proposta da [3] che suddivide le pompe di calore in tradizionali (<80°C), alta temperatura (<100°C) ed altissima temperatura (>100°C). Vista l'attuale evoluzione tecnologica, che ha consentito di innalzare sempre di più la temperatura massima raggiungibile,

nel database si è scelto di definire pompe di calore ad alta temperatura quelle in cui è possibile ottenere temperature di output  $T_{out} > 100^{\circ}\text{C}$ . Difatti, ad oggi, temperature tra gli 80 e i 100 °C rappresentano uno standard nel panorama industriale, con alcune tecnologie in grado di raggiungere temperature prossime ai 200°C.

Tra le tecnologie più innovative presenti nel database troviamo:

- Pompe di calore ad alta e altissima temperatura<sup>5 6 7</sup>, in grado di raggiungere temperature di output fino a circa 150-200 °C. Queste, su richiesta, possono essere fornite di un condensatore in grado di produrre vapore senza l'aiuto di un circuito intermedio;
- Sistemi termoacustici<sup>8</sup> per la conversione di energia termica in energia frigorifera per la produzione di freddo industriale; Le potenze frigorifere sono di circa 25 kW - 40 kW con produzione di aria fredda o acqua fredda con temperature fino a -25°C;
- Generatori termoelettrici<sup>9</sup> basati su sistemi solido-liquido con proprietà non correlate per la conversione di energia termica in energia elettrica. Viste le basse potenze in gioco (da  $\mu\text{W}$  a mW), la tecnologia è particolarmente adatta all'alimentazione di sensori per applicazioni IoT (Internet of Things);
- Sistemi micro-ORC modulari basati su espansori volumetrici<sup>10</sup>. Questi sistemi, grazie alla loro modularità (con singoli moduli anche da 3 kW) sono in grado di mantenere la massima efficienza anche ai carichi parziali;
- Generatori a stato solido realizzati con leghe a memoria di forma SMA (Shape Memory Alloys)<sup>11</sup> in grado di convertire calore di scarto ( $T < 100^{\circ}\text{C}$ ) in energia elettrica sfruttando l'effetto SME (Shape Memory Effect).

### 3.4 Modalità di utilizzo del database

In questo paragrafo vengono descritte le modalità di consultazione del database nella sua versione Access, destinata alla consultazione da parte delle utenze esterne. La creazione di una versione Access del database è stata condotta con l'obiettivo di realizzare uno strumento user friendly che potesse essere facilmente interrogabile.

Così come la struttura e le query, anche la versione Access del database, e quindi la sua modalità di utilizzo, non hanno subito variazioni rispetto a quanto presentato nella precedente annualità (LA3.22, alla quale si rimanda per maggiori informazioni). Si riportano in breve le informazioni necessarie per l'utilizzo di questa versione finale del database.

All'apertura del file Access, viene mostrata automaticamente all'utente una schermata principale, riportata in Figura 7, in cui viene brevemente descritto il database, il suo obiettivo e la sua struttura e ne vengono fornite le modalità di utilizzo.

---

<sup>5</sup> <https://www.turboden.com>

<sup>6</sup> <http://highlift.olvondotech.no>

<sup>7</sup> <https://www.spheat.de/?lang=en>

<sup>8</sup> <https://www.soundenergy.nl>

<sup>9</sup> <http://uncorrelated.uji.es>

<sup>10</sup> <https://www.kaymacor.com>

<sup>11</sup> <https://www.exergyn.com>

## Database di Tecnologie

Questo database nasce come strumento finalizzato a supportare le aziende per incrementare il tasso di recupero e riutilizzo di calore di scarto a basse e bassissime temperature (< 250°C). In tale banca dati sono presenti informazioni le tecnologie esistenti e in fase di sviluppo per il recupero di cascami termici di scarto raccogliendo informazioni provenienti da differenti fonti come articoli scientifici, report di progetti già realizzati, interviste con fornitori di tecnologie e cataloghi.

Ad ogni riga del database corrisponde una tecnologia di recupero di calore. Le diverse informazioni raccolte sono organizzate in cinque macrocategorie: identificazione, fonte, fornitore di tecnologie, informazioni sulla tecnologia, altre informazioni. L'utente può consultare il database secondo le due tipologie di utilizzo previste in base alle informazioni disponibili al momento della consultazione dello stesso:

### A. Conoscenza delle caratteristiche del calore di scarto

L'utente, in seguito all'identificazione del calore di scarto e alla definizione delle sue caratteristiche (temperatura e potenza termica disponibile), può consultare il database in cerca di tecnologie utili al riutilizzo del flusso termico considerato.

Ricerca dal calore di scarto

### B. Informazioni sulla tipologia di recupero

L'utente, nel caso avesse già individuato la tipologia di recupero o la tecnologia da adottare, può ricercare informazioni più dettagliate sulla specifica tecnologia o sulle altre tecnologie adatte alla tipologia di recupero da approfondire.

Ricerca per tipologia di recupero

Figura 7 Menù principale visualizzabile all'apertura del database in Access

Cliccando sul pulsante "Ricerca dal calore di scarto" e "Ricerca per tipologia di recupero" (visibili in Figura 7) si ottiene l'apertura automatica delle maschere di ricerca corrispondenti alle due modalità di consultazione previste, descritte nel paragrafo precedente. In particolare, è possibile consultare il database tramite la modalità di ricerca A, partendo dalla conoscenza delle caratteristiche del calore di scarto (Figura 8), e la modalità di ricerca B, dedicata all'ottenimento di ulteriori informazioni sulla specifica tipologia di recupero termico (Figura 9).

### A- Ricerca dal calore di scarto

Temperatura del calore disponibile

Potenza termica in ingresso

Tutti

ID_tecnologi	ID_fonte	Tipologia fonte	Anno	Riferime	Tipologia di	Destinazione recu	Tecnologia	Descrizione della tec	Stato di mat	Campi di Applicazi	Modello	Fluido vettore	Temperatura di
1	1	Intervista	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Sistemi micro-ORC per la produzione di energia elettrica dal	Tecnologia consolidata	Recupero a bassa temperatura, solare termico, caldaie a	LT	Acqua	70-110
2	1	Intervista	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Sistemi micro-ORC per la produzione di energia elettrica dal	Tecnologia consolidata	recupero calore a media temperatura(fumi)	MT	Acqua pressurizzata-olio diatermico	110-200
3	1	Intervista	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Sistemi micro-ORC per la produzione di energia elettrica dal	Tecnologia in fase di sviluppo	recupero su motori a combustione interna	HT	Olio diatermico	200-300
4	2	Intervista	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Sistemi ORC con turbina radiale centrifuga	Tecnologia consolidata	Recupero a valle di turbine a gas, recupero di calore	-	Olio diatermico, acqua, vapore	90-300
5	3	Intervista	2020	Italia	Produttore	Scambio termico	Scambiatori di calore	Produttori di scambiatori di calore di varia natura e materiali	Tecnologia consolidata	Applicazioni in molti settori industriali (tessile, caseario,	-	Non sono previsti particolari limiti	Non sono previsti particolari limiti
6	4	Intervista	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia termica	pompe di calore ad assorbimento	Pompe di calore indirect fired	Tecnologia consolidata	Condizionamento edifici, riscaldamento	-	Acqua pressurizzata-olio diatermico	150-210 °C per ac pressurizzata180 °C per olio diater
7	4	Intervista	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia frigorifera	frigoriferi ad assorbimento	Absorbitori Power Fluid Robur (indirect Fired) ovvero refrigeratori	Tecnologia consolidata	Industria metallurgica, industria agro	Unità Power Fluid disponibili in 3	Acqua pressurizzata-olio diatermico	150-210 °C per ac pressurizzata180 °C per olio diater
8	5	Catalogo	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Moduli ORC per recupero di cascami termici su piccola scala	Tecnologia consolidata	I moduli ORC della serie ULH disponibili in una gamma di	ZE-30-UHL	Acqua calda	≥ 94
9	5	Catalogo	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Moduli ORC per recupero di cascami termici su piccola scala	Tecnologia consolidata	I moduli ORC della serie ULH disponibili in una gamma di	ZE-40-UHL	Acqua calda	≥ 94
10	5	Catalogo	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Moduli ORC per recupero di cascami termici su piccola scala	Tecnologia consolidata	I moduli ORC della serie ULH disponibili in una gamma di	ZE-50-UHL	Acqua calda	≥ 94
11	5	Catalogo	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Moduli ORC per recupero di cascami termici su piccola scala	Tecnologia consolidata	I moduli ORC della serie ULH disponibili in una gamma di	ZE-100-UHL	Acqua calda	≥ 95
12	5	Catalogo	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Moduli ORC per recupero di cascami termici su piccola scala	Tecnologia consolidata	I moduli ORC della serie LT, disponibili in una gamma di	ZE-75-LT	Acqua surriscaldata pressurizzata	≥ 160

Figura 8 Maschera di ricerca A – Ricerca dal calore di scarto



Figura 9 Maschera di ricerca B – Ricerca per tipologia di recupero

All’apertura delle maschere di ricerca verranno mostrati tutti i record contenuti nel database. Interrogando il database con differenti criteri previsti, i record verranno filtrati in accordo con i parametri inseriti.

Per fornire un esempio più pratico dell’utilizzo del database, possiamo immaginare di essere un Energy Manager di un’azienda alla ricerca di possibili tecnologie per lo sfruttamento di un flusso di calore di scarto di cui ipoteticamente l’azienda dispone. L’Energy Manager può consultare il database utilizzando la query di tipo A “Conoscenza delle caratteristiche del calore di scarto”. Ad esempio, impostando come "Temperatura del calore disponibile" l’intervallo  $T \leq 100^{\circ}\text{C}$  e come “Potenza termica di ingresso”  $P_{t} \leq 50\text{kW}_t$ , il database mostra circa 30 record di tecnologie compatibili con i criteri di ricerca inseriti. Un estratto della ricerca è riportato in Figura 10.



**A - Ricerca dal calore di scarto**

Temperatura del calore disponibile  $\leq 100^{\circ}\text{C}$

Potenza termica in ingresso  $P_{\leq 50 \text{ kW}}$

Tutti

ID_tecnologia	ID_fonte	Tipologia fonte	Anno	Riferime	Tipologia di	Destinazione recu	Tecnologia	Descrizione della tec	Stato di matu	Campi di Applicaz	Modello	Fluido vettore	Temperatura di input	Minima tem	Range di temperatura am
1	1	Intervista	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Sistemi micro-ORC per la produzione di energia elettrica da calore di scarto.	Tecnologia consolidata	Recupero a bassa temperatura, solare termico, caldaie a biomassa	LT	Acqua	70-110	70	$\leq 100^{\circ}\text{C}$ ; $100^{\circ}\text{C}<\text{T}\leq 150^{\circ}\text{C}$
5	3	Intervista	2020	Italia	Produttore	Scambio termico	Scambiatori di calore	Produttori di scambiatori di calore di varia natura e materiali.	Tecnologia consolidata	Applicazioni in molti settori industriali (tessile, caseario, ecc.)	-	Non sono previsti particolari limiti	Non sono previsti particolari limiti	-	$\leq 100^{\circ}\text{C}$ ; $100^{\circ}\text{C}<\text{T}\leq 150^{\circ}\text{C}$ ; $150^{\circ}\text{C}<\text{T}\leq 200^{\circ}\text{C}$ ; $200^{\circ}\text{C}<\text{T}\leq 250^{\circ}\text{C}$
24	8	Catalogo	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia termica	Pompa di calore	Compressori serie ZH**KCE R134a Copeland Scroll	Tecnologia consolidata	Recupero di calore dall'acqua del circuito di	ZH40KCE	Acqua	20-40	20	$\leq 100^{\circ}\text{C}$
25	8	Catalogo	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia termica	Pompa di calore	Compressori serie ZH**KCE R134a Copeland Scroll	Tecnologia consolidata	Recupero di calore dall'acqua del circuito di	ZH45KCE	Acqua	20-40	20	$\leq 100^{\circ}\text{C}$
26	8	Catalogo	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia termica	Pompa di calore	Compressori serie ZH**KCE R134a Copeland Scroll	Tecnologia consolidata	Recupero di calore dall'acqua del circuito di	ZH50KCE	Acqua	20-40	20	$\leq 100^{\circ}\text{C}$
27	8	Catalogo	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia termica	Pompa di calore	Compressori serie ZH**KCE R134a Copeland Scroll	Tecnologia consolidata	Recupero di calore dall'acqua del circuito di	ZH64KCE	Acqua	20-40	20	$\leq 100^{\circ}\text{C}$
38	12	Catalogo	2021	Italia	Produttore	Produzione di energia frigorifera	frigoriferi ad assorbimento	Frigoriferi ad assorbimento acqua-bromuro di litio	Tecnologia consolidata	Recupero energetico da acqua calda: biomasse,	SYDHL - SYDHH - SYBDH	Acqua	75-200 °C	75	$\leq 100^{\circ}\text{C}$ ; $100^{\circ}\text{C}<\text{T}\leq 150^{\circ}\text{C}$ ; $150^{\circ}\text{C}<\text{T}\leq 200^{\circ}\text{C}$
43	14	Catalogo	2020	Germania	Produttore	Produzione di energia termica	Pompa di calore	Pompe di calore CombiTherm adionate elettricamente in grado	Tecnologia consolidata	Riscaldamento privato, riscaldamento	-	-	Da -20 a 70°C	-20	$\leq 100^{\circ}\text{C}$
44	15	Catalogo	2019	Norvegia	Produttore	Produzione di energia termica	Pompa di calore	HeatBooster è una pompa di calore industriale ad alta	Tecnologia disponibile sul mercato	Processi industriali di essiccazione, sterilizzazione e	HeatBooster	-	30-110°C	30	$\leq 100^{\circ}\text{C}$ ; $100^{\circ}\text{C}<\text{T}\leq 150^{\circ}\text{C}$
58	19	Catalogo	2020	Italia	Produttore	Scambio termico	Scambiatori a piastre saldobrasate	Gli scambiatori di calore a piastre saldobrasate, serie P e WP,	Tecnologia consolidata	*Riscaldamento, raffreddamento, acqua tecnica o	Serie P e WP	acqua, olio, vapore, freon, altro	da -160 a +195 °C	-160	$\leq 100^{\circ}\text{C}$ ; $100^{\circ}\text{C}<\text{T}\leq 150^{\circ}\text{C}$ ; $150^{\circ}\text{C}<\text{T}\leq 200^{\circ}\text{C}$
59	19	Catalogo	2020	Italia	Produttore	Scambio termico	Scambiatori di calore a piastre saldobrasate	Gli scambiatori di calore a piastre saldobrasate, serie K e F design che	Tecnologia consolidata	Applicazioni nel settore civile e industriale (HVAC,	Serie K e F	acqua, acqua e glicole, idrocarburi, oli, acidi, fluidi alimentari, alcool,	da -20 a +195 °C	-20	$\leq 100^{\circ}\text{C}$ ; $100^{\circ}\text{C}<\text{T}\leq 150^{\circ}\text{C}$ ; $150^{\circ}\text{C}<\text{T}\leq 200^{\circ}\text{C}$
60	20	Catalogo	2020	Turchia	Produttore	Scambio termico	Scambiatori a piastre saldobrasate	Gli scambiatori di calore a piastre saldobrasate caratterizzati da	Tecnologia consolidata	Gli scambiatori di calore a piastre saldobrasate MIT	-	Acqua,olio, acqua glicolata, altro	da -196 a +200 °C	-196	$\leq 100^{\circ}\text{C}$ ; $100^{\circ}\text{C}<\text{T}\leq 150^{\circ}\text{C}$ ; $150^{\circ}\text{C}<\text{T}\leq 200^{\circ}\text{C}$
61	20	Catalogo	2020	Turchia	Produttore	Scambio termico	Scambiatori a fascio tubiero e mantello	Gli scambiatori di calore a fascio tubiero e mantello progettati	Tecnologia consolidata	Gli scambiatori di calore a tubi MIT trovano	-	Acqua calda, acqua surriscaldata, acqua marina olio, vapore,	Fino a 350°C	Non sono previsti particolari	$\leq 100^{\circ}\text{C}$ ; $100^{\circ}\text{C}<\text{T}\leq 150^{\circ}\text{C}$ ; $150^{\circ}\text{C}<\text{T}\leq 200^{\circ}\text{C}$ ; $200^{\circ}\text{C}<\text{T}\leq 250^{\circ}\text{C}$

**Figura 10 Esempio della ricerca nel database di tecnologie secondo la query A impostando come "Temperatura del calore disponibile"  $T \leq 100^{\circ}\text{C}$  e come "Potenza termica di ingresso"  $P \leq 50\text{kW}$ .**

Analogamente, è possibile immedesimarsi nei panni di un Energy Manager che abbia già individuato una possibile tecnologia da implementare e vuole ottenere maggiori informazioni sulla stessa. L'Energy Manager può consultare il database utilizzando la query di tipo B "Informazioni sulla tipologia di recupero tecnologia". Ad esempio, impostando nel campo "Seleziona tipologia di recupero" l'opzione *Produzione di energia elettrica*, in "Seleziona tecnologia" la tecnologia *Organic Rankine Cycle* ed in "Seleziona stato di maturità della tecnologia" l'opzione *Tecnologia consolidata*, il database mostra 16 record di tecnologie compatibili con i criteri di ricerca inseriti. Un estratto della ricerca è riportato in Figura 11.

**B - Ricerca per tipologia di recupero**

Seleziona tipologia di recupero *Produzione di energia elettrica*

Seleziona Tecnologia *Organic Rankine Cycle*

Seleziona stato di maturità della tecnologia *Tecnologia consolidata*

Tutti

ID_tecnologia	ID_fonte	Tipologia fonte	Anno	Riferime	Tipologia di fornitore	Destinazione recu	Descrizione della tecnologia	Campi di Applicazione	Modello	Fluido vettore	Temperatura di input	Minima tem
1	1	Intervista	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Sistemi micro-ORC per la produzione di energia elettrica dal recupero di calore di scarto. Tecnologia modulare con moduli da 3 a 6 kW elettrici.	Recupero a bassa temperatura, solare termico, caldaie a biomassa std	LT	Acqua	70-110	70
2	1	Intervista	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Sistemi micro-ORC per la produzione di energia elettrica dal recupero di calore di scarto. Tecnologia modulare con moduli da 3 a 6 kW elettrici.	recupero calore a media temperatura (fumi <280°), solare a concentrazione, caldaie a biomassa ad olio diatermico	MT	Acqua pressurizzata - olio diatermico	110-200	110
4	2	Intervista	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Sistemi ORC con turbina radiale centrifuga	Recupero a valle di turbine a gas, recupero di calore nel settore industriale (principalmente settori del cemento, vetro, fonderia, ecc.)	-	Olio diatermico, acqua, vapore	90-300	90
8	5	Intervista	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Moduli ORC per recupero di cascamì termici su piccola scala a bassissime temperature	I moduli ORC della serie UHL disponibili in una gamma di potenze da 30 a 100 kW, trovano il loro campo di applicazione ideale in	ZE-30-UHL	Acqua calda	$\geq 94$	94
9	5	Intervista	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Moduli ORC per recupero di cascamì termici su piccola scala a bassissime temperature	I moduli ORC della serie UHL disponibili in una gamma di potenze da 30 a 100 kW, trovano il loro campo di applicazione ideale in	ZE-40-UHL	Acqua calda	$\geq 94$	94
10	5	Intervista	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Moduli ORC per recupero di cascamì termici su piccola scala a bassissime temperature	I moduli ORC della serie UHL disponibili in una gamma di potenze da 30 a 100 kW, trovano il loro campo di applicazione ideale in	ZE-50-UHL	Acqua calda	$\geq 94$	94
11	5	Intervista	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Moduli ORC per recupero di cascamì termici su piccola scala a bassissime temperature	I moduli ORC della serie UHL disponibili in una gamma di potenze da 30 a 100 kW, trovano il loro campo di applicazione ideale in	ZE-100-UHL	Acqua calda	$\geq 95$	95
12	5	Intervista	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Moduli ORC per recupero di cascamì termici su piccola scala a basse temperature	I moduli ORC della serie LT, disponibili in una gamma di potenze da 75 a 561 kW, trovano il loro campo di applicazione ideale in	ZE-75-LT	Acqua surriscaldata pressurizzata	$\geq 160$	160
13	5	Intervista	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Moduli ORC per recupero di cascamì termici su piccola scala a basse temperature	I moduli ORC della serie LT, disponibili in una gamma di potenze da 75 a 561 kW, trovano il loro campo di applicazione ideale in	ZE-100-LT	Acqua surriscaldata pressurizzata	$\geq 160$	160
14	5	Intervista	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Moduli ORC per recupero di cascamì termici su piccola scala a basse temperature	I moduli ORC della serie LT, disponibili in una gamma di potenze da 75 a 561 kW, trovano il loro campo di applicazione ideale in	ZE-150-LT	Acqua surriscaldata pressurizzata	$\geq 160$	160
15	5	Intervista	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Moduli ORC per recupero di cascamì termici su piccola scala a basse temperature	I moduli ORC della serie LT, disponibili in una gamma di potenze da 75 a 561 kW, trovano il loro campo di applicazione ideale in	ZE-175-LT	Acqua surriscaldata pressurizzata	$\geq 160$	160
16	5	Intervista	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Moduli ORC per recupero di cascamì termici su piccola scala a basse temperature	I moduli ORC della serie LT, disponibili in una gamma di potenze da 75 a 561 kW, trovano il loro campo di applicazione ideale in	ZE-200-LT	Acqua surriscaldata pressurizzata	$\geq 160$	160

**Figura 11 Esempio della ricerca nel database di tecnologie secondo la query B impostando nel campo "Seleziona tipologia di recupero" l'opzione *Produzione di energia elettrica*, in "Seleziona tecnologia" *Organic Rankine Cycle* ed in "Seleziona stato di maturità della tecnologia" l'opzione *Tecnologia consolidata***



## 4 Sviluppo definitivo di una metodologia per l'identificazione e l'analisi dei flussi energetici e degli interventi di efficientamento

In questo capitolo del documento di sintesi è contenuta la descrizione della versione definitiva della metodologia da applicare per l'identificazione e l'analisi dei flussi energetici e degli interventi di efficientamento, nonché degli strumenti di rappresentazione dei flussi di calore.

Le principali attività svolte in questa annualità sono state volte allo sviluppo definitivo della metodologia, concludendo il lavoro svolto negli anni precedenti. In particolare, le attività portate avanti nel corso della terza e ultima annualità del progetto sono state:

- Sviluppo definitivo di una metodologia per l'identificazione e l'analisi dei flussi energetici e degli interventi di efficientamento, recependo le risultanze delle interviste e delle sperimentazioni effettuate durante i casi studio;
- Completamento del modulo di valutazione preliminare che, a partire da pochi dati in ingresso, sia in grado di offrire una valutazione dei possibili interventi di recupero termico implementabili nel caso specifico considerato. In particolare, sono stati revisionati i precedenti modelli per le tecnologie ORC, pompe di calore e frigoriferi ad assorbimento, ed è stato esteso il modello di valutazione preliminare alla tecnologia scambiatori di calore. Tale attività è stata supportata dalle informazioni recepite dalle interviste e dai casi di studio;
- Finalizzazione degli strumenti da utilizzare nella rappresentazione dei flussi di calore, per fornire in maniera efficace le diverse informazioni necessarie alla valutazione e alla distinzione delle diverse opportunità di recupero di calore di scarto a bassa temperatura.

Il principale risultato atteso prevede la realizzazione di strumenti definitivi, implementati in fogli di calcolo, e validati grazie alle interviste con fornitori e progetti di ricerca e grazie all'applicazione degli strumenti stessi sui casi di studio individuati.

Inoltre, in appendice nel paragrafo 10.2 "*Sintesi schematica della metodologia per l'identificazione e l'analisi dei flussi energetici e degli interventi di efficientamento*" è riportata una sintesi della stessa.

### 4.1 Le fasi della metodologia

L'approccio metodologico identificato, già definito nel corso della precedente annualità, si compone di cinque step:

1. **Analisi del contesto:** viene analizzato il contesto industriale di riferimento in cui l'azienda opera e ne viene caratterizzato il profilo in termini di fabbisogni energetici (energia elettrica, energia termica ed energia frigorifera), dei principali processi e dei sistemi utilizzati;
2. **Identificazione del calore di scarto:** vengono individuati e caratterizzati i flussi di calore di scarto disponibili al recupero (in termini di temperatura, tipo di fluido, portata, disponibilità). Inoltre, dal match tra calore di scarto e fabbisogni viene effettuata una prima valutazione qualitativa delle tecnologie di recupero termico tecnicamente implementabili;
3. **Valutazione preliminare:** grazie ai dati precedentemente raccolti viene effettuata una prima valutazione sia tecnica sia economica delle possibili tecnologie identificate;
4. **Dimensionamento:** tra le tecnologie preliminarmente valutate, le più promettenti sono oggetto di un'analisi tecnica dettagliata attraverso criteri di dimensionamento specifici per la singola tecnologia;
5. **Supporto decisionale:** le tecnologie analizzate vengono confrontate sotto diversi punti di vista (in particolare, aspetti economici, energetici ed ambientali), e in accordo con i bisogni aziendale viene identificata la soluzione ottimale.

In Figura 12 è riportata la rappresentazione grafica delle fasi della metodologia.



Figura 12 Fasi della metodologia

Gli strumenti realizzati all'interno di questo ampio progetto di ricerca sono in grado di fornire valido supporto in tutte le fasi della metodologia proposta: il database dei casi di studio e le mappe dei principali processi produttivi realizzati da ENEA possono fornire supporto nell'analisi del contesto e nell'identificazione del calore di scarto (fase 1 e 2); il database delle tecnologie realizzato dall'Università di Roma "Tor Vergata" è in grado di offrire un contributo significativo nella prima valutazione delle tecnologie di recupero utilizzabili e nelle successive fasi per la scelta delle tecnologie (fase 3, 4 e 5); i modelli di dimensionamento specifici delle singole tecnologie, realizzati dall'Università dell'Aquila, così come i modelli per l'analisi delle opportunità di utilizzo esterno del calore, realizzati dall'Università di Udine, sono applicabili nella fase di dimensionamento (fase 4); la metodologica per la valutazione delle soluzioni di recupero proposta da ENEA è fondamentale nella fase di supporto decisionale (fase 5).

In parallelo alla realizzazione del database di tecnologie, il focus del gruppo di ricerca dell'Università di "Tor Vergata" è stato rivolto alla fase centrale di questa metodologia: la fase di valutazione preliminare. Le successive fasi della metodologia ("Dimensionamento" e "Supporto decisionale") sono invece oggetto di approfondimento degli altri partner di progetto grazie ad opportuni strumenti realizzati.

Oltre a fornire input fondamentali per gli step successivi, la fase di valutazione preliminare è stata la parte di cui sono state riscontrate le maggiori lacune, rilevate nel corso dell'indagine di letteratura avviata negli anni precedenti ed estesa e terminata in questa annualità.

Nella letteratura esistono diverse metodologie per il dimensionamento dettagliato delle singole tecnologie di recupero termico, ma spesso non risultano essere di facile utilizzo a causa del loro elevato livello di complessità.

Lavori come [4]–[9] per gli ORC, [5], [10] per le pompe di calore, [11]–[15] per i frigoriferi ad assorbimento e [15]–[28] per gli scambiatori di calore, offrono sicuramente delle soluzioni interessanti per le singole tecnologie ma sono ancora molto distanti dal rappresentare un approccio pratico e concreto per gli utilizzatori finali a cui questo lavoro è orientato.

In particolare, per gli ORC in [4] il problema dell'ottimizzazione viene risolto utilizzando un approccio a due livelli che include la selezione dei fluidi, la determinazione delle condizioni operative e il dimensionamento delle apparecchiature; in [6] il modello è risolto utilizzando un algoritmo generico, la cui funzione obiettivo è impostata per soddisfare la potenza elettrica richiesta; in [7] viene utilizzata una metodologia di progettazione e ottimizzazione basata sul metodo "Design to Resource" che considera tutte le variabili di progettazione necessarie e ottimizza sia l'efficienza termodinamica che la fattibilità economica; nel lavoro presentato in [8] la metodologia proposta integra l'ottimizzazione tecnico-economica del ciclo Rankine e l'ottimizzazione della disposizione e dimensionamento della rete di scambiatori di calore. Questo metodo consente di effettuare una completa ottimizzazione tecnico-economica dell'intero sistema; tuttavia, il problema risultante è un complesso sistema non lineare misto-intero, risolvibile solo con un algoritmo ad hoc; infine, in [9] viene proposto un complesso metodo che tiene conto anche di aspetti pratici come limiti e costi dei componenti.

Passando alle pompe di calore, in [5] vengono esaminate le prestazioni e la potenzialità di queste apparecchiature e ne viene dimostrata la competitività in range di temperature molto basse (45-60°C); nello studio [10] viene invece presentato un nuovo prototipo di pompa di calore dotato di un compressore scroll modificato e scambiatore di calore interno. Inoltre, questo documento fornisce un riferimento per lo studio del recupero termico con pompa di calore da flussi termici di scarto di bassa qualità da processi industriali.

Per i frigoriferi ad assorbimento in [11] viene costruito un modello numerico del sistema in cui viene simulato il processo di generazione; in [12] invece, a partire da dati sperimentali, è stato sviluppato un insieme di cinque equazioni che descrivono le proprietà vapore-liquido del sistema ammoniaca-acqua che permettono di studiare i cicli ad assorbimento senza ricorrere a valutazioni iterative; nel lavoro [13] viene proposto un approccio schematico che a partire dalle sole condizioni di ingresso e uscita dei componenti del refrigeratore effettua lo studio a scatola chiusa dell'intero sistema; per ultimo, in [14] viene realizzato il modello di un sistema di refrigerazione ad assorbimento ad acqua e bromuro di litio per poi simulare il processo con un software specifico di simulazione.

Numerosi sono i lavori che coinvolgono gli scambiatori di calore. In [23] viene proposto un nuovo metodo di dimensionamento che supera quelli più datati e che nella fase di ottimizzazione tiene conto anche del tipo di scambiatore e dei materiali più idonei per ogni specifico flusso termico considerato. Altre metodologie come quelle proposte in [16], [17], fanno invece affidamento su metodologie di dimensionamento consolidate basate sulla caratterizzazione del processo di scambio termico. Altri studi come [20], [22]–[24] propongono inoltre metodologie di stima dei costi per la progettazione di scambiatori di calore.

Inoltre, in letteratura sono state riscontrate altre metodologie con un approccio più generale più allineato con quanto si è voluto proporre in questo progetto di ricerca. Ad esempio, la proposta di [15], rivista poi in [29], si pone l'obiettivo di definire un processo generale per l'identificazione e la successiva combinazione di sorgenti e utilizzatori di flussi. Il problema di queste metodologie è che di fatto sono eccessivamente generiche e non considerano le differenti tecnologie disponibili per il recupero termico.

Allo stesso modo in [30] viene proposto un approccio che non fornisce una vera e propria metodologia strutturata bensì si limita ad introdurre un'analisi di fattibilità delle varie tecnologie basandosi sostanzialmente sui range di temperatura applicabili.

Lavoro più allineato con quanto si vuole proporre in questa sede è l'approccio proposto da [31] che fornisce le indicazioni e i passi generali da seguire per un dimensionamento di primo tentativo del sistema di recupero termico. Di contro però vengono prese in considerazione solo alcune tecnologie di recupero come gli ORC e i sistemi ad assorbimento, tralasciando quindi scambiatori di calore e pompe di calore.

Di interesse la presenza in rete di tool realizzati da aziende specializzate nella produzione delle tecnologie per il recupero di calore, che ne permettono la selezione in maniera semplice e intuitiva. A partire da un ridotto numero di dati, in tool come "The Heat Pump Check"<sup>12</sup> di De Kleijin Energy Consultants & Engineers, "Heat Pump eCalculator"<sup>13</sup> di GEA e "Energy Cost Calculator for Commercial Heat Pumps"<sup>14</sup> del sito del Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti d'America per le pompe di calore, "HEXpert"<sup>15</sup> di Alfa Laval, "Configuratore scambiatori a piastre"<sup>16</sup> di Cordivari e "Calcolo scambiatore"<sup>17</sup> di Techno System per gli scambiatori di calore a piastre, è possibile individuare la tecnologia più adatta tra quelle presenti nei cataloghi ed è possibile quindi valutarne le caratteristiche tecniche.

Sebbene tali strumenti siano estremamente affidabili, e sono anche risultati utili in questo progetto di ricerca per la fase di validazione degli strumenti, il limite di questi tool è quello di non essere integrati in un unico sistema, il che ne rende difficile l'utilizzo congiunto. Inoltre, quelli costruiti da fornitori di tecnologia specifici, si limitano a mostrare ovviamente le sole tecnologie prodotte dagli stessi, non permettendo quindi di avere una visione globale di ciò che offre il mercato.

In conclusione, sebbene siano già presenti in letteratura diverse metodologie per la valutazione della convenienza del recupero termico in ambito industriale, risulta comunque assente un criterio unico e ben

---

<sup>12</sup> [http://tools.industrialheatpumps.nl/warmtepompwijzer/EN\\_index.html](http://tools.industrialheatpumps.nl/warmtepompwijzer/EN_index.html)

<sup>13</sup> <https://www.gea.com/it/articles/heat-pump/savings-calculator.jsp>

<sup>14</sup> <https://www.energy.gov/eere/femp/energy-cost-calculator-commercial-heat-pumps-54-20-tons>

<sup>15</sup> <https://www.alfalaval.it/prodotti/scambio-termico/configuratore-scambiatore-di-calore/strumento-selezione-scambiatore-calore/>

<sup>16</sup> <https://www.cordivari.it/scambiatori>

<sup>17</sup> <https://www.techno-system.it/it/strumenti/calcolo-scambiatore/>

strutturato che possa fungere da reale supporto a tutte le aziende che vogliono prendere in considerazione tali opportunità, soprattutto nelle fasi di valutazioni preliminari.

Per superare tale lacuna, si è ritenuto indispensabile proporre un modello per la valutazione preliminare che, utilizzando pochi dati di input, possa fornire una panoramica chiara e completa delle tecnologie di recupero termico applicabili per lo specifico caso di studio considerato, fornendo inoltre degli strumenti tecnici ed economici per valutarne la reale applicabilità.

L'idea è quella di sviluppare uno strumento, tramite foglio di calcolo, da mettere a disposizione delle aziende, che deve risultare essere di facile utilizzo per l'utente finale a prescindere dal suo livello di conoscenza delle tecnologie e dei processi coinvolti. La volontà del gruppo di ricerca è che questo strumento possa essere perfettamente integrabile con gli altri gli strumenti di efficienza energetica comunemente utilizzati dalle aziende. Ad esempio, grazie alla tipologia di dati richiesti, esso può rappresentare un valido supporto per un'azienda nella ricerca delle opportunità di efficientamento durante la conduzione di una diagnosi energetica ai sensi del decreto legislativo 102/2014 o nell'ambito di un sistema di gestione dell'energia.

Infine, in chiusura di questo paragrafo, viene riportata una tabella di sintesi (Tabella 14) con gli articoli ed i riferimenti più rappresentativi analizzati in questa fase dello studio; per ogni lavoro è riportato il riferimento, le tecnologie considerate e una breve descrizione dell'approccio impiegato.

**Tabella 14 Riepilogo delle metodologie più rappresentative riscontrate in letteratura con riportato riferimenti, tecnologia e approccio dello studio**

<b>Titolo</b>	<b>Rif.</b>	<b>Tecnologia</b>	<b>Approccio</b>
<i>Generic Superstructure Synthesis of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery in Industrial Processes</i>	[4]	ORC	Rassegna delle metodologie esistenti per la selezione della migliore architettura dell'impianto e proposta di un nuovo metodo
<i>Low Grade Waste Heat Recovery Using Heat Pumps and Power Cycles</i>	[5]	ORC e pompe di calore	Confronto tra le tecnologie di recupero del calore
<i>Study of Waste Heat Recovery Potential and Optimization of the Power Production by an Organic Rankine Cycle in an FPSO Unit</i>	[6]	ORC	Metodo di sintesi della configurazione tramite algoritmo genetico
<i>A Novel Design Methodology for Waste Heat Recovery Systems Using Organic Rankine Cycle</i>	[7]	ORC	Metodologia di progettazione che mira ad ottenere il miglior utilizzo delle risorse
<i>A Systematic Methodology for the Techno-Economic Optimization of Organic Rankine Cycles</i>	[8]	ORC	Metodologia per l'ottimizzazione tecnico-economica che integra l'ottimizzazione della disposizione e del dimensionamento degli scambiatori di calore dell'impianto
<i>A Comprehensive Design Methodology of Organic Rankine Cycles for the Waste Heat Recovery of Automotive Heavy-Duty Diesel Engine</i>	[9]	ORC	Metodologia di progettazione che considerando diversi layout del ciclo valuta la migliore fonte di calore e il fluido di lavoro più idoneo
<i>Experimental Exergy and Energy Analysis of a Novel High-Temperature Heat Pump with Scroll Compressor for Waste Heat Recovery</i>	[10]	Pompe di calore	Metodologia di progettazione, sviluppo e analisi di nuovi sistemi prototipo
<i>Modeling and Analysis of an Ammonia-Water Absorption Refrigeration System Utilizing Waste Heat with Large Temperature Span</i>	[11]	Frigoriferi ad assorbimento	Sviluppo di un modello numerico del sistema in cui viene simulato il processo
<i>Simple Functions for Fast Calculations of Selected Thermodynamic Properties of the Ammonia-Water System</i>	[12]	Frigoriferi ad assorbimento	Sviluppo di funzioni analitiche che riproducono i dati sperimentali delle proprietà termodinamiche del sistema
<i>A General Thermodynamic Framework for Understanding the Behaviour of Absorption Chillers</i>	[13]	Frigoriferi ad assorbimento	Sviluppo di un metodo di analisi del sistema e del suo ciclo termodinamico
<i>Optimal Match between Heat Source and Absorption Refrigeration</i>	[14]	Frigoriferi ad assorbimento	Modellazione e simulazione del ciclo attraverso il software Aspen Plus
<i>A Decision Support System for Waste Heat Recovery in Manufacturing</i>	[15]	Scambiatori di calore	Metodologia generale per valutare la compatibilità dello scambiatore con i flussi termici di scarto
<i>Heat exchanger design based on economic optimisation</i>	[16]	Scambiatori di calore	Ottimizzazione della progettazione tramite algoritmo genetico

<i>Cost estimation and energy price forecasts for economic evaluation of retrofit projects</i>	[17]	Scambiatori di calore	Sintesi dei metodi più comuni di stima dei costi
<i>An extended grid diagram for heat exchanger network retrofit considering heat exchanger types</i>	[18]	Scambiatori di calore	Selezione del tipo idoneo di scambiatore di calore in base all'intervallo di temperatura
<i>Product and process design principles: synthesis, analysis and evaluation</i>	[19]	Scambiatori di calore	Preselezione del materiale in base all'intervallo di temperatura e funzioni di costo per diverse tipologie di scambiatore di calore
<i>Development of Cost Correlations for the Economic Assessment of Power Plant Equipment</i>	[20]	Pompe di calore e scambiatori di calore	Analisi delle correlazioni dei costi disponibili e proposta di nuovi modelli di correlazione
<i>Approximate design and costing methods for heat exchangers</i>	[21]	Scambiatori di calore	Metodi approssimativi di progettazione e determinazione dei costi (C-value method)
<i>Heat exchanger networks synthesis considering the rigorous equipment design and distinct parameters for capital cost estimation</i>	[22]	Scambiatori di calore	Proposta di un nuovo metodo a due livelli per la progettazione ottimale degli scambiatori di calore
<i>Heat exchanger network retrofit with heat exchanger and material type selection: a review and a novel method</i>	[23]	Scambiatori di calore	Selezione del tipo di scambiatore, analisi dei diversi metodi di stima dei costi disponibili ed elaborazione di un nuovo metodo
<i>Cost Effective Heat Exchanger Network Design with Mixed Materials of Construction</i>	[24]	Scambiatori di calore	Funzioni di costo scambiatori a fascio tubiero
<i>Cost Analysis of Heat Exchangers</i>	[25]	Scambiatori di calore	Funzioni di costo specifico per differenti tipologie di scambiatore costruiti con differenti materiali.
<i>Optimal heat exchanger network synthesis with the detailed heat transfer equipment design</i>	[26]	Scambiatori di calore	Dimensionamento scambiatore di calore e confronto con due esempi tratti da letteratura.
<i>Chemical Engineering Design, vol. 6</i>	[27]	Scambiatori di calore	Manuale di design di componenti di processi industriali
<i>Process Heat Transfer</i>	[28]	Scambiatori di calore	Manuale sullo scambio termico e sul dimensionamento degli scambiatori di calore
<i>Industrial Waste Heat Recovery: A Systematic Approach</i>	[29]	Metodologia generale	Metodologia generale per la selezione dei sistemi di recupero più idonei
<i>Heat Recovery Opportunities in UK Industry</i>	[30]	Metodologia generale	Metodologia generale per valutare il potenziale delle diverse tecnologie
<i>Evaluating the Potential of Process Sites for Waste Heat Recovery</i>	[31]	ORC e Frigoriferi ad assorbimento	Metodologia supportata da modelli matematici semplificati delle tecnologie in analisi per valutarne le potenzialità di recupero termico

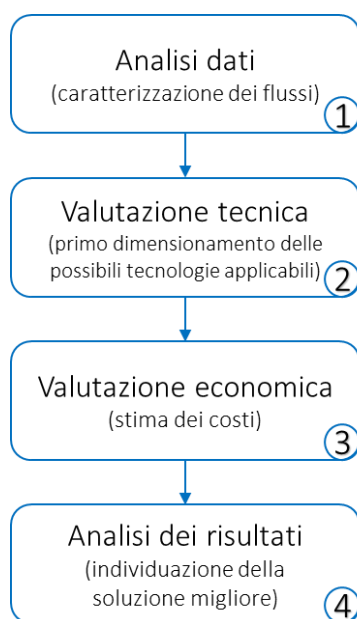
## 4.2 Modulo di valutazione preliminare

In questo paragrafo vengono descritte le attività e gli strumenti realizzati al fine di produrre uno strumento di valutazione preliminare di tecnologie di recupero di calore.

Il primo passo, già presentato nella scorsa annualità, è stato quello di definire le fasi coinvolte in questo processo di valutazione. L'approccio si divide in quattro step (Figura 13):

1. **Analisi dati** - La prima fase nella valutazione preliminare prevede l'analisi dei dati precedentemente raccolti nelle prime fasi della metodologia circa la individuazione dei flussi di calore di scarto di cui si dispone e dei fabbisogni energetici dell'impianto (fabbisogno di energia elettrica, termica e di raffreddamento del sito). Per ogni flusso energetico è necessario raccogliere informazioni circa le caratteristiche termodinamiche, la distribuzione temporale (ai fini della valutazione dell'eventuale matching tra disponibilità e domanda) e la tipologia di fluidi coinvolti (informazione necessaria oltre che alla stima di tutte le altre grandezze come calore specifico e densità, ma anche eventuale tossicità, infiammabilità o corrosività). Altri dati da utili da raccogliere sono: dati anagrafici del sito quali localizzazione geografica (per la determinazione dei parametri ambientali), orari e giorni di apertura (per valutare le ore effettive di funzionamento); dati relativi all'attuale generazione o approvvigionamento di energia ai fini della stima dell'eventuale risparmio prodotto dal recupero termico (costi dei vettori energetici, parametri prestazionali dei principali sistemi come caldaie e chiller); ulteriori informazioni utili, come vincoli strutturali (rigidezza del layout, spazi limitati).

2. **Valutazione tecnica** - In questa fase si sottopongono ad una prima analisi i dati precedentemente raccolti e, attraverso l'utilizzo di modelli specifici, vengono individuate le tecnologie tecnicamente implementabili e, per ciascuna di esse, viene fornito un primo dimensionamento;
3. **Valutazione economica** - Note le caratteristiche tecniche, per le tecnologie considerate, grazie a specifiche funzioni di costo, viene fornita una prima stima dell'investimento iniziale richiesto;
4. **Analisi dei risultati** - Per tutte le soluzioni analizzate, a seguito delle valutazioni tecniche ed economiche, viene stimata la taglia dell'impianto e calcolata l'energia elettrica, termica e di raffreddamento generabile con ognuno dei flussi termici di scarto a disposizione. Avendo stimato la taglia dell'impianto, l'investimento iniziale e l'energia generabile, sarà possibile procedere al calcolo di indicatori economici dell'investimento, come, ad esempio, il PayBack Period (PBP), utili ad individuare la soluzione migliore tra quelle investigate.



**Figura 13 Fasi principali del modulo di valutazione preliminare**

Lo scopo di questo modello è di fornire una valutazione preliminare, che non è da intendersi esaustiva. La definizione della soluzione migliore in senso assoluto, oltre che a dipendere dai parametri di valutazione dell'azienda, non può prescindere da un'analisi più dettagliata viste le numerose variabili in gioco. Ad esempio, in questa fase, è stato scelto un criterio di tipo economico basato sulla sola valutazione del PBP, che è un parametro particolarmente significativo nel campo industriale. Lo scopo di una valutazione preliminare è quello di individuare, a patto che sussistano le condizioni necessarie, un primo indirizzamento verso le soluzioni maggiormente interessanti e meritevoli di un adeguato approfondimento.

Va specificato però che, a seconda dell'azienda, possono essere utilizzati altri criteri di scelta come, ad esempio, basati sull'entità dell'investimento (particolarmente importante nelle piccole imprese con bassa disponibilità economica), sulla redditività dell'investimento o su parametri ambientali come la massima riduzione di emissioni inquinanti.

Per le fasi di valutazione tecnica ed economica sono stati sviluppati dei modelli ad hoc per le tecnologie più rappresentative nel panorama del recupero di calore in campo industriale.

Per quanto riguarda la scelta delle tecnologie, come suggerito da [32], e come già ampiamente descritto nelle precedenti annualità di ricerca, le tecnologie di recupero possono essere suddivise in quattro categorie (produzione di energia termica, produzione di energia frigorifera, produzione di energia elettrica e scambio termico). Per ciascuna tipologia di recupero, sulla base di analisi della letteratura, è stata scelta la tecnologia più rappresentativa: gli ORC per la generazione di energia elettrica, le pompe di calore per la generazione di



energia termica, i frigoriferi ad assorbimento per la produzione di energia frigorifera e gli scambiatori di calore a piastre per la categoria di scambio termico. Per ciascuna di queste tecnologie sono stati sviluppati dei modelli specifici in grado di fornire, a partire dalle informazioni sul flusso di calore recuperabile, i parametri tecnici ed economici caratteristici più rilevanti.

Si precisa che ai fini del progetto di ricerca, viene considerata innovativa anche una soluzione che tecnologicamente è ormai sufficientemente matura, ma con un basso grado di penetrazione e per la quale manca a livello nazionale know how su: settori industriali potenzialmente beneficiari; strumenti per facilitarne una prima valutazione di fattibilità e convenienza; dati circa prestazioni tecnico-economiche.

Al termine della seconda annualità del progetto di ricerca erano stati sviluppati i modelli delle prime tre tecnologie (ORC, pompe di calore e frigoriferi ad assorbimento). In questa annualità, oltre a rivedere i modelli già sviluppati recependo le risultanze delle interviste e delle applicazioni sui casi di studio, il modulo è stato esteso anche agli scambiatori di calore a piastre.

Per lo sviluppo di questi modelli, e quindi per ciascuna tecnologia, è stata seguita la stessa procedura già delineata nell'annualità precedente.

In questo paragrafo, per quanto riguarda i modelli relativi a ORC, pompe di calore e frigoriferi ad assorbimento, così come la fase di validazione degli stessi, ci si limiterà a fornire le caratteristiche principali, evidenziando gli aggiornamenti che sono stati effettuati in questa annualità. Per approfondimenti circa la realizzazione di questi modelli e la loro fase di validazione si rimanda alla LA 3.22, in cui sono dettagliatamente descritti. Si dedicherà, invece, un paragrafo più approfondito agli scambiatori di calore a piastre, in quanto sono stati oggetto di questa annualità.

#### 4.2.1 Generazione di energia elettrica: ORC

Il modello di valutazione preliminare per la tecnologia ORC è basato su dati tecnici raccolti riguardanti moduli ORC per la generazione di energia elettrica a partire da fonti termiche a bassa temperatura, realizzati da diversi produttori nazionali ed internazionali, per un totale di 40 unità. Per ogni modulo, laddove disponibili, sono state raccolte informazioni su: produttore, modello, potenza termica in ingresso ( $P_t$ ), potenza elettrica in uscita ( $P_e$ ), range di temperatura del fluido vettore in ingresso, temperatura del fluido vettore in uscita, portata elaborata, tipologia di fluido vettore, tipologia di fluido di lavoro, rendimento.

Dall'analisi dei dati raccolti, è stata riscontata una relazione lineare significativa tra la potenza elettrica generata e la potenza termica in ingresso al modulo. È stata condotta un'analisi di regressione lineare riportata graficamente in Figura 14.

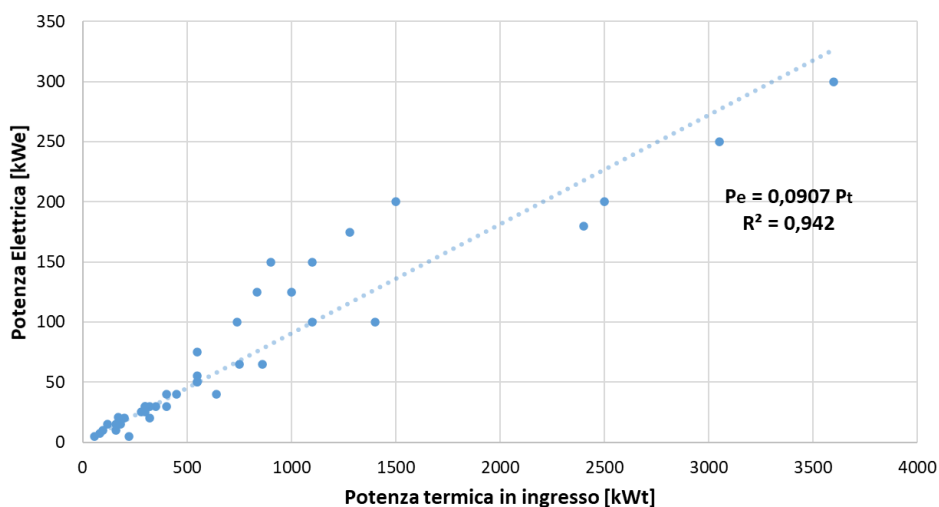


Figura 14 Relazione lineare tra potenza termica in ingresso e potenza elettrica in output per ORC

La relazione riscontrata è caratterizzata da un alto valore del coefficiente di correlazione ( $R^2 = 0,942$ ) e da una buona significatività statistica con un valore di p-value pari a  $1,0 \cdot 10^{-25}$ , decisamente inferiore al comunemente ritenuto accettabile di 0,05, corrispondente ad un livello di significatività statistica del 95%. La potenza termica in ingresso ai moduli considerati è variabile tra 55 e 3600 kW<sub>t</sub> mentre la potenza elettrica di output è variabile tra 2,5 e 300 kW<sub>e</sub> per singolo modulo. Pertanto, tali intervalli rappresentano i range di validità di questa relazione, anche se, grazie alle validazioni effettuate con i fornitori di tecnologia, tale relazione può essere ritenuta valida anche per potenze superiori dell'ordine del MW<sub>e</sub>. In Tabella 15 è riportato l'output sintetico dell'analisi di regressione condotta.

**Tabella 15 Output dell'analisi di regressione tra potenza termica in ingresso e potenza elettrica per ORC**

Statistica della regressione	
R multiplo	0,971
R al quadrato	0,942
Osservazioni	40
Equazione	$P_e = 0,0907 P_t$
Valore di significatività	$< 1,0E-25$

Tale relazione sebbene ritenuta affidabile è stata oggetto di correzione grazie alle risultanze delle sperimentazioni di questo modulo. Sebbene la taglia influenzi il rendimento di un ciclo ORC, questo risulta essere significativamente influenzato soprattutto dalla temperatura del fluido vettore in ingresso all'evaporatore. Difatti possono essere individuate diverse classi di rendimento:

- Per temperature del fluido vettore in ingresso tra 70 e 150 °C i valori di efficienza si attestano tra 5-12%;
- Per temperature del fluido vettore in ingresso fino a 200 °C i valori di efficienza si attestano tra 10-18%;
- Per temperature del fluido vettore in ingresso fino a 300 °C i valori di efficienza si attestano tra 16-25%;

Pertanto, si è ritenuto opportuno applicare una correzione alla relazione individuata introducendo dei fattori correttivi per modificare l'efficienza in funzione della temperatura del calore di scarto. In particolare, la relazione è stata ritenuta valida per temperature inferiori ai 150 °C, mentre è stato considerato un incremento dell'efficienza del 25% per temperature comprese tra 150 e 200 °C e un incremento del 50% per temperature tra i 200 e i 250 °C.

Grazie a questa relazione, è possibile determinare una stima della potenza elettrica ottenibile a partire dal flusso termico di scarto. La potenza termica in ingresso al modulo ORC potrà essere stimata grazie alla conoscenza delle caratteristiche del fluido di scarto come portata, calore specifico e differenza di temperatura tra ingresso e uscita del flusso termico (assumendo un opportuno  $\Delta T$  all'evaporatore del modulo ORC).

Determinata la potenza elettrica, è possibile passare alla valutazione dell'energia elettrica generabile su base annuale, considerando le ore effettive di funzionamento tramite le informazioni precedentemente raccolte. Il prodotto tra questa ed il costo dell'energia elettrica fornirà il risparmio lordo annuo. Per il prezzo dell'energia elettrica, qualora non fosse noto, è possibile fare riferimento ai valori forniti dall'Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente (ARERA) circa i prezzi finali per i consumatori industriali suddivisi per fascia di consumo [33].

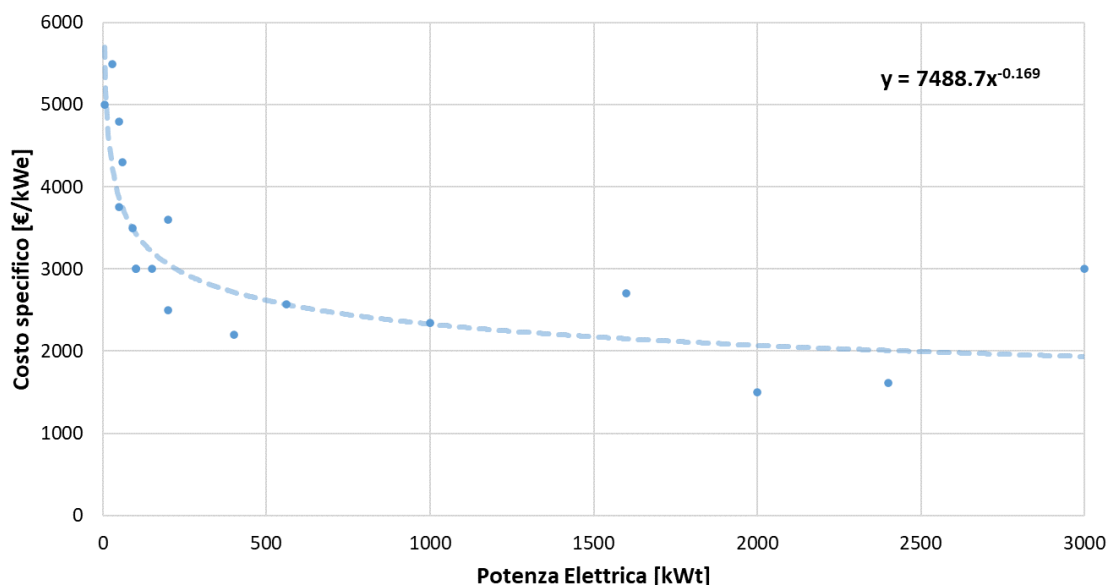
All'interno del modulo, realizzato tramite un foglio di lavoro Excel, per i parametri tecnici come l'efficienza di scambio termico, la temperatura di ingresso dei fluidi, le differenze di temperatura degli scambi termici e i costi dei vettori energetici verrà fornito un valore di primo tentativo sulle base delle risultanze dell'analisi di letteratura. Verrà comunque lasciata sempre la possibilità di poter modificare questi valori in caso di utente

esperto o in presenza di informazioni più dettagliate. Tutte le assunzioni fatte verranno poi descritte nel seguente paragrafo dedicato alla descrizione del foglio di calcolo, su cui tale modello è implementato.

Per la valutazione dell'investimento iniziale necessario all'installazione di un impianto ORC si è proceduto con una raccolta dati riguardante il costo d'investimento in funzione della taglia. La raccolta di tali dati, provenienti da interventi realizzati e rilevati durante le interviste ai fornitori di tecnologie, ha permesso di individuare una relazione, di tipo esponenziale, tra potenza elettrica e costo specifico d'impianto (Figura 15):

$$c_s = 7488,7 \cdot (P_e)^{-0,169}$$

Tale relazione è stata aggiornata rispetto a quanto riportato nella scorsa annualità, in quanto sono stati aggiunti nuovi dati e sono state recepite le risultanze delle validazioni con fornitori e casi studio. Le interazioni con i fornitori di tecnologie hanno confermato la buona corrispondenza tra i costi rilevati durante le interviste e quelli stimati con la relazione ricavata. È bene precisare come tale relazione si riferisca al costo globale dell'impianto e non al costo del solo modulo ORC.



**Figura 15 Relazione tra costo specifico e potenza elettrica di output per ORC**

Inoltre, in accordo con [34], è stato possibile considerare un costo di gestione e manutenzione pari a 10 € per ogni MWh di energia elettrica generata. Tale valore viene decurtato al risparmio lordo annuo.

Stimato l'investimento iniziale necessario e il risparmio annuo conseguibile, è possibile procedere al calcolo del PBP. Questa procedura viene seguita per ciascuno dei flussi di calore di scarto a disposizione.

Inoltre, sulla base delle validazioni effettuate (per la fase di validazione svolta si rimanda alla LA3.22), sono stati considerati due fattori correttivi, entrambi fissati al valore di 0,9. Essi hanno riguardato: la maggiorazione dell'investimento iniziale relativo a ORC, per tener in conto di altri costi come, ad esempio, quelli di progettazione o relativi a componentistica extra; la riduzione del risparmio annuo, per tenere conto dei possibili disallineamenti tra domanda e offerta (in quanto le ore di funzionamento, quando fornite, rappresentano un valore puramente indicativo).

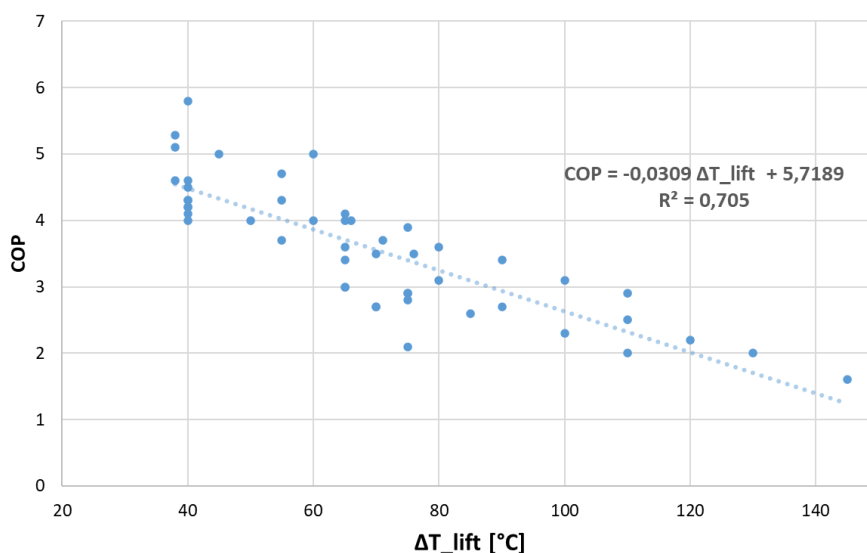
In conclusione, rispetto alla precedente annualità, grazie alle interazioni con fornitori e casi studio, sono state introdotte le correzioni circa la potenza di output, è stata aggiornata la relazione per la stima del costo di investimento e sono stati confermati i fattori correttivi frutto delle validazioni effettuate.

#### 4.2.2 Generazione di energia termica: pompe di calore

Per il modello di valutazione preliminare per la tecnologia pompa di calore sono stati raccolti i dati e le specifiche tecniche di 25 pompe di calore attualmente disponibili in commercio per un totale di 49 punti di funzionamento. Per ogni punto di funzionamento, laddove disponibili, sono state raccolte informazioni su:

produttore, modello, potenza termica in ingresso ( $P_{t,in}$ ), temperatura di evaporazione ( $T_{ev}$ ), temperatura della sorgente fredda ( $T_f$ ), temperatura di condensazione ( $T_{cond}$ ), temperatura della sorgente calda ( $T_c$ ), salto di temperatura nella pompa di calore  $\Delta T_{lift}$ , potenza termica erogabile ( $P_{t,out}$ ), portata elaborata, tipologia di fluido vettore, tipologia di fluido di lavoro, COP.

Dall’analisi dei dati raccolti, sono state valutate le eventuali relazioni tra le variabili in gioco. È stata riscontrata una relazione lineare significativa tra il salto di temperatura della pompa di calore ( $\Delta T_{lift}$ ) e il coefficiente di prestazione COP. È stata condotta un’analisi di regressione lineare riportata graficamente in Figura 16.



**Figura 16 Relazione lineare tra  $\Delta T_{lift}$  e COP per una pompa di calore**

Sia il coefficiente di correlazione ( $R^2 = 0,705$ ), sia la significatività statistica ( $p_{value} = 4,74 \cdot 10^{-14}$ ) risultano essere soddisfacenti. Per quanto riguarda i limiti di applicabilità della relazione individuata, per i punti di funzionamento considerati il  $\Delta T_{lift}$  è variabile tra i 38 e i 145 °C mentre il COP è variabile tra 1,6 e 5,8 (con potenza termica di output dei singoli moduli variabile tra 41 e 15.000 kW<sub>t</sub>). In Tabella 16 è riportato l’output sintetico dell’analisi di regressione condotta.

**Tabella 16 Output dell’analisi di regressione tra  $\Delta T_{lift}$  e COP per una pompa di calore**

Statistica della regressione	
R multiplo	0,840
R al quadrato	0,705
Osservazioni	49
Equazione	COP = -0,0309 $\Delta T_{lift}$ + 5,7189
Valore di significatività	4,74E-14

Il parametro  $\Delta T_{lift}$  di una pompa di calore (pari a  $T_{cond} - T_{ev}$ ) non è comunemente noto a priori. In accordo con i valori ricorrenti in bibliografia, il  $\Delta T_{lift}$  può essere stimato come la differenza tra la temperatura della sorgente calda e quella della sorgente fredda (calore di scarto), maggiorata di 15 °C.

Potendo a questo punto stimare il COP dalla relazione lineare riportata in Tabella 16, calcolando la potenza termica necessaria grazie ai dati precedentemente raccolti è possibile determina la potenza elettrica che deve essere fornita alla pompa di calore come rapporto tra potenza termica e COP. Dalla conoscenza di questi parametri è quindi possibile effettuare un bilancio globale del sistema e valutare l’entità del flusso termico necessario in input, come differenza tra potenza termica in uscita e potenza elettrica in ingresso. Grazie al confronto tra calore necessario e calore di scarto disponibile è possibile stabilire il potenziale grado di copertura del fabbisogno termico.

Lo step successivo prevede la stima dei risparmi conseguibili valutando la situazione attuale per il soddisfacimento del fabbisogno termico individuato. Nel caso di generazione iniziale del flusso termico tramite caldaia a gas sarà necessario risalire al potere calorifico inferiore del gas naturale (in alternativa può essere assunto  $9,5 \text{ kWh/Sm}^3$ ), e sarà necessario considerare un opportuno valore di rendimento di caldaia, in genere compreso tra 0,85 e 0,95. Per il prezzo del gas e dell'energia elettrica, qualora non fossero noti, è possibile fare riferimento ai valori forniti dall'ARERA circa i prezzi finali per i consumatori industriali suddivisi per fascia di consumo [33]. Tutti i parametri sono comunque modificabili in presenza di dati più dettagliati.

Nel caso in cui per la generazione iniziale del flusso termico siano adottate tecnologie non convenzionali, si ritiene necessaria una valutazione della fattibilità e dei risparmi conseguibili più accurata.

Si passa ora alla stima del costo di investimento. I dati rilevati in letteratura non risultano essere sufficienti costruire una relazione statisticamente significativa tra costo specifico ( $\text{€/kW}_t$ ) e parametri dimensionali dell'impianto. I valori rilevati, provenienti principalmente da cataloghi disponibili online, applicazioni e studi in letteratura, riportano costi specifici variabili tra i 150 e i 500  $\text{€/kW}_t$  [35], [36]. Grazie al confronto dei fornitori è stato possibile ottenere delle valutazioni più accurate: il costo specifico si attesta ad un valore compreso tra 200 e 300  $\text{€/kW}_t$  per il solo componente pompa di calore fino ad arrivare a valori superiori a 500  $\text{€/kWh}$  per l'intero sistema.

In virtù dei risultati ottenuti, è stato scelto di assumere un costo specifico di 500  $\text{€/kW}_t$  per potenze di output inferiore a 200  $\text{kW}_t$  e di 400  $\text{€/kW}_t$  per potenze superiori.

Tali risultati, già definiti nel corso della seconda annualità di ricerca, sono stati ulteriormente confermati dalle interazioni con i fornitori oggetto di questa annualità.

Dalla conoscenza del costo specifico per il sistema pompa di calore è possibile calcolare l'investimento richiesto ed il relativo il PBP.

Tale valutazione viene effettuata per ogni combinazione possibile tra flusso termico di scarto e flusso termico a cui fornire calore.

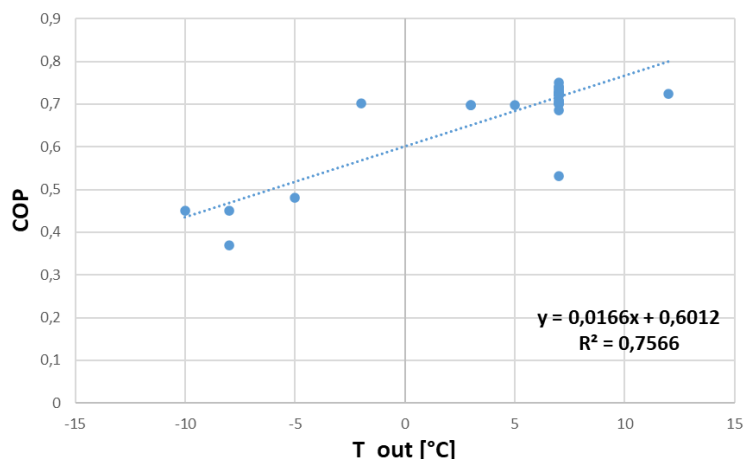
Come per il caso precedente, per la stima dei parametri sono stati utilizzati due fattori correttivi (per la fase di validazione svolta nella precedente annualità si rimanda alla LA3.22) entrambi fissati al valore di 0,9 riguardanti rispettivamente: la maggiorazione dell'investimento iniziale relativo pompe di calore per tener in conto di altri costi come ad esempio i costi di progettazione o componentistica extra; la riduzione del risparmio annuo per tenere conto sia dei costi di gestione e manutenzione sia dei possibili disallineamenti tra domanda e offerta (in quanto le ore di funzionamento, quando fornite, rappresentano un valore puramente indicativo). A seguito delle ulteriori validazioni effettuate in questa annualità interagendo con i fornitori di tecnologie, non si è ritenuto opportuno modificare tali parametri che sono stati pertanto confermati.

In conclusione, rispetto alla precedente annualità, grazie alle interazioni con fornitori e casi studio, non sono state introdotte correzioni.

#### 4.2.3 Generazione di energia frigorifera: frigoriferi ad assorbimento

Così come nei casi precedenti sono stati raccolti i dati tecnici dei cicli frigoriferi ad assorbimento attualmente disponibili in commercio per un totale di 40 unità. Per ogni modulo, laddove disponibili, sono state raccolte informazioni su: produttore, modello, potenza termica in ingresso ( $P_t$ ), potenza frigorifera in uscita ( $P_f$ ), range di temperatura del fluido vettore in ingresso ( $T_{in}$ ), temperatura del fluido freddo in uscita ( $T_{out}$ ), portata elaborata, tipologia di fluido vettore, tipologia di fluido di lavoro, COP.

Dall'analisi dei dati raccolti, sono state valutate le eventuali relazioni tra i parametri caratteristici della tecnologia. È stata riscontrata una relazione lineare significativa tra la temperatura del fluido freddo in uscita ( $T_{out}$ ) e il coefficiente di prestazione COP. È stata condotta un'analisi di regressione lineare riportata graficamente in Figura 17.



**Figura 17 Relazione lineare tra T<sub>out</sub> e COP per frigoriferi ad assorbimento**

Anche in quest’ultimo caso, sia il coefficiente di correlazione ( $R^2 = 0,757$ ), sia la significatività statistica ( $p_{value} = 3,72 \cdot 10^{-14}$ ) risultano essere soddisfacenti. Per quanto riguarda i limiti di applicabilità della relazione individuata, per i punti di funzionamento considerati la T<sub>out</sub> è variabile tra i -10 e i 12 °C mentre il COP è variabile tra 0,37 e 0,75 (con potenza frigorifera di output dei singoli moduli variabile tra 17 e 2.100 kW<sub>f</sub>). In Tabella 17 è riportato l’output sintetico dell’analisi di regressione condotta.

**Tabella 17 Output dell’analisi di regressione tra T<sub>out</sub> e COP per frigoriferi ad assorbimento**

Statistica della regressione	
R multiplo	0,870
R al quadrato	0,757
Osservazioni	43
Equazione	COP = 0,0166 T <sub>out</sub> + 0,6012
Valore di significatività	3,72E-14

Nel caso la soluzione sia tecnicamente implementabile, è possibile utilizzare la temperatura frigorifera (T<sub>out</sub>) per calcolare il COP secondo la relazione lineare  $COP = 0,0166 \cdot T_{out} + 0,6012$ .

In accordo con i dati tecnici individuati e con i risultati della ricerca bibliografica, sono state considerate ammissibili temperature del calore di scarto comprese tra 80 e 120°C. Inoltre, le tipologie dei moduli rilevati permettono di considerare ammissibili soltanto temperature del fluido freddo comprese tra -10 °C e 12°C. Utilizzare valori di T<sub>out</sub> al di fuori del range di valori utilizzato per la costruzione del modello si traduce in estrapolazioni della relazione individuata con ottenimento di valori di COP distanti dalla realtà.

È possibile calcolare la potenza frigorifera richiesta dalla conoscenza di portata, calore specifico e differenza di temperatura tra ingresso e uscita del fluido freddo (dati precedentemente raccolti e in genere facilmente reperibili), e, tramite il COP, si determina la potenza termica necessaria in input all’assorbitore. Per il calcolo della potenza termica a disposizione viene considerato un ΔT minimo tra ingresso e uscita del fluido caldo pari a 15 °C (valore di primo tentativo fornito, che nel modulo è possibile modificare).

Confrontando la potenza termica necessaria con quella a disposizione, si determina la capacità del calore di scarto di soddisfare, totalmente o parzialmente, il fabbisogno di energia di raffreddamento.

Successivamente si passa alla stima dei potenziali risparmi. In questa sede è necessario conoscere l’attuale sistema di generazione utilizzato nell’azienda oggetto di valutazione. Nel caso più comune di generazione iniziale del flusso di raffreddamento tramite frigorifero a compressione, è possibile assumere (se non nota) un’efficienza di quest’ultimo che risulta generalmente compresa tra 3 e 4. Tramite la conoscenza delle ore di funzionamento e del costo dell’energia (in alternativa assunto coerentemente con [33]) è possibile determinare i risparmi conseguibili come la differenza tra i costi ante e post-intervento. In questa sede è

opportuno verificare che l'energia frigorifera prodotta tramite l'assorbitore non ecceda il fabbisogno, in alternativa l'assorbitore risulterebbe sovradimensionato.

Nel caso di generazione iniziale del flusso tramite altre tecnologie non convenzionali sarà necessaria una valutazione più accurata.

Per quanto riguarda la stima del costo di investimento, anche in questo caso la scarsa numerosità dei dati non ha permesso di costruire una relazione statisticamente significativa tra costo specifico ( $\text{€/kW}_f$ ) e parametri dimensionali dell'impianto. Inoltre, le diverse fonti analizzate riportano valori di costo fortemente variabili comprese nel range tra 200 e 700  $\text{€/kW}_f$  [37]–[39]. Questa variabilità, oltre che fortemente influenzata dall'effetto scala, è attribuibile sia alle diverse condizioni operative e logistiche sia all'inclusione o meno degli altri componenti dell'impianto (torre evaporativa, unità di trattamento acqua, piping, service ecc.).

In virtù di queste considerazioni, e grazie alle risultanze del primo ciclo delle interviste con i fornitori di tecnologie, è stato scelto di suddividere il costo specifico dell'intero sistema per impianti frigoriferi ad assorbimento in quattro fasce di costo:

1. 900  $\text{€/kW}_f$  per potenze fino a 100  $\text{kW}_f$
2. 500  $\text{€/kW}_f$  per potenze comprese tra 100 e 200  $\text{kW}_f$
3. 350  $\text{€/kW}_f$  per potenze comprese tra 200 e 1000  $\text{kW}_f$
4. 250  $\text{€/kW}_f$  per potenze superiori ai 1000  $\text{kW}_f$

Tale relazione di costo, già definita nella precedente annualità, è stata seguita da ulteriori approfondimenti ed è stata confermata.

Una volta determinato l'investimento, potrà essere calcolato il PBP come il rapporto tra investimento iniziale ed il risparmio annuo precedentemente calcolato. Tale valutazione viene effettuata per tutte le combinazioni sorgente-utilizzatore possibili.

Come per i precedenti, il modello realizzato prevede l'utilizzo di due ulteriori fattori correttivi entrambi fissati al valore di primo tentativo di 0,9 riguardanti rispettivamente: la maggiorazione dell'investimento iniziale relativo frigoriferi ad assorbimento per tener conto di altri costi come ad esempio i costi di progettazione o componentistica extra; la riduzione del risparmio annuo per tenere conto sia dei costi di gestione e manutenzione sia dei possibili disallineamenti tra domanda e offerta (in quanto le ore di funzionamento, quando fornite, rappresentano un valore puramente indicativo). Allo stato attuale non si è ritenuto opportuno modificare i valori di tali parametri.

In conclusione, rispetto alla precedente annualità, grazie alle interazioni con fornitori e casi studio, non sono state introdotte correzioni.

#### 4.2.4 Scambio termico: scambiatori di calore a piastre

Il modulo di dimensionamento preliminare per gli scambiatori di calore è stato sviluppato prendendo in esame una specifica tipologia: lo scambiatore di calore a piastre. Questa scelta è stata effettuata a seguito di una scrupolosa analisi delle caratteristiche tecniche e operative delle diverse tipologie di scambiatore di calore presenti oggi nel mercato. Rispetto alle altre tipologie di scambiatore, questi rappresentano in genere la soluzione ottimale per il recupero energetico soprattutto nel campo delle basse temperature, in quanto sono caratterizzati da notevole compattezza, alta efficienza, estendibilità, facilità di manutenzione, possibilità di complesse circuitazioni e costi sempre più competitivi.

Il campo di applicazione di temperatura e di pressione tipico degli scambiatori a piastre è generalmente limitato. A seconda del tipo di guarnizione utilizzata, i valori massimi di temperatura e pressione in cui è possibile impiegare con sicurezza gli scambiatori a piastre sono rispettivamente 200-250°C e 25-30 bar. Tuttavia, tali caratteristiche risultano essere perfettamente allineate con i confini del nostro progetto di ricerca, essendo questo focalizzato sul recupero di calore a bassa e bassissima temperatura (<250°C).

Per quanto riguarda le prestazioni queste dipendono da numerosi parametri e scelte operative che caratterizzano lo specifico tipo di funzionamento. In genere il livello di efficienza dello scambio termico per questa tipologia di scambiatore è molto elevato e può andare dal 95% fino ad oltre il 99% con differenze di temperature raggiungibili anche di 1°C.

Entrando nel dettaglio del modello sviluppato, il dimensionamento preliminare degli scambiatori di calore ha visto un procedimento leggermente diverso da quanto sviluppato per le altre tecnologie considerate.

Gli scambiatori a piastre hanno, rispetto ad altre tipologie di scambiatore, la peculiarità di essere gli unici estendibili, ovvero, anche ad installazione eseguita e per qualsiasi motivo, permettono di aumentare o diminuire la potenza di scambio garantendo, in ogni caso, il perfetto funzionamento dell'impianto [40]. Inoltre, le prestazioni di uno scambiatore di calore sono individuate facendo riferimento ad un certo numero di parametri che caratterizzano il tipo di servizio. Questi parametri sono usualmente la lunghezza termica, le portate, le perdite di carico, i coefficienti di sporco, le tenute, la necessità di manutenzione, la tipologia dei fluidi coinvolti, i materiali utilizzati, ecc.

In virtù di questi numerosi fattori non si è ritenuto opportuno cercare di ricostruire una relazione che legasse la potenza di output con i pochi dati disponibili in ingresso relativi al calore di scarto, bensì è stato necessario entrare nel dettaglio delle relazioni di scambio termico.

Per ogni flusso termico inserito nel modulo viene effettuato un confronto tra le caratteristiche del flusso termico di scarto in ingresso e quelle del fabbisogno individuato, determinando la tipologia di processo di scambio termico: nessun processo applicabile, riscaldamento fino alla temperatura richiesta dal fabbisogno o preriscaldamento fino alla massima temperatura ottenibile con il determinato flusso di scarto a disposizione.

I dati di input che vengono inseriti nel modulo sono:

- per il flusso di scarto (fluido caldo) è necessario conoscere la portata ( $\dot{m}_c$ ), il calore specifico ( $c_{p,c}$ ) e la temperatura a cui il flusso è disponibile ( $T_{i,c}$ );
- Per il fabbisogno (fluido freddo) è necessario conoscere la portata ( $\dot{m}_f$ ), il calore specifico ( $c_{p,f}$ ) e le temperature di ingresso e uscita ( $T_{i,f}$ ,  $T_{u,f}$ );
- Disponibilità temporale e tipologia dei due fluidi.

Partendo da questi dati vengono effettuate le prime valutazioni. In particolare, la prima valutazione che viene effettuata è sul confronto tra le temperature di ingresso tra i due fluidi:

$$T_{i,c} > T_{i,f}$$

La possibilità di soddisfare il fabbisogno termico richiesto con il flusso di scarto in esame è limitata dall'aver una temperatura in ingresso del fluido caldo maggiore di quella del fluido freddo. Soddisfatta questa semplice condizione si procede indagando la possibilità di effettuare il completo riscaldamento o il parziale preriscaldamento del flusso considerato. Quindi, la seconda condizione da valutare è sul confronto tra la temperatura di ingresso del fluido di scarto (fluido caldo) e quella di uscita del fluido freddo (fabbisogno):

$$T_{i,c} > T_{u,f}$$

Questa condizione rappresenta il requisito necessario affinché sia possibile soddisfare completamente il fabbisogno richiesto; se non soddisfatta, l'unica opzione possibile è quella di effettuare un preriscaldamento fino alla massima temperatura raggiungibile con lo specifico flusso di scarto.

In entrambi i casi il passaggio successivo è rappresentato dalla valutazione delle potenze termiche scambiate dai due flussi e la verifica della temperatura di uscita a cui si porterebbe il flusso caldo a seguito dello scambio termico.

In relazione alle diverse condizioni soddisfatte si procede in maniera differente:

Caso 1 – Riscaldamento completo fino a  $T_{u,f}$ :



- Se  $T_{i,c} > T_{u,f}$  :
- Calcolo la potenza termica richiesta dal fabbisogno,  
 $Q_f = \dot{m}_f \cdot c_{p,f} \cdot (T_{u,f} - T_{i,f})$  ;
  - Calcolo il calore necessario dal flusso di scarto,  
 $Q_c = Q_f / \eta_{scambiatore}$  ;
  - Calcolo della temperatura di uscita del fluido caldo  
 $T_{u,c} = T_{i,c} - \frac{Q_c}{\dot{m}_c \cdot c_{p,c}}$ .

Caso 2 – Preriscaldamento fino a  $(T_{u,f})_p$  :

- Se  $T_{i,c} > T_{i,f}$  &  $T_{i,c} < T_{u,f}$  :
- Calcolo la temperatura massima raggiungibile dal fluido freddo,  
 $(T_{u,f})_p = T_{i,c} - \Delta T_{min,scambiatore}$  ;
  - Calcolo la potenza termica richiesta dal fabbisogno,  
 $(Q_f)_p = \dot{m}_f \cdot c_{p,f} \cdot [(T_{u,f})_p - T_{i,f}]$  ;
  - Calcolo il calore necessario dal flusso di scarto,  
 $(Q_c)_p = (Q_f)_p / \eta_{scambiatore}$  ;
  - Calcolo della temperatura di uscita del fluido caldo  
 $(T_{u,c})_p = T_{i,c} - \frac{(Q_c)_p}{\dot{m}_c \cdot c_{p,c}}$ .

In questo secondo caso imponiamo la temperatura di uscita del fluido freddo  $(T_{u,f})_p$  in relazione alla massima raggiungibile con lo scambiatore di calore considerato. Generalmente gli scambiatori a piastre possono lavorare con differenze di temperatura molto ridotte, anche fino a 1°C. In questo modello, è stato scelto cautelativamente di fissare il  $\Delta T_{min,scambiatore}$  a 3°C.

A questo punto, qualunque sia la condizione precedentemente soddisfatta, è necessario verificare che la temperatura di uscita del fluido caldo sia maggiore di quella di ingresso del fluido freddo, così da avere un processo termodinamicamente realizzabile.

Caso 3 – Preriscaldamento fino a  $(T_{u,f})_{max}$

- Se  $T_{i,c} > T_{u,f}$  &  $T_{u,c} < T_{i,f}$       o       $T_{i,c} > T_{i,f}$  &  $T_{i,c} < T_{u,f}$  &  $(T_{u,c})_p < T_{i,f}$  :
- Imposto la minima temperatura raggiungibile dal fluido caldo,  
 $(T_{u,c})_{min} = T_{i,f} + \Delta T_{min,scambiatore}$  ;
  - Calcolo la massima potenza termica disponibile associata al flusso di scarto,  
 $(Q_c)_{max} = \dot{m}_c \cdot c_{p,c} \cdot [T_{i,c} - (T_{u,c})_{min}]$  ;
  - Calcolo la potenza termica messa a disposizione dallo scambiatore di calore per il fabbisogno,  
 $(Q_f)_{max} = (Q_c)_{max} \cdot \eta_{scambiatore}$  ;
  - Calcolo la massima temperatura di uscita raggiungibile dal fluido freddo,  
 $(T_{u,f})_{max} = T_{i,f} + \frac{(Q_f)_{max}}{\dot{m}_f \cdot c_{p,f}}$ .

In questo ultimo caso preriscaldiamo il fluido freddo fino alla massima temperatura raggiungibile  $(T_{u,f})_{max}$  sfruttando completamente il flusso di scarto, ovvero portandolo alla temperatura più bassa possibile  $(T_{u,c})_{min}$ .

In Tabella 18 è riportata una sintesi delle casistiche previste dal modello con le diverse condizioni, le funzioni associate e le variabili ricavate necessarie per il successivo dimensionamento.

**Tabella 18 Sintesi delle valutazioni del processo di scambio termico realizzabile.**

Casi	Condizioni	Procedura di calcolo	Variabili in output
Caso 0	$T_{i,c} < T_{i,f}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nessun processo di scambio termico realizzabile.</li> </ul>	
Caso 1	$T_{i,c} > T_{u,f}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Calcolo la potenza termica richiesta dal fabbisogno,  <math>Q_f = \dot{m}_f \cdot c_{p,f} \cdot (T_{u,f} - T_{i,f})</math>;</li> <li>Calcolo il calore necessario dal flusso di scarto,  <math>Q_c = Q_f / \eta_{scambiatore}</math>;</li> <li>Calcolo della temperatura di uscita del fluido caldo  <math>T_{u,c} = T_{i,c} - \frac{Q_c}{\dot{m}_c \cdot c_{p,c}}</math></li> </ul>	$T_{i,c}, T_{u,c}$ $T_{i,f}, T_{u,f}$ $Q_c$ $Q_f$
Caso 2	$T_{i,c} > T_{i,f} \ \& \ T_{i,c} < T_{u,f}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Calcolo la temperatura massima raggiungibile dal fluido freddo,  <math>(T_{u,f})_p = T_{i,c} - \Delta T_{min,scambiatore}</math>;</li> <li>Calcolo la potenza termica richiesta dal fabbisogno,  <math>(Q_f)_p = \dot{m}_f \cdot c_{p,f} \cdot [(T_{u,f})_p - T_{i,f}]</math>;</li> <li>Calcolo il calore necessario dal flusso di scarto,  <math>(Q_c)_p = (Q_f)_p / \eta_{scambiatore}</math>;</li> <li>Calcolo della temperatura di uscita del fluido caldo  <math>(T_{u,c})_p = T_{i,c} - \frac{(Q_c)_p}{\dot{m}_c \cdot c_{p,c}}</math>.</li> </ul>	$T_{i,c}, (T_{u,c})_p$ $T_{i,f}, (T_{u,f})_p$ $(Q_c)_p$ $(Q_f)_p$
Caso 3	$T_{i,c} > T_{u,f} \ \& \ T_{u,c} < T_{i,f}$ o $T_{i,c} > T_{i,f} \ \& \ T_{i,c} < T_{u,f}$ & $(T_{u,c})_p < T_{i,f}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Imposto la minima temperatura raggiungibile dal fluido caldo,  <math>(T_{u,c})_{min} = T_{i,f} + \Delta T_{min,scambiatore}</math>;</li> <li>Calcolo la massima potenza termica disponibile associata al flusso di scarto,  <math>(Q_c)_{max} = \dot{m}_c \cdot c_{p,c} \cdot [T_{i,c} - (T_{u,c})_{min}]</math>;</li> <li>Calcolo la potenza termica messa a disposizione dallo scambiatore di calore per il fabbisogno,  <math>(Q_f)_{max} = (Q_c)_{max} \cdot \eta_{scambiatore}</math>;</li> <li>Calcolo la massima temperatura di uscita raggiungibile dal fluido freddo,  <math>(T_{u,f})_{max} = T_{i,f} + \frac{(Q_f)_{max}}{\dot{m}_f \cdot c_{p,f}}</math>.</li> </ul>	$T_{i,c}, (T_{u,c})_{min}$ $T_{i,f}, (T_{u,f})_{max}$ $(Q_c)_{max}$ $(Q_f)_{max}$

Da qui in avanti nelle formule si farà riferimento, qualunque siano le condizioni soddisfatte (Caso 1, Caso 2 o Caso 3), alle variabili solamente come:  $T_{i,c}, T_{u,c}, T_{i,f}, T_{u,f}, Q_c, Q_f$ .

Determinato quindi il processo realizzabile e le relative temperature e potenze termiche a questo associato si può procedere con il dimensionamento preliminare vero e proprio dello scambiatore di calore.

La superficie di scambio, uno dei driver principali per determinare il costo di uno scambiatore di calore, può essere determinata utilizzando la ben nota equazione di dimensionamento di un generico scambiatore di calore [41]:

$$S = \frac{Q}{K \cdot \Delta T_{ML}}$$

Dove i termini che compaiono rappresentano:

- S, superficie di scambio termico (m<sup>2</sup>);
- Q, potenzialità (kW);
- K, coefficiente di scambio termico globale (kW/m<sup>2</sup> °C);
- $\Delta T_{ML}$ , Differenza di temperatura media logaritmica.

Con  $\Delta T_{ML}$  che può essere calcolato utilizzando la seguente formula [41]:

$$\Delta T_{ML} = \frac{(\Delta T_c - \Delta T_f)}{\ln\left(\frac{\Delta T_c}{\Delta T_f}\right)}$$

In cui  $\Delta T_c = T_{i,c} - T_{u,f}$  e  $\Delta T_f = T_{u,c} - T_{i,f}$ .

Per quanto riguarda il coefficiente di scambio termico globale (K) si è fatto riferimento a dei valori indicativi messi a disposizione dal produttore di tecnologie intervistato Techno System [40]. I valori forniti dal produttore sono riferiti a casi con perdite di carico tipiche, ovvero comprese tra 0,3 e 0,6 bar, e con valori normali dei coefficienti di sporcamento. In particolare, il produttore fornisce un range di riferimento per diverse coppie di tipologie di fluido (tra le più comuni) riportate in Figura 18. Si osservi come per altri fattori di sporcamento K può essere anche notevolmente inferiore.

FLUIDI		K (Kcal/m <sup>2</sup> h°C)
Primario	Secondario	
acqua	acqua	3000 - 6300
alcol etil.	acqua	1000 - 3000
olio sae 10	acqua	450 - 1200
solventi	acqua	1000 - 3000
soluzioni	acqua	900 - 2400
salamoia	acqua	1800 - 3900
aria compr.	acqua	150 - 600
vapore	acqua	2700 - 6300
vapore	olio	450 - 1200
vapore	solventi	900 - 3000
vapore	soluzioni	750 - 2400
NH <sub>3</sub> condens.	acqua	2500 - 5400
freon	acqua	1500 - 3000

**Figura 18 Coefficiente di scambio termico globale indicativo per diverse tipologie di fluido evolvente per cadute di pressione tra 0,3 e 0,6 bar [40]**

Nel modulo, per ogni coppia di tipologia di fluido, il range di fornito, definito rispettivamente per perdite pari a 0,3 e 0,6 bar, è stato mediato e considerato valido in questo range di caduta di pressione.

Le perdite di pressione ( $\Delta p$ ) sono inversamente proporzionale alle dimensioni dello scambiatore di calore a piastre. Nei casi in cui sia accettabile aumentare la caduta di pressione consentita (con costi di pompaggio maggiori), lo scambiatore di calore sarà di dimensioni inferiori e di conseguenza meno costoso.

Inoltre, come previsto generalmente nella progettazione degli scambiatori di calore, per tenere in considerazione della perdita in efficienza di scambio termico dovuta allo sporcamento delle superfici di trasmissione, nel modulo è previsto un coefficiente di sovradimensionamento da applicare alla superficie calcolata. In particolare, è stato considerato tipico un sovradimensionamento compreso tra il 50 e il 100%.

Definita la superficie di scambio termica si può passare alla valutazione economica stimando il costo di investimento, i risparmi conseguibili e quindi il tempo di ritorno dell'investimento.

Per la stima del costo di investimento sono state analizzati numerosi lavori finalizzati a definire delle funzioni di costo per gli scambiatori di calore [20], [22]–[24], [30]. La maggior parte di queste relazioni utilizzano come

variabile di input la sola superficie di scambio attraverso la quale è possibile ottenere una stima veritiera dei costi del componente.

Per la realizzazione di questo modello di valutazione preliminare si è deciso di utilizzare la relazione per il calcolo dei costi fissi di uno scambiatore proposta dall'Università degli Studi dell'Aquila sviluppata all'interno del medesimo progetto di ricerca. L'equazione elaborata ha validità generale ed è frutto dell'interpolazione di numerose relazioni di letteratura. Per maggiori informazioni si rimanda al report relativo alla LA3.25 e LA3.26 di competenza dell'Università degli Studi dell'Aquila

Per quanto riguarda la stima dei risparmi questa viene effettuata valutando i costi pre-intervento evitati grazie all'intervento proposto. In particolare, nel modello è stato scelto di considerare come tecnologia standard per il soddisfacimento del fabbisogno pre-intervento una caldaia a gas naturale, soluzione molto diffusa in ambito industriale. Nel caso di generazione iniziale del flusso tramite altre tecnologie non convenzionali sarà necessaria una valutazione più accurata per il calcolo dei risparmi

$$Costi_{preintervento} = c_{GN} \cdot \frac{E_{termica}}{\eta_{caldaia} \cdot H_{i,GN}}$$

Dove i termini che compaiono rappresentano:

- $c_{GN}$ , costo specifico gas naturale (€/Sm<sup>3</sup>);
- $E_{termica}$ , energia termica prodotta per soddisfare il fabbisogno (kWh/anno);
- $\eta_{caldaia}$ , rendimento precedente sistema di generazione (caldaia);
- $H_{i,GN}$ , potere calorifico inferiore del gas naturale (kWh/Sm<sup>3</sup>).

Stimato l'investimento iniziale necessario e il risparmio annuo conseguibile, è possibile procedere al calcolo del PBP ottenuto rapportando l'investimento iniziale con il risparmio annuo calcolato

Questo procedimento viene effettuato per ogni combinazione possibile tra flusso termico di scarto e flusso termico del fabbisogno.

#### *Validazione del modello e fattori correttivi*

La validazione del modello sviluppato è avvenuta prevalentemente in virtù della disponibilità mostrata dalle aziende fornitrici di scambiatori di calore intervistate. Grazie alle interazioni con le aziende fornitrici di tecnologie è stato possibile confrontare i risultati ottenuti dal modello con soluzioni realmente proposte.

Se dal punto di vista del calcolo parametri tecnici non erano previsti problemi, in quanto sono state utilizzate le classiche equazioni dimensionamento su cui si basano anche gli strumenti di cui dispongono le aziende fornitrici di tecnologie, la fase di validazione è stata indispensabile soprattutto per la stima dei costi di investimento.

I risultati ottenuti grazie a questi confronti hanno mostrato come la funzione utilizzata per la stima dei costi fissi dello scambiatore riesca a stimare, con un buon livello di approssimazione, i costi del componente in condizioni standard (ovvero non considerando condizioni particolari come materiali speciali, perdite di carico eccessivamente basse, ecc.). Al componente scambiatore di calore è imputabile una percentuale del costo totale di impianto che solo raramente supera il 50%. Pertanto, per il calcolo del costo totale del sistema di scambio termico (scambiatore di calore, installazione, altri componenti idraulici, tubature, ecc.) è stato scelto di raddoppiare il costo ottenuto grazie alla relazione precedentemente introdotta.

Tuttavia, al fine di essere ulteriormente cautelativi con la stima dell'investimento, è stato scelto di ricorrere ad un ulteriore fattore correttivo per maggiorare in percentuale il valore del costo ottenuto dall'equazione. Nel modello è stato inserito un fattore correttivo di riferimento impostato ad un valore di primo tentativo del 10 %. Tale valore può essere modificato dall'utente per tenere conto di situazioni particolari, come nel caso di necessità di utilizzo di materiali speciali o di notevole distanza tra fonte di calore e utilizzatore, o ancora, nel caso di situazioni che richiedano un particolare dimensionamento.

Inoltre, così come fatto per le altre tecnologie si è fatto ricorso ancora una volta a un coefficiente correttivo che riduce i risparmi conseguibili con l'intervento proposto. È stato fissato un coefficiente correttivo pari a 0,9 ma, come nel caso precedente, questo può essere modificato dall'utente per tenere conto di specifiche condizioni operative che comportano un aumento della difficoltà gestionale, maggiori costi di pompaggio a causa di perdite di carico elevate o necessità di frequenti opere di manutenzione a causa di utilizzo di fluidi incrostanti o corrosivi.

#### 4.3 Fogli di calcolo e modalità di utilizzo

I modelli descritti precedentemente sono stati implementati in un file Excel, destinato all'utilizzo dell'utente esterno.

Nel seguente paragrafo viene descritto lo strumento su foglio di calcolo Excel come realizzato dal gruppo di ricerca dell'Università di Roma "Tor Vergata". Inoltre, il gruppo di ricerca ha contribuito anche all'integrazione dello stesso modulo nello strumento ENEA, che risulta pertanto descritto nel report relativo alla LA3.20.

Il file Excel è costituito da diversi fogli di calcolo:

- Foglio di calcolo di "Input dati": rappresenta l'interfaccia principale, in cui verranno inserite le informazioni propedeutiche alla valutazione preliminare circa i flussi di calore di scarto e i fabbisogni di energia;
- Foglio di calcolo "ORC": propedeutico alla valutazione preliminare della tecnologia ORC;
- Foglio di calcolo "Pompe di calore": propedeutico alla valutazione preliminare della tecnologia pompa di calore;
- Foglio di calcolo "Frigoriferi ad assorbimento": propedeutico alla valutazione preliminare della tecnologia frigorifero ad assorbimento;
- Foglio di calcolo "Scambiatori di calore a piastre": propedeutico alla valutazione preliminare della tecnologia scambiatori di calore a piastre;
- Foglio di calcolo "Allegati": sezione a disposizione dell'utente per inserire ulteriori informazioni ritenute utili nella valutazione degli interventi di efficientamento.

In Figura 19 è riportato uno screenshot del file Excel sul quale è implementato il modulo di valutazione preliminare sviluppato dal gruppo di ricerca dell'università di Roma "Tor Vergata".

ANAGRAFICA IMPIANTO				INFORMAZIONI GENERALI PER LA COMPILAZIONE DEL MODULO								
AZIENDA:	Nome azienda			1) Ai fini di una corretta valutazione, è necessario attenersi alle unità di misura specificate; 2) se i flussi a disposizione sono minori di quelli presenti nelle tabelle, lasciare vuoti gli spazi superflui; se invece sono superiori, inserire gli ulteriori flussi modificando opportunamente il file; 3) nelle note sono contenute informazioni puramente indicative riguardanti la compilazione della relativa cella; 4) nel caso di domanda di disponibilità temporale discontinua, è opportuno inserire informazioni riguardanti l'andamento nel Foglio "Allegati".								
INDIRIZZO IMPIANTO:	Roma (RM)											
SETTORE INDUSTRIALE:	(es. alimentare, tessile, ecc.)											
ORARIO DI APERTURA:	Dalle ore:	0	Alle ore:									24
GIORNI SETTIMANALI DI APERTURA:	7 giorni su 7											
ORE ANNUALI DI FUNZIONAMENTO:	7200 ore su 8760											

SEZIONE 1: FLUSSI DI CALORE DI SCARTO								
	Provenienza	Tipologia fluido	Disponibilità	Portata [kg/s]	Temperatura [°C]	Pressione [bar]	Calore specifico [kJ/kgK]	Ulteriori informazioni
FLUSSO1	Doruriscaldamento ammoniacale	acqua	100%	5.24	85	2	4.186	-
FLUSSO2	Cogeneratore	acqua	84%	11.11	90	2	4.186	-
FLUSSO3	Cogeneratore	acqua	48%	11.11	35	4	4.186	-
FLUSSO4	Condensatore	acqua	100%	0.6	175	10	4.186	-
FLUSSO5	Fumi di combustione	altre	100%	28.2	200	3	1.1	-
FLUSSO6	Prava	acqua	100%	10.28	40	4	4.186	-

SEZIONE 2: FABBISOGNO DI ENERGIA ELETTRICA DELL'IMPIANTO			
Fabbisogno annuale di energia elettrica [MWh]:	2000		
Domanda di energia elettrica:	100%		
Energia elettrica annua autoprodotta [MWh]:	0		
Costo medio energia elettrica [€/MWh]:	150		
Ulteriori informazioni:	Energia elettrica acquistata totalmente da rete		

SEZIONE 3: FABBISOGNO DI ENERGIA TERMICA DELL'IMPIANTO									
	Tipologia fluido	Domanda	Portata [kg/s]	Temperatura [°C]	Temperatura_in [°C]	Pressione [bar]	Generazione	Calore specifico [kJ/kgK]	Ulteriori informazioni
FLUSSO1	acqua	55%	0.2	90	25	2	Caldo a qar	4.186	Precezza di parturizzazione
FLUSSO2	acqua	50%	4.2	95	75	4	Caldo a qar	4.186	Precezza di parturizzazione
FLUSSO3	acqua	25%	7.1	90	75	3	Caldo a qar	4.186	Cattura
FLUSSO4	acqua	100%	5.5	100	80	3	Caldo a qar	4.186	Storizzazione
FLUSSO5	acqua	100%	0.4	90	70	3	Caldo a qar	4.186	Stagionatura
FLUSSO6	acqua	100%	2	100	70	3	Caldo a qar	4.186	Parturizzazione

SEZIONE 4: FABBISOGNO DI ENERGIA DI RAFFREDDAMENTO DELL'IMPIANTO									
	Tipologia fluido	Domanda	Portata [kg/s]	Temperatura [°C]	Temperatura_in [°C]	Pressione [bar]	Generazione	Calore specifico [kJ/kgK]	Ulteriori informazioni
FLUSSO1	acqua	24%	72.26	7	12	3	Frigorifero a compressione	4.186	Condizionamento attivo
FLUSSO2	acqua	100%	54.22	7	12	4	Frigorifero a compressione	4.186	Raffreddamento macchinari
FLUSSO3	acqua	100%	12.01	7	12	5	Frigorifero a compressione	4.186	Raffreddamento macchinari
FLUSSO4	acqua	100%	13.53	7	12	5	Frigorifero a compressione	4.186	Raffreddamento macchinari
FLUSSO5	acqua	100%	50.2	7	12	3	Frigorifero a compressione	4.186	Condizionamento attivo
FLUSSO6	acqua	100%	2.3	7	12	3	Frigorifero a compressione	4.186	Condizionamento attivo

Figura 19 File Excel sul quale è implementato il modulo di valutazione preliminare

Nei successivi paragrafi verranno descritte le caratteristiche dei singoli fogli, nonché le loro modalità di utilizzo.

### 4.3.1 Foglio di calcolo: input dati

Il foglio di calcolo "Input dati" rappresenta la prima interfaccia dell'utente. Lo scopo di tale foglio è quello di raccogliere i dati necessari alle valutazioni successive.

Il foglio di input dati è organizzato in diverse tabelle. Nella parte superiore del foglio è presente una prima tabella (Figura 20) dedicata alla raccolta di dati anagrafici dell'impianto. Particolarmente importante è il valore delle ore di funzionamento, sui quali si baserà il calcolo dei costi e dei risparmi.

ANAGRAFICA IMPIANTO				
AZIENDA:	Nome azienda			
LOCALITÀ IMPIANTO:	Roma (RM)			
SETTORE INDUSTRIALE:	(es. alimentare, tessile, ecc.)			
ORARIO DI APERTURA:	Dalle ore:	0	Alle ore:	24
GIORNI SETTIMANALI DI APERTURA:	7 giorni su 7			
GIORNI ANNUALI DI APERTURA:	300 giorni su 365			
ORE ANNUALI DI FUNZIONAMENTO:	7200 ore su 8760			

Figura 20 Dati anagrafici dell'impianto

Nelle altre tabelle presenti nel foglio “Input dati”, come mostrato in Figura 21, è necessario inserire i dati riguardanti la caratterizzazione dei flussi di calore di scarto di cui si dispone e dei fabbisogni energetici dell’impianto (fabbisogno di energia elettrica, termica e di raffreddamento del sito).

SEZIONE 1: FLUSSI DI CALORE DI SCARTO								
	Provenienza	Tipologia fluido	Disponibilità	Portata [kg/s]	Temperatura [°C]	Pressione [bar]	Calore specifico [kJ/kgK]	Ulteriori informazioni
FLUSSO 1	Desurriscaldamento ammoniacca	acqua	100%	5.26	85	2	4.186	-
FLUSSO 2	Cogeneratore	acqua	86%	11.11	90	2	4.186	-
FLUSSO 3	Cogeneratore	acqua	46%	11.11	35	4	4.186	-
FLUSSO 4	Condense vapore	acqua	100%	0.6	175	10	4.186	-
FLUSSO 5	Fumi di combustione	altro	100%	38.2	200	3	1.1	-
FLUSSO 6	Prova	acqua	100%	10.28	40	4	4.186	-

SEZIONE 2: FABBISOGNO DI ENERGIA ELETTRICA DELL'IMPIANTO	
Fabbisogno annuale di energia elettrica [MWh]:	2000
Domanda di energia elettrica:	100%
Energia elettrica annua autoprodotta [MWh]	0
Costo medio energia elettrica [€/MWh]	150
Ulteriori informazioni:	Energia elettrica acquistata totalmente da rete

SEZIONE 3: FABBISOGNO DI ENERGIA TERMICA DELL'IMPIANTO									
	Tipologia fluido	Domanda	Portata [kg/s]	Temperatura [°C]	Temperatura_in [°C]	Pressione [bar]	Generazione	Calore specifico [kJ/kgK]	Ulteriori informazioni
FLUSSO 1	acqua	55%	0.2	90	25	2	Caldaia a gas	4.186	Processo di pastorizzazione
FLUSSO 2	acqua	50%	9.2	95	75	4	Caldaia a gas	4.186	Processo di lavaggio
FLUSSO 3	acqua	25%	7.1	90	75	3	Caldaia a gas	4.186	Cottura
FLUSSO 4	acqua	100%	5.5	100	80	3	Caldaia a gas	4.186	Sterilizzazione
FLUSSO 5	acqua	100%	0.4	90	70	3	Caldaia a gas	4.186	Stagionatura
FLUSSO 6	acqua	100%	2	100	70	3	Caldaia a gas	4.186	Pastorizzazione

SEZIONE 4: FABBISOGNO DI ENERGIA DI RAFFREDDAMENTO DELL'IMPIANTO									
	Tipologia fluido	Domanda	Portata [kg/s]	Temperatura [°C]	Temperatura_in [°C]	Pressione [bar]	Generazione	Calore specifico [kJ/kgK]	Ulteriori informazioni
FLUSSO 1	acqua	29%	72.26	7	12	3	Frigorifero a compressione	4.186	Condizionamento estivo
FLUSSO 2	acqua	100%	54.22	7	12	4	Frigorifero a compressione	4.186	Raffreddamento macchinari
FLUSSO 3	acqua	100%	12.01	7	12	5	Frigorifero a compressione	4.186	Raffreddamento macchinari
FLUSSO 4	acqua	100%	13.53	7	12	5	Frigorifero a compressione	4.186	Raffreddamento macchinari
FLUSSO 5	acqua	100%	50.2	7	12	3	Frigorifero a compressione	4.186	Condizionamento estivo
FLUSSO 6	acqua	100%	2.3	7	12	3	Frigorifero a compressione	4.186	Condizionamento estivo

Figura 21 Input dati riguardanti il calore di scarto e i fabbisogni di energia elettrica, termica e frigorifera

#### 4.3.2 Foglio di calcolo: ORC

Il foglio di calcolo ORC è totalmente automatizzato. In funzione dei parametri inseriti nel foglio “Input dati” è in grado di effettuare una valutazione preliminare della tecnologia considerata seguendo il procedimento logico descritto nel paragrafo 4.2.1 “Generazione di energia elettrica: ORC”.

Nella parte superiore del foglio di calcolo, in una specifica tabella come mostrato in Figura 22, sono riportate i parametri assunti propedeutici al calcolo. Per tutti i parametri assunti viene proposto un valore di primo tentativo che, nel caso l’utente sia a conoscenza di informazioni più dettagliate o comunque più rispondenti allo specifico caso considerato, avrà la possibilità di modificare. Per tutti i parametri è presente una breve descrizione e, laddove necessario, delle note per favorirne la corretta interpretazione.

ASSUNZIONI			
Variabile	Valore	Unità di misura	Descrizione
$C_{EE}$	0.15	€/kWh	Costo dell'energia elettrica
$\Delta T_c$	15	°C	Variazione temperatura lato caldo (lato calore di scarto)
$\eta_{elm}$	0.98	-	Rendimento elettromeccanico
$T_{amb}$	25	°C	Temperatura ambiente
$f_{c,ST}$	1	-	Fattore correttivo scambio termico
$f_{c,investimento}$	0.9	-	Valore compreso tra 0 e 1. Se diminuito maggiore l'investimento per tenere costi ulteriori (es. costi progettazione, costi extra non standard, ecc.)
$f_{c,risparmio}$	0.9	-	Valore compreso tra 0 e 1. Se diminuito riduce il risparmio per tenere conto di eventuali non contemporaneità tra flusso di scarto e fabbisogno

Figura 22 Parametri assunti dal modello per la valutazione preliminare di ORC

Tra i parametri assunti troviamo:

- Costo dell'energia elettrica ( $C_{EE}$ ), fissato al valore di primo tentativo di 0,15€/kWh. Tale parametro è necessario per il calcolo dei risparmi;
- Variazione di temperatura del fluido caldo ( $\Delta T_c$ ), fissata al valore di primo tentativo di 15°C. Valore necessario a caratterizzare la potenza termica in ingresso all'ORC;
- Rendimento elettromeccanico ( $\eta_{elm}$ ), fissato al valore di primo tentativo di 0,98. Parametro necessario al calcolo delle perdite di conversione elettromeccaniche;
- Temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), fissata al valore di primo tentativo di 25°C;
- Fattore correttivo per lo scambio termico ( $f_{c,ST}$ ), fissato al valore di primo tentativo di 1. Per fluidi di scarto diversi da acqua, vapore e olio diatermico, sarà necessario un ulteriore scambiatore di calore prima dell'ingresso all'ORC. Inoltre, in alcune situazioni impiantistiche sono presenti distanze considerevoli tra calore di scarto e fabbisogno. In tal caso è opportuno selezionare un fattore correttivo compreso tra 0 e 1 per maggiorare la potenza in input necessaria. Valori tipici sono compresi tra 0,85 e 0,95. Se tali complicazioni non sono presenti, è opportuno lasciare il valore a quello di primo tentativo;
- Fattore correttivo per l'investimento ( $f_{c,i}$ ), fissato al valore di primo tentativo di 0,9. Se diminuito, tale parametro maggiore l'investimento per tener in conto di altri costi come, ad esempio, i costi di progettazione o componentistica extra;
- Fattore correttivo di contemporaneità ( $f_{c,c}$ ), fissato al valore di primo tentativo di 0,9. Se diminuito, tale parametro riduce il risparmio annuo per tenere conto dei possibili disallineamenti tra domanda e offerta.

In virtù dei dati utilizzati per la costruzione dei modelli, per procedere alle fasi successive della valutazione preliminare per la tecnologia ORC dovranno essere soddisfatte alcune condizioni: temperatura del calore di scarto non inferiore a 80°C; potenza elettrica generabile non inferiore a 3 kWe. Il modulo procederà in maniera automatica alla verifica di tali limitazioni e alla successiva valutazione tecnica ed economica della tecnologia ORC. L'operazione verrà ripetuta per ogni flusso di scarto considerato.

Un esempio dell'output visualizzabile dal modulo dove sono contenuti tutti i parametri più significativi della valutazione è riportato in Figura 23.



**VALUTAZIONE PRELIMINARE ORC**

FLUSSO TERMICO DI SCARTO 1	
POTENZA TERMICA INPUT ORC [kWt]:	330.28
POTENZA ELETTRICA PRODOTTA [kWe]:	29.96
ENERGIA ELETTRICA ANNUA [MWh]:	215.68
RISPARMIO ANNUO [€/a]:	29117.21
INVESTIMENTO [€]	140320.69
COSTI DI GESTIONE E MANUTENZIONE [€/a]	2156.83
GUADAGNO NOMINALE [€/a]	26960.38
PAYBACK TIME PBT semplice [anni]	5.20

**Figura 23 Output principale del modulo di valutazione preliminare per la tecnologia ORC**

Inoltre, per ogni valutazione effettuata sarà disponibile una tabella riepilogativa (Figura 24) utile alla rappresentazione dell'intervento tramite diagramma di Sankey (vedi paragrafo 4.4 "Strumenti di rappresentazione di flussi energetici e di interventi di efficientamento").

TABELLA PER SANKEY ORC CON FLUSSO TERMICO DI SCARTO 1		
Provenienza	Destinazione	Valore [kWh/anno]
FLUSSO TERMICO DI SCARTO 1	ORC	2377982.88
ORC	Energia elettrica prodotta	215683.05
ORC	Altre perdite	4401.695
ORC	Energia dissipata al condensatore	2157898.138

**Figura 24 Riepilogo dei flussi energetici coinvolti propedeutici alla realizzazione del diagramma di Sankey per la tecnologia ORC**

#### 4.3.3 Foglio di calcolo: pompe di calore

Il foglio di calcolo pompe di calore è totalmente automatizzato. In funzione dei parametri inseriti nel foglio "Input dati" è in grado di effettuare una valutazione preliminare della tecnologia considerata seguendo il procedimento logico descritto nel paragrafo 4.2.2 "Generazione di energia termica: pompe di calore".

Nella parte superiore del foglio di calcolo, in una specifica tabella come mostrato in Figura 25, sono riportate i parametri assunti propedeutici al calcolo. Per tutti i parametri assunti viene proposto un valore di primo tentativo che, nel caso l'utente sia a conoscenza di informazioni più dettagliate o comunque più rispondenti allo specifico caso considerato, avrà la possibilità di modificare. Per tutti i parametri è presente una breve descrizione dello stesso e, laddove necessario, delle note per favorirne la corretta interpretazione.

ASSUNZIONI			
Variabile	Valore	Unità di misura	Descrizione
$C_{EE}$	0.15	€/kWh	Costo dell'energia elettrica
$C_g$	0.8	€/smc	Costo gas naturale
$H_i$	9.5	kWh/smc	Potere calorifico gas naturale
$\eta_{cald}$	0.9	-	Rendimento caldaia (sistema generazione attuale)
$\Delta T_{lift} - (T_H - T_{WH}) =$	15	°C	Differenza di temperatura utile alla stima del $\Delta T_{lift}$
$\Delta T_{ev}$	15	°C	Variazione di temperatura del fluido di scarto all'evaporatore
$T_{amb}$	25	°C	Temperatura ambiente
$fc_{ST}$	1	-	Fattore correttivo scambio termico
$fc_{investimento}$	0.9	-	Valore compreso tra 0 e 1. Se diminuito maggiore l'investimento per tenere costi ulteriori (es. costi progettazione, costi extra non standard, ecc.)
$fc_{risparmio}$	0.9	-	Valore compreso tra 0 e 1. Se diminuito riduce il risparmio per tenere sia dei costi di manutenzione sia dei possibili disallineamenti tra domanda e offerta.

Valutazione riferita al caso di matching temporale tra i due flussi soddisfatto

**Figura 25 Parametri assunti dal modello per la valutazione preliminare della tecnologia pompa di calore**

Tra i parametri assunti troviamo:

- Costo dell'energia elettrica ( $C_{EE}$ ), fissato al valore di primo tentativo di 0,15€/kWh;
- Costo del gas naturale ( $C_{GN}$ ), fissato al valore di primo tentativo di 0,8 €/Sm<sup>3</sup>;
- Potere calorifico del gas naturale ( $H_i$ ), fissato al valore di primo tentativo di 9,5 kWh/Sm<sup>3</sup>;

- Rendimento caldaie ( $\eta_{\text{caid}}$ ), fissato al valore di primo tentativo di 0,90. Parametro che rappresenta il rendimento del precedente sistema di generazione ed è utile al calcolo dei risparmi;
- Differenza di temperatura utile alla stima del  $\Delta T_{\text{lift}}$ . Tale parametro è fissato al valore di primo tentativo di 15°C;
- Variazione di temperatura all'evaporatore ( $\Delta T_{\text{ev}}$ ), fissata al valore di primo tentativo di 15°C. Valore necessario a caratterizzare la potenza termica in ingresso alla pompa di calore;
- Temperatura ambiente ( $T_{\text{amb}}$ ), fissata al valore di primo tentativo di 25°C;
- Fattore correttivo per lo scambio termico ( $f_{\text{c,ST}}$ ), fissato al valore di primo tentativo di 1. Per fluidi di scarto diversi da acqua, vapore e olio diatermico, sarà necessario un ulteriore scambiatore di calore prima dell'ingresso della pompa di calore. Inoltre, in alcune situazioni impiantistiche sono presenti distanze considerevoli tra calore di scarto e fabbisogno. In tal caso è opportuno selezionare un fattore correttivo compreso tra 0 e 1 per maggiorare la potenza in input necessaria. Valori tipici sono compresi tra 0,85 e 0,95. Se tali complicazioni non sono presenti, è opportuno lasciare il valore a quello di primo tentativo;
- Fattore correttivo per l'investimento ( $f_{\text{c,i}}$ ), fissato al valore di primo tentativo di 0,9. Tale parametro, se diminuito, maggiora l'investimento per tener in conto di altri costi come, ad esempio, i costi di progettazione o componentistica extra;
- Fattore correttivo di contemporaneità ( $f_{\text{c,c}}$ ), fissato al valore di primo tentativo di 0,9. Tale parametro, se diminuito, riduce il risparmio annuo per tenere conto sia dei costi di manutenzione sia dei possibili disallineamenti tra domanda e offerta.

In virtù dei dati utilizzati per la costruzione dei modelli, per procedere alle fasi successive della valutazione preliminare per la tecnologia pompa di calore dovranno essere soddisfatte alcune condizioni: temperatura del calore di scarto a 200°C; temperatura del calore di scarto inferiore alla temperatura richiesta dal fabbisogno di energia termica. Inoltre, se il precedente sistema di generazione è diverso da una convenzionale caldaia a gas, per il calcolo del risparmio conseguibile sarà necessaria una valutazione più accurata.

Il modulo procederà in maniera automatica alla verifica di tali limitazioni e alla successiva valutazione tecnica ed economica della tecnologia pompa di calore. L'operazione verrà ripetuta per ogni flusso di scarto considerato e per ogni fabbisogno di energia termica compatibile inserito.

Un esempio dell'output visualizzabile dal modulo dove sono contenuti tutti i parametri più significativi della valutazione è riportato in Figura 26.

VALUTAZIONE PRELIMINARE POMPE DI CALORE										
FLUSSO TERMICO DI SCARTO 1										
FLUSSI DI FABBISOGNO	T [°C]	$\Delta T_{\text{lift}}$	COP	CALORE_out [kWt]	POTENZA_in [kWe]	CALORE_in necessario [kWt]	COPERTURA %	RISPARMIO [€/a]	INVESTIMENTO [€]	PAYBACK TIME (PBT) [a]
FLUSSO CALDO 1	90	20	5.10	54.42	10.67	43.75	1.00	12443.69	30232.22	2.43
FLUSSO CALDO 2	95	25	4.95	770.22	155.71	614.51	0.54	84823.48	183984.76	2.17
FLUSSO CALDO 3	90	20	5.10	445.81	87.40	358.41	0.92	42699.99	182583.42	4.28
FLUSSO CALDO 4	100	30	4.79	460.46	96.09	364.37	0.91	168400.01	185500.28	1.10
FLUSSO CALDO 5	90	20	5.10	33.49	6.57	26.92	1.00	13923.01	18604.44	1.34
FLUSSO CALDO 6	100	30	4.79	251.16	52.41	198.75	1.00	101336.40	111626.67	1.10

Figura 26 Output principale del modulo di valutazione preliminare per la tecnologia pompa di calore

Inoltre, per ogni valutazione effettuata sarà disponibile una tabella riepilogativa (Figura 27) utile alla rappresentazione dell'intervento tramite diagramma di Sankey (vedi paragrafo 4.4 "Strumenti di rappresentazione di flussi energetici e di interventi di efficientamento").

SANKEY POMPA DI CALORE FLUSSO TERMICO DI SCARTO 1		
Input	Output	Flusso Caldo 1 [kWh/anno]
FLUSSO TERMICO DI SCARTO 1	Pompa di calore	173248.76
FLUSSO TERMICO DI SCARTO 1	Calore residuo	2204734.12
Energia elettrica	Pompa di calore	42246.52
Pompa di calore	Energia termica di output	215495.28

**Figura 27 Riepilogo dei flussi energetici coinvolti propedeutici alla realizzazione del diagramma di Sankey per la tecnologia pompa di calore**

#### 4.3.4 Foglio di calcolo: frigoriferi ad assorbimento

In funzione dei parametri inseriti nel foglio "Input dati" è in grado di effettuare in maniera automatica una valutazione preliminare della tecnologia considerata seguendo il procedimento logico descritto nel paragrafo 4.2.3 "Generazione di energia frigorifera: frigoriferi ad assorbimento".

Nella parte superiore del foglio di calcolo, in una specifica tabella come mostrato in Figura 28, sono riportate i parametri assunti propedeutici al calcolo. Per tutti i parametri assunti viene proposto un valore di primo tentativo che, nel caso l'utente sia a conoscenza di informazioni più dettagliate o comunque più rispondenti allo specifico caso considerato, avrà la possibilità di modificare. Per tutti i parametri è presente una breve descrizione dello stesso e, laddove necessario, delle note per favorirne la corretta interpretazione.

ASSUNZIONI			
Variabile	Valore	Unità di misura	Descrizione
$C_{EE}$	0.15	€/kWh	Costo dell'energia elettrica
$COP_{FC}$	3	-	Rendimento frigorifero a compressione (sistema di generazione attuale)
$\Delta T_{caldo}$	15	°C	Variazione temperatura fluido caldo (calore di scarto)
$T_{amb}$	25	°C	Temperatura ambiente
$f_{c\_ST}$	1	-	Fattore correttivo scambio termico
$f_{c\_investimento}$	0.9	-	Valore compreso tra 0 e 1. Se diminuito favorisce l'investimento per tenere costi ulteriori (es. costi progettazione, costi extra non standard, ecc.)
$f_{c\_risparmio}$	0.9	-	Valore compreso tra 0 e 1. Se diminuito riduce il risparmio per tenere sia dei costi di manutenzione sia dei possibili disallineamenti tra domanda e offerta.

Valutazione riferita al caso di matching temporale tra i due flussi soddisfatto

**Figura 28 Parametri assunti dal modello per la valutazione preliminare della tecnologia frigoriferi ad assorbimento**

Tra i parametri assunti troviamo:

- Costo dell'energia elettrica ( $C_{EE}$ ), fissato al valore di primo tentativo di 0,15€/kWh;
- Coefficiente di prestazione sistema di generazione attuale ( $COP_{FC}$ ), fissato al valore di primo tentativo di 3. Parametro che rappresenta il rendimento del precedente sistema di generazione ed è utile al calcolo dei risparmi;
- Variazione di temperatura del fluido caldo ( $\Delta T_c$ ), fissata al valore di primo tentativo di 15°C. Valore necessario a caratterizzare la potenza termica in ingresso al frigorifero ad assorbimento;
- Temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), fissata al valore di primo tentativo di 25°C;
- Fattore correttivo per lo scambio termico ( $f_{c\_ST}$ ), fissato al valore di primo tentativo di 1. Per fluidi di scarto diversi da acqua, vapore e olio diatermico, sarà necessario un ulteriore scambiatore di calore prima dell'ingresso del frigorifero ad assorbimento. Inoltre, in alcune situazioni impiantistiche sono presenti distanze considerevoli tra calore di scarto e fabbisogno. In tal caso è opportuno selezionare un fattore correttivo compreso tra 0 e 1 per migliorare la potenza in input necessaria. Valori tipici sono compresi tra 0,85 e 0,95. Se tali complicazioni non sono presenti, è opportuno lasciare il valore a quello di primo tentativo;

- Fattore correttivo per l'investimento ( $f_{c,i}$ ), fissato al valore di primo tentativo di 0,9. Tale parametro, se diminuito, maggiore l'investimento per tener in conto di altri costi come, ad esempio, i costi di progettazione o componentistica extra;
- Fattore correttivo di contemporaneità ( $f_{c,c}$ ), fissato al valore di primo tentativo di 0,9. Tale parametro, se diminuito, riduce il risparmio annuo per tenere conto sia dei costi di manutenzione sia dei possibili disallineamenti tra domanda e offerta.

In virtù dei dati utilizzati per la costruzione dei modelli, per procedere alle fasi successive della valutazione preliminare per la tecnologia frigorifero ad assorbimento dovranno essere soddisfatte alcune condizioni: temperatura del calore di scarto non inferiore a 80°C; Temperatura fredda richiesta compresa tra -10 e 12 °C. Inoltre, se il precedente sistema di generazione è diverso dai convenzionali chiller elettrici, per il calcolo del risparmio conseguibile sarà necessaria una valutazione più accurata.

Il modulo procederà in maniera automatica alla verifica di tali limitazioni e alla successiva valutazione tecnica ed economica della tecnologia frigorifero ad assorbimento. L'operazione verrà ripetuta per ogni flusso di scarto considerato e per ogni fabbisogno di energia frigorifera compatibile inserito.

Un esempio dell'output visualizzabile dal modulo dove sono contenuti tutti i parametri più significativi della valutazione è riportato in Figura 29.

**VALUTAZIONE PRELIMINARE FRIGORIFERI AD ASSORBIMENTO**

FLUSSO TERMICO DI SCARTO 1									
FLUSSI DI FABBISOGNO	T [°C]	COP	POTENZA FRIGORIFERA NECESSARIA	POTENZA FRIGORIFERA GENERABILE	POTENZA FRIGORIFERA [kwf]	COPERTURA %	INVESTIMENTO [€]	RISPARMIO [€/a]	PAYBACK TIME (PBT) [a]
FLUSSO FREDDO 1	7	0.65	1512.50	213.25	213.25	0.14	82928.85	20036.56	4.14
FLUSSO FREDDO 2	7	0.65	1134.82	213.25	213.25	0.19	82928.85	69091.58	1.20
FLUSSO FREDDO 3	7	0.65	251.37	213.25	213.25	0.85	82928.85	69091.58	1.20
FLUSSO FREDDO 4	7	0.65	283.18	213.25	213.25	0.75	82928.85	69091.58	1.20
FLUSSO FREDDO 5	7	0.65	1050.69	213.25	213.25	0.20	82928.85	69091.58	1.20
FLUSSO FREDDO 6	7	0.65	48.14	213.25	48.14	1.00	48139.00	15597.04	3.09

**Figura 29 Output principale del modulo di valutazione preliminare per la tecnologia frigoriferi ad assorbimento**

Inoltre, per ogni valutazione effettuata sarà disponibile una tabella riepilogativa (Figura 30) utile alla rappresentazione dell'intervento tramite diagramma di Sankey (vedi paragrafo 4.4 "Strumenti di rappresentazione di flussi energetici e di interventi di efficientamento").

SANKEY FRIGORIFERO AD ASSORBIMENTO FLUSSO TERMICO DI SCARTO 1		
Input	Output	Flusso freddo 1 [kWh/anno]
FLUSSO TERMICO DI SCARTO 1	Frigorifero ad assorbimento	689615.04
FLUSSO TERMICO DI SCARTO 1	Calore residuo	1688367.84
Frigorifero ad assorbimento	Energia Frigorifera	445256.84

**Figura 30 Riepilogo dei flussi energetici coinvolti propedeutici alla realizzazione del diagramma di Sankey per la tecnologia frigoriferi ad assorbimento**

**4.3.5 Foglio di calcolo: scambiatori di calore**

In funzione dei parametri inseriti nel foglio "Input dati" è in grado di effettuare in maniera automatica una valutazione preliminare della tecnologia considerata seguendo il procedimento logico descritto nel paragrafo 4.2.4 "Scambio termico: scambiatori di calore a piastre".

Nella parte superiore del foglio di calcolo, in una specifica tabella come mostrato in Figura 31, sono riportate i parametri assunti propedeutici al calcolo. Per tutti i parametri assunti viene proposto un valore di primo tentativo che, nel caso l'utilizzatore sia a conoscenza di informazioni più dettagliate o comunque più rispondenti allo specifico caso considerato, avrà la possibilità di modificare. Per tutti i parametri è presente una breve descrizione dello stesso e, laddove necessario, delle note per favorirne la corretta interpretazione.

Coefficiente di scambio termico globale (W/m <sup>2</sup> C)			ASSUNZIONI		
<i>Fluido primario</i>	<i>Fluido sec.</i>	<i>K*</i>	<sup>1</sup> Coefficienti per la valutazione dell'investimento:		
acqua	acqua	5407.95	Sovrad.	75%	- Sovradimensionamento scambiatore di calore (NOTE)
alcol etilico	acqua	2326.00	fc_investimento	10%	- Fattore correttivo per la maggiorazione dell'investimento (NOTE)
olio sae 10	acqua	959.48	<sup>2</sup> Parametri per il calcolo del costo da caldaia:		
solventi	acqua	2326.00	$\eta_{cald}$	0.9	- Rendimento caldaia (sistema generazione attuale)
soluzioni	acqua	1918.95	$H_{i, gas\ naturale}$	9.5	kWh/smc Potere calorifico gas naturale
salamoia	acqua	3314.55	$C_{gas\ naturale}$	0.8	€/smc Costo gas naturale
aria comp.	acqua	436.13	<sup>3</sup> Parametro di correzione per il risparmio:		
vapore	acqua	5233.50	fc_risparmio	0.9	- Fattore correttivo per la riduzione del risparmio (NOTE)
vapore	olio sae 10	959.48	<b>Altri parametri utilizzati:</b>		
vapore	solventi	2267.85	$\eta_{scambiatore}$	98%	- Rendimento scambiatore di calore
vapore	soluzioni	1831.73	$\Delta T_{min\ scambiatore}$	3	°C Differenza di temperatura minima scambiatore
ammoniaca cond.	acqua	4593.85	$T_{amb}$	25	°C Temperatura ambiente
freon	acqua	2616.75			

**Figura 31 Parametri assunti dal modello per la valutazione preliminare della tecnologia frigoriferi ad assorbimento**

Tra i parametri assunti troviamo:

- Valori assunti del coefficiente di scambio termico globale K per diverse tipologie di coppie di fluidi (Valore mediato su un range di perdite da 0,3 a 0,6 bar)[40];
- Coefficiente di sovradimensionamento fissato al valore di primo tentativo del 75%. Tiene conto del sovradimensionamento della superficie per garantire lo scambio termico necessario;
- Fattore correttivo per l'investimento ( $f_{c,i}$ ), fissato al valore di primo tentativo del 10%. Tale parametro, se aumentato, maggiora l'investimento per tener in conto di altri costi come, ad esempio, i costi di progettazione o componentistica extra, notevole distanza tra fonte di calore e utilizzatore, necessità di utilizzo di materiali speciali o di situazioni che richiedano un dimensionamento particolare;
- Rendimento caldaie ( $\eta_{cald}$ ), fissato al valore di primo tentativo di 0,90. Parametro che rappresenta il rendimento del precedente sistema di generazione ed è utile al calcolo dei risparmi;
- Potere calorifico del gas naturale ( $H_i$ ), fissato al valore di primo tentativo di 9,5 kWh/Sm<sup>3</sup>;
- Costo del gas naturale ( $C_{GN}$ ), fissato al valore di primo tentativo di 0,8 €/Sm<sup>3</sup>;
- Fattore correttivo di contemporaneità ( $f_{c,c}$ ), fissato al valore di primo tentativo di 0,9. Tale parametro, se diminuito, riduce il risparmio annuo per tenere conto dei costi di manutenzione, dei possibili disallineamenti tra domanda, particolari difficoltà gestionale, aumento dei costi di pompaggio o frequenti opere di manutenzione.
- Differenza di temperatura minima nello scambiatore ( $\Delta T_{min\ scambiatore}$ ), fissato cautelativamente al valore di 3°C;
- Rendimento scambiatore ( $\eta_{scamb}$ ), fissato al valore di primo tentativo di 0,98;
- Temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), fissata al valore di primo tentativo di 25°C.

In virtù dei dati utilizzati per la costruzione dei modelli, per procedere alle fasi successive della valutazione preliminare per la tecnologia scambiatori di calore a piastre dovranno essere soddisfatte alcune condizioni: temperatura del calore di scarto non superiore a 200°C; pressione dei fluidi coinvolti non superiore a 25 bar. Inoltre, se il precedente sistema di generazione è diverso da convenzionali caldaie a gas, per il calcolo del risparmio conseguibile sarà necessaria una valutazione più accurata.

Il modulo procederà in maniera automatica alla verifica di tali limitazioni e alla successiva valutazione tecnica ed economica della tecnologia scambiatori di calore a piastre. L'operazione verrà ripetuta per ogni flusso di scarto considerato e per ogni fabbisogno di energia termica compatibile inserito.

Un esempio dell'output visualizzabile dal modulo dove sono contenuti tutti i parametri più significativi della valutazione è riportato in Figura 32. Figura 32 Output principale del modulo di valutazione preliminare per la tecnologia scambiatori di calore a piastre

**VALUTAZIONE PRELIMINARE SCAMBIATORI DI CALORE**

FLUSSO TERMICO DI SCARTO 1												
Flusso di fabbisogno	T <sub>i, caldo</sub> [°C]	T <sub>i, freddo</sub> [°C]	(T <sub>u, freddo</sub> ) <sub>richiesto</sub> [°C]	T <sub>u, caldo</sub> [°C]	(T <sub>u, freddo</sub> ) <sub>effettivo</sub> [°C]	Q <sub>c</sub> [kW]	ΔT <sub>ML</sub> [°C]	K [W/m <sup>2</sup> °C]	S [m <sup>2</sup> ]	Investimento <sup>1</sup> [€]	Risparmio <sup>3</sup> [€/anno]	PBT semplice [anni]
FLUSSO CALDO 1	85	25	90	82.79	82.00	48.69	18.52	5407.95	0.851	1,394.57	15,913.50	0.09
FLUSSO CALDO 2	85	75	95	78.00	78.92	154.13	4.36	5407.95	11.441	5,399.06	45,790.77	0.12
FLUSSO CALDO 3	85	75	90	75.36	82.00	212.29	1.24	5407.95	55.249	15,190.23	31,535.12	0.48
FLUSSO CALDO 4	85	80	100	82.87	82.00	46.99	2.93	5407.95	5.185	3,354.45	27,918.42	0.12
FLUSSO CALDO 5	85	70	90	84.07	82.00	20.50	7.16	5407.95	0.926	1,441.33	12,182.58	0.12
FLUSSO CALDO 6	85	70	100	80.34	82.00	102.51	5.93	5407.95	5.591	3,503.68	60,912.91	0.06

**Figura 32 Output principale del modulo di valutazione preliminare per la tecnologia scambiatori di calore a piastre**

Inoltre, per ogni valutazione effettuata sarà disponibile una tabella riepilogativa (Figura 33) utile alla rappresentazione dell'intervento tramite diagramma di Sankey (vedi paragrafo 4.4 "Strumenti di rappresentazione di flussi energetici e di interventi di efficientamento").

SANKEY SCAMBIATORI DI CALORE A PIASTRE FLUSSO TERMICO DI SCARTO 1		
Input	Output	Flusso Caldo 1 [kWh/anno]
FLUSSO TERMICO DI SCARTO 1	Scambiatore di calore	196764.66
FLUSSO TERMICO DI SCARTO 1	Calore residuo sorgente	153834.19
Scambiatore di calore	Energia termica utile	192829.37

**Figura 33 Riepilogo dei flussi energetici coinvolti propedeutici alla realizzazione del diagramma di Sankey per la tecnologia scambiatori di calore a piastre**

#### 4.4 Strumenti di rappresentazione di flussi energetici e di interventi di efficientamento

L'ultima fase nello sviluppo di una metodologia per l'identificazione e l'analisi dei flussi energetici e degli interventi di efficientamento ha previsto la definizione degli strumenti da utilizzare nella rappresentazione dei flussi di calore per fornire in maniera efficace le complesse e le diverse informazioni necessarie alla distinzione delle opportunità di recupero di calore di scarto.

Lo strumento selezionato è il diagramma Sankey in quanto coniuga semplicità di visualizzazione con quantità di informazioni in grado di fornire. Il diagramma è costituito da frecce, o più ingenerale "collegamenti", il cui spessore è proporzionale alla grandezza quantitativa da rappresentare. Tramite l'introduzione di una semplice legenda, è possibile associare una diversa colorazione a collegamenti e nodi per differenziare i vettori energetici coinvolti (distinguendo in particolare energia elettrica, energia frigorifera ed energia termica), e, laddove applicabile, il corrispondente intervallo di temperatura. Pertanto, è stato ritenuto lo strumento più idoneo a fornire un'esauriva rappresentazione di flussi energetiche coinvolti in un intervento di recupero termico.

Sono stati previste due modalità di utilizzo di questo strumento:

1. *Sankey di stabilimento, reparto o processo*: diagramma di più alto livello, da utilizzare a monte della realizzazione di un intervento di recupero termico. Un diagramma Sankey di alto livello, oltre a favorire l'identificazione dei flussi termici di maggiore interesse per il recupero, può essere utilizzato a supporto dell'individuare dei potenziali utilizzi del calore da recuperare;
2. *Sankey dell'intervento di recupero di calore*: diagramma di dettaglio dell'intervento di recupero di calore analizzato.

Per le modalità di realizzazione di queste due differenti tipologie di diagrammi di Sankey si rimanda al report relativo alla precedente annualità (LA3.22) in cui sono dettagliatamente descritte in termini di informazioni necessarie e modalità di rappresentazione.

Lo scopo di questa annualità è stato quello di selezionare definitivamente il software da utilizzare per la rappresentazione dei flussi energetici tramite diagrammi di Sankey e sviluppare dei format per facilitarne lo sviluppo.

Alla luce dei differenti strumenti testati, descritti nella precedente annualità, e delle sperimentazioni svolte con i casi di studio, la scelta definitiva è ricaduta sul software “Power BI” di Microsoft. Tale strumento, in virtù della sua perfetta integrazione con Excel, è caratterizzato da una fase di input dati estremamente semplice: ciò è possibile mediante l’importazione di una tabella a tre colonne contenenti informazioni rispettivamente su provenienza (source), destinazione (target) e grandezza (value) dei flussi energetici da rappresentare. È inoltre possibile, in maniera semplice, impostare colori differenti per nodi e collegamenti.

Come già descritto nella precedente annualità, è stato predisposto un format per la realizzazione di un diagramma di Sankey di alto livello realizzando una tabella Excel e collegando il foglio di calcolo a un documento “Power BI”. L’esempio della tabella Excel utilizzata è mostrato in Tabella 19, mentre il risultato dell’utilizzo di “Power BI” è rappresentato in Figura 34.

**Tabella 19** Dati di input per la realizzazione del diagramma di Sankey con Power BI

Source	Target	Value (kWh)
Energia elettrica da rete	Linea 1	120.000
Energia elettrica da rete	Linea 2	100.000
Energia elettrica da rete	Linea 3	60.000
Energia elettrica da rete	Chiller	172.000
Chiller	Linea 1	140.000
Chiller	Linea 2	140.000
Chiller	Linea 3	140.000
Gas naturale	Caldaia 1	400.000
Gas naturale	Caldaia 2	200.000
Caldaia 1	Linea 1	200.000
Caldaia 1	Linea 2	160.000
Caldaia 1	Altro (perdite)	40.000
Caldaia 2	Linea 3	180.000
Caldaia 2	Altro (perdite)	20.000

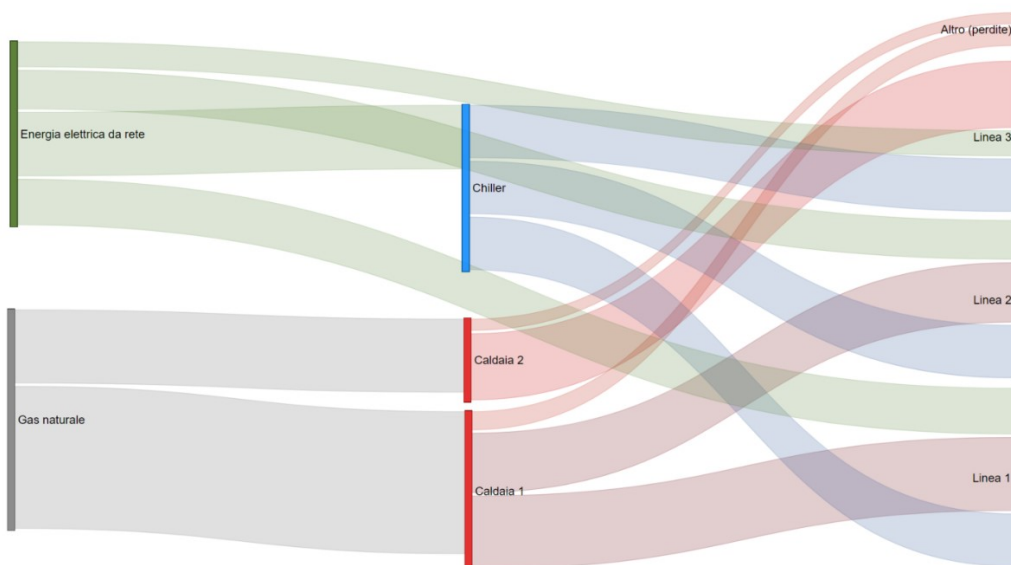


Figura 34 Esempio di un diagramma Sankey per un reparto produttivo realizzato utilizzando Power BI

Tramite l'utilizzo di questo format, semplicemente modificando i dati direttamente sul file Excel di riferimento, è possibile in modo immediato aggiornare i dati caricati sul software "Power BI" mediante la sua interfaccia per tabelle, come mostrato in Figura 35, con conseguente aggiornamento del diagramma di Sankey.

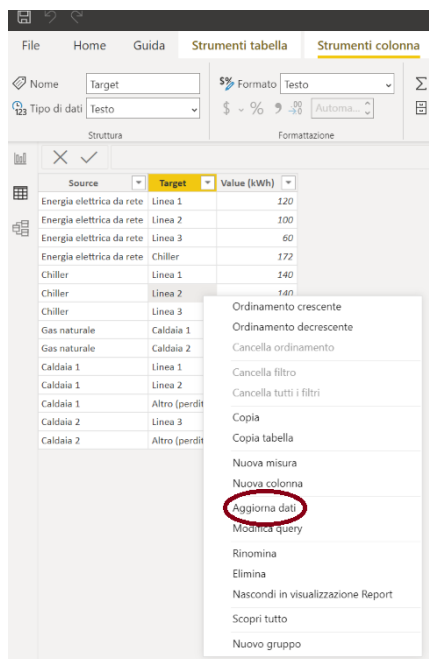


Figura 35 Dettaglio della funzione di aggiornamento dati di Power BI

Per rendere più immediata la creazione dei diagrammi di Sankey relativi agli interventi di efficientamento considerati per tecnologie di recupero di calore e favorire l'integrazione con il modello di valutazione preliminare realizzato, in output al foglio di calcolo è stata predisposta una tabella auto compilata per ognuna delle tecnologie considerate (vedi Figura 24, Figura 27, Figura 30, Figura 33).

L'utilizzo di questo strumento è stato testato e validato sui casi di studio, più specificamente nella realizzazione sia di diagrammi di Sankey di stabilimento, sia relativi ai singoli interventi di recupero individuali. Gli ottimi risultati ottenuti sono presentati nel successivo capitolo.



## 5 Analisi dei casi di studio

In questa terza ed ultima annualità del progetto di ricerca, la sperimentazione degli strumenti, già iniziata nell'anno precedente, ha ricoperto un ruolo fondamentale. Sono state coinvolte diverse aziende del settore industriale italiano con l'obiettivo principale di testare sul campo gli strumenti sviluppati. Le interazioni sono state basate su contatti precedenti tra le aziende e i vari partner del progetto di ricerca. I contatti si sono svolti principalmente a distanza e attraverso sopralluoghi in stabilimento.

In questo capitolo viene fornita una descrizione delle attività svolte riguardanti le tre principali aziende coinvolte per l'annualità 2021. Per garantire la riservatezza delle informazioni forniteci dalle aziende, queste vengono presentate sempre in forma anonima.

Per ogni caso di studio si è seguita una procedura che ricalca le fasi della metodologia di competenza dell'Università di Roma "Tor Vergata" precedentemente descritte:

1. **Analisi del contesto:** in questo paragrafo viene fornita una breve descrizione del sito industriale, analizzando i principali vettori usi energetici. Viene inoltre presentata la mappatura energetica dello stabilimento attraverso diagrammi di Sankey dello stabilimento;
2. **Individuazione del calore di scarto:** in collaborazione con i rappresentanti delle aziende, vengono individuati e descritti cascami termici di scarto e vengono individuati dei possibili riutilizzi degli stessi;
3. **Valutazione preliminare:** in questo paragrafo viene descritta l'applicazione del modulo di valutazione preliminare di tecnologie di recupero di calore sviluppato dal gruppo di ricerca. Inoltre, verrà testata l'efficacia del database di tecnologie nel suo ruolo di supporto nell'individuazione di tecnologie implementabili coerentemente con i risultati ottenuti.

Inoltre, nel paragrafo conclusivo del capitolo (paragrafo 5.4 "Discussioni"), sono discussi i risultati complessivi ottenuti e indicazione di eventuali modifiche da apportare alla metodologia o al database nell'ottica del suo miglioramento.

Per la raccolta dati sono stati utilizzati i format presentati nel report descrittivo della precedente annualità di ricerca (LA3.22). Per completezza, in Figura 36 viene riportato il format utilizzato per la raccolta delle informazioni sui principali utilizzatori di energia (in termini di quantità, fluidi, temperature coinvolte, ecc.) mentre in Figura 37 viene riportato il format utilizzato per l'identificazione di flussi di calore di scarto.



all'applicazione degli strumenti sviluppati nell'ambito del progetto di ricerca che è difatti avvenuta nella corrente annualità e che pertanto viene descritta nei successivi paragrafi.

### 5.1.1 Analisi del contesto

L'azienda in questione ed è una delle maggiori realtà aziendali operanti nel centro Italia nel settore alimentare lattiero-caseario. La principale attività dell'azienda consiste nella produzione di latte e derivati e la sua clientela è rappresentata principalmente da compagnie appartenenti alla GDO (Grande Distribuzione Organizzata).

Dal punto di vista energetico lo stabilimento industriale si autoproduce gran parte dell'energia elettrica di cui necessita grazie alla presenza di un cogeneratore da 1,2 MW<sub>e</sub>, alimentato a gas naturale funzionante ad inseguimento elettrico. Il motore risulta stabilmente a carico nominale, ed è accoppiato ad un generatore di vapore a recupero, in grado di produrre vapore alla pressione di circa 11-13 bar, tutti ampiamente utilizzati. La restante parte del fabbisogno termico è soddisfatta grazie alla presenza di una centrale termica composta da due caldaie funzionanti a gas naturale (ciascuna da 3 ton/h), di cui solo una è stabilmente in funzione.

L'impianto è dotato di un assorbitore a bromuro di litio l'acqua alimentato con acqua calda a circa 90°C proveniente dai circuiti di raffreddamento del motore. L'assorbitore è attualmente utilizzato prevalentemente durante il periodo estivo, in cui il fabbisogno di freddo è maggiore, mentre è in corso di analisi la convenienza del suo impiego durante l'inverno per soddisfare il fabbisogno di energia frigorifera del processo, per la quale vengono utilizzati chiller a compressione funzionanti ad ammoniaca (con COP approssimativamente pari a 3).

Lo stabilimento si approvvigiona quindi di due vettori energetici: il gas metano utilizzato prevalentemente per il cogeneratore e, in misura minore, nella centrale termica per la generazione di vapore. Inoltre, lo stabilimento si approvvigiona di energia elettrica da rete per coprire il fabbisogno non soddisfatto dal cogeneratore.

Le principali utenze dello stabilimento possono essere suddivise in tre macrocategorie:

1. *Utenze di processo e produzione*, nelle quali sono concentrati la parte più rilevanti dei consumi energetici e che racchiudono i processi di ricevimento materie prime, pastorizzazione (microfiltrato e fresco), sistemi CIP (Clean In Place), linee di produzione e confezionamento, magazzino prodotto finito, ecc.;
2. *Utenze dei servizi generali*, di cui fanno parte l'illuminazione, forza elettromotrice, UTA (Unità di Trattamento Aria), UPS (Uninterruptible Power Supply), laboratorio uffici, sale controllo, ecc.;
3. *Utenza del depuratore*.

Tali utenze richiedono energia elettrica, termica e frigorifera.

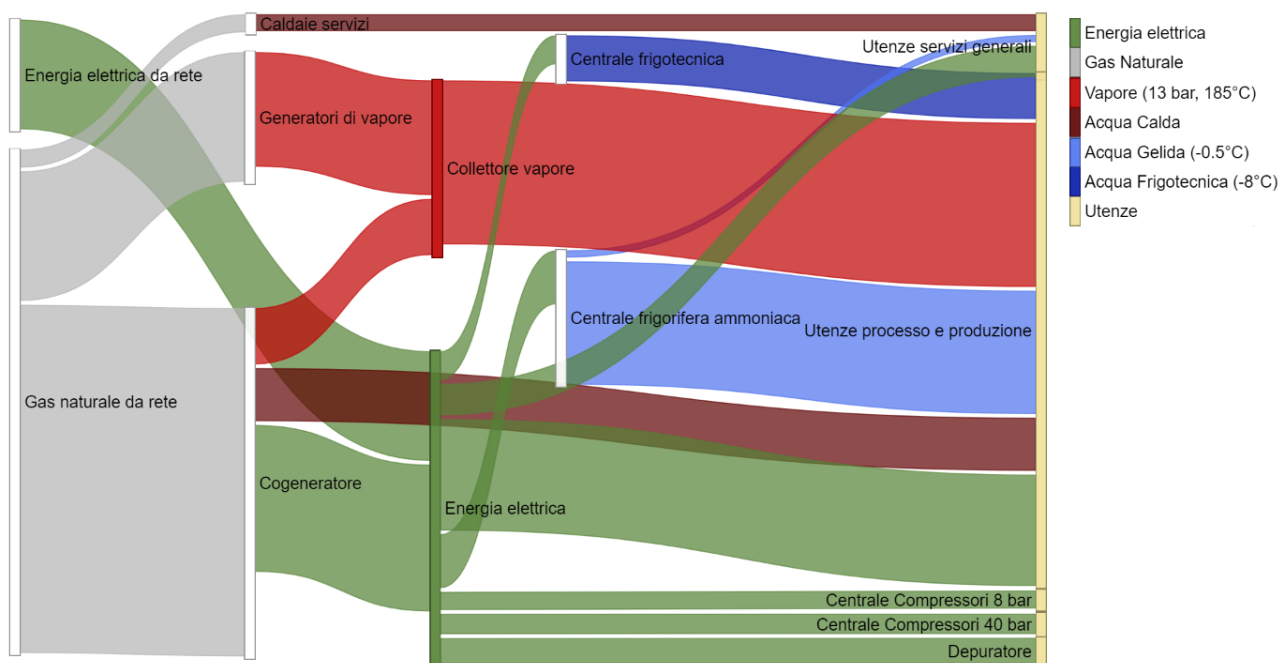
L'energia elettrica rappresenta il vettore energetico più rilevante in termini di consumi con un consumo annuo superiore a 14 GWh<sub>e</sub>. I contributi prevalenti sono rappresentati dai processi di trattamento e confezionamento del latte, rispettivamente con il 41% ed il 55% dei consumi elettrici; per il primo, oltre alla spesa di pompaggio, si hanno tutte le macchine di trattamento (bactofuga, scrematrice, omogeneizzatore), mentre per secondo vanno alimentate le diverse riempitrici, etichettatrici e soffiatrici che sono caratterizzate da assorbimenti elevati.

L'energia termica è richiesta dall'impianto principalmente sottoforma di vapore, in larga misura prodotto dal generatore di vapore a recupero dell'impianto di cogenerazione, ed in misura minore dai generatori di vapore ausiliari. I CIP richiedono complessivamente più del 70% del vapore prodotto dallo stabilimento, mentre risulta modesto il suo utilizzo durante le operazioni di pastorizzazione. Nel processo di pastorizzazione, l'impiego del vapore è limitato quasi esclusivamente alle fasi di avvio e solo in minima quantità per la pastorizzazione vera e propria ed i lavaggi finali. Complessivamente i pastorizzatori richiedono il 26,5% del vapore totale utilizzato.

La restante parte del fabbisogno di energia termica è richiesto sottoforma di acqua calda. La maggior parte dell'acqua calda viene prodotta dal circuito di recupero HT (High Temperature) del cogeneratore mentre la restante parte viene integrata tramite l'utilizzo di caldaie ausiliarie. Tale aspetto rappresenta un punto cruciale: negli anni precedenti tutta l'acqua calda prodotta dal cogeneratore, alla temperatura di circa 85 °C, è stata utilizzata nel processo produttivo per soddisfare il fabbisogno di energia termica di CIP e pastorizzatori. Attualmente è in fase di valutazione la convenienza dell'utilizzo dell'acqua calda prodotta dal cogeneratore per la produzione di acqua refrigerata tramite un frigorifero ad assorbimento di cui è dotato lo stabilimento.

Rilevante è anche il fabbisogno di energia frigorifera. Quest'ultima viene quasi completamente destinata alla produzione (raffreddamento del latte crudo a 4°C dopo il ricevimento, raffreddamento del latte e della panna pastorizzati a 2-3°C, conservazione del prodotto finito, raffreddamento delle linee di produzione, ecc.), in misura minore viene richiesta dalle UTA per la climatizzazione dei locali dello stabilimento.

Grazie alla collaborazione con i referenti aziendali, facendo uso del format di raccolta riportati precedentemente, è stato possibile ricostruire dettagliatamente i principali flussi energetici dello stabilimento, il cui risultato finale è riportato nel diagramma di Sankey in Figura 38.



**Figura 38 Diagramma Sankey di stabilimento per la grande azienda del settore caseario**

I dati riportati nel diagramma di stabilimento fanno riferimento ai consumi energetici dell'azienda, espressi in kWh, per l'annualità 2020. I dati resi disponibili dall'azienda provengono quasi integralmente dal sistema di monitoraggio di cui la stessa è dotata. In particolare, sono presenti misuratori per l'energia elettrica su tutte le principali utenze elettriche, mentre per quanto riguarda la misura dei consumi di vapore, acqua calda e acqua refrigerata sono presenti dei contatori generali; per la ripartizione di questi ultimi si è ricorsi a stime andando ad analizzare potenzialità e logiche di funzionamento delle principali utenze dello stabilimento.

### 5.1.2 Individuazione del calore di scarto

L'azienda è molto attenta alla tematica del recupero di calore e nel corso degli anni ha individuato ed effettuato numerosi interventi: recupero e reintegro in alimento alle caldaie delle condense di vapore; recupero del calore contenuto nello spurgo dei generatori di vapore; recupero lato fumi generatori di vapore; recupero termico sui pastorizzatori (tutti i pastorizzatori sono dotati di un sistema di recupero a doppio effetto termico); recupero calore per lo sbrinamento delle celle frigo (il calore necessario per lo sbrinamento delle celle frigorifere è ottenuto grazie al recupero termico sul circuito dell'acqua di torre).

In collaborazione con i referenti aziendali si è proceduto ad individuare ulteriori cascami termici non ancora valorizzati.

Quasi tutti i compressori installati, sia quelli dedicati alla produzione dell'aria compressa che quelli che realizzano i cicli frigoriferi, si affidano per il loro raffreddamento a torri evaporative o torri di condensazione, in cui il calore è interamente ceduto all'ambiente esterno. Nello stabilimento sono presenti numerose torri: una dedicata al raffreddamento dei compressori a 8 bar (da 1400 kW), tre per il raffreddamento dei compressori 40 bar (da 318, 318 e 196 kW rispettivamente), una per l'assorbitore frigorifero ed altre dedicate ai chiller degli impianti frigoriferi per la condensazione dell'ammoniaca.

Un'eventuale opportunità è rappresentata dal recupero di calore dalle torri evaporative dei compressori da 40 bar (utilizzati per il processo di soffiaggio di preforme in PET); le torri sono collocate in un'area adiacente ai locali compressori e operano a circuito chiuso lavorando solo di rado contemporaneamente.

La portata d'acqua di raffreddamento nominale si attesta sui 7,6 litri/s (circa 23 m<sup>3</sup>/h) per le torri da 318 kW e 4,7 litri/s (circa 17 m<sup>3</sup>/h) per quella da 196 kW. Il  $\Delta T$  di raffreddamento è di circa 10 °C con acqua di torre in uscita a circa 35 °C. Analizzando di funzionamento del sistema si è stimata una portata media annua di circa 40 m<sup>3</sup>/h con un numero di ore di funzionamento pari a 4000 ore/anno per un totale di 1 860 444,4 kWh/anno di calore dissipato mediante le torri (stima cautelativa).

All'interno dello stabilimento sono presenti numerosi processi che richiedono energia termica a temperatura non elevata. Ad esempio, tutte le fasi di risciacquo operate dai CIP dopo ogni lavaggio "chimico" o alcune fasi dei processi di pastorizzazione avvengono a temperatura inferiore ai 90 °C e sono difatti soddisfatte grazie al circuito acqua calda HT alimentato prevalentemente dal calore recuperato dal cogeneratore.

Come descritto precedentemente, l'azienda sta valutando l'utilizzo dell'acqua calda proveniente dai circuiti di raffreddamento del motore del cogeneratore per alimentare l'assorbitore a bromuro di litio disponibile per la produzione di energia frigorifera. Tale soluzione, che dalle prime analisi effettuate sembrerebbe essere la soluzione più conveniente, lascerebbe "scoperto" il fabbisogno di acqua calda che dovrà essere soddisfatto mediante l'utilizzo delle caldaie convenzionali.

La soluzione proposta compatibilmente con quelle previste dal nostro modello di valutazione preliminare, prevede quindi di utilizzare il calore di scarto disponibile dalle torri evaporative per alimentare una pompa di calore per la produzione di acqua calda alla temperatura di circa 85°C.

In Tabella 20 sono sintetizzate tutte le informazioni circa il calore di scarto ed il fabbisogno di energia termica individuato. Tali informazioni saranno utilizzate come input al modello di valutazione preliminare.

**Tabella 20 Dati di input al modello per la grande azienda del settore caseario**

<b>Calore di scarto</b>	Provenienza	Circuito di raffreddamento compressori aria
	Tipo di fluido	Acqua
	Disponibilità (es. ore/anno)	4000 ore/anno
	Portata	11,1 kg/s
	Pressione	3-4 bar
	Temperatura	35 °C
<b>Fabbisogno di energia termica</b>	Processo	Produzione acqua calda
	Tipo di Fluido	Acqua
	Richiesta (es. ore/anno)	7000 ore/anno
	Portata	9,2 kg/s
	Pressione	3-4 bar
	Temperatura richiesta ( $T_{out}$ )	85 °C
Temperatura fluido in ingresso ( $T_{in}$ )	75 °C	

### 5.1.3 Valutazione preliminare

La terza fase della metodologia, l'ultima di competenza del gruppo di ricerca dell'Università di Roma "Tor Vergata", prevede l'applicazione dello strumento per la valutazione preliminare delle tecnologie di recupero di calore.

Per l'applicazione del modello di valutazione preliminare è stata seguita la procedura illustrata nel paragrafo 4.2 "Modulo di valutazione preliminare". I risultati dell'applicazione del modello per la tecnologia *pompa di calore* sono riportati in Tabella 21 ottenuti utilizzando i dati di input riportati in Tabella 20.

Per la valutazione preliminare della pompa di calore, nota la temperatura del flusso di calore di scarto pari a 35°C, si è stimato  $\Delta T_{lift}$  come la differenza tra la temperatura della sorgente calda e quella della sorgente fredda (calore di scarto) maggiorata di 15 °C così come suggerito dal modello. Si è inoltre assunto un  $\Delta T_{ev}$  pari a 10 °C dal lato dell'evaporatore (lato del calore di scarto).

È stato selezionato un costo dell'energia elettrica pari 0,15 €/kWh e un costo del metano pari a 0,6 €/Sm<sup>3</sup> (circa 64 €/MWh). Per il calcolo dei risparmi energetici conseguibili è stato utilizzato un rendimento del precedente sistema di generazione pari a 0,878, in accordo con i dati forniti dall'azienda.

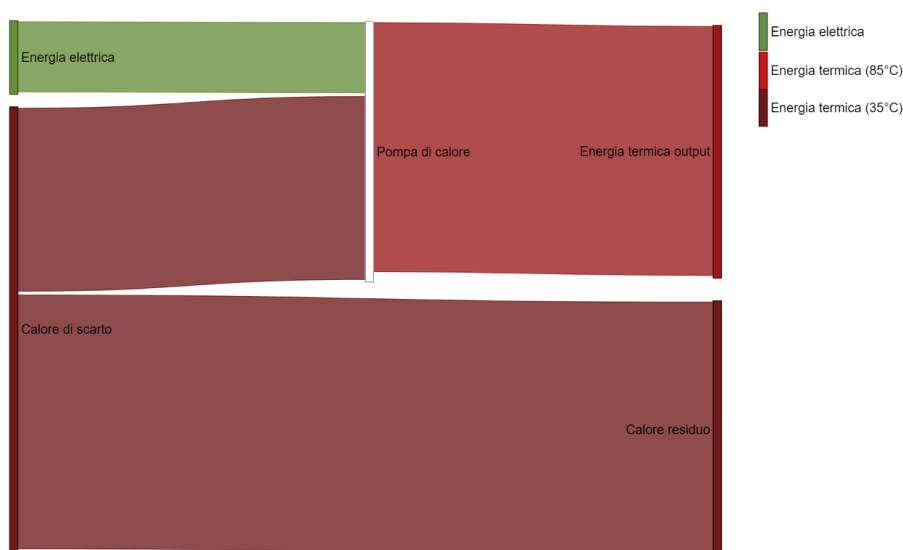
**Tabella 21 Risultati dell'applicazione del modello di valutazione preliminare per la tecnologia pompa di calore**

VALUTAZIONE PRELIMINARE POMPA DI CALORE	
T <sub>out</sub> [°C]	85
$\Delta T_{lift}$ [°C]	65
COP	3,71
POTENZA TERMICA OUTPUT [kW <sub>t</sub> ]:	385,12
POTENZA ELETTRICA [kW <sub>e</sub> ]:	103,79
POTENZA TERMICA INPUT [kW <sub>t</sub> ]:	281,32
COPERTURA FABBISOGNO	100%
ENERGIA TERMICA PRODOTTA [MWh <sub>t</sub> /anno]:	1540,45
ENERGIA ELETTRICA RICHIESTA [MWh <sub>e</sub> /anno]:	415,17
RISPARMIO ANNUO [€/a]:	44004,53
INVESTIMENTO [€]	171160,89
PAYBACK TIME PBT [anni]	3,89

L'investimento, che garantirebbe un notevole risparmio energetico, è caratterizzato da tempo di ritorno di poco inferiore a 4 anni, a fronte di un investimento iniziale di 171 k€. Tenendo presente lo scopo di questo strumento finalizzato ad una valutazione preliminare della tecnologia, si suggerisce sicuramente l'approfondimento dell'intervento di efficientamento.

È bene sottolineare come nella valutazione preliminare non sono considerati gli eventuali incentivi, il cui ottenimento ridurre ulteriormente il tempo di ritorno dell'investimento, facendolo avvicinare al tipico valore di 3 anni che normalmente le aziende considerano come condizione favorevole.

In Figura 39/46 è riportata la rappresentazione grafica, tramite diagrammi di Sankey, dell'intervento di efficientamento proposto.



**Figura 39** Rappresentazione tramite diagramma di Sankey della pompa di calore per la grande azienda del settore caseario

#### Utilizzo del database come strumento di supporto

L'ultimo strumento testato nell'ambito del caso di studio proposto è stato il database di tecnologie. A valle della valutazione preliminare, l'azienda dispone quindi di tutte le informazioni sufficienti per poter consultare il database ed ottenere informazioni più dettagliate sulle tecnologie effettivamente disponibili e compatibili con le caratteristiche individuate.

In riferimento alle modalità di consultazione definite nel paragrafo 3.2.2 "Query e consultazione del database", l'azienda può consultare il database utilizzando la query di tipo B "Informazioni sulla tipologia di recupero" secondo i criteri riportati in Tabella 22.

**Tabella 22** Criteri di ricerca utilizzati per la consultazione del database di tecnologie

Tipologia di recupero	Tecnologia	Stato di maturità della tecnologia
Produzione di energia termica	Pompa di calore Pompa di calore ad alta temperatura	Tecnologia consolidata

Con i criteri di ricerca inseriti, il database mostra l'esistenza di numerose tecnologie compatibili: 38 record per le pompe di calore di cui 10 tecnologie di 8 differenti fornitori sono adeguate al tipo di intervento ( $T_{out} \geq 85^\circ\text{C}$  e  $P_{t,out}$  di circa 400 kW<sub>t</sub>).

A titolo di esempio, in Tabella 23 sono riportati alcuni risultati della ricerca per la tecnologia pompa di calore. Per garantire la riservatezza, non sono riportate informazioni sui riferimenti del fornitore.

**Tabella 23** Risultati della ricerca nel database per la tecnologia pompa di calore

CAMPI	RECORD 1	RECORD 2	RECORD 3
<b>Destinazione recupero</b>	Produzione di energia termica	Produzione di energia termica	Produzione di energia termica
<b>Tecnologia utilizzata</b>	Pompa di calore ad alta temperatura	Pompa di calore	Pompa di calore
<b>Descrizione tecnologia</b>	Pompe di calore azionate elettricamente in grado di fornire calore con temperature fino a 120°C	Pompe di calore ideali per sfruttare efficacemente il calore di scarto a bassa temperatura, per la produzione di acqua calda (fino a 90°C). Utilizzano ammoniacca (R717) come refrigerante	Pompe di calore per applicazioni industriali. Singole macchine da 115-500 kW con applicazione di macchine in serie fino anche a 3000 kW
<b>Stato di maturità</b>	Tecnologia consolidata	Tecnologia consolidata	Tecnologia consolidata
<b>Campi di applicazione</b>	Riscaldamento privato, riscaldamento industriale dell'acqua nei processi produttivi, recupero di calore. Potenze termiche che vanno da circa 20 a fino 5000 kW <sub>t</sub> . Alcuni settori di riferimento: produzione	-	Applicazioni in diversi settori industriali come ad esempio birrifici, prosciuttifici, lattiero-caseario, pneumatici, produzione di cioccolata, cantine vinicole ecc.

	birra, caseario, produzione zucchero, alimentare, carta, tessile, lavorazione metalli, vetro e ceramica, produzione di energia		
<b>Modello</b>	-	-	Serie professionale
<b>Fluido vettore</b>	-	Acqua	Acqua, Acqua e glicole
<b>Temperatura di input</b>	Da -20 a +70 °C	15-70 °C	20-60 °C
<b>Minima temperatura di input</b>	-20 °C	15 °C	20 °C
<b>Portata fluido vettore</b>	-	-	-
<b>Fluido di lavoro</b>	R134a, R245fa, R1234ze	Ammoniaca (R717)	R290 propano R600a isobutano
<b>Potenza termica in ingresso</b>	14-1734 kW <sub>t</sub>	260-1750 kWt	da 100 kWt fino a 2500 kWt
<b>Tipo di output</b>	Energia Termica	Energia Termica	Energia Termica
<b>Potenza di Output</b>	17-2063 kW <sub>t</sub>	300-2000 kWt	115-3000 kWt
<b>Temperatura di output</b>	65-120 °C	<90°C	Fino a 94 °C
<b>Efficienza</b>	-	COP da 4,4 a 6,5	COP da 3,5 a 5,6
<b>Dimensioni</b>	-	Lu*La*Al 2,8m*1,0m*2,0m (307 kWt) 5,05m*1,0m*2,1 m (2078 kWt)	-
<b>Vita utile attesa</b>	-	-	20 anni
<b>PBP atteso</b>	-	-	-
<b>Note</b>	-	I valori tecnici sono riferiti a casistiche tipo (in termini di temperatura di ingresso e temperatura di uscita richiesta) riportate su catalogo	-

## 5.2 Grande azienda del settore alimentare

L'interazione con l'azienda del settore alimentare è avvenuta grazie a contatti precedenti esistenti tra quest'ultima e il gruppo di ricerca dell'Università di Roma "Tor Vergata". L'azienda in questione è un'azienda multiprodotto leader in Italia nella produzione di salumi e insaccati. In virtù degli elevati consumi di energia termica, utilizzata nella maggior parte dei processi produttivi caratteristici dello stabilimento industriale, l'azienda si è dimostrata fortemente interessata alla tematica del recupero di calore e alla ricerca di interventi di efficientamento.

Dopo dei contatti preliminari dedicati alla presentazione e descrizione del progetto di ricerca, è stato organizzato un sopralluogo in stabilimento a novembre 2021 per favorire la conoscenza dell'impianto e dei principali vettori e usi energetici. Si è poi proceduto alla fase di raccolta dei dati, che ha permesso l'applicazione dei principali strumenti sviluppati, in particolare, la realizzazione di diagrammi di Sankey dello stabilimento, l'applicazione della metodologia per l'identificazione e l'analisi dei flussi energetici e degli interventi di efficientamento, e l'utilizzo del database nel suo ruolo di supporto nell'individuazione delle possibili tecnologie implementabili compatibili con i flussi di scarto individuati.

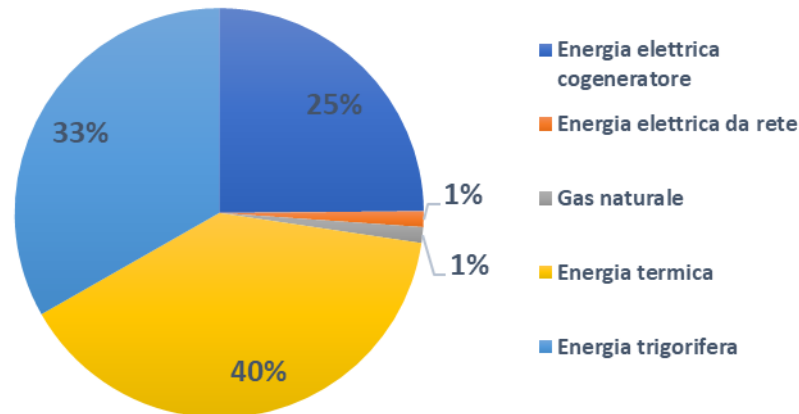
### 5.2.1 Analisi del contesto

La prima fase della metodologia prevede un'accurata analisi del contesto industriale di riferimento in cui l'azienda opera e ne viene caratterizzato il profilo in termini di fabbisogni energetici, dei principali processi, e sistemi utilizzati.

Lo stabilimento è dotato di un impianto di cogeneratore da 6,8 MW<sub>e</sub> che riesce a produrre gran parte dell'energia elettrica richiesta dallo stabilimento (solo circa il 5% dell'energia elettrica annua consumata viene acquistata da rete). L'impianto è dotato di un generatore di vapore a recupero per la produzione di vapore di processo. In virtù dell'elevato fabbisogno termico, lo stabilimento utilizza integralmente il calore reso disponibile dal cogeneratore, compresi i flussi termici a più bassa entalpia provenienti dai circuiti di raffreddamento del motore (acqua calda HT a 80°C e Acqua calda LT a 50°C).



Ad integrazione del fabbisogno termico e frigorifero dell'impianto, l'azienda è dotata di una centrale termica con due caldaie da 6 MW<sub>t</sub> ciascuna, e da diversi impianti frigoriferi (chiller elettrici ed impianti ad espansione diretta) dislocati per lo stabilimento necessari alla produzione di acqua glicolata alla temperatura di -2 e -8°C. In Figura 40 è riportata la ripartizione percentuale dei consumi energetici in kWh dello stabilimento.



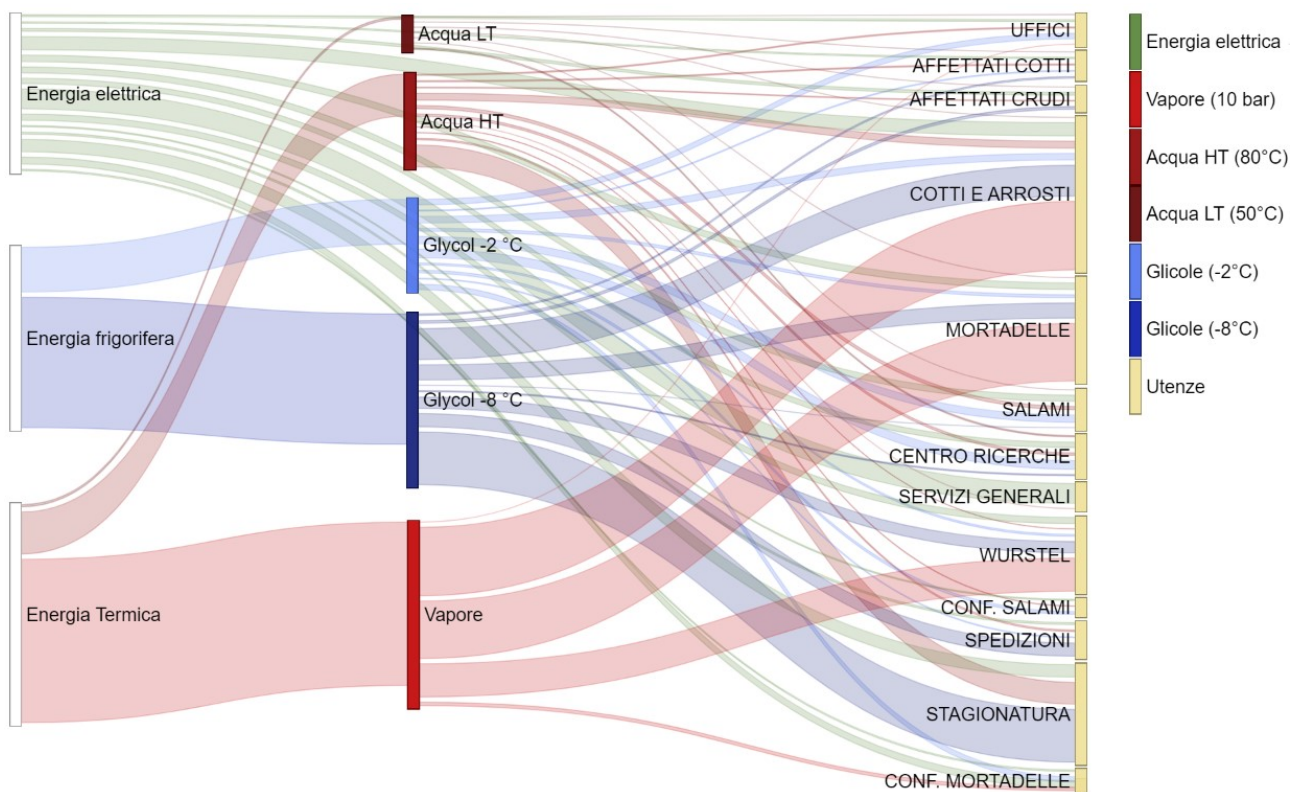
**Figura 40 Ripartizione percentuale dei consumi energetici in kWh dello stabilimento**

Come si evince dal grafico a torta riportato in Figura 40, i fabbisogni di energia termica e frigorifera rappresentano una percentuale consistente del consumo energetico dello stabilimento.

L'azienda è dotata di un sistema di misuratori per il monitoraggio e controllo dei consumi energetici. In particolare, sono presenti misuratori elettrici su tutte le principali utenze elettriche, mentre per quanto riguarda la misura dei consumi di vapore, acqua calda e acqua refrigerata, sono presenti dei contatori generali. Per le altre grandezze coinvolte nel bilancio energetico dello stabilimento l'azienda ricorre a misure spot o stime.

Grazie alla stretta collaborazione con i referenti aziendali, facendo uso del format di raccolta riportati precedentemente, è stato possibile ricostruire dettagliatamente i principali flussi energetici dello stabilimento, il cui risultato finale è riportato nel diagramma di Sankey in Figura 41.

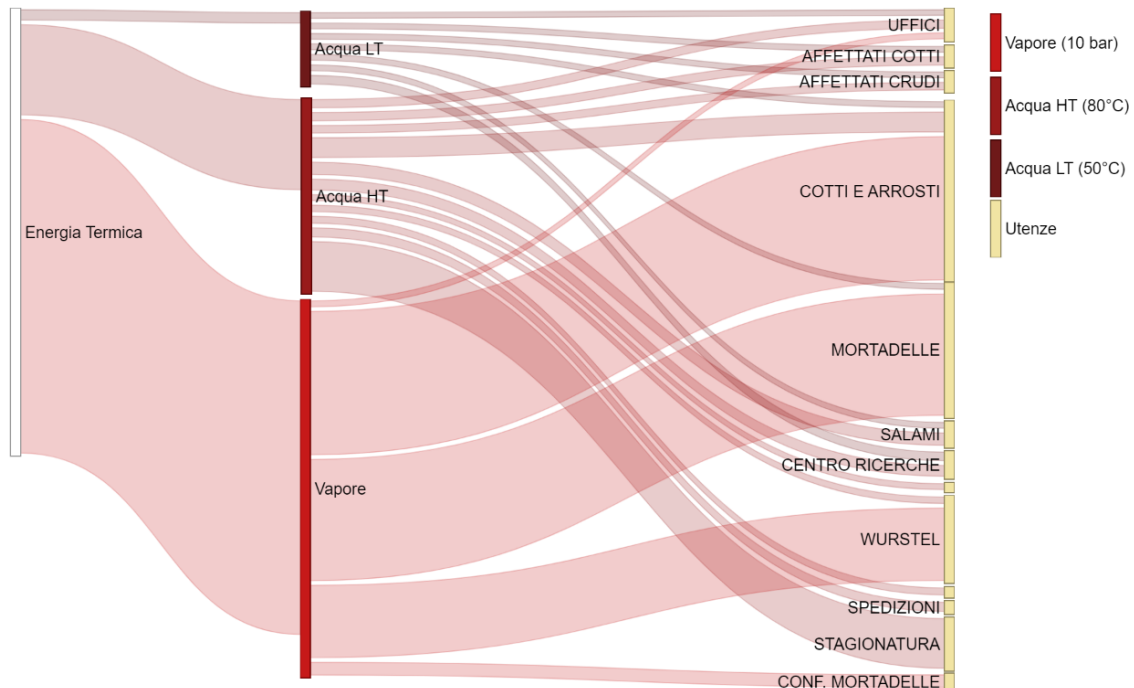
I dati riportati nel diagramma di stabilimento fanno riferimento ai consumi energetici dell'azienda, espressi in kWh, per l'annualità 2019 raccolti in corrispondenza della seconda tornata di diagnosi energetica. Tale scenario di consumo è ritenuto rappresentativo dello stato attuale in quanto non vi sono stati importanti cambiamenti impiantistici che possono aver determinato scostamenti significativi rispetto alla situazione rappresentata in Figura 41. I dati misurati, calcolati e stimati e le informazioni su provenienza, destinazione e temperatura (laddove applicabile) di ogni flusso energetico, erano già disponibili all'azienda, ma sono stati revisionati ed integrati dal gruppo di progetto al fine di raggiungere un congruo livello di dettaglio.



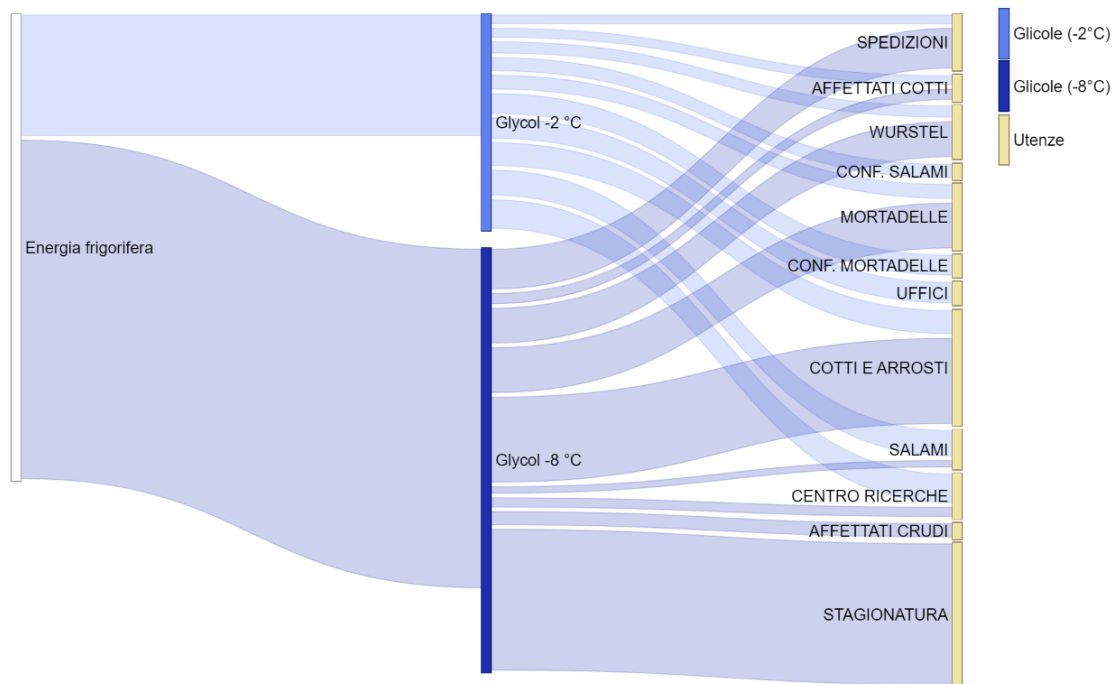
**Figura 41 Diagramma Sankey di stabilimento per la grande azienda del settore alimentare**

Analizzando il diagramma in Figura 41, il consumo di energia termica dello stabilimento è in misura maggiore riconducibile alla richiesta di vapore di processo alla pressione di circa 10 bar utilizzato prevalentemente per i processi di cottura. Importanti sono anche i consumi di acqua calda, nelle due linee HT e BT, utilizzata prevalentemente per i processi di stagionatura, lavaggio e riscaldamento ambienti. Rilevante risulta essere anche il fabbisogno di energia frigorifera, utilizzata prevalentemente per i processi di surgelazione, refrigerazione dei magazzini per la conservazione di materie prime, semilavorati e prodotto finito e per il processo di stagionatura.

Al fine di evidenziare ulteriormente i flussi termici coinvolti, e di testare la versatilità degli strumenti di rappresentazione proposti in questo progetto di ricerca, in Figura 42 e Figura 43 sono riportati rispettivamente i diagrammi di Sankey di dettaglio dei flussi termici e frigoriferi che interessano lo stabilimento industriale.



**Figura 42 Sankey di dettaglio dei principali flussi termici dello stabilimento**



**Figura 43 Diagramma di Sankey dei flussi di energia frigorifera dello stabilimento**

### 5.2.2 Individuazione del calore di scarto

La seconda fase della metodologia prevede l'identificazione e la caratterizzazione dei flussi di calore di scarto disponibili al recupero (in termini di temperatura, tipo di fluido, portata, disponibilità).

In collaborazione con l'azienda è stato individuato un flusso di scarto non ancora recuperato e potenzialmente valorizzabile. Tale flusso si riferisce al calore di scarto messo a disposizione dalla fase di desurriscaldamento dell'impianto frigorifero ad ammoniaca che fornisce il freddo a circa 200 locali nello stabilimento. Il desurriscaldamento viene effettuato tramite due scambiatori di calore a piastre ammoniaca-

acqua che portano la temperatura dell'ammoniaca da 85°C a circa 65°C. Allo stato attuale questo flusso termico disponibile sottoforma di acqua calda alla temperatura di 70°C non è utilizzato. Non essendo installati misuratori dedicati, si è proceduto all'analisi delle schede tecniche dell'impianto grazie alle quali è stato possibile ottenere tutte le informazioni necessarie per caratterizzare il cascame termico non utilizzato. Tali informazioni vengono riportate in Tabella 24.

Inoltre, è stato individuato come potenziale destinatario del flusso di calore di scarto il reparto Wurstel in quanto caratterizzato da diversi utilizzi termici che richiedono temperature comprese tra gli 80 e i 110°C. I vettori energetici richiesti dal reparto in questione sono evidenziati nel diagramma di Sankey in Figura 44.

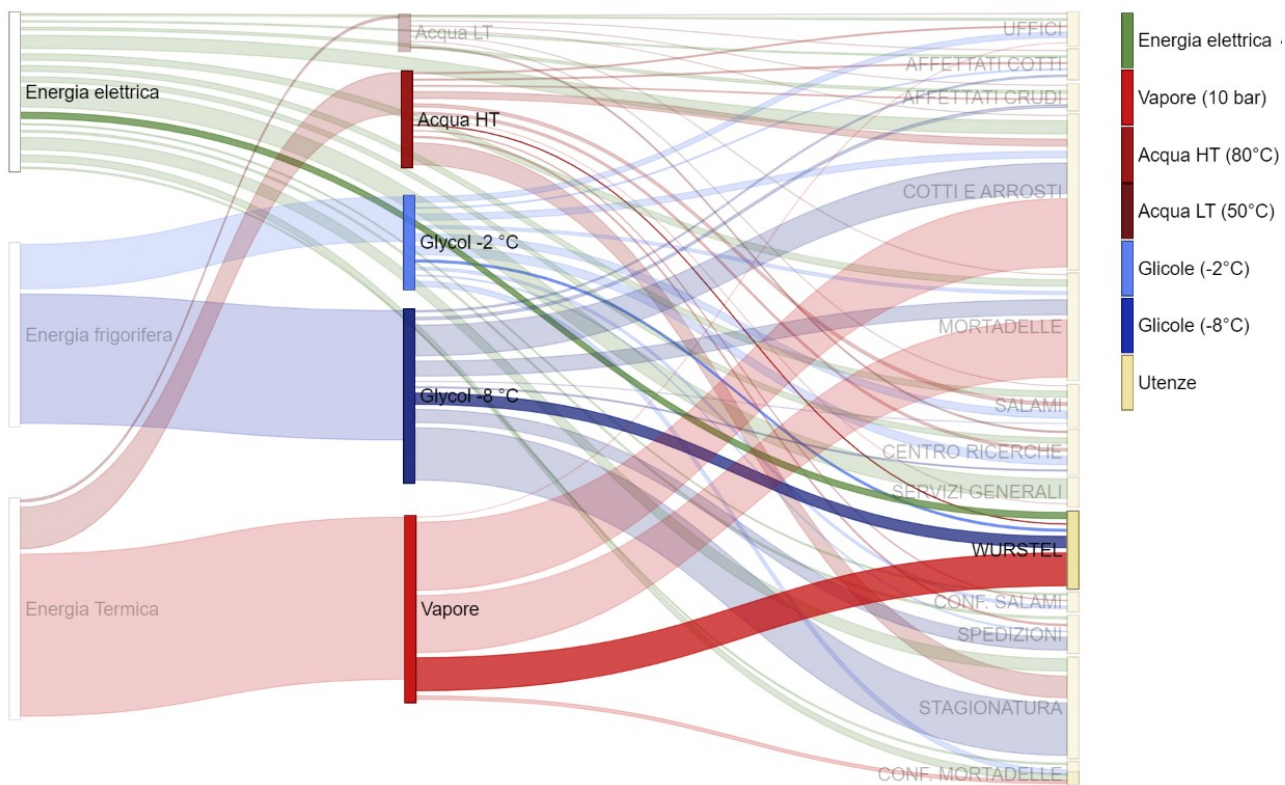
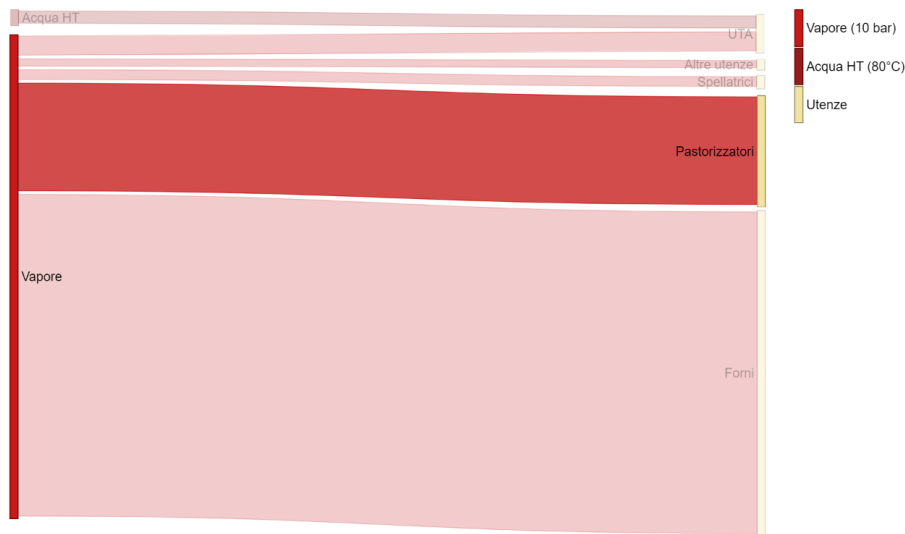


Figura 44 Diagramma di Sankey di stabilimento con i consumi del reparto Wurstel in evidenza

Grazie ai dati resi disponibili dall'azienda, è stato possibile dettagliare ulteriormente i flussi energetici coinvolti nello specifico reparto oggetto di analisi, con un particolare focus al processo di pastorizzazione che è stato individuato come possibile destinatario del calore di scarto recuperabile. Il diagramma di Sankey di dettaglio del reparto wurstel è riportato in Figura 45.



**Figura 45 Diagramma di Sankey di dettaglio del reparto wurstel dello stabilimento con il processo di pastorizzazione in evidenza**

Il reparto wurstel è dotato di due pastorizzatori, funzionanti per un elevato numero di ore/anno. Il processo di pastorizzazione richiede che la temperatura sia mantenuta costante a 83 °C per l'intero ciclo di pastorizzazione. Le perdite dagli sfiati sono considerevoli, allo stato attuale per il mantenimento della temperatura del processo di pastorizzazione viene utilizzato vapore.

In questa fase è inoltre indispensabile analizzare la corrispondenza, sia in termini quantitativi, sia in termini di disponibilità tra calore di scarto e fabbisogni per effettuare una prima valutazione qualitativa delle tecnologie di recupero termico tecnicamente implementabili, prendendo in considerazione le quattro casistiche al previste dal modello di valutazione preliminare (recupero di calore di scarto per la produzione di energia elettrica, energia frigorifera ed energia termica a temperatura più elevata o scambio termico).

Considerando la temperatura del calore di scarto (tra i 60 e i 70°C in funzione delle condizioni operative) non risulta possibile l'utilizzo del calore di scarto per la produzione di energia elettrica mediante ORC e la produzione di energia frigorifera tramite l'utilizzo di frigoriferi ad assorbimento. In virtù di queste considerazioni, e, visto l'elevato fabbisogno di energia termica dello stabilimento, le alternative possibili riguardano il riutilizzo di calore di scarto per la produzione di energia termica ad una temperatura superiore mediante una pompa di calore o per preriscaldare l'acqua di reintegro da inviare al pastoreizzatore stesso.

Per quanto riguarda la corrispondenza tra disponibilità del calore di scarto e la richiesta termica del pastoreizzatore, questa risulta sempre garantita: il calore di scarto è sempre disponibile (8760 ore/anno) mentre il processo di pastorizzazione è stimabile in 4800 ore/anno.

In Tabella 24 sono sintetizzate tutte le informazioni circa il calore di scarto ed il fabbisogno di energia termica individuato. Tali informazioni saranno utilizzate come input al modello di valutazione preliminare.

**Tabella 24 Dati di input al modello**

<b>Calore di scarto</b>	Provenienza	Fase di de surriscaldamento ammoniacca
	Tipo di fluido	Acqua
	Disponibilità (es. ore/anno)	8760 ore/anno
	Portata	5,26 kg/s
	Pressione	< 5 bar
	Temperatura	65 °C
<b>Fabbisogno di energia termica</b>	Processo	Pastorizzazione
	Tipo di Fluido	Acqua
	Richiesta (es. ore/anno)	4800 ore/anno

Portata	0,2 kg/s
Pressione	< 5 bar
Temperatura richiesta ( $T_{out}$ )	83 °C
Temperatura fluido in ingresso ( $T_{in}$ )	25° C

### 5.2.3 Valutazione preliminare

La terza fase della metodologia, l'ultima di competenza del gruppo di ricerca dell'Università di Roma "Tor Vergata", prevede l'applicazione dello strumento per la valutazione preliminare delle tecnologie di recupero di calore.

Per l'applicazione del modello di valutazione preliminare è stata seguita la procedura illustrata nel paragrafo 4.2 "Modulo di valutazione preliminare". I risultati ottenuti dell'applicazione del modello per la tecnologia *pompa di calore* e *scambiatori di calore* sono riportati rispettivamente in Tabella 25 e Tabella 26.

**Tabella 25 Risultati dell'applicazione del modello di valutazione preliminare per la tecnologia pompa di calore**

<b>VALUTAZIONE PRELIMINARE POMPA DI CALORE</b>	
$T_{out}$ [°C]	83
$\Delta T_{ift}$	33
COP	4,70
POTENZA TERMICA OUTPUT [ $kW_t$ ]:	48,56
POTENZA ELETTRICA [ $kW_e$ ]:	10,33
POTENZA TERMICA INPUT [ $kW_t$ ]:	38,22
COPERTURA FABBISOGNO	100%
ENERGIA TERMICA PRODOTTA [MWh <sub>t</sub> /anno]:	233,95
ENERGIA ELETTRICA RICHIESTA [MWh <sub>e</sub> /anno]:	49,60
RISPARMIO ANNUO [€/a]:	12980,10
INVESTIMENTO [€]	26976
PAYBACK TIME PBT [anni]	2,08

**Tabella 26 Risultati dell'applicazione del modello di valutazione preliminare per la tecnologia scambiatori di calore a piastre**

<b>VALUTAZIONE PRELIMINARE SCAMBIATORE DI CALORE</b>	
$T_{out}$ [°C]	62
$\Delta T_{ml}$ [°C]	13,93
$s$ [m <sup>2</sup> ]	0,734
POTENZA TERMICA SCAMBIATORE [ $kW_t$ ]:	31,61
ENERGIA TERMICA [MWh <sub>t</sub> /anno]:	151,44
RISPARMIO ANNUO [€/a]:	11477,57
INVESTIMENTO [€]	1320,08
PAYBACK TIME PBT [anni]	0,12

Per la valutazione preliminare della pompa di calore e dello scambiatore di calore, tutti i parametri modificabili previsti dal modello sono stati lasciati ai valori di primo tentativo suggeriti (vedi paragrafo 4.2 "Modulo di valutazione preliminare") in quanto non si è ritenuto necessario apportare modifiche vista l'assenza di condizioni particolari.

Per entrambe le valutazioni è stato scelto un costo dell'energia elettrica pari 0,15 €/kWh e un costo del metano pari a 0,8 €/Sm<sup>3</sup> (circa 84 €/MWh) Per il calcolo dei risparmi energetici conseguibili è stato utilizzato un rendimento del precedente sistema di generazione pari a 0,90, in accordo con i dati forniti dall'azienda.

Entrambi gli interventi proposti mostrano parametri sia tecnici sia economici favorevoli. Il tempo di ritorno dell'investimento risulta in entrambi i casi inferiore al valore di 3 anni che molte aziende utilizzano come

principale indicatore per valutare la fattibilità di un intervento di efficientamento energetico. Inoltre, è da sottolineare che i due interventi proposti non sono caratterizzati da importanti investimenti iniziali (circa 27 k€ per la pompa di calore e circa 1,5 k€ per lo scambiatore di calore). Si precisa che l'utilizzo della pompa di calore comporta il soddisfacimento integrale del fabbisogno di energia termica considerato; nel caso dello scambiatore di calore a piastre, tale fabbisogno viene soddisfatto solo in parte rendendo necessario l'utilizzo del precedente sistema di generazione per integrare la quota rimanente.

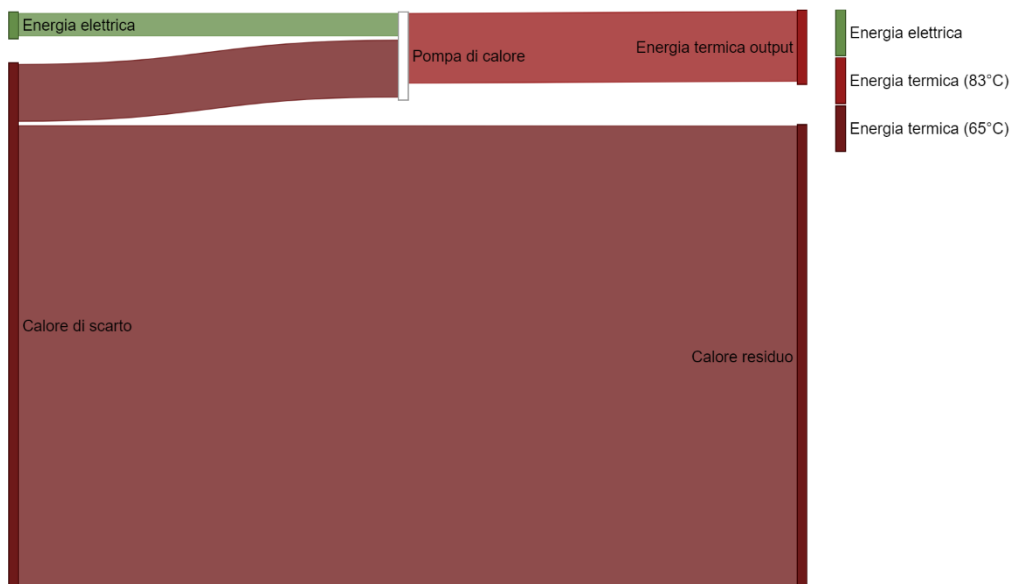
Particolarmente interessante risulta essere l'applicazione dello scambiatore di calore con un investimento iniziale molto basso ed un PBP inferiore ai due mesi. Facendo variare dei parametri rilevanti (analisi di sensitività), come ad esempio, raddoppiando l'investimento iniziale o dimezzando il costo del gas utilizzato per il calcolo dei risparmi, il tempo di ritorno dell'investimento si mantiene inferiore ai 6 mesi.

Più sensibile alla variazione dei parametri è invece l'intervento pompa di calore. Ad esempio, assumendo un costo del gas metano pari a 40 €/MWh (prima del forte aumento del prezzo del combustibile avvenuto nel 2021), si otterrebbe un tempo di ritorno dell'investimento superiore a 5 anni. Tenendo presente lo scopo di questo strumento finalizzato ad una valutazione preliminare della tecnologia, si suggerisce comunque l'approfondimento dell'intervento di efficientamento.

In conclusione, entrambi gli interventi valutati sono promettenti, si consiglia quindi di approfondire entrambe le proposte e valutarli seguendo i criteri di valutazione che l'azienda ridurrà più opportuni (PBP, VAN, riduzione emissioni di CO<sub>2</sub>, ecc.).

È bene sottolineare come nella valutazione preliminare non sono considerati gli eventuali incentivi ottenibili che ridurrebbero ulteriormente il tempo di ritorno dell'investimento.

In Figura 46 e Figura 47 Figura 46 sono riportate le rappresentazioni grafiche, tramite diagrammi di Sankey, dei due interventi di efficientamento proposti.



**Figura 46** Rappresentazione tramite diagramma di Sankey della pompa di calore

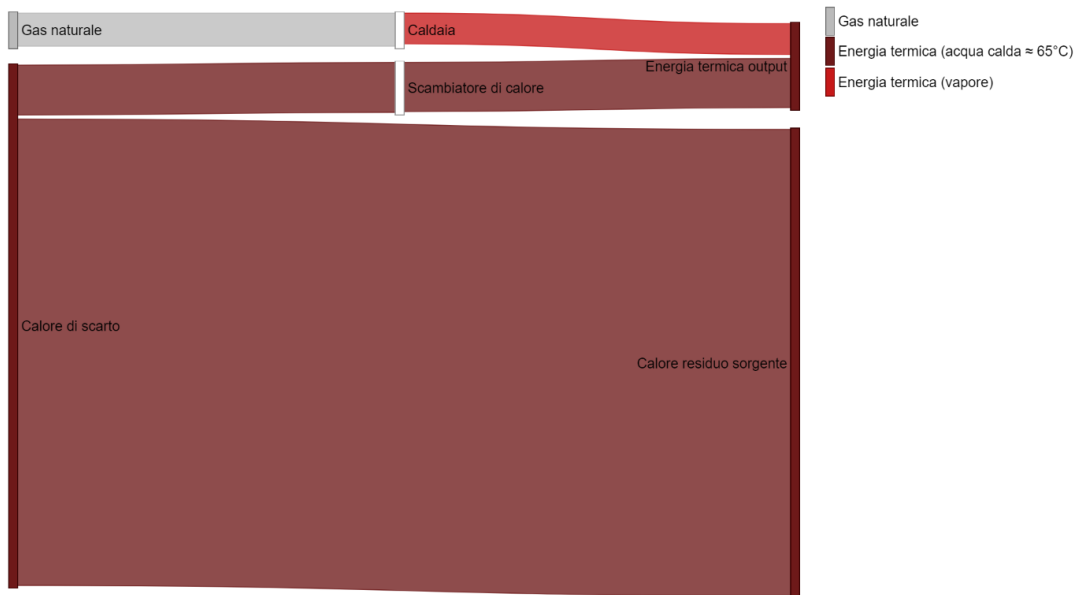


Figura 47 Rappresentazione tramite diagramma di Sankey dello scambiatore di calore a piastre

Analizzando i due diagrammi di Sankey è possibile constatare l’ancora elevato potenziale del calore di scarto che può essere ulteriormente valorizzato valutando altri possibili utilizzi.

*Utilizzo del database come strumento di supporto*

L’ultimo strumento testato nell’ambito del caso di studio proposto è stato il database di tecnologie. A valle della valutazione preliminare, l’azienda dispone quindi di tutte le informazioni sufficienti per poter consultare il database ed ottenere informazioni più dettagliate sulle tecnologie effettivamente disponibili e compatibili con le caratteristiche individuate.

In riferimento alle modalità di consultazione definite nel paragrafo 3.2.2 “Query e consultazione del database”, l’azienda può consultare il database utilizzando la query di tipo B “Informazioni sulla tipologia di recupero” secondo i criteri riportati in Tabella 27.

**Tabella 27 Criteri di ricerca utilizzati per la consultazione del database di tecnologie**

Tipologia di recupero	Tecnologia	Stato di maturità della tecnologia
Produzione di energia termica	Pompa di calore	Tecnologia consolidata
	Pompa di calore ad alta temperatura	
Scambio termico	Scambiatori di calore	Tecnologia consolidata
	Scambiatori di calore a piastre	

Con i criteri di ricerca inseriti, il database mostra l’esistenza di numerose tecnologie compatibili: 12 record provenienti da 9 fornitori differenti per quanto riguarda gli scambiatori di calore; 38 record per le pompe di calore di cui 3 tecnologie di 3 differenti fornitori sono adeguate al tipo di intervento ( $T_{out} > 80^{\circ}C$  e  $P_{t,out}$  di circa 50 kW<sub>t</sub>).

A titolo di esempio, in Tabella 28 sono riportati i risultati della ricerca per la tecnologia pompa di calore. Per garantire la riservatezza delle informazioni Tabella 28 non sono riportate informazioni sui riferimenti del fornitore.



**Tabella 28 Risultati della ricerca nel database per la tecnologia pompa di calore**

CAMPI	RECORD 1	RECORD 2	RECORD 3
<b>Destinazione recupero</b>	Produzione di energia termica	Produzione di energia termica	Produzione di energia termica
<b>Tecnologia utilizzata</b>	Pompa di calore ad alta temperatura	Pompa di calore	Pompa di calore ad alta temperatura
<b>Descrizione tecnologia</b>	Pompe di calore azionate elettricamente in grado di fornire calore con temperature fino a 120°C	Pompe di calore per applicazioni residenziali ed industriali. La pompa di calore è progettata per elevare la temperatura sino ad oltre 80°C, con la massima efficienza in ogni condizione di funzionamento. Singole macchine da 10-60 kW	Pompa di calore ad alta temperatura acqua/acqua e acqua/aria per applicazioni industriali con gas refrigerante naturale R744 (CO <sub>2</sub> ).
<b>Stato di maturità</b>	Tecnologia consolidata	Tecnologia consolidata	Tecnologia consolidata
<b>Campi di applicazione</b>	Riscaldamento privato, riscaldamento industriale dell'acqua nei processi produttivi, recupero di calore. Potenze termiche che vanno da circa 20 a fino 5000 kW <sub>t</sub> . Alcuni settori di riferimento: produzione birra, caseario, produzione zucchero, alimentare, carta, tessile, lavorazione metalli, vetro e ceramica, produzione di energia	Prevalentemente per applicazioni di condizionamento invernale (locali, uffici, ecc.)	Preriscaldamento resine, essiccazione, GDO, HVAC ecc.
<b>Modello</b>	-	Serie residenziale	-
<b>Fluido vettore</b>	-	Acqua	Acqua, aria
<b>Temperatura di input</b>	Da -20 a +70 °C	20-60 °C	0-30 °C
<b>Minima temperatura di input</b>	-20 °C	20 °C	0 °C
<b>Portata fluido vettore</b>	-	-	-
<b>Fluido di lavoro</b>	R134a, R245fa, R1234ze	R290 (propano), R600a (isobutano)	CO <sub>2</sub>
<b>Potenza termica in ingresso</b>	14-1734 kW <sub>t</sub>	<50 kW <sub>t</sub>	25-125 kW <sub>t</sub>
<b>Tipo di output</b>	Energia Termica	Energia Termica	Energia Termica
<b>Potenza di Output</b>	17-2063 kW <sub>t</sub>	10-60 kW <sub>t</sub>	40-200 kW <sub>t</sub>
<b>Temperatura di output</b>	65-120 °C	Fino a 80-90°C	Fino a 110 °C
<b>Efficienza</b>	-	COP da 3,5 a 5,5	COP= 2,6 - 3,5
<b>Dimensioni</b>	-	-	0.08 m <sup>2</sup> /kW <sub>t</sub>
<b>Vita utile attesa</b>	-	20 anni	10 anni
<b>PBP atteso</b>	-	-	1-2 anni
<b>Note</b>	-	-	-

### 5.3 Grande azienda del settore della produzione di articoli in carta e cartone

L'interazione con la grande azienda del settore della produzione della produzione di articoli in carta e cartone è avvenuta grazie a contatti precedenti esistenti tra quest'ultima e il gruppo di ricerca dell'Università di Roma "Tor Vergata". L'azienda in questione è un'azienda italiana multiprodotto leader in Italia nella produzione di prodotti intimi per la cura della persona. L'azienda è caratterizzata da consumi energetici elevati, e, sebbene non sia un grande utilizzatore di energia termica e frigorifera per i processi produttivi, si è dimostrata fortemente interessata alla tematica del recupero di calore, motivata dalla continua ricerca del miglioramento della propria prestazione energetica, anche in ottica di sistema di gestione dell'energia per la quale l'azienda risulta certificata secondo lo standard ISO 50001:2018.

I contatti preliminari avvenuti prevalentemente a distanza sono stati dedicati alla presentazione e descrizione del progetto di ricerca. È stato organizzato un sopralluogo in stabilimento di due giorni, a novembre 2021 per favorire la conoscenza dell'impianto e dei principali vettori e usi energetici. Con le stesse modalità descritte per i precedenti casi di studio si è proceduto alla fase di raccolta dei dati finalizzata all'applicazione dei

principali strumenti sviluppati, in particolare, la realizzazione di diagrammi di Sankey dello stabilimento, l'applicazione della metodologia per l'identificazione e l'analisi dei flussi energetici e degli interventi di efficientamento, e l'utilizzo del database nel suo ruolo di supporto nell'individuazione delle possibili tecnologie implementabili compatibili con i flussi di scarto individuati.

### 5.3.1 Analisi del contesto

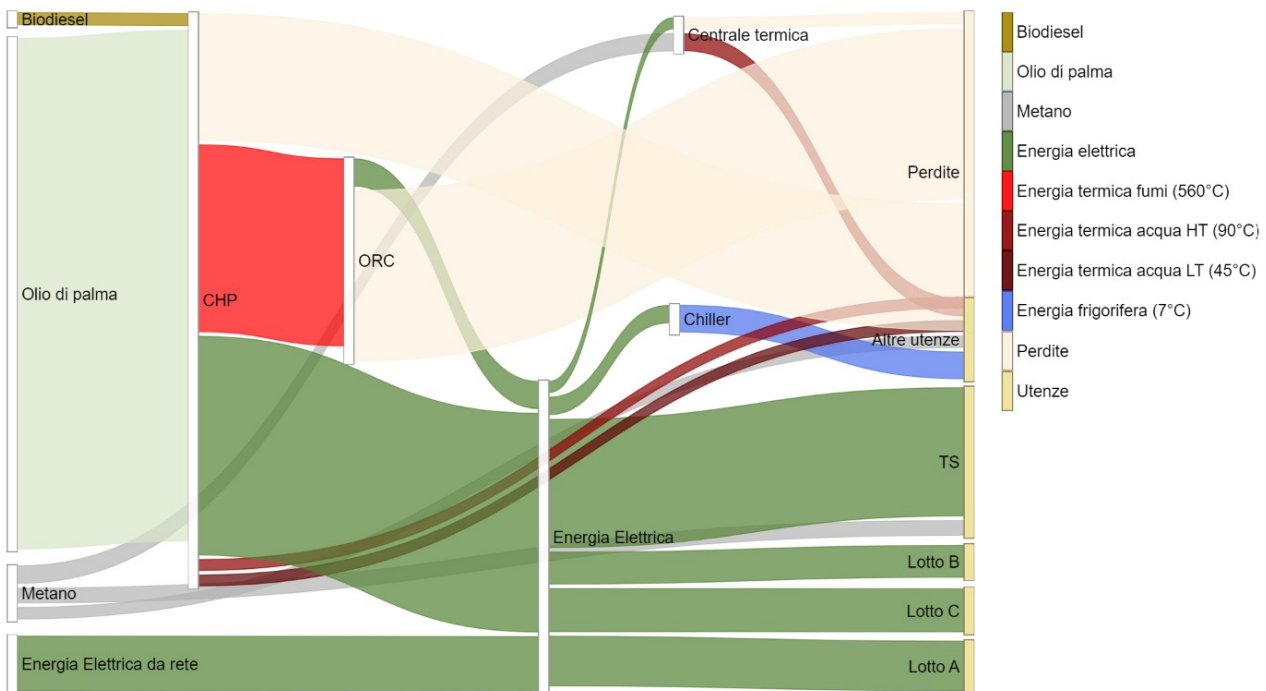
La struttura dell'azienda in esame è organizzata in tre lotti produttivi (lotto A, lotto B, lotto C) in cui sono concentrate le numerose linee di produzione. Parte consistente dei consumi energetici è rappresentata dai *Servizi Tecnici* (TS) che racchiudono i servizi ausiliari a supporto delle linee produttive (centrale aria compressa e altri impianti specifici) servizi generali (uffici, magazzini, illuminazione, unità di trattamento aria, altro)

Lo stabilimento è dotato di un impianto per l'autoproduzione di energia elettrica costituito da un motore principale da 8 MW<sub>e</sub> (motore a combustione interna di derivazione navale) che, per il suo funzionamento, utilizza principalmente la biomassa vegetale (olio di palma) e, in misura minore, biodiesel per l'avvio e l'arresto. Parte del calore generato viene recuperato da un primo scambiatore denominato LT (Low-Temperature) per la produzione di acqua calda a 45°C ed utilizzato nel circuito post-caldo delle unità di trattamento aria di stabilimento. Attraverso uno scambiatore di calore denominato "Scambiatore 1", il calore dei fumi di scarico del motore è utilizzato per permettere il funzionamento del motore secondario ORC. Un ulteriore scambiatore denominato "Scambiatore 2" permette la produzione di acqua calda HT (High-Temperature) a 90°C per il riscaldamento dell'anello acqua caldaie e di conseguenza evitare l'avvio delle stesse. Il restante calore viene disperso dal camino a temperature ridotte rispetto al primo ingresso (si passa dai circa 560°C ai circa 120°C).

Lo stabilimento è anche alimentato dalla rete elettrica nazionale per permettere la vendita dell'energia prodotta e non utilizzata o l'acquisto di quella mancante, e dal metano, utile per la mensa, per lo smaltimento dei solventi e per il riscaldamento (in supporto al cogeneratore).

Gli usi energetici vengono costantemente registrati e tenuti sotto controllo grazie ai numerosi misuratori di cui è dotato il sistema di monitoraggio dell'azienda. Sono presenti misuratori per l'energia elettrica prodotta dal sistema di cogenerazione, per l'energia elettrica venduta e acquistata e, in generale, su tutte le utenze più energivore dello stabilimento. Per i consumi di metano sono presenti, oltre al contatore del gestore in ingresso allo stabilimento, dei sotto-contatori per il consumo della mensa e dell'impianto COV. Anche il consumo di combustibile per il cogeneratore viene costantemente misurato attraverso sistemi di supervisione in cabina di comando per il regolare funzionamento del motore. Vengono inoltre misurate altre variabili rilevanti come, ad esempio, l'aria compressa utilizzata nei tre reparti di produzione.

Grazie alla collaborazione con i referenti aziendali, facendo uso del format di raccolta riportati precedentemente, è stato possibile ricostruire la mappatura energetica dello stabilimento, il cui risultato finale è riportato nel diagramma di Sankey in Figura 48.



**Figura 48 Diagramma Sankey di stabilimento per la grande azienda del settore della produzione di articoli in carta e cartone**

I dati riportati nel diagramma di stabilimento fanno riferimento ai consumi energetici dell'azienda, espressi in kWh, per le annualità 2019-2020. I dati utilizzati provengono quasi integralmente dal sistema di monitoraggio presente nello stabilimento. Dove necessario si è ricorsi a stime e calcoli.

L'analisi del diagramma di Sankey in Figura 48, seppure molto complesso a causa dei differenti impianti per produzione di energia elettrica e dei diversi combustibili utilizzati, mostra come il consumo di energia elettrica sia preponderante rispetto all'energia termica il cui utilizzo è difatti limitato al riscaldamento degli ambienti nel periodo invernale (sotto la voce "Altre utenze").

### 5.3.2 Individuazione del calore di scarto

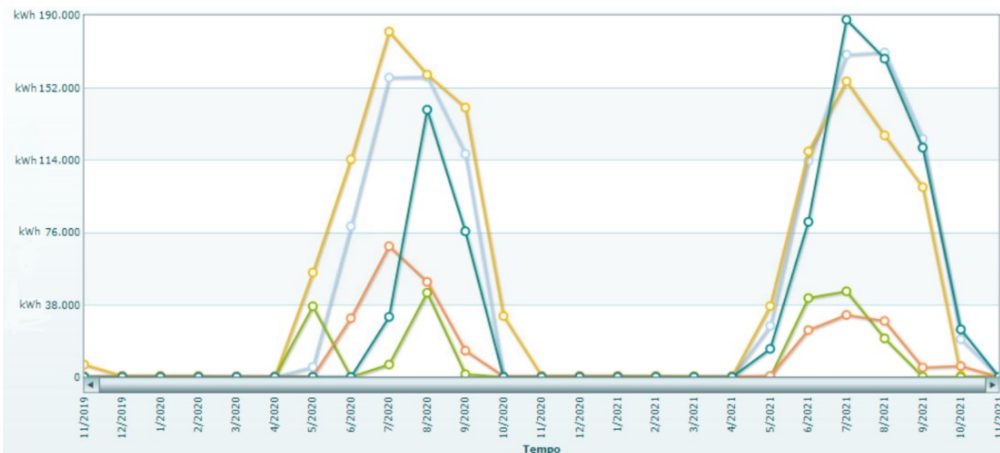
La seconda fase della metodologia prevede l'identificazione e la caratterizzazione dei flussi di calore di scarto disponibili al recupero (in termini di temperatura, tipo di fluido, portata, disponibilità).

In collaborazione con l'azienda è stato individuato un flusso di scarto non ancora recuperato e potenzialmente valorizzabile. Tale flusso si riferisce al calore di scarto messo a disposizione da uno dei circuiti che recuperano il calore dal sistema di cogenerazione. Tale circuito, denominato circuito HT (High Temperature), produce acqua calda alla temperatura di circa 90 °C utilizzata sia nei mesi invernali per il pre e post-riscaldamento delle UTA (Unità Trattamento Aria), sia nei mesi estivi per mantenere in temperatura i serbatoi di olio di palma (che altrimenti solidificherebbe) e per garantire una corretta de-umidificazione estiva. Tale recupero, in virtù della bassa richiesta termica dello stabilimento, non risulta essere ottimizzato.

Autoproducendosi integralmente l'energia elettrica utile (a meno di fermi del cogeneratore), e, a fronte del limitato fabbisogno termico dello stabilimento, l'unica alternativa possibile risulta quella di utilizzare questo calore per il soddisfacimento dei fabbisogni di energia frigorifera tramite l'utilizzo di un frigorifero ad assorbimento.

Il fabbisogno di energia frigorifera dello stabilimento viene attualmente soddisfatto tramite l'utilizzo di chiller elettrici. Non essendo presenti misuratori dell'acqua refrigerata utilizzata, per la stima del fabbisogno di energia frigorifera si è ricorsi ai dati di assorbimenti elettrici orari dei chiller per l'anno 2021. Nei mesi estivi di giugno, luglio, agosto e settembre l'assorbimento elettrico medio risulta essere pari 605,3 kW<sub>e</sub> con un COP medio di 2,5.

In Figura 49 sono riportati i consumi energetici dei chiller presenti nello stabilimento destinati alla produzione di energia frigorifera per la climatizzazione dove si evidenzia l'andamento stagionale.



**Figura 49 Andamento dell'energia elettrica assorbita dai chiller dello stabilimento destinati alla produzione di energia frigorifera per climatizzazione**

In Tabella 29 sono sintetizzate tutte le informazioni raccolte circa il calore di scarto ed il fabbisogno di energia frigorifera individuato. Tali informazioni saranno utilizzate come input al modello di valutazione preliminare.

**Tabella 29 Dati di input al modello**

<b>Calore di scarto</b>	Provenienza	Recupero calore da cogeneratore
	Tipo di fluido	Acqua calda
	Disponibilità (es. ore/anno)	7500 ore/anno
	Portata	11,11 kg/s
	Pressione	< 5 bar
	Temperatura	90 °C
<b>Fabbisogno di energia termica</b>	Processo	Condizionamento estivo
	Tipo di Fluido	Acqua refrigerata
	Richiesta (es. ore/anno)	2500 ore/anno
	Portata	28,91 kg/s
	Pressione	< 5 bar
	Temperatura richiesta ( $T_{out}$ )	7 °C
	Temperatura fluido in ingresso ( $T_{in}$ )	12° C

### 5.3.3 Valutazione preliminare

La terza fase della metodologia prevede l'applicazione dello strumento per la valutazione preliminare delle tecnologie di recupero di calore la cui applicazione segue fedelmente la procedura illustrata nel paragrafo 4.2 "Modulo di valutazione preliminare".

Utilizzando i dati di input descritti precedentemente (Tabella 29), la Tabella 30 riporta i risultati ottenuti dell'applicazione del modello per la tecnologia *frigoriferi ad assorbimento*.

**Tabella 30 Risultati dell'applicazione del modello di valutazione preliminare per la tecnologia frigorifero ad assorbimento**

VALUTAZIONE PRELIMINARE FRIGORIFERO AD ASSORBIMENTO	
$T_{out}$ [°C]	7
COP	0,646
POTENZA FRIGORIFERA GENERABILE [ $kW_f$ ]:	600,6
POTENZA FRIGORIFERA RICHIESTA [ $kW_f$ ]:	1512,5
COPERTURA FABBISOGNO	40%
ENERGIA FRIGORIFERA [ $MWh_f$ /anno]:	1501,5
RISPARMIO ANNUO [€/a]:	87885,1

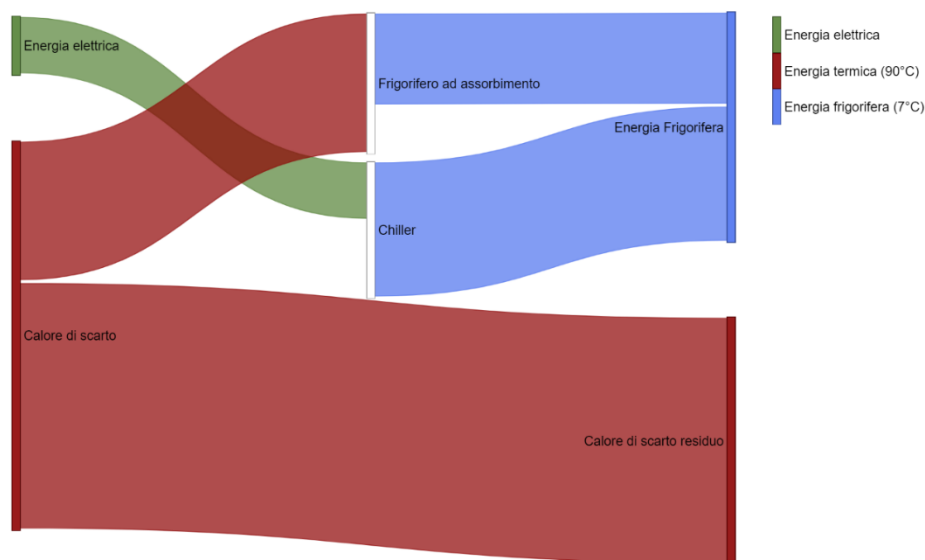
INVESTIMENTO [€]	233569,5
PAYBACK TIME PBT [anni]	2,66

Per il calcolo dei risparmi energetici conseguibili è stato utilizzato un costo dell'energia elettrica pari 0,16 €/kWh<sub>e</sub> e un COP del precedente sistema di generazione pari a 2,5, in accordo con i dati forniti dall'azienda. Ad eccezione del salto di temperatura del calore di scarto fissato al valore di 20°C ( $\Delta T_{caldo}$ ), tutti gli altri parametri selezionabili sono stati lasciati ai valori di primo tentativo (vedi paragrafo 4.2 "Modulo di valutazione preliminare") in quanto non si è ritenuto necessario apportare modifiche vista l'assenza di condizioni particolari.

L'intervento proposto presenta dei parametri economici favorevoli. Il tempo di ritorno dell'investimento risulta di 2, anni, a fronte di un investimento iniziale non trascurabile di circa 234 k€ con un risparmio annuo stimabile in 87,9 k€/anno. Inoltre, svolgendo un'analisi di sensitività del tempo di ritorno dell'investimento facendo variare il costo dell'energia elettrica da un minimo di 0,10 €/kWh<sub>e</sub> ad un massimo 0,20 €/kWh<sub>e</sub>, il PBP rimane contenuto tra i 2,13 anni e i 4,25 anni.

Gli ottimi risultati ottenuti non possono che suggerire all'azienda un approfondimento dell'intervento di efficientamento individuato.

In Figura 50 Figura 46 è riportata la rappresentazione grafiche, tramite diagramma di Sankey, dell'intervento di efficientamento proposto.



**Figura 50 Rappresentazione tramite diagramma di Sankey del frigorifero ad assorbimento**

#### Utilizzo del database come strumento di supporto

L'ultimo strumento testato nell'ambito del caso di studio proposto è stato il database di tecnologie. A valle della valutazione preliminare, l'azienda dispone quindi di tutte le informazioni sufficienti per poter consultare il database ed ottenere informazioni più dettagliate sulle tecnologie effettivamente disponibili e compatibili con le caratteristiche individuate.

In riferimento alle modalità di consultazione definite nel paragrafo 3.2.2 "Query e consultazione del database", l'azienda può consultare il database utilizzando la query di tipo B "Informazioni sulla tipologia di recupero" secondo i criteri riportati in Tabella 31.

**Tabella 31 Criteri di ricerca utilizzati per la consultazione del database di tecnologie**

Tipologia di recupero	Tecnologia	Stato di maturità della tecnologia
Produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento	Tecnologia consolidata

Con i criteri di ricerca inseriti, il database mostra l'esistenza di numerose tecnologie compatibili: 22 record relativi a frigoriferi ad assorbimento di 9 tecnologie di 5 differenti fornitori sono adeguate al tipo di intervento ( $T_{in} < 90^{\circ}\text{C}$  e  $P_{f,out}$  di circa 600 kW<sub>f</sub>).

L'azienda, in un periodo temporalmente precedente a questa applicazione, ha contattato un fornitore di frigoriferi ad assorbimento per valutare l'utilizzo dello stesso per l'analoga situazione. L'interazione si è però fermata ad una fase preliminare. Tale circostanza ha permesso di validare ulteriormente gli strumenti proposti: Il fornitore contattato dalla azienda è presente all'interno del database sviluppato, e le sue tecnologie sono tra quelle compatibili con i criteri di ricerca selezionati. In aggiunta, l'azienda oggetto della valutazione preliminare avrà la possibilità di interfacciarsi con altri quattro fornitori di frigoriferi ad assorbimento e valutare la soluzione migliore per le proprie esigenze scegliendo tra più alternative.

A titolo di esempio, in Tabella 32 sono riportati alcuni dei risultati della ricerca nel database per la tecnologia frigoriferi ad assorbimento. Per garantire la riservatezza delle informazioni, in Tabella 32 Tabella 28 non sono riportate informazioni sui riferimenti del fornitore.

**Tabella 32 Risultati della ricerca nel database per la tecnologia frigoriferi ad assorbimento**

CAMPI	RECORD 1	RECORD 2	RECORD 3
<b>Destinazione recupero</b>	Produzione di energia frigorifera	Produzione di energia frigorifera	Produzione di energia frigorifera
<b>Tecnologia utilizzata</b>	Frigoriferi ad assorbimento	Frigoriferi ad assorbimento	Frigoriferi ad assorbimento
<b>Descrizione tecnologia</b>	Frigoriferi ad assorbimento a Bromuro di litio alimentati ad acqua calda	Frigoriferi ad assorbimento a Bromuro di litio per recupero del calore di scarto per la produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento acqua-bromuro di litio alimentati da acqua calda a singolo effetto ad alta efficienza. Produzione di acqua refrigerata alla temperatura minima di 5°C
<b>Stato di maturità</b>	Tecnologia consolidata	Tecnologia consolidata	Tecnologia consolidata
<b>Campi di applicazione</b>	Applicazione nel settore areoportuale, ospedaliero, industriale, terziario. Applicazione principale è il recupero di calore da cogenerazione	Qualsiasi sistema che presenti del calore di scarto (settore alimentare, plastico, terziario, etc.)	-
<b>Modello</b>	-	-	-
<b>Fluido vettore</b>	Acqua	Acqua	Acqua
<b>Temperatura di input</b>	Da 65 a +165 °C	80-120 °C	80-120 °C
<b>Minima temperatura di input</b>	65 °C	80 °C	80 °C
<b>Portata fluido vettore</b>	-	-	2,1-91,4 kg/s
<b>Fluido di lavoro</b>	Acqua-LiBr	Acqua-LiBr	Acqua-LiBr
<b>Potenza termica in ingresso</b>	25 - 15000 kW <sub>t</sub>	60-2800 kW <sub>t</sub>	130-5500 kW <sub>t</sub>
<b>Tipo di output</b>	Energia frigorifera	Energia frigorifera	Energia frigorifera
<b>Potenza di Output</b>	20 - 11000 kW <sub>f</sub>	52-2212 kW <sub>f</sub>	105-4571 kW <sub>f</sub>
<b>Temperatura di output</b>	> 2,5 °C	7-12 °C	> 5 °C
<b>Efficienza</b>	COP da 0,7 a 0,84	COP=0,8	COP= 0,825
<b>Dimensioni</b>	-	0,01 m <sup>2</sup> /kWf	Lu*La*Al 2,110m*1,156m*2,131m (105 kWf) 8,466m*3,345m*3,709m (4571 kWf)
<b>Vita utile attesa</b>	20	>20 anni	-
<b>PBP atteso</b>	-	1,5 anni	-
<b>Note</b>	-	-	Per i valori tecnici indicati si fa riferimento a: <ul style="list-style-type: none"> <li>min. temp. ingresso ammissibile dell'acqua di raffreddamento: 20°C;</li> <li>L'intervallo controllabile deve essere 0 ~ 100%;</li> <li>Ogni flusso d'acqua può essere regolato entro il 50 ~ 120%;</li> <li>Temp. ingresso/uscita acqua calda: 95/85.</li> </ul>

## 5.4 Discussioni

La sperimentazione degli strumenti, già iniziata nello scorso anno, si è conclusa durante la presente annualità portando a quattro il totale dei casi di studio sviluppati. Tale attività ha ricoperto un ruolo fondamentale. Grazie alla collaborazione di importanti aziende operanti nello scenario industriale italiano è stato possibile svolgere le operazioni necessarie a terminare la sperimentazione e validazione definitiva degli strumenti proposti: in particolare, la metodologia di identificazione e l'analisi dei flussi energetici e degli interventi di efficientamento sulla base di dati reali, nonché il database di tecnologie di recupero nel suo ruolo di supporto all'individuazione e valutazione della soluzione ottimale per il recupero del calore.

Per i quattro casi di studio si è seguito un approccio comune: si è partiti dalla presentazione del progetto di ricerca, laddove possibile organizzando un sopralluogo dello stabilimento, per poi passare alla raccolta dati propedeutica all'applicazione degli strumenti.

La fase di raccolta dati è sicuramente la più dispendiosa; tuttavia, questa non ha generato problematiche durante le applicazioni, in quanto tutte le aziende disponevano della maggior parte dei dati necessari. Tale aspetto è di fondamentale importanza, derivante una progettazione di strumenti che potessero essere applicati con successo utilizzando dati, unitamente ad un livello di dettaglio, di cui le aziende normalmente dispongono. I dati richiesti risultano essere in linea con quelli disponibili a valle di audit energetici, ad esempio, a seguito di una diagnosi energetica ai sensi del D.Lgs. 102/14.

In Tabella 33 è riportata una sintesi dei risultati ottenuti per gli interventi valutati nei casi di studio analizzati.

**Tabella 33 Riepilogo degli interventi di efficientamento proposti per i casi di studio sviluppati nell'ambito del progetto di ricerca**

Caso studio	Provenienza calore di scarto	Applicazione	Intervento proposto	Taglia	Investimento	PBP
Grande azienda del settore della lavorazione della gomma*	Condense vapore	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	8,5 kW <sub>e</sub>	49,5 k€	5,79 anni
Grande azienda del settore caseario	Raffreddamento compressori aria	Produzione acqua calda di processo	Pompa di calore	385,1 kW <sub>t</sub>	171,2 k€	3,89 anni
Grande azienda del settore alimentare	Desurriscaldamento ammoniaca impianto frigorifero	Processo di pastorizzazione	Pompa di calore	48,6 kW <sub>t</sub>	27,0 k€	2,08 anni
		Preriscaldamento acqua per processo di pastorizzazione	Scambiatore di calore	31,6 kW <sub>t</sub>	1,3 k€	0,12 anni
Grande azienda del settore della produzione di articoli in carta e cartone	Recupero calore da cogeneratore	Condizionamento estivo	Frigorifero ad assorbimento	600,6 kW <sub>t</sub>	233,6 k€	2,66 anni

\*Caso di studio presentato nella precedente annualità di ricerca (LA 3.22). I risultati ottenuti sono stati aggiornati tenendo conto delle modifiche apportate al modello di valutazione preliminare descritte nel presente report di progetto.

Tutti i risultati conseguiti sono stati ritenuti interessanti sia dal gruppo di ricerca sia dalle aziende interessate e pertanto i valori ottenuti suggeriscono un approfondimento ulteriore degli stessi. Si ricorda come lo scopo del modello applicato sia quello di ottenere una valutazione preliminare quanto più realistica possibile, al fine di individuare le soluzioni più idonee che possiedono caratteristiche tali da meritare uno studio più dettagliato.

A seguito delle applicazioni sui casi di studio, in virtù degli ottimi risultati ottenuti, non si è ritenuto necessario effettuare importanti modifiche agli strumenti sviluppati. Tale aspetto può essere riconducibile all'aver prodotto degli strumenti dal forte carattere operativo progettati appositamente per l'applicazione nel contesto industriale, tenendo sempre in considerazione la quantità e la tipologia di dati necessari allineati con le disponibilità delle aziende. Pertanto, le sperimentazioni hanno avuto il principale, nonché fondamentale, ruolo di validare e contestualizzare tali strumenti dimostrandone appropriatezza e fruibilità.

Da sottolineare come gli strumenti applicati abbiano consentito, in maniera agevole, di proporre soluzioni interessanti, nonostante l'elevata maturità e attenzione con cui le aziende oggetto di caso di studio già affrontavano tematiche relative all'efficienza energetica. La metodologia ha consentito di individuare flussi non semplici da sfruttare, ed individuare tecnologie idonee operanti in condizioni non particolarmente favorevoli. I responsabili aziendali non erano spesso a conoscenza della capacità di tali tecnologie di essere utilizzabili a determinate temperature e, soprattutto, delle prestazioni raggiungibili.

Particolarmente apprezzato dai referenti delle varie aziende è risultato l'utilizzo del database nel suo ruolo di supporto nell'individuazione delle tecnologie. Utilizzando un numero limitato di dati di input, come la temperatura del calore di scarto, il range di potenza termica disponibile e informazioni relative alla tipologia di tecnologia da ricercare, il database riporta tecnologie, consolidate ed innovative, che possono essere successivamente approfondite dall'azienda. È bene notare come, sebbene il database rappresenti uno strumento "autonomo" il suo ruolo si è dimostrato particolarmente efficace se utilizzato a valle di una valutazione preliminare, permettendo di ottenere risultati maggiormente focalizzati su quelle che possono essere le tecnologie realmente implementabili. L'efficacia nell'applicazione di questo strumento è in parte derivante dalle query introdotte che sono state generate con un'ottica operativa ripercorrendo i processi logici che accompagnano tipicamente la ricerca e la valutazione di interventi di efficientamento energetico.

In conclusione, questa attività di validazione ha permesso di contestualizzare gli strumenti sviluppati nello scenario industriale italiano, al quale ci si vuole riferire, e ha permesso di consolidarne il funzionamento. I positivi feedback ottenuti dagli esperti del settore circa la fruibilità degli strumenti ne ha confermato l'effettiva adeguatezza. Inoltre, è doveroso sottolineare come il progetto di ricerca ha sempre suscitato l'interesse delle aziende che ne hanno riconosciuto la validità e l'attualità delle tematiche affrontate.



## 6 Conclusioni

Le attività svolte nel corso della terza annualità, a conclusione del progetto di ricerca, hanno permesso di ottenere una versione finale degli strumenti sviluppati. In particolare, è stato realizzato un database di tecnologie di recupero di calore a bassa e a bassissima temperatura e una metodologia da applicare per l'identificazione, la valutazione e la mappatura dei flussi energetici. Il prezioso contributo di fornitori di tecnologie, progetti di ricerca e aziende, che si sono resi disponibili al confronto con il gruppo di ricerca, ha consentito di creare degli strumenti contestualizzati e validati nello scenario industriale italiano.

L'interazione con i fornitori di tecnologie ha rappresentato un contributo fondamentale nello sviluppo delle linee di attività del gruppo di ricerca. Nel corso delle ultime due annualità di ricerca è stato contattato un totale di circa 45 fornitori di tecnologia nazionali ed internazionali, con la realizzazione di 16 interviste (9 nell'annualità 2020 e 7 nell'annualità 2021). Sono stati inoltre contattati 13 progetti di ricerca attivi nella tematica del recupero di calore, con la realizzazione di 4 interviste (tutte realizzate nella terza annualità) per un totale di 20 interviste realizzate.

Nel corso della terza e ultima annualità di ricerca è stata validata e resa definitiva la struttura del database di tecnologie ed è stato esteso in maniera sostanziale il suo popolamento. La versione definitiva del database contiene 100 record di tecnologie di recupero di calore a bassa e bassissima temperatura, provenienti da 37 diverse fonti, per lo più riconducibili a cataloghi dei fornitori e tecnologie riscontrate durante le interviste realizzate. Il database è stato realizzato sia in versione Excel che in versione Access, destinata alla consultazione dell'utente esterno. Le sperimentazioni di tale strumento hanno avuto un esito positivo. Lo strumento è stato apprezzato dai referenti aziendali dei casi di studio affrontati, i quali hanno riconosciuto la completezza ma allo stesso tempo la semplicità nel suo utilizzo.

Parallelamente al completamento del database, il gruppo di ricerca ha proseguito le attività volte alla finalizzazione di una metodologia per l'identificazione e l'analisi dei flussi energetici e degli interventi di efficientamento. Il focus dell'università di Roma "Tor Vergata" è stato posto sulla realizzazione di un modulo di valutazione preliminare che, a partire da pochi dati in ingresso, compatibili con quelli generalmente disponibili alle aziende, potesse offrire una prima valutazione dei possibili interventi di recupero termico implementabili nel caso specifico considerato, sia dal punto di vista tecnico, sia economico. Sono stati sviluppati dei modelli ad hoc per le tecnologie più rappresentative nel panorama del recupero di calore in campo industriale. Gli ORC per la generazione di energia elettrica, le pompe di calore per la generazione di energia termica, i frigoriferi ad assorbimento per la generazione di energia frigorifera, gli scambiatori di calore a piastre per applicazioni di scambio termico a bassa temperatura sono state selezionate come le tecnologie più rappresentative delle diverse tipologie di recupero di calore di scarto. Per esse è stato sviluppato un modello dedicato, sulla base di caratteristiche tecniche ed economiche rilevate durante l'analisi della letteratura, e consolidate grazie ai fornitori di tecnologie. Nell'ultima annualità ci si è dedicati all'estensione di questo modello agli scambiatori di calore a piastre, allo sviluppo di un foglio di calcolo che includesse tutti i modelli sviluppati. Fondamentale sono state le fasi di test di questi strumenti sui casi di studio.

Sono state inoltre definiti e sperimentati gli strumenti da utilizzare nella rappresentazione dei flussi di calore. Lo strumento selezionato è il diagramma Sankey, in quanto coniuga semplicità di visualizzazione con quantità di informazioni in grado di fornire. Come strumento di sviluppo è stato scelto il software "Power BI" in quanto, essendo integrato con Excel, ne permette una semplice realizzazione e un rapido aggiornamento. In questa annualità ci si è dedicati allo sviluppo di alcuni format per la realizzazione dei diagrammi di Sankey, ciascuno per ognuna delle quattro tipologie di recupero di calore, al fine di facilitarne la rappresentazione in maniera più immediata a seguito della valutazione preliminare di un intervento di recupero di calore.

Tutti gli strumenti sviluppati nell'ambito del progetto di ricerca sono stati validati grazie alla loro applicazione su casi di studio reali. In totale sono stati affrontati 4 casi di studio, il primo relativo ad una grande azienda del settore della lavorazione della gomma, presentato nella precedente annualità di ricerca (LA 3.22) e i restanti tre casi di studio, affrontati in questa annualità, relativi a grandi aziende rispettivamente del settore

caseario, alimentare e della lavorazione di articoli in carta e cartone. Tale validazione si è rivelata molto positiva, confermando la fruibilità degli strumenti coniugata all'utilità dei risultati raggiungibili.

Indice del successo del progetto è stato il riscontro positivo circa gli strumenti sviluppati all'interno del progetto di ricerca ottenuto da fornitori di tecnologie, progetti di ricerca nazionali ed internazionali e aziende possibili utilizzatrici. Tali interazioni hanno permesso di confermare l'allineamento della tematica della nostra ricerca con il panorama scientifico nazionale ed internazionale nonché la riconosciuta utilità degli strumenti sviluppati nel ruolo di supporto alla diffusione delle tecnologie di recupero di calore.

## 7 Attività di disseminazione

Nel corso dell'annualità 2021 il gruppo di ricerca in collaborazione con ENEA e gli altri co-beneficiari del progetto è stato impegnato in attività di disseminazione scientifica. In seguito, vengono riportate le principali attività condotte:

1. Pubblicazione dell'articolo scientifico [42]:  
M. Benedetti, D. Dadi, L. Giordano, V. Introna, P. E. Lapenna, e A. Santolamazza, «Design of a Database of Case Studies and Technologies to Increase the Diffusion of Low-Temperature Waste Heat Recovery in the Industrial Sector», Sustainability, vol. 13, n. 9, pag. 5223, mag. 2021, doi: 10.3390/su13095223
2. Intervento dal titolo "Sviluppo di un database di tecnologie di recupero e di una metodologia per l'identificazione e l'analisi di flussi energetici" all'evento "Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali - Risultanze dei WP3 e WP4 del Progetto 1.6 del Piano Triennale di realizzazione 2019-2021". Relatore dell'intervento: Prof. Ing. Vito Introna del Dipartimento di Ingegneria dell'Impresa dell'Università di Roma "Tor Vergata". 02 dicembre 2021. L'evento ha visto più di cento partecipanti tra professionisti del settore e ricercatori.



PTR 2019-21 – Progetto 1.6

EFFICIENZA ENERGETICA DEI PRODOTTI E DEI PROCESSI INDUSTRIALI

Sviluppo di strumenti di supporto alle decisioni e ottimizzazione del recupero di calore a bassa temperatura in industria (WP 3.19-3.28)

Triennio 2019-2021

### Sviluppo di un database di tecnologie di recupero e di una metodologia per l'identificazione e l'analisi di flussi energetici

Prof. Ing. VitoIntrona

**Figura 51 Flyer di presentazione all'evento "Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali - Risultanze dei WP3 e WP4 del Progetto 1.6 del Piano Triennale di realizzazione 2019-2021"**

3. Seminario dal titolo "Recupero del calore" nel corso universitario di "Gestione dei consumi energetici" tenuto dal docente Prof. Ing. Vito Introna all'Università degli studi di Roma "Tor Vergata". Relatori del seminario: Prof. Ing. Vito Introna e Ing. Daniele Dadi del Dipartimento di Ingegneria dell'Impresa dell'Università di Roma "Tor Vergata". 12 novembre 2021. L'evento è stato seguito da circa 40 studenti di ingegneria meccanica, energetica e gestionale.
4. Intervento dal titolo "Il Recupero di Calore" all'evento "Come raggiungere la Carbon Neutrality" organizzato da Alens e Nonsoloambiente programmato per il giorno 24 febbraio 2022. Relatore dell'intervento: Prof. Ing. Vito Introna del Dipartimento di Ingegneria dell'Impresa dell'Università di Roma "Tor Vergata". L'evento è dedicato a professionisti operanti nel settore energetico.

## 8 Riferimenti bibliografici

- [1] «SoWHAT Project». <https://sowhatproject.eu> (consultato 15 dicembre 2021).
- [2] University of Birmingham - UoB, «D1.6 - Report on H/C recovery/storage technologies and renewable technologies». 11 marzo 2021. [Online]. Disponibile su: <https://sowhatproject.eu/documents/>
- [3] C. Arpagaus, F. Bless, M. Uhlmann, J. Schiffmann, e S. S. Bertsch, «High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials», *Energy*, vol. 152, pagg. 985–1010, giu. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.03.166.
- [4] M. Kermani, «Generic superstructure synthesis of organic Rankine cycles for waste heat recovery in industrial processes», *Applied Energy*, pag. 23, 2018.
- [5] D. M. van de Bor, C. A. Infante Ferreira, e A. A. Kiss, «Low grade waste heat recovery using heat pumps and power cycles», *Energy*, vol. 89, pagg. 864–873, set. 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.06.030.
- [6] M. M. L. Reis e W. L. R. Gallo, «Study of waste heat recovery potential and optimization of the power production by an organic Rankine cycle in an FPSO unit», *Energy Conversion and Management*, vol. 157, pagg. 409–422, feb. 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2017.12.015.
- [7] D. Budisulistyo e S. Krumdieck, «A novel design methodology for waste heat recovery systems using organic Rankine cycle», *Energy Conversion and Management*, vol. 142, pagg. 1–12, giu. 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.03.047.
- [8] C. Elsidio, A. Mian, e E. Martelli, «A systematic methodology for the techno-economic optimization of Organic Rankine Cycles», *Energy Procedia*, vol. 129, pagg. 26–33, set. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.171.
- [9] S. Amicabile, J.-I. Lee, e D. Kum, «A comprehensive design methodology of organic Rankine cycles for the waste heat recovery of automotive heavy-duty diesel engines», *Applied Thermal Engineering*, vol. 87, pagg. 574–585, ago. 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.04.034.
- [10] C. Mateu-Royo, J. Navarro-Esbrí, A. Mota-Babiloni, F. Molés, e M. Amat-Albuixech, «Experimental exergy and energy analysis of a novel high-temperature heat pump with scroll compressor for waste heat recovery», *Applied Energy*, vol. 253, pag. 113504, nov. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113504.
- [11] D. Lu *et al.*, «Modeling and analysis of an ammonia–water absorption refrigeration system utilizing waste heat with large temperature span», *International Journal of Refrigeration*, vol. 103, pagg. 180–190, lug. 2019, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2019.04.008.
- [12] J. Pátek e J. Klomfar, «Simple functions for fast calculations of selected thermodynamic properties of the ammonia-water system», *International Journal of Refrigeration*, vol. 18, n. 4, pagg. 228–234, mag. 1995, doi: 10.1016/0140-7007(95)00006-W.
- [13] H. T. Chua, H. K. Toh, A. Malek, K. C. Ng, e K. Srinivasan, «A general thermodynamic framework for understanding the behaviour of absorption chillers», *International Journal of Refrigeration*, vol. 23, n. 7, pagg. 491–507, nov. 2000, doi: 10.1016/S0140-7007(99)00077-8.
- [14] Y. Wang, C. Wang, e X. Feng, «Optimal match between heat source and absorption refrigeration», *Computers & Chemical Engineering*, vol. 102, pagg. 268–277, lug. 2017, doi: 10.1016/j.compchemeng.2016.11.003.
- [15] A. Simeone, Y. Luo, E. Woolley, S. Rahimifard, e C. Boër, «A decision support system for waste heat recovery in manufacturing», *CIRP Annals*, vol. 65, n. 1, pagg. 21–24, 2016, doi: 10.1016/j.cirp.2016.04.034.
- [16] A. C. Caputo, P. M. Pelagagge, e P. Salini, «Heat exchanger design based on economic optimisation», *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, n. 10, pagg. 1151–1159, lug. 2008, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2007.08.010.
- [17] M. Taal, I. Bulatov, J. Klemeš, e P. Stehlík, «Cost estimation and energy price forecasts for economic evaluation of retrofit projects», *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, n. 14, pagg. 1819–1835, ott. 2003, doi: 10.1016/S1359-4311(03)00136-4.
- [18] B. Wang, J. J. Klemeš, P. S. Varbanov, e M. Zeng, «An Extended Grid Diagram for Heat Exchanger Network Retrofit Considering Heat Exchanger Types», *Energies*, vol. 13, n. 10, Art. n. 10, gen. 2020, doi: 10.3390/en13102656.

- [19] W. D. Seider e W. D. Seider, A. c. di, *Product and process design principles: synthesis, analysis, and evaluation*, 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2009.
- [20] M. Shamoushaki, P. H. Niknam, L. Talluri, G. Manfrida, e D. Fiaschi, «Development of Cost Correlations for the Economic Assessment of Power Plant Equipment», *Energies*, vol. 14, n. 9, Art. n. 9, gen. 2021, doi: 10.3390/en14092665.
- [21] G. F. Hewitt e S. J. Pugh, «Approximate Design and Costing Methods for Heat Exchangers», *Heat Transfer Engineering*, vol. 28, n. 2, pagg. 76–86, feb. 2007, doi: 10.1080/01457630601023229.
- [22] S. L. Cotrim, E. V. C. Galdamez, K. B. Matos, e M. A. S. S. Ravagnani, «Heat exchanger networks synthesis considering the rigorous equipment design and distinct parameters for capital cost estimation», *Energy Conversion and Management: X*, vol. 11, pag. 100099, set. 2021, doi: 10.1016/j.ecmx.2021.100099.
- [23] B. Wang, J. J. Klemeš, N. Li, M. Zeng, P. S. Varbanov, e Y. Liang, «Heat exchanger network retrofit with heat exchanger and material type selection: A review and a novel method», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 138, pag. 110479, mar. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110479.
- [24] M. Reza, M. Reza, P. Shahi, e M. Hassan, «Cost Effective Heat Exchanger Network Design with Mixed Materials of Construction», vol. 23, pag. 12, 2004.
- [25] «Cost analysis of Heat Exchangers - Efficiency Finder». [http://wiki.zero-emissions.at/index.php?title=Cost\\_analysis\\_of\\_Heat\\_Exchangers](http://wiki.zero-emissions.at/index.php?title=Cost_analysis_of_Heat_Exchangers) (consultato 17 gennaio 2022).
- [26] M. A. S. S. Ravagnani e J. A. Caballero, «Optimal heat exchanger network synthesis with the detailed heat transfer equipment design», *Computers & Chemical Engineering*, vol. 31, n. 11, pagg. 1432–1448, nov. 2007, doi: 10.1016/j.compchemeng.2006.12.005.
- [27] R. K. Sinnott, *Coulson & Richardson's chemical engineering*, 4th ed. Amsterdam Paris: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [28] D. Q. Kern, *Process heat transfer*, 24. print. Auckland: McGraw-Hill, 1988.
- [29] E. Woolley, Y. Luo, e A. Simeone, «Industrial waste heat recovery: A systematic approach», *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 29, pagg. 50–59, ott. 2018, doi: 10.1016/j.seta.2018.07.001.
- [30] G. P. Hammond e J. B. Norman, «Heat recovery opportunities in UK industry», *Applied Energy*, vol. 116, pagg. 387–397, mar. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.11.008.
- [31] G. Oluleye, M. Jobson, R. Smith, e S. J. Perry, «Evaluating the potential of process sites for waste heat recovery», *Applied Energy*, vol. 161, pagg. 627–646, gen. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.07.011.
- [32] S. Brückner, S. Liu, L. Miró, M. Radspieler, L. F. Cabeza, e E. Lävemann, «Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies», *Applied Energy*, vol. 151, pagg. 157–167, ago. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.147.
- [33] «Prezzi e tariffe», ARERA. <https://www.arera.it/it/prezzi.htm> (consultato 6 aprile 2021).
- [34] N. Palestra e R. Vescovo, «Applicazione di Cicli ORC a Recupero Termici da Processi Industriali», pag. 8.
- [35] G. Kosmadakis, «Estimating the potential of industrial (high-temperature) heat pumps for exploiting waste heat in EU industries», *Applied Thermal Engineering*, vol. 156, pagg. 287–298, giu. 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.04.082.
- [36] «AEE INTEC- Cost Analysis of Industrial Heat Pumps». [http://wiki.zero-emissions.at/index.php?title=Cost\\_Analysis\\_of\\_Industrial\\_Heat\\_Pumps](http://wiki.zero-emissions.at/index.php?title=Cost_Analysis_of_Industrial_Heat_Pumps) (consultato 6 aprile 2021).
- [37] R. M. Lazzarin e M. Noro, «Past, present, future of solar cooling: Technical and economical considerations», *Solar Energy*, vol. 172, pagg. 2–13, set. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2017.12.055.
- [38] R. Gabrielli, P. Castrataro, e F. Del Medico, «Performance and Economic Comparison of Solar Cooling Configurations», *Energy Procedia*, vol. 91, pagg. 759–766, giu. 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.06.241.
- [39] J. Labus, C. Bruno, e A. Coronas, «Review on absorption technology with emphasis on small capacity absorption machines», *Therm sci*, vol. 17, n. 3, pagg. 739–762, 2013, doi: 10.2298/TSCI120319016L.
- [40] «Descrizione e teoria», *Techno System*, 2011. [https://www.techno-system.it/\\_files/uploads/Descrizione\\_e\\_Teoria\\_ed\\_20110801\\_ITA\\_1.pdf](https://www.techno-system.it/_files/uploads/Descrizione_e_Teoria_ed_20110801_ITA_1.pdf) (consultato 1 dicembre 2021).
- [41] F. Kreith, *Principi di trasmissione del calore*. Napoli: Liguori, 1975.
- [42] M. Benedetti, D. Dadi, L. Giordano, V. Introna, P. E. Lapenna, e A. Santolamazza, «Design of a Database of Case Studies and Technologies to Increase the Diffusion of Low-Temperature Waste Heat Recovery in the Industrial Sector», *Sustainability*, vol. 13, n. 9, pag. 5223, mag. 2021, doi: 10.3390/su13095223.



## 9 Breve curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Il gruppo di ricerca impegnato nel progetto è composto da membri dell'Università degli studi di Roma "Tor Vergata", con competenze relative alla riduzione dei consumi energetici e dell'impatto ambientale dei processi industriali, alla gestione dell'energia e dei servizi industriali e al controllo statistico dei processi industriali.

Il gruppo di ricerca coinvolto nelle attività relative al risparmio energetico è così composto:

- Vito Introna, professore associato di impianti industriali meccanici, esperto di Energy Management, Impianti Industriali e manutenzione industriale;
- Luca Andreassi, professore associato di macchine a fluido, esperto di analisi dei processi termofluidodinamica nelle macchine a fluido e di interazione tra macchine e ambiente;
- Daniele Dadi, dottorando in "Ingegneria per la Progettazione e Produzione industriale", esperto di sistemi energetici e specializzato in caratterizzazione dei consumi attraverso tecniche di machine learning.

## 10 Appendice

### 10.1 Il database

In questo paragrafo viene riportato un estratto del database sottoforma di tabella (Tabella 34). Per esigenze di rappresentazione sono riportati solo 11 dei 29 campi che compongono il database selezionando quelli ritenuti tra i più significativi. Per i dati raccolti durante le interviste nel campo “Tipologia fonte” è stato specificato il nominativo dell’azienda intervistata. La versione completa del database, disponibile sia in formato Excel sia in Access, verrà resa disponibile per il download gratuito da ENEA.

**Tabella 34 Estratto del database di tecnologie di recupero di calore a bassa e bassissima temperatura**

ID fonte	ID tecnologia	Tipologia fonte	Destinazione recupero	Tecnologia	Descrizione della tecnologia	Stato di maturità	Temperatura di input	Potenza di Output	Temperatura di output (effetto utile)	Efficienza (rendimento, COP)
1	1	Intervista (Kaymacor)	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Sistemi micro-ORC per la produzione di energia elettrica dal recupero di calore di scarto. Tecnologia modulare con moduli da 3 o 6 kW elettrici, espansore volumetrico scroll di derivazione automotive	Tecnologia consolidata	70:110	3 - 100 kWe	-	6-7%
1	2	Intervista (Kaymacor)	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Sistemi micro-ORC per la produzione di energia elettrica dal recupero di calore di scarto. Tecnologia modulare con moduli da 5 o 10 kW elettrici, espansore volumetrico scroll di derivazione automotive	Tecnologia consolidata	110:200	5 - 100 kWe	-	10%
1	3	Intervista (Kaymacor)	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Sistemi micro-ORC per la produzione di energia elettrica dal recupero di calore di scarto. Tecnologia modulare con moduli da 10 kW elettrici, espansore volumetrico scroll di derivazione automotive	Tecnologia in fase di sviluppo	200:300	5 - 100 kWe	-	14-16%
2	4	Intervista (Exergy International S.r.l.)	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Sistemi ORC con turbina radiale centrifuga	Tecnologia consolidata	90:300	1000 - 30000 kWe	-	da 5% @ 90°C a 25% @ 300°C
3	5	Intervista (Dav Coil S.r.l.)	Scambio termico	Scambiatori di calore	Produttori di scambiatori di calore di varia natura e materiali che possano funzionare sia in regime di recupero sensibile che anche latente. Economizzatori, condensatori, preriscaldatori, surriscaldatori e recuperatori di calore di scarto industriale anche da fumi molto sporchi	Tecnologia consolidata	Non sono previsti particolari limiti	1 - 10000 kWt	-	50-85%
4	6	Intervista (Robur SpA)	Produzione di energia termica	Pompe di calore ad assorbimento	Pompe di calore indirect fired	Tecnologia consolidata	150:210 °C per acqua pressurizzata 180:240 °C per olio diatermico	40 - 200 kWt	da 35 a 65 °C	1.64
4	7	Intervista (Robur SpA)	Produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento	Assorbitori (indirect Fired) ovvero refrigeratori che utilizzano un ciclo termodinamico con una soluzione di acqua e ammoniaca, sono raffreddati in aria e possono essere alimentati da una fonte termica esterna, tramite un circuito ad olio	Tecnologia consolidata	150:210 °C per acqua pressurizzata 180:240 °C per olio diatermico	17 - 100 kWf	da -10 a +5 °C	0.7



					diatermico o ad acqua surriscaldata pressurizzata.					
5	8	Intervista (Zuccato Energia)	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Moduli ORC per recupero di cascami termici su piccola scala a bassissime temperature	Tecnologia consolidata	≥ 94	30 kWe	86	8.50%
5	9	Intervista (Zuccato Energia)	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Moduli ORC per recupero di cascami termici su piccola scala a bassissime temperature	Tecnologia consolidata	≥ 94	40 kWe	86	8.90%
5	10	Intervista (Zuccato Energia)	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Moduli ORC per recupero di cascami termici su piccola scala a bassissime temperature	Tecnologia consolidata	≥ 94	50 kWe	86	9.10%
5	11	Intervista (Zuccato Energia)	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Moduli ORC per recupero di cascami termici su piccola scala a bassissime temperature	Tecnologia consolidata	≥ 95	100 kWe	85	8.30%
5	12	Intervista (Zuccato Energia)	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Moduli ORC per recupero di cascami termici su piccola scala a basse temperature	Tecnologia consolidata	≥ 160	75 kWe	145	13.60%
5	13	Intervista (Zuccato Energia)	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Moduli ORC per recupero di cascami termici su piccola scala a basse temperature	Tecnologia consolidata	≥ 160	100 kWe	145	13.50%
5	14	Intervista (Zuccato Energia)	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Moduli ORC per recupero di cascami termici su piccola scala a basse temperature	Tecnologia consolidata	≥ 160	150 kWe	140	13.60%
5	15	Intervista (Zuccato Energia)	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Moduli ORC per recupero di cascami termici su piccola scala a basse temperature	Tecnologia consolidata	≥ 160	175 kWe	140	13.30%
5	16	Intervista (Zuccato Energia)	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Moduli ORC per recupero di cascami termici su piccola scala a basse temperature	Tecnologia consolidata	≥ 160	200 kWe	145	13.60%
5	17	Intervista (Zuccato Energia)	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Moduli ORC per recupero di cascami termici su piccola scala a basse temperature	Tecnologia consolidata	≥ 160	420 kWe	145	16.00%
5	18	Intervista (Zuccato Energia)	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Moduli ORC per recupero di cascami termici su piccola scala a basse temperature	Tecnologia consolidata	≥ 160	561 kWe	145	16.00%
5	19	Intervista (Zuccato Energia)	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Moduli ORC della serie CHP sono sistemi di generazione combinata di calore ed elettricità altamente versatili, che operando in modalità cogenerativa producono non solo energia elettrica ma anche acqua calda ad 80°C.	Tecnologia consolidata	≥ 160	105 kWe	140	8.20%
6	20	Articolo scientifico	Produzione di energia elettrica	Solid-State Stack	Tecnologia per la conversione in energia elettrica di calore di scarto a bassa temperatura. Il sistema è basato sull'effetto SMA utilizza come sorgente acqua calda ad una temperatura inferiore a 100°C	Tecnologia in fase di sviluppo	90	10-40 kWe	70-80	-
7	21	Articolo scientifico	Produzione di energia termica	Pompe di calore	Pompa di calore con compressore centrifugo azionato da inverter per la produzione di acqua calda (90 °C) proveniente da acqua a 10—50 °C. La capacità è 547 kW e il COP è di 3,7.	Tecnologia consolidata	10:50	547 kWt	90	3.7

7	22	Articolo scientifico	Produzione di energia termica	Pompe di calore ad alta temperatura	Pompa di calore con compressore centrifugo azionato da inverter per la produzione di acqua calda (130 °C) proveniente da acqua a 55 °C. La capacità di riscaldamento e COP è di 627kW e 3.0, rispettivamente.	Tecnologia consolidata	70	627 kWt	130	3
8	23	Catalogo	Produzione di energia termica	Pompe di calore	Pompa di calore centrifuga Acqua-Acqua per la produzione di acqua calda ad 80°C. Sistema alimentato elettricamente	Tecnologia consolidata	35:50	627 kWt	80	4.5
9	24	Catalogo	Produzione di energia termica	Pompe di calore	Compressori concepiti per il recupero e il riutilizzo del calore disponibile. Il calore recuperato dall'acqua del circuito di condensazione può essere utilizzato per generare ACS o il riscaldamento dei locali. Tipica temperatura di evaporazione compresa tra i 20 e i 40 °C e di condensazione fino a 85 °C. Utilizzabili anche in tandem	Tecnologia consolidata	20:40	da 16,9 kWt ( $\Delta T=+10$ ) a 41,1 kWt ( $\Delta T=+40$ )	80	4.3
9	25	Catalogo	Produzione di energia termica	Pompe di calore	Compressori concepiti per il recupero e il riutilizzo del calore disponibile. Il calore recuperato dall'acqua del circuito di condensazione può essere utilizzato per generare ACS o il riscaldamento dei locali. Tipica temperatura di evaporazione compresa tra i 20 e i 40 °C e di condensazione fino a 85 °C. Utilizzabili anche in tandem	Tecnologia consolidata	20:40	da 20,2 kWt ( $\Delta T=+10$ ) a 46,5 kWt ( $\Delta T=+40$ )	80	4.6
9	26	Catalogo	Produzione di energia termica	Pompe di calore	Compressori concepiti per il recupero e il riutilizzo del calore disponibile. Il calore recuperato dall'acqua del circuito di condensazione può essere utilizzato per generare ACS o il riscaldamento dei locali. Tipica temperatura di evaporazione compresa tra i 20 e i 40 °C e di condensazione fino a 85 °C. Utilizzabili anche in tandem	Tecnologia consolidata	20:40	da 23,1 kWt ( $\Delta T=+10$ ) a 53,8 kWt ( $\Delta T=+40$ )	80	4.5
9	27	Catalogo	Produzione di energia termica	Pompe di calore	Compressori concepiti per il recupero e il riutilizzo del calore disponibile. Il calore recuperato dall'acqua del circuito di condensazione può essere utilizzato per generare ACS o il riscaldamento dei locali. Tipica temperatura di evaporazione compresa tra i 20 e i 40 °C e di condensazione fino a 85 °C. Utilizzabili anche in tandem	Tecnologia consolidata	20:40	da 28,7 kWt ( $\Delta T=+10$ ) a 67,3 kWt ( $\Delta T=+40$ )	80	4.3

9	28	Catalogo	Produzione di energia termica	Pompe di calore	Compressori concepiti per il recupero e il riutilizzo del calore disponibile. Il calore recuperato dall'acqua del circuito di condensazione può essere utilizzato per generare ACS o il riscaldamento dei locali. Tipica temperatura di evaporazione compresa tra i 20 e i 40 °C e di condensazione fino a 85 °C. Utilizzabili anche in tandem	Tecnologia consolidata	20:40	da 34,8 kWt ( $\Delta T=+10$ ) a 80,3 kWt ( $\Delta T=+40$ )	80	4.2
9	29	Catalogo	Produzione di energia termica	Pompe di calore	Compressori concepiti per il recupero e il riutilizzo del calore disponibile. Il calore recuperato dall'acqua del circuito di condensazione può essere utilizzato per generare ACS o il riscaldamento dei locali. Tipica temperatura di evaporazione compresa tra i 20 e i 40 °C e di condensazione fino a 85 °C. Utilizzabili anche in tandem	Tecnologia consolidata	20:40	da 46,4 kWt ( $\Delta T=+10$ ) a 101,5 kWt ( $\Delta T=+40$ )	80	4
9	30	Catalogo	Produzione di energia termica	Pompe di calore	Compressori concepiti per il recupero e il riutilizzo del calore disponibile. Il calore recuperato dall'acqua del circuito di condensazione può essere utilizzato per generare ACS o il riscaldamento dei locali. Tipica temperatura di evaporazione compresa tra i 20 e i 40 °C e di condensazione fino a 85 °C. Utilizzabili anche in tandem	Tecnologia consolidata	20:40	da 57,6 kWt ( $\Delta T=+10$ ) a 127,0 kWt ( $\Delta T=+40$ )	80	4.1
9	31	Catalogo	Produzione di energia termica	Pompe di calore	Compressori concepiti per il recupero e il riutilizzo del calore disponibile. Il calore recuperato dall'acqua del circuito di condensazione può essere utilizzato per generare ACS o il riscaldamento dei locali. Tipica temperatura di evaporazione compresa tra i 20 e i 40 °C e di condensazione fino a 85 °C. Utilizzabili anche in tandem	Tecnologia consolidata	20:40	da 71,0 kWt ( $\Delta T=+10$ ) a 157,0 kWt ( $\Delta T=+40$ )	80	4.2
10	32	Catalogo	Produzione di energia termica	Pompe di calore	Pompa di calore compatta per carichi di calore medio-piccoli. Dotata di compressore alternativo, disponibile in tre diverse dimensioni e adatto a tutte le comuni applicazioni a pompa di calore.	Tecnologia consolidata	10:40	500-1100 kWt	70	5.7
10	33	Catalogo	Produzione di energia termica	Pompe di calore	La serie che consiste in quattro modelli di pompe di calore con compressore a vite di recente sviluppo per applicazioni a 52 bar.	Tecnologia consolidata	da -7 a +40	600-2000 kWt	80	3,85 - 6,10

10	34	Catalogo	Produzione di energia termica	Pompe di calore	Le pompe di calore progettate per un'efficienza ottimizzata ad alte temperature. Queste pompe di calore sono personalizzate per un ampio intervallo di capacità (da 300 kW a 10.000 kW)	Tecnologia consolidata	da -7 a +40	600-10000 kWt	70-90	-
11	35	Intervista (Turboden)	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Impianti a ciclo Rankine Organico di medio-grande taglia	Tecnologia consolidata	>100 °C	0,5-10 MW	-	nglobale= 20 ÷ 27
11	36	Intervista (Turboden)	Produzione di energia termica	Pompe di calore ad alta temperatura	Pompe di calore industriali di grossa taglia (3MWth-30 MWth per unità). In grado di lavorare con alti $\Delta T$ lift (>80°C) e elevate temperature di output inclusa la generazione di vapore.	Tecnologia disponibile sul mercato	60-200	3-30 MWt (per singola unità)	fino a 200°C	COP = 2 ÷ 15 in funzione delle temperature in gioco
12	37	Intervista (Studio Caramelli)	Produzione di energia termica	Pompe di calore ad alta temperatura	Pompa di calore ad alta temperatura progettata specificamente per la produzione di calore industriale. Si tratta di una macchina in grado di produrre energia termica a temperature sino a 165 °C, anche direttamente sotto forma di vapore. Ogni macchina ha una potenza termica in uscita fra i 500 e i 1000 kW.	Tecnologia in fase di sviluppo	20-120°C	400-1000 kWt	80-165	COP da 3 a 8
13	38	Catalogo	Produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento	Frigoriferi ad assorbimento acqua-bromuro di litio alimentati da acqua calda a singolo effetto e doppio effetto	Tecnologia consolidata	75-200 °C	11-11630 kWf	> 5 °C	-
13	39	Catalogo	Produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento	Frigoriferi ad assorbimento acqua-bromuro di litio alimentati da acqua calda a bassissima temperatura a singolo effetto	Tecnologia consolidata	55-75 °C	58-11630 kWf	> 5 °C	-
13	40	Catalogo	Produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento	Frigoriferi ad assorbimento acqua-bromuro di litio alimentati a vapore a singolo effetto e doppio effetto	Tecnologia consolidata	0,1 - 9 bar	23-11630 kWf	> 5 °C	-
13	41	Catalogo	Produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento	Frigoriferi ad assorbimento acqua-bromuro di litio alimentati da fumi a singolo effetto	Tecnologia consolidata	230 -350 °C	150-11630 kWf	> 5 °C	-
14	42	Intervista (IBT Group)	Produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento	Frigoriferi ad assorbimento a Bromuro di litio per recupero del calore di scarto per la produzione di energia frigorifera	Tecnologia consolidata	80-120°C	52-2212 kWf	7-12 °C	0.8
15	43	Catalogo	Produzione di energia termica	Pompe di calore ad alta temperatura	Pompe di calore azionate elettricamente in grado di fornire calore con temperature fino a 120°C	Tecnologia consolidata	Da -20 a 70°C	17-2063 kWt	65-120 °C	-

16	44	Catalogo	Produzione di energia termica	Pompe di calore ad alta temperatura	Pompa di calore industriale ad alta temperatura che è stata appositamente progettata per incrementare la temperatura di calore di scarto dai processi industriali fino a 160 ° C. Questo sistema a pompa di calore si adatta facilmente e rapidamente alle fluttuazioni nella fornitura di e richiesta di calore. Un altro grande vantaggio è la sua capacità di fornire a alto coefficiente di prestazione (COP) per alti delta T richiesti.	Tecnologia disponibile sul mercato	30-110°C	200 kWt	80-160 °C	Fino a 8 (COP)
17	45	Sito Web	Produzione di energia frigorifera	Thermoacoustic Energy Converter	Unità di raffreddamento centrale. La sua funzione principale è convertire il calore in freddo tramite la tecnologia termoacustica. L'immissione di calore in ingresso su un lato del refrigeratore si traduce in 25 kW - 40 kW di potenza fredda che consente la produzione di aria fredda o acqua fredda. L'uscita a freddo della nostra tecnologia può raggiungere temperature fino a -25 ° C.	Tecnologia disponibile sul mercato	160°C-300°C	25-40 kWf	fino a -25°C	-
18	46	Catalogo	Produzione di energia termica	Pompe di calore	Pompe di calore ideali per sfruttare efficacemente il calore di scarto a bassa temperatura, per la produzione di acqua calda (fino a 90°C), utilizzando solo un minimo di energia elettrica. Utilizzano ammoniaca (R717) come refrigerante	Tecnologia consolidata	15-70	300-2000 kWt	<90°C	4,4-6,5
18	47	Catalogo	Produzione di energia termica	Pompe di calore	Pompe di calore ad ammoniaca bistadio con capacità fino a 3.000 kW	Tecnologia consolidata	15-70	400-3000 kWt	<90°C	3,0-4,9
18	48	Catalogo	Produzione di energia termica	Pompe di calore	Pompe di calore ad ammoniaca con compressore a vite, con capacità fino a 8.000 kW	Tecnologia consolidata	15-70	1800-8000 kWt	<90°C	3,5-6,7
19	49	Catalogo	Produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento	Frigoriferi ad assorbimento acqua-bromuro di litio alimentati da acqua calda a singolo effetto ad alta efficienza. Produzione di acqua refrigerata alla temperatura minima di 5°C	Tecnologia consolidata	80-120	105-4571 kWf	>5°C	0.825
19	50	Catalogo	Produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento	Frigoriferi ad assorbimento acqua-bromuro di litio alimentati da acqua calda a singolo effetto ad alta efficienza. Produzione di acqua refrigerata alla temperatura minima di 5°C	Tecnologia consolidata	80-120	105-4571 kWf	>5°C	0.8

19	51	Catalogo	Produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento	Frigoriferi ad assorbimento acqua-bromuro di litio alimentati da acqua calda a singolo effetto ad alta efficienza. Produzione di acqua refrigerata alla temperatura minima di 5°C	Tecnologia consolidata	80-120	105-4571 kWf	>5°C	0.702
19	52	Catalogo	Produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento	Frigoriferi ad assorbimento acqua-bromuro di litio alimentati da acqua calda a singolo effetto della serie. Produzione di acqua refrigerata alla temperatura minima di 5°C	Tecnologia consolidata	80-120	264-4571 kWf	>5°C	0.64
19	53	Catalogo	Produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento	Frigoriferi ad assorbimento acqua-bromuro di litio alimentati da acqua calda a singolo effetto ad alta efficienza. Produzione di acqua refrigerata alla temperatura minima di 5°C	Tecnologia consolidata	70-80	105-4571 kWf	>5°C	0.412
19	54	Catalogo	Produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento	Frigoriferi ad assorbimento acqua-bromuro di litio alimentati a vapore a doppio effetto ad alta efficienza. Produzione di acqua refrigerata alla temperatura minima di 5°C	Tecnologia consolidata	Vapore saturo 3 - 9 bar	352-5247 kWf	>5°C	1.48
19	55	Catalogo	Produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento	Frigoriferi ad assorbimento acqua-bromuro di litio alimentati a vapore a doppio effetto. Produzione di acqua refrigerata alla temperatura minima di 5°C	Tecnologia consolidata	Vapore saturo 3 - 9 bar	352-5247 kWf	>5°C	1.36
19	56	Catalogo	Produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento	Frigoriferi ad assorbimento acqua-bromuro di litio alimentati a vapore a singolo effetto. Produzione di acqua refrigerata alla temperatura minima di 5°C	Tecnologia consolidata	Vapore saturo 1 - 3 bar	176-5247 kWf	>5°C	0.812
19	57	Catalogo	Produzione di energia termica	Pompe di calore ad assorbimento	Pompa di calore ad assorbimento (Absorption Heat Transformer o 2nd type heat pump) acqua-bromuro di litio alimentate ad acqua calda. Produzione di vapore o acqua calda alla temperatura di circa 100°C	Tecnologia consolidata	90	670-4686 kWt	100 °C	0.5

20	58	Catalogo	Scambio termico	Scambiatori di calore a piastre	Scambiatori di calore a piastre saldobrasate, caratterizzati da design compatto, elevate efficienze di scambio termico, Elevato range di temperature di utilizzo (-160/+195 °C), elevata pressione di esercizio (fino a 30 bar). Utilizzabili con molti tipi di fluidi in combinazioni diverse compatibilmente con la resistenza meccanica e chimica dei materiali (ad esempio: acqua/acqua, acqua/olio, vapore/acqua, vapore/olio, freon/acqua, ecc.).	Tecnologia consolidata	da -160 a +195 °C	1-200 kWt	-	-
20	59	Catalogo	Scambio termico	Scambiatori di calore a piastre	Scambiatori di calore a piastre ispezionabili, design che consente un facile accesso, una rapida ispezione e manutenzione. Inoltre, la modularità dei suoi componenti consente di aumentare il pacco piastre in base alla variazione delle esigenze di scambio termico. Piastre disponibili in diversi materiali (AISI 304, AISI 316L, Titanio, ecc.) e con differenti tipologie di guarnizioni di tenuta (NBR, EPDM, VITON).	Tecnologia consolidata	da -20 a +195 °C	1-300000 kWt	-	-
21	60	Catalogo	Scambio termico	Scambiatori di calore a piastre	Scambiatori di calore a piastre saldobrasate caratterizzati da elevate prestazioni e ingombri ridotti. Disponibili in vari modelli vari con diversi tipi di connessione (filettata, brasata) e in differenti materiali (rame, nichel e acciaio inossidabile)	Tecnologia consolidata	da -196 a +200 °C	0,5-500 kWt	-	-
21	61	Catalogo	Scambio termico	Scambiatori di calore a fascio tubiero e mantello	Scambiatori di calore a fascio tubiero e mantello progettati secondo i diversi requisiti del cliente in termini di dimensioni, materiali e tipologia di applicazione (economizzatori, radiatori, evaporatori e condensatori, batterie per il condizionamento, ecc.)	Tecnologia consolidata	Fino a 350°C	15-1750 kWt	-	-
22	62	Catalogo	Scambio termico	Scambiatori di calore a piastre	Scambiatori di calore a piastre saldobrasate caratterizzati da elevate prestazioni e ingombri ridotti. Disponibili in diverse serie (GLP/GLPK, NPL, GPLS, TPL) adattabili alle differenti condizioni operative e tipologie di fluidi). Il materiale delle piastre di scambio è acciaio inossidabile 1.4401 o AISI 316L, e la brasatura è realizzata in rame o nichel.	Tecnologia consolidata	Fino a 200°C	2-6000 kWt	-	-

22	63	Catalogo	Scambio termico	Scambiatori di calore a fascio tubiero e mantello	Scambiatori di calore a fascio tubiero e mantello adatti e ottimizzati per le differenti condizioni operative e realizzati in differenti materiali .	Tecnologia consolidata	da -20 a +500 °C	1-30000 kWt	-	-
23	64	Intervista (Termoleader)	Scambio termico	Scambiatori di calore a piastre	<p>Gli scambiatori di calore a piastre saldobrasate sono costituiti da una gamma completa e flessibile di piastre di numerose taglie per risolvere al meglio ogni singolo problema di scambio termico con soluzioni mirate e calcolate su misura per il cliente.</p> <p>Avvalendosi dei più avanzati sistemi di calcolo è possibile ottenere sempre la soluzione ottimizzata per lo specifico problema termico che il cliente deve risolvere. Gli scambiatori sono costituiti da un pacco di piastre per lo scambio termico di materiale idoneo ai fluidi che devono scambiare il calore tra loro, tenuto insieme da una brasatura realizzata in diversi tipi di materiale (rame, nichel, acciaio INOX).</p> <p>Lo scambiatore saldobrasato presenta il principale vantaggio della compattezza, dal momento che è costituito dal solo pacco piastre, sicuramente di dimensioni e peso inferiori ad un analogo scambiatore dotato del telaio ispezionabile.</p>	Tecnologia consolidata	da -40 a +200 °C	1kWt-20MWt	-	fino al 99%
23	65	Intervista (Termoleader)	Scambio termico	Scambiatori di calore a piastre	<p>Gli scambiatori di calore a piastre ispezionabili sono costituiti da una gamma completa e flessibile di piastre di numerose taglie per risolvere al meglio ogni singolo problema di scambio termico con soluzioni mirate e calcolate su misura per il cliente.</p> <p>Avvalendosi dei più avanzati sistemi di calcolo è possibile ottenere sempre la soluzione ottimizzata per lo specifico problema termico che il cliente deve risolvere.</p> <p>Lo scambiatore ispezionabile presenta il principale vantaggio della flessibilità, dal momento che può essere smontato nei suoi singoli componenti. Questo garantisce più efficienza nelle operazioni di pulizia e manutenzione, oltre a rendere flessibili i processi termici a cui è sottoposto con la possibilità di ampliamento della</p>	Tecnologia consolidata	da -40 a +200 °C	1kWt-20MWt	-	fino al 99%



					superficie di scambio mediante la semplice aggiunta di piastre all'interno del pacco. Disponibili in diversi materiali e diverse tipologie di guarnizioni per garantire la compatibilità con i fluidi di lavoro					
24	66	Intervista (Tecneuro pa)	Produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento	Frigoriferi ad assorbimento a Bromuro di litio alimentati ad acqua calda	Tecnologia consolidata	65 - 165 °C	20 - 11000 kWf	> 2,5 °C	0,7 - 0,84
24	67	Intervista (Tecneuro pa)	Produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento	Frigoriferi ad assorbimento a Bromuro di litio alimentati a vapore	Tecnologia consolidata	Vapore saturo 0,15 - 0,8 Mpa	300 - 11000 kWf	> 2,5 °C	1,3 - 1,61
24	68	Intervista (Tecneuro pa)	Produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento	Frigoriferi ad assorbimento a Bromuro di litio alimentati con fumi di combustione	Tecnologia consolidata	> 250 °C	200 - 11000 kWf	> 2,5 °C	1,3 - 1,45
24	69	Intervista (Tecneuro pa)	Produzione di energia termica	Pompe di calore ad assorbimento	Pompe di calore ad assorbimento a Bromuro di litio di prima categoria (temperatura di output <100 °C)	Tecnologia consolidata	15-60 °C	350 - 70000 kWt	100	1,65 - 1,80
24	70	Intervista (Tecneuro pa)	Produzione di energia termica	Pompe di calore ad assorbimento	Pompe di calore ad assorbimento a Bromuro di litio di seconda categoria (temperatura di output >100 °C)	Tecnologia consolidata	70-130 °C	500 - 8000 kWt	190	0,48 - 0,84
24	71	Intervista (Tecneuro pa)	Produzione di energia termica	Pompe di calore	Pompe di calore alimentate ad aria	Tecnologia consolidata	0-50 °C	30 - 2500 kWt	-	3.25
24	72	Intervista (Tecneuro pa)	Produzione di energia termica	Pompe di calore	Pompe di calore alimentate ad acqua	Tecnologia consolidata	15-50 °C	240 - 2500 kWt	-	5.84
25	73	Intervista (Fornitore X)	Scambio termico	Scambiatori di calore a piastre	Scambiatori di calore a piastre saldobrasate o ispezionabili	Tecnologia consolidata	Fino a 110°C	Da 1 kWt a 1500kWt	30 ÷ 99°C	Non applicabile
25	74	Intervista (Fornitore X)	Scambio termico	Sistemi di accumulo	Accumulo con scambiatore integrati acqua/acqua	Tecnologia consolidata	Fino a 110°C	Da 1 kWt a 400kWt	40 ÷ 99°C	Non applicabile
25	75	Intervista (Fornitore X)	Scambio termico	Sistemi di accumulo	Accumulo con scambiatore integrati a vapore	Tecnologia consolidata	Fino a 170°C	Da 1 kWt a 700kWt	40 ÷ 99°C	Non applicabile
25	76	Intervista (Fornitore X)	Produzione di energia termica	Pompe di calore	Pompa di calore per climatizzazione	Tecnologia consolidata	da -20°C a +45°C	7kWt-16kWt	40 ÷ 65°C	3-4,5
25	77	Intervista (Fornitore X)	Produzione di energia termica	Pompe di calore	Pompe di calore per la produzione di acqua calda sanitaria	Tecnologia consolidata	da -5°C a +43°C	1kWt-2kWt	40 ÷ 65°C	2,6-2,9
26	78	Intervista (Teon)	Produzione di energia termica	Pompe di calore	Pompe di calore per applicazioni residenziali ed industriali. La pompa di calore è progettata per elevare la temperatura sino ad oltre 80°C, con la massima efficienza in ogni condizione di funzionamento. Singole macchine da 10-60 kW	Tecnologia consolidata	20-60	10-60 kWt	fino a 80-90 °C	COP da 3,5 a 5,5
26	79	Intervista (Teon)	Produzione di energia termica	Pompe di calore	Pompe di calore per applicazioni industriali. Singole macchine da 115-500 kW con applicazione di macchine in serie fino anche a 3000 kW	Tecnologia consolidata	20-60	115-3000 kWt	94	COP da 3,5 a 5,6

27	80	Intervista (Olvondo Technology)	Produzione di energia termica	Pompe di calore ad alta temperatura	Pompa di calore ad alta temperatura basata sul ciclo Stirling. La pompa di calore ha una potenza nominale di 700 kW di calore ed è progettata per applicazioni dove vi è richiesta di calore con temperature fino a 200 °C. La macchina utilizza elio (gas refrigerante R-704) come mezzo di lavoro	Tecnologia in fase di sviluppo	0-120°C	750 kWt	fino a 200 °C	COP= 1,7-3,5
28	81	Intervista (Uncorrela TED)	Produzione di energia elettrica	Generatori termoelettrici	Sistemi termoelettrici solido-liquido con proprietà non correlate per la conversione di energia termica in energia elettrica	Tecnologia in fase di sviluppo	da -50 a 150 °C	da μW a mW	-	10-12%
29	82	Intervista (Thermoke y)	Scambio termico	Scambiatori di calore	Scambiatore di calore microcanale	Tecnologia consolidata	Gas refrigerante fino a 150°C, acqua fino a 105°C	da 8 kW a 220 kW	dipende dalle condizioni in ingresso	90%
30	83	Intervista (Blauwerspa)	Produzione di energia termica	Pompe di calore ad alta temperatura	Pompa di calore ad alta temperatura acqua/acqua e acqua/aria per applicazioni industriali con gas refrigerante naturale R744 (CO2).	Tecnologia consolidata	da 0°C a 30°C	40-200 kWt	fino a 110°C	COP=2,6/3,5
30	84	Intervista (Blauwerspa)	Produzione di energia termica	Pompe di calore ad alta temperatura	Pompa di calore ad alta temperatura acqua/acqua e acqua/aria per applicazioni industriali	Tecnologia consolidata	da 30°C a 60°C	90-340 kWt	fino a 110°C	COP=3,5/4,7
30	85	Intervista (Blauwerspa)	Scambio termico	Scambiatori di calore a piastre	Scambiatori di calore a piastre ispezionabili per applicazioni industriali	Tecnologia consolidata	da 25°C a 70°C	50-1500 kWt	fino a 70°C	fino a 99%
31	86	Intervista (Techno System)	Scambio termico	Scambiatori di calore a piastre	Scambiatori di calore a piastre ispezionabili per applicazioni HVAC	Tecnologia consolidata	da - 15°C a 150°C	da decine di kW a decine di MW	da - 15°C a 150°C	fino a 99%
31	87	Intervista (Techno System)	Scambio termico	Scambiatori di calore a piastre	Scambiatori di calore a piastre ispezionabili per applicazioni industriali	Tecnologia consolidata	da - 15°C a 150°C	da decine di kW a decine di MW	da - 15°C a 150°C	fino a 99%
32	88	Catalogo	Produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento	Assorbitore ad acqua calda a singolo effetto. Il refrigeratore ad assorbimento utilizza un innovativo evaporatore a due stadi (soluzione di bromuro di litio). Utilizza calore di scarto con temperature minime di 70°C.	Tecnologia consolidata	70-160 °C	105-7034 kW	al minimo 4°C	-
32	89	Catalogo	Produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento	Assorbitore vapore a singolo effetto. Il refrigeratore ad assorbimento utilizza un innovativo evaporatore a due stadi (soluzione di bromuro di litio). Utilizza come calore di scarto vapore con pressione compresa tra 0,3 e 3 barg.	Tecnologia consolidata	Vapore 0,3-3 bar(g)	105-7034 kW	al minimo 4°C	
33	90	Sito Web	Produzione di energia termica	Pompe di calore	Le pompe di calore industriali sono progettate e realizzate secondo le specifiche esigenze del cliente. Il punto di partenza è ottimizzare la generazione di caldo e freddo con lo stesso dispositivo. Il range di	Tecnologia consolidata	0-40 °C	100-1000 kW	40-95°C	COP=3-6

					potenze installate varia da 100 a 1000 kW con una temperatura del calore di output compresa tra 40 e 95°C. Le pompe di calore possono anche essere collegate in parallelo per ottenere unità più potenti.					
33	91	Sito Web	Produzione di energia termica	Pompe di calore ad alta temperatura	Le pompe di calore industriali ad alta temperatura sono progettate e realizzate secondo le specifiche esigenze del cliente. Il punto di partenza è ottimizzare la generazione di caldo e freddo con lo stesso dispositivo. Il range di potenze installate varia da 100 a 1000 kW con una temperatura del calore di output compresa tra 90 e 130°C. Le pompe di calore possono anche essere collegate in parallelo per ottenere unità più potenti.	Tecnologia consolidata	20-90 °C	100-1000 kW	90-130°C	COP=3-7
34	92	Report di progetto	Produzione di energia termica	Pompe di calore ad alta temperatura	Pompa di calore a ciclo chiuso che utilizza come fluido di lavoro un refrigerante a basso potenziale di riscaldamento globale (GWP) HFO-1336mzz-Z con buone proprietà termodinamiche. Il sistema a pompa di calore a circuito chiuso è adatto alle temperature di mandata fino a 160°C.	Tecnologia in fase di sviluppo	70-120	400 kW	110 - 160	COP= 2,5-5
34	93	Report di progetto	Produzione di energia termica	Pompe di calore ad alta temperatura	Pompa di calore a ciclo aperto, dove l'acqua (R718) è il refrigerante. Tali sistemi sono comunemente noti come MVR (Mechanical Vapor Re-compression). In questo sistema, il calore il ciclo della pompa utilizza direttamente il vapore in eccesso dall' processo (es. dal processo di essiccazione).	Tecnologia in fase di sviluppo	circa 100 (circa 0,8 - 1 bar)	500 kW	fino a 160	COP= 4,5-7
35	94	Catalogo	Produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento	Assorbitori ad acqua e ammoniaca per il raggiungimento di bassissime temperature (fino a -60°C)	Tecnologia consolidata	170	100-1000 kWf	-35 °C	COP= 0,38
35	95	Catalogo	Produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento	Assorbitori ad acqua e ammoniaca per il raggiungimento di basse temperature	Tecnologia consolidata	110 ÷ 140	100-600 kWf	-25 ÷ -5 °C	COP= 0,42-0,5
35	96	Catalogo	Produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento	Assorbitori ad acqua e ammoniaca per il raggiungimento di temperature di refrigerazione relativamente più elevate (fino a +5°C)	Tecnologia consolidata	90	100-400 kWf	0 °C	COP= 0,58

36	97	Sito Web	Produzione di energia termica	Pompe di calore	La pompa di calore è una pompa di calore ibrida a stadio singolo, ciascuna unità eroga fino a 2 MW. Richiede una fonte di calore compresa tra 50-65°C e fornisce calore a 90-100°C.	Tecnologia consolidata	40 – 60°C	500 – 2000 kWt	80 – 100°C	COP= 5-8
36	98	Sito Web	Produzione di energia termica	Pompe di calore ad alta temperatura	Pompa di calore ibrida a due stadi, ciascuna unità eroga fino a 2 MW. Richiede una fonte di calore compresa tra 50-65°C e fornisce 95-120°C (ΔT massimo di 90 °C).	Tecnologia consolidata	40 – 60°C	750 – 2000kWt	80– 120°C	COP= 3,5-6
36	99	Sito Web	Produzione di energia termica	Pompe di calore ad alta temperatura	Pompa di calore ibrida a stadio singolo, ciascuna unità eroga fino a 5 MW. Richiede una fonte di calore di 70-80°C (tipicamente acqua da teleriscaldamento) e fornisce calore con temperature fino a 120°C.	Tecnologia consolidata	40 – 60°C	2000 – 5000 kWt	80 – 120°C	COP= 4-7
37	100	Catalogo	Produzione di energia termica	Pompe di calore	Pompe di calore che utilizzano il compressore ad alta pressione (50 bar) con refrigerante naturale NH3 (GWP = 0). L'unità può produrre acqua calda fino a 85°C.	Tecnologia consolidata	40-45°C	430-490 kWt	65-85 °C	COP= 4,5-6,5

## 10.2 Sintesi schematica della metodologia per l'identificazione e l'analisi dei flussi energetici e degli interventi di efficientamento

In questo paragrafo viene riportata la sintesi schematica della metodologia sviluppata per l'identificazione e l'analisi dei flussi energetici e degli interventi di efficientamento (Figura 52).



Figura 52 Fasi della metodologia

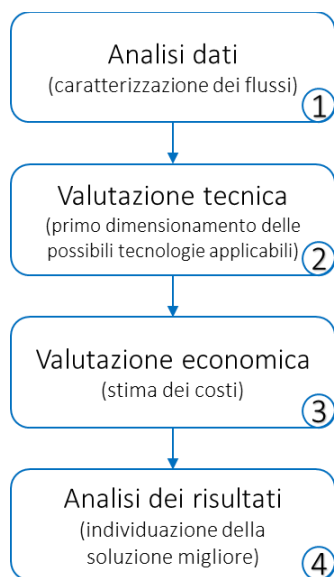
L'approccio metodologico identificato si compone di cinque step:

1. **Analisi del contesto:** viene analizzato il contesto industriale di riferimento in cui l'azienda opera e ne viene caratterizzato il profilo in termini di fabbisogni energetici (energia elettrica, energia termica ed energia frigorifera), dei principali processi e dei sistemi utilizzati;
2. **Identificazione del calore di scarto:** vengono individuati e caratterizzare i flussi di calore di scarto disponibili al recupero (in termini di temperatura, tipo di fluido, portata, disponibilità). Inoltre, dal match tra calore di scarto e fabbisogni viene effettuata una prima valutazione qualitativa delle tecnologie di recupero termico tecnicamente implementabili;
3. **Valutazione preliminare:** grazie ai dati precedentemente raccolti viene effettuata una prima valutazione sia tecnica sia economica delle possibili tecnologie identificate;
4. **Dimensionamento:** tra le tecnologie preliminarmente valutate, le più promettenti saranno oggetto di un'analisi tecnica dettagliata attraverso criteri di dimensionamento specifici per la singola tecnologia;
5. **Supporto decisionale:** le tecnologie analizzate vengono confrontate sotto diversi punti di vista (in particolare, aspetti economici, energetici ed ambientali), e in accordo con i bisogni aziendale viene identificata la soluzione ottimale.

Gli strumenti realizzati all'interno di questo ampio progetto di ricerca sono in grado di fornire valido supporto in tutte le fasi della metodologia proposta: il database dei casi di studio realizzato da ENEA può fornire supporto nell'analisi del contesto e nell'identificazione del calore di scarto (fase 1 e 2); il database delle tecnologie realizzato dall'Università di Roma "Tor Vergata" è in grado di offrire un contributo significativo nella prima valutazione delle tecnologie di recupero utilizzabili e nelle successive fasi per la scelta delle tecnologie (fase 3, 4 e 5); i modelli di dimensionamento specifico delle singole tecnologie realizzati dall'Università di L'Aquila saranno applicabili nella fase di dimensionamento (fase 4); la metodologica per la valutazione delle soluzioni di recupero proposta da ENEA sarà fondamentale nella fase di supporto decisionale (fase 5).

Il focus del gruppo di ricerca dell'Università di "Tor Vergata" è stato posto sulla fase centrale di questa metodologia: la fase di valutazione preliminare. Tale fase, come rappresentato in Figura 53, è a sua volta articolata in quattro step:

1. **Analisi dati** - La prima fase nella valutazione preliminare prevede l'analisi dei dati precedentemente raccolti nelle prime fasi della metodologia circa la individuazione dei flussi di calore di scarto di cui si dispone e dei fabbisogni energetici dell'impianto (fabbisogno di energia elettrica, termica e di raffreddamento del sito). Per ogni flusso energetico è necessario raccogliere informazioni circa le caratteristiche termodinamiche, la distribuzione temporale (ai fini della valutazione dell'eventuale matching tra disponibilità e domanda) e la tipologia di fluidi coinvolti (informazione necessaria oltre che alla stima di tutte le altre grandezze come calore specifico e densità, ma anche eventuale tossicità, infiammabilità o corrosività). Altri dati da utili da raccogliere sono: dati anagrafici del sito quali localizzazione geografica (per la determinazione dei parametri ambientali), orari e giorni di apertura (per valutare le ore effettive di funzionamento); dati relativi all'attuale generazione o approvvigionamento di energia ai fini della stima dell'eventuale risparmio prodotto dal recupero termico (costi dei vettori energetici, parametri prestazionali dei principali sistemi come caldaie e chiller); ulteriori informazioni utili, come vincoli strutturali (rigidezza del layout, spazi limitati).
2. **Valutazione tecnica** - In questa fase si sottopongono ad una prima analisi i dati precedentemente raccolti e, attraverso l'utilizzo di modelli specifici, vengono individuate le tecnologie tecnicamente implementabili e, per ciascuna di esse, viene fornito un primo dimensionamento;
3. **Valutazione economica** - Note le caratteristiche tecniche, per le tecnologie considerate, grazie a specifiche funzioni di costo, viene fornita una prima stima dell'investimento iniziale richiesto;
4. **Analisi dei risultati** - Per tutte le soluzioni analizzate, a seguito delle valutazioni tecniche ed economiche, viene stimata la taglia dell'impianto e calcolata l'energia elettrica, termica e di raffreddamento generabile con ognuno dei flussi termici di scarto a disposizione. Avendo stimato la taglia dell'impianto, l'investimento iniziale e l'energia generabile, sarà possibile procedere al calcolo di indicatori economici dell'investimento, come, ad esempio, il PayBack Period (PBP), utili ad individuare la soluzione migliore tra quelle investigate.



**Figura 53 Fasi principali del modulo di valutazione preliminare**