



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



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

Contestualizzazione del database di tecnologie di recupero al mercato italiano e prima validazione degli strumenti attraverso casi studio

Vito Introna, Luca Andreassi, Daniele Dadi



Report RdS/PTR2020/087

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

Vito Introna, Luca Andreassi, Daniele Dadi
(UNIROMA2)

Aprile 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 - II 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 3.22 – Contestualizzazione del database di tecnologie di recupero al mercato italiano e prima validazione degli strumenti attraverso casi studio

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.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 COINVOLGIMENTO DEI FORNITORI DI TECNOLOGIE	7
2.1 FORNITORI DI TECNOLOGIE	7
2.1.1 <i>Primo ciclo di interviste</i>	8
2.1.2 <i>Risultati</i>	18
3 IL DATABASE.....	20
3.1 CONTINUAZIONE DELL'ATTIVITÀ DI ANALISI DEI DATABASE DISPONIBILI.....	20
3.2 REVISIONE DELLA STRUTTURA	25
3.2.1 <i>Nuova struttura del database e le informazioni da raccogliere</i>	25
3.2.2 <i>Interazione con le parti interessate</i>	27
3.2.3 <i>Query e consultazione del database</i>	27
3.2.4 <i>Integrazione con il database ENEA</i>	29
3.3 MODALITÀ DI UTILIZZO DEL DATABASE	30
3.4 POPOLAMENTO DEL DATABASE E PROTOCOLLO DI INDAGINE	33
4 METODOLOGIA PER L'IDENTIFICAZIONE E L'ANALISI DEI FLUSSI ENERGETICI E DEGLI INTERVENTI DI EFFICIENTAMENTO.....	36
4.1 LE FASI DELLA METODOLOGIA	36
4.2 MODULO DI VALUTAZIONE PRELIMINARE	37
4.2.1 <i>Le tecnologie considerate e la realizzazione dei modelli</i>	39
4.2.2 <i>Generazione di energia elettrica: ORC</i>	41
4.2.3 <i>Generazione di energia termica: pompe di calore</i>	43
4.2.4 <i>Generazione di energia frigorifera: frigoriferi ad assorbimento</i>	45
4.2.5 <i>Fattori di sicurezza</i>	46
4.2.6 <i>Validazione e discussioni</i>	47
4.3 RAPPRESENTAZIONE DEI FLUSSI ENERGETICI	52
4.3.1 <i>Sankey di stabilimento, reparto o processo</i>	53
4.3.2 <i>Sankey dell'intervento di recupero di calore</i>	55
4.3.3 <i>Realizzazione del Sankey e Software disponibili</i>	56
5 CASI DI STUDIO	61
5.1 GRANDE AZIENDA DEL SETTORE CASEARIO.....	61
5.2 GRANDE AZIENDA DEL SETTORE DELLA LAVORAZIONE DELLA GOMMA	65
5.2.1 <i>Analisi del contesto</i>	65
5.2.2 <i>Individuazione del calore di scarto</i>	67
5.2.3 <i>Valutazione preliminare</i>	68
5.2.4 <i>Utilizzo del database come strumento di supporto</i>	70
5.3 RISULTATI.....	71
6 CONCLUSIONI	73
7 ATTIVITÀ DI DISSEMINAZIONE.....	75
8 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	77
9 BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO	79

Sommario

Il lavoro presentato nel seguente report è il risultato della seconda annualità di un'attività di ricerca triennale che si pone come principale obiettivo quello di sviluppare strumenti utili che possano fornire un supporto alle aziende nell'identificazione e nella valutazione di opportunità di recupero termico di calore di scarto.

L'obiettivo principale di questa seconda linea di attività è rappresentato dalla continuazione e affinamento delle attività iniziate nella precedente annualità, in particolare, la revisione e lo sviluppo di un database di tecnologie ed una metodologia per l'identificazione, l'analisi e la valutazione preliminare delle opportunità di recupero di calore, e la loro contestualizzazione nello scenario industriale italiano.

L'attività di ricerca è stata strutturata in quattro macrofasi descritte nei corrispondenti capitoli del report:

- Realizzazione di interviste ai fornitori di tecnologie di recupero di calore a bassa temperatura operanti nel mercato italiano con lo scopo di contestualizzare e affinare gli strumenti sviluppati;
- Revisione della struttura del database di tecnologie di recupero di calore e continuazione del suo popolamento;
- Sviluppo della metodologia per l'identificazione, la mappatura e l'analisi dei flussi energetici. In particolare, realizzazione di modelli per la valutazione preliminare di possibili interventi di recupero di calore e affinamento dei diagrammi di Sankey per la rappresentazione dei flussi energetici coinvolti;
- Prima sperimentazione degli strumenti sviluppati attraverso dei casi di studio di aziende operanti nel settore industriale italiano come possibili utilizzatori degli strumenti sviluppati.

Gli output principali della seconda annualità di ricerca prevedono la versione revisionata ed aggiornata del database, disponibile sia su foglio di calcolo Excel sia tramite database Access, della metodologia da applicare per l'identificazione e la mappatura dei flussi energetici, e degli strumenti di rappresentazione dei flussi di calore. Grazie all'interazione con i fornitori di tecnologie e le aziende del settore, tali strumenti sono stati preliminarmente validati sul campo.

1 Introduzione

Il presente progetto di ricerca è stato sviluppato tramite la collaborazione dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" con altri due Atenei italiani (l'Università degli Studi dell'Aquila e l'Università degli Studi di Udine) e coordinato da ENEA nell'ambito di Ricerca di Sistema. Il suo obiettivo 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. Ciò permetterebbe di colmare i gap di carattere prevalentemente non tecnologico che attualmente non consentono l'adeguato sfruttamento di questa importante risorsa che possiede invece un'elevata potenzialità. L'output principale del progetto sarà un sistema informativo contenente strumenti di supporto in grado di guidare le aziende in tutte le fasi coinvolte in un processo di recupero termico, dall'identificazione del calore di scarto alla scelta della tecnologia più opportuna.

In Figura 1 sono riportati in maniera schematica gli obiettivi del triennio di ricerca, suddivisi per linee di attività, previsti per l'Università di Roma "Tor Vergata".

Le attività condotte dall'Università di Roma "Tor Vergata" durante la prima annualità iniziata a gennaio 2019 (descritte nel dettaglio nel precedente report relativo alla LA3.21) hanno portato alla realizzazione preliminare di un database contenente tecnologie e, a livello di diagrammi di flusso, di una prima metodologia a supporto delle aziende in tutte le fasi previste nell'implementazione di un progetto di recupero termico, dalla scelta della soluzione più idonea da adottare, alla valutazione tecnico-economica della stessa.



Figura 1 Descrizione attività del triennio di ricerca

L'attività di questa seconda annualità è stata suddivisa in quattro fasi principali, descritte nei capitoli corrispondenti del report:

- Il capitolo **"Coinvolgimento dei fornitori di tecnologia"** 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. 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 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 aziende del mercato delle tecnologie di recupero di calore.
- Nel capitolo **"Il database"** vengono descritte tutte le attività che hanno portato alla revisione e all'aggiornamento del database rispetto a quanto fatto nella prima annualità. In particolare, sono stati riportati la continuazione dell'analisi di letteratura circa i database simili individuati,

l'aggiornamento dei requisiti del nuovo database e delle query a disposizione dell'utente, nonché la continuazione del popolamento del database con la descrizione del protocollo di indagine utilizzato. Il database sviluppato è stato reso disponibile sia su foglio di calcolo Excel nella sua versione aggiornata, sia tramite database Access.

- Nel capitolo “**Metodologia per l'identificazione e l'analisi dei flussi energetici e degli interventi di efficientamento**” viene descritta la versione aggiornata della metodologia da applicare per l'identificazione e la mappatura dei flussi energetici e degli strumenti di rappresentazione dei flussi di calore coinvolti. Un particolare focus viene posto sulla realizzazione di modelli da utilizzare nella fase di valutazione preliminare delle tecnologie di recupero applicabili.
- Nel capitolo “**Casi di 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 le indicazioni delle eventuali modifiche da apportare agli strumenti testati nell'ottica di un loro miglioramento.

Infine, nella parte conclusiva del report, è riportata una breve descrizione delle attività di disseminazione scientifica sulla tematica del recupero che hanno visto coinvolta l'università di Roma “Tor Vergata” per l'annualità 2020.

2 Coinvolgimento dei fornitori di tecnologie

Al fine di migliorare gli strumenti preliminarmente realizzati, una delle attività cardine per la presente annualità ha visto il coinvolgimento delle parti interessate: i fornitori di tecnologie attivi nel mercato del recupero di calore e le aziende possibili utilizzatrici degli strumenti sviluppati.

È bene evidenziare come l'emergenza sanitaria causata dalla pandemia COVID-19 abbia ostacolato tale attività di interazione con le parti interessate, sia impedendo per larga parte dell'annualità 2020 incontri e sopralluoghi in presenza, sia mettendo le aziende in condizioni di crisi e rendendo difficile considerare prioritarie tematiche quali l'efficientamento energetico. Ciò nonostante, il gruppo di progetto è riuscito a reperire le informazioni necessarie e sufficienti allo svolgimento delle linee di attività previste.

Durante questa fase, l'Università di Roma "Tor Vergata", le Università de L'Aquila e di Udine ed ENEA hanno collaborato per la creazione di diversi documenti per il coinvolgimento di fornitori ed aziende. In particolare, sono stati sviluppati:

- Un flyer di presentazione del progetto per aziende fornitrici di tecnologie di recupero di calore;
- Un flyer di presentazione del progetto per aziende possibili utilizzatrici degli strumenti sviluppati nell'ambito del progetto di ricerca;
- Una lista condivisa delle aziende fornitrici di tecnologie da contattare (tale lista è stata stilata principalmente sulla base di contatti esistenti tra le aziende e i diversi partner di progetto e su ricerche online);
- Una lista condivisa delle aziende possibili utilizzatrici da contattare (tale lista è stata stilata principalmente sulla base di contatti esistenti tra le aziende e i diversi partner di progetto).

In questa fase ENEA si è occupata del primo contatto con tutte le aziende individuate, principalmente a mezzo e-mail. Ulteriori informazioni sui documenti utilizzati e sulle metodologie di contatto sono riportate con maggiore dettaglio nel report ENEA relativo alla LA3.19, in quanto quest'ultimo è stato coordinatore di tale attività.

2.1 Fornitori di tecnologie

Gli incontri con le aziende fornitrici di tecnologie, inizialmente previste nella modalità di tavoli di lavoro da tenersi in presenza nella sede ENEA di Roma, sono stati condotti in modalità "a distanza" tramite apposite piattaforme web. Sebbene più dispendiosa in termini di tempi, la modalità selezionata è stata ritenuta la più idonea per non pregiudicare le attività di validazione e contestualizzazione degli strumenti sviluppati.

In collaborazione con ENEA e le altre Università cobeneficarie, sono state definite le modalità e le informazioni necessarie da raccogliere durante gli incontri. Per sistematizzare la qualità e la quantità delle informazioni da raccogliere è stato realizzato un questionario comune da utilizzare come traccia per la conduzione delle interviste. Le informazioni raccolte possono essere sintetizzate in:

- a) Informazioni generali sul fornitore;
- b) Descrizione, specifiche e caratteristiche di innovazione delle tecnologie proposte;
- c) Campi di applicazione e principali settori coinvolti;
- d) Barriere percepite dal fornitore circa la diffusione delle tecnologie di recupero di calore proposte;
- 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 e 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 Periodi tipici
Tecnologia 1	(es. 70°C-160°C)	(es. 1kW _e -1MW _e)	(es. 0,3-0,6)	(m ² /kW _e)	(es. 20 anni)	(es. €/kW _e)	(es. €/kW _h)	(es. 4 anni)
Tecnologia 2	(es. 70°C-160°C)	(es. 1kW _e -1MW _e)	(es. COP)	(m ² /kW _e)	(es. 20 anni)	(es. €/kW _e)	(es. €/kW _h)	(es. 4 anni)

Note per la compilazione della tabella: viste le diverse unità di misura utilizzabili (es. kW_e, kW_t, ...) riportare sempre l'unità di misura in tabella.

Con riferimento alla Tabella 1, le caratteristiche tecniche come “range di temperatura del calore di scarto”, “range di potenze installate” ed “efficienza”, oltre che a consolidare lo stato di conoscenza di suddette tecnologie e favorire il loro inserimento nel database, sono state raccolte allo scopo principale di ampliare e completare la raccolta di informazioni sulle tecnologie di recupero di calore a bassa temperatura disponibili sul mercato, ed incrementare l’affidabilità dei modelli sviluppati nell’ambito del progetto di ricerca (vedi paragrafo 4.2 Modulo di valutazione preliminare).

Particolarmente importante risulta essere 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. Tali dati sono di difficile reperibilità in letteratura ed in continua evoluzione visto il rapido sviluppo delle tecnologie di recupero di calore.

2.1.1 Primo ciclo di interviste

Attraverso le modalità precedentemente descritte sono state contattate circa 30 aziende fornitrici di tecnologie e, al termine dell’annualità 2020, sono state realizzate le prime nove interviste. Il calendario delle interviste con le prime nove aziende partecipanti è riportato in Tabella 2.

Tabella 2 Calendario delle interviste realizzate le aziende produttrici di tecnologie di recupero di calore

Data Intervista	Azienda	Principali tecnologie
20 novembre 2020	KAYMACOR S.R.L.	ORC ¹ di piccola taglia
27 novembre 2020	DAV COIL S.R.L.	Scambiatori di calore
9 dicembre 2020	EXERGY INTERNATIONAL S.R.L.	ORC ¹ di grande taglia
9 dicembre 2020	ZUCCATO ENERGIA S.R.L.	ORC ¹ di piccola e media taglia
14 dicembre 2020	ROBUR S.P.A.	Refrigeratori ad assorbimento
11 marzo 2021	TURBODEN S.P.A.	ORC ¹ e pompe di calore di grande taglia
23 marzo 2021	STUDIO CAMELLI S.R.L.	Pompe di calore ad alta temperatura
23 marzo 2021	IBT GROUP	Refrigeratori ad assorbimento
26 marzo 2021	TERMOLEADER S.R.L.	Scambiatori di calore a piastre

¹Organic Rankine Cycle (ORC)

Le interviste sono state condotte dall’Università di Roma “Tor Vergata” con il supporto di ENEA. Per ogni intervista, dalla durata di circa un’ora ciascuna, è stato redatto un report dettagliato che è poi 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 riguardante i casi di studio e le barriere

percepiti 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 LA3.19.

Kaymacor S.r.l.

Kaymacor è un'azienda HighTech che opera nel campo delle tecnologie per recupero e conversione dell'energia. L'azienda produce sistemi micro-ORC (Organic Rankine Cycle) modulari, con moduli da 3,5 e 10 kW_e assemblabili fino a 100 kW_e (sotto un unico controller che riesce ad avviare e spegnere i singoli moduli in funzione della potenza termica disponibile).

L'azienda propone tre tipologie di sistemi: basse temperature (<100-110°C), medie temperature (<180-200°C) e alte temperature (230°C-280°C). La differenza tra i sistemi proposti risiede sostanzialmente nella tipologia del fluido di lavoro utilizzato (refrigeranti o idrocarburi).

Il sistema ORC proposto da Kaymacor utilizza espansori volumetrici scroll di derivazione automotive opportunamente modificati. Ogni modulo è dotato di un proprio alternatore e convertitore AC-DC, seguito poi da un unico inverter dimensionato per la massima potenza dell'impianto (così come tutta la parte di conversione di potenza come filtro sinusoidale e trasformatore). Dal lato scambio termico il modulo è dotato di tre scambiatori a piastre (evaporatore, rigeneratore, condensatore). Come fluido vettore in ingresso al modulo ORC è previsto un liquido: acqua pressurizzata o olio diatermico per le alte temperature, acqua per le basse temperature.

L'aspetto innovativo di questa tecnologia risiede nella modularità della soluzione, che permette di discretizzare il recupero termico mantenendo efficienze elevate del sistema anche al variare della disponibilità del flusso di scarto (la variabilità della sorgente termica è una situazione molto caratteristica nel recupero, soprattutto nel settore industriale). Inoltre, grazie alla soluzione modulare, si riesce ad ovviare ai problemi di perdite di fluido e perdite di tenuta, che possono rappresentare un grande problema di affidabilità.

I settori di mercato individuati sono principalmente tre: integrazione con caldaie a biomassa e solare termico a bassa temperatura; recupero di calore per motori a combustione interna a biogas (fumi e acqua del radiatore); recupero di calore nel settore industriale.

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

Tabella 3 Parametri tecnici e economici rilevati durante la conduzione dell'intervista al fornitore Kaymacor S.r.l.

PARAMETRI TECNICI	Tecnologie	Organic Rankine Cycle
	Range di temperatura del calore di scarto	70 -270°C (in presenza di un pozzo freddo a T< 25°C si riesce a scendere a temperature più basse)
	Range di potenza installate	3kW _e - 100kW _e
	Efficienza	LT: 6-7 % MT: 10-12 % HT: 15-16 % Per impianti ORC l'efficienza fortemente influenzata sia dalla temperatura del calore di scarto sia dalla temperatura a cui è disponibile il pozzo freddo
	Ingombro Specifico	1,8m*0,6m*0,5m (per singolo modulo da 5kW)
	Vita utile	10-15 anni
PARAMETRI ECONOMICI	Costo specifico	Dato non riportato perché riservato
	Costi di gestione e manutenzione	Dato non riportato perché riservato
	PayBack Period tipici	2-3 anni

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

- Per un sistema ORC caratterizzato da macchine modulari si potrebbe salire anche di potenza elettrica: con le macchine volumetriche (tipicamente espansori Scroll) si può valutare fino ad un massimo di 150-200 kW_e, sopra i quali si entra nel campo delle turbine, che dal punto di vista tecnico sono più adeguate alle alte potenze;
- Si sottolinea come per impianti ORC l'efficienza è fortemente legata sia alla temperatura del calore di scarto sia alla temperatura a cui è disponibile il pozzo freddo;
- Per quanto riguarda la fattibilità economica, sebbene la tecnologia permetta recuperi di calore di scarto anche a potenze molto basse, l'effetto scala incide molto sul costo dell'impianto e quindi sul PBP (PayBack Period).

DAV COIL S.r.l.

DAV COIL è un'azienda specialista nella produzione di scambiatori di calore. Vanta un'ampia gamma di prodotti di varia natura e materiali che possano funzionare sia in regime di recupero sensibile che anche latente. Il range di potenze elaborato varia da 1kW_t (es. radiatori per macchine elettriche) fino ad oltre a 10 MW_t. Storicamente il fornitore nasce come produttore di tubi alettati (elemento base con il quale vengono costruiti quasi tutti i loro prodotti). La produzione fornisce i seguenti prodotti:

- Economizzatori: recuperatori di calore dei fumi esausti per il preriscaldamento di acqua in ingresso a caldaie. Vengono realizzati in materiali meno nobili come acciaio e carbonio se le temperature in gioco sono tali da non permettere la condensazione dell'umidità contenuta nei fumi;
- Condensatori: mediante i quali, oltre al recupero del calore sensibile, si recupera calore per la condensazione dell'umidità contenuta nei fumi (richiedono materiali più nobili);
- Preriscaldatori: per il preriscaldamento di aria comburente;
- Surriscaldatori: utilizzati nelle caldaie a vapore, surriscaldano il vapore e lo rendono disponibile alla rete;
- Abbinamenti economizzatore-preriscaldatore-condensatore: mediante i quali il condensatore è utilizzato per riscaldare acqua di processo e non acqua per caldaia.

Per il recupero di calore di scarto industriale si aprono numerosi scenari dovuti sostanzialmente alla presenza nei fumi di sporco (es. sospensioni polverose) e condense più acide di quelle derivanti da gas metano. Questo complica la costruzione dello scambiatore dal punto di vista del dimensionamento e dei materiali da utilizzare. Vengono realizzati profili a tubo liscio, tubi profilati con profili alari per minimizzare le perdite di carico e massimizzare le superfici di scambio, scambiatori a piastre dove all'interno delle piastre scorre il fluido vettore (es. acqua o olio diatermico) e all'esterno fumi di processo, ottenendo scambiatori con molta superficie primaria e di facile manutenzione.

Tra gli aspetti più innovativi del fornitore circa il recupero di calore di scarto industriale si cita lo sviluppo di soluzioni idonee per il recupero di calore anche da fumi molto sporchi.

L'azienda è attiva nei più diversi settori industriali: tessile, caseario, prodotti da forno, generazione di potenza, oil & gas, alimentare, bevande, chimico, industria pesante, condizionamento, teleriscaldamento, depurazione, trasporti, essiccazione, impianti offshore, ecc.

La Tabella 4 riporta la descrizione dei principali parametri raccolti durante l'intervista.

Tabella 4 Parametri tecnici e economici rilevati durante la conduzione dell'intervista al fornitore DAV COIL S.r.l.

PARAMETRI TECNICI	Tecnologie	Scambiatori di calore di varia natura
	Range di temperatura del calore di scarto	Non si registrano particolari limitazioni sulla temperatura per quanto riguarda il recupero di calore a basse T. Forte dipendenza dal ΔT tra i due fluidi e dalla temperatura del pozzo freddo a disposizione.

	Range di potenza installate	1 MW_e -10 MW_e
	Efficienza	Per applicazioni di recupero di calore le efficienze si attestano comunemente tra 50-85%. Valori superiori a 85% potrebbero non risultare convenienti.
	Ingombro Specifico	10 m ² /MW
	Vita utile	Dipende fortemente dalla tipologia dei fluidi coinvolti
PARAMETRI ECONOMICI	Costo specifico	Dipende molto dal materiale utilizzato per la costruzione dello scambiatore (ad esempio, ho un costo contenuto per un economizzatore in acciaio-carbonio, ho un costo elevato per un condensatore realizzato con leghe di nichel o acciaio duplex con valori della sola materia prima di circa 30 € al Kg)
	Costi di gestione e manutenzione	Dipendono fortemente dalla tipologia dei fluidi coinvolti
	PayBack Period tipici	Se ci riferiamo al solo componente scambiatore di calore il tempo di ritorno è spesso inferiore ad un anno. Considerando ausiliari di impianto come ventilatori e sistemi di controllo il PBP sale ma rimane comunque contenuto (di norma <3 anni)

EXERGY S.r.l.

EXERGY è un'azienda attiva nel campo della fornitura di impianti ORC di grande taglia. La tecnologia proposta da Exergy è la turbina, di tipo radiale a flusso centrifugo, per impianto ORC. Il fornitore produce il componente turbina e fornisce tutto l'ORC sviluppato e ingegnerizzato internamente, di cui garantisce il funzionamento complessivo. Per la parte impiantistica di scambio termico primario, Exergy si occupa della progettazione di base, nel caso ciò sia reso necessario dalle caratteristiche della sorgente di recupero, (condizioni che ottimizzano il funzionamento dell'ORC), diversamente questo aspetto è competenza del cliente. L'interfaccia dell'impianto di Exergy è quindi il fluido in ingresso all'ORC (tipicamente acqua pressurizzata o olio diatermico). Ad oggi l'intervallo di potenza installato varia da 1MW_e a 30MW_e con singole turbine che vanno dai 300kW_e ai 22 MW_e (precedentemente il fornitore sviluppava progetti anche con taglie più piccole, come ad esempio 300 kW_e, ma nel corso degli anni le richieste del mercato sono andate in una direzione diversa, prediligendo unità maggiori e capaci di sfruttare meglio le economie di scala per ritorni più elevati).

L'innovazione proposta da Exergy risiede nella tipologia di turbina, che consente di ottenere elevatissime efficienze, e nella semplicità dell'O&M, in quanto tutti i componenti usurabili sono racchiusi nel gruppo meccanico che si sostituisce in tempi estremamente rapidi.

La turbina radiale a flusso centrifugo è una configurazione insolita in quanto il flusso è caratterizzato da una componente radiale negativa che diminuisce il lavoro di eulero estraibile per stadio. Questo però può rappresentare un vantaggio nelle applicazioni ORC dove si lavora con fluidi complessi con un salto entalpico ridotto (circa 1/10 di quello dell'acqua). Non avere una componente assiale all'interno dello stesso stadio permette di evitare effetti tridimensionali nello sviluppo delle palette che saranno quindi uguali senza necessità di essere svergolate (ovviamente all'interno dello stesso stadio). Questo aspetto permette un'elevata flessibilità dal punto di vista costruttivo della turbina in termini di personalizzazione. A ciò si lega anche un altro vantaggio che è la possibilità di utilizzare i più diversi fluidi organici (ciclopentano, isopentano, butano ma anche refrigeranti come R1233zd con GWP basso, in alternativa al precedente R245fa).

Circa il 50% delle applicazioni di Exergy sono nel campo del geotermico che copre la grande maggioranza della loro potenza installata con taglie medie 10-12 MWe. L'altra metà delle applicazioni sono nel campo del recupero di calore con potenze medie di 2-5 MWe. In particolare, in quest'ultimo segmento, i settori più interessanti sono cemento, vetro e acciaio, in primo luogo per l'elevata quantità di energia richiesta; inoltre, le portate e le temperature tipiche in queste applicazioni portano al dimensionamento di ORC nel suddetto intervallo di potenze, per le quali l'impianto di recupero risulta maggiormente competitivo. Altro aspetto importante è legato alle disponibilità del calore di scarto per questi settori che permettono di realizzare impianti con ore equivalenti di funzionamento prossime alle 8000 ore. Un altro settore di rilievo per il fornitore Exergy è rappresentato dal recupero a valle di turbine a gas, la principale applicazione referenziata nel settore oil&gas. È infine presente, seppur di minor rilievo, il settore della generazione di potenza da altre fonti rinnovabili, come le biomasse o il solare a concentrazione (CSP).

La Tabella 5 riporta la descrizione dei principali parametri raccolti durante l'intervista.

Tabella 5 Parametri tecnici e economici rilevati durante la conduzione dell'intervista al fornitore EXERGY S.r.l.

PARAMETRI TECNICI	Tecnologie	Organic Rankine Cycle
	Range di temperatura del calore di scarto	Da un minimo di acqua pressurizzata a 80-90°C ad un massimo di olio diatermico a 300-320°C. Nota bene: queste temperature sono del fluido in ingresso all'ORC quindi coincidono con la T del calore di scarto solo se disponibile in questa forma (es. acqua pressurizzata). In alternativa vanno considerati i delta T di scambio.
	Range di potenza installate	Turbine da 300 kWe a 22 MWe. Per l'impianto il range di potenza elettrica è 1-30MWe (in passato il fornitore operava anche a potenze più piccole es. 300 kWe)
	Efficienza	Considerando solo il modulo ORC quindi il flusso in ingresso al modulo, con acqua pressurizzata a 90°C si arriva ad efficienze del 5% con olio diatermico o acqua pressurizzata, a 200°C si attesta tra il 16-18% con olio diatermico a 300°C possiamo superare il 25% di rendimento GLOBALE (quindi termodinamico, meccanico ed elettrico)
	Ingombro Specifico	Incide molto il tipo di condensatore. Se raffreddato ad acqua l'ingombro è sostanzialmente quello del modulo, se raffreddato ad aria l'ingombro aumenta.
	Vita utile	Progettazione almeno a 20 anni, ma attualmente ci sono impianti ORC che sono funzionanti da ancora prima
PARAMETRI ECONOMICI	Costo specifico	Dato non riportato perché riservato
	Costi di gestione e manutenzione	Dato non riportato perché riservato
	PayBack Period tipici	Da un minimo di 2-3 anni ad un massimo di 4-5 anni

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

- Nel dimensionamento di un ORC la prima cosa di cui tenere conto è la temperatura, non tanto della sorgente primaria ma di quella che arriva in ingresso all'ORC. Il recupero diretto da fumi sporchi è una strada difficilmente percorribile (ci sono progetti pionieristici ancora non competitivi). Si ricorre sempre ad un fluido intermedio che a volte può anche essere direttamente presente in stabilimento (acqua pressurizzata, vapore, olio diatermico). Si va da un minimo di acqua a 80-90 °C (minima condizione caratterizzata da efficienza bassa) a circa 300-320°C con l'olio diatermico.
- I costi dell'ORC sono principalmente influenzati da due componenti: costi termici (scambiatori, pompe, quantità di fluido di lavoro che si ripercuotono sul calore di ingresso) e costi elettrici (per la generazione di potenza). A parità di potenza prodotta e in funzione della temperatura disponibile e della tipologia di fluido in ingresso abbiamo un'efficienza "caratteristica" che incide sulla quantità di calore in ingresso da elaborare e quindi sui costi legati al dimensionamento degli scambiatori.
- L'ingombro dell'impianto è sostanzialmente legato al tipo di condensatore. Qualche esempio: per un condensatore raffreddato ad acqua la superficie è di 20m*15m per potenze da 1-4 MWe, 25m*20m per potenze da 4-9 MWe e 30m*25m sopra i 9 MWe; per un condensatore raffreddato ad aria l'ingombro è di 20m*10m per 1MWe se la sorgente è ad alta T mentre 20m*40m per sorgenti a basse T. Saliamo a dimensioni dell'ordine di 20m*70m per potenze di 2MWe a basse T. In un impianto esistente raffreddato ad aria, di potenza 4MWe, le dimensioni realizzate sono state 30m*30m. Con le stesse dimensioni ma raffreddato ad acqua questi sono gli ingombri caratteristici di impianti da 20MWe.
- Per la scelta del condensatore se il cliente non ha acqua disponibile e ha spazio disponibile si preferisce il condensatore ad aria.
- Nella taglia 1-3 MW gli ORC hanno fortissime economie di scala. Ad esempio, per 1 MWe ad acqua a 90°C il costo di aggira su 2000 €/kWe mentre per 3 MW alla stessa temperatura il range è tra i 1000 e i 1500 €/kW. Inoltre, notevole è l'influenza della temperatura del flusso di scarto disponibile: per esempio su un impianto da 1MWe con olio diatermico ad alte T parliamo già di 1200-1000 €/kW.
- La soluzione più completa per la stima dei costi consisterebbe in una superficie multidimensionale con in ingresso la taglia dell'ORC e il fluido disponibile al recupero (tipologia e temperatura). Altro parametro da dover considerare sarebbe il tipo di raffreddamento al condensatore.

- Per la suddivisione del costo complessivo di impianto, in media si aggira attorno al 40% ORC - 60% altri componenti. Questa ripartizione può oscillare da un massimo di 30% ORC - 70% altri componenti, fino ad un minimo di 70% ORC - 30% altri componenti. La differenza dipende molto dal fluido in ingresso e dal sistema di raffreddamento.
- Il costo di fluidi non infiammabili non è affatto trascurabile a differenza degli idrocarburi.

Zuccato Energia S.r.l.

Zuccato Energia è un'azienda che produce sistemi ORC. L'offerta di prodotti copre la fetta di mercato da 30 kW_e a 550 kW_e. I sistemi ORC di Zuccato Energia possono recuperare energia dalla maggior parte dei processi industriali che coinvolgono il calore. In input come fluido vettore sono previsti acqua calda o pressurizzata (surriscaldata), vapore o olio diatermico. Le temperature minime di recupero si aggirano intorno ad 85-90°C (del fluido in acqua, se il fluido è disponibile in altra forma sarà necessaria una temperatura maggiore). Inoltre, l'azienda è in grado di fornire impianti chiavi in mano (scambiatore fumi/acqua, piping, pompe dell'acqua, modulo ORC e la parte di condensazione con torri evaporative o dry cooler e relativo piping).

Tra gli aspetti innovativi si citano gli studi in corso sull'utilizzo di nuovi fluidi organici per incrementare la temperatura accettabile in ingresso all'ORC (il che permetterebbe di aumentare l'efficienza del sistema di recupero), lo studio di soluzioni innovative per i componenti chiave del sistema e l'ottimizzazione degli algoritmi di controllo e delle logiche di manutenzione predittiva.

I settori industriali nei quali il fornitore è più attivo sono il settore del vetro, il settore siderurgico (fonderie, acciaierie) e il settore della ceramica; più in generale, settori nei quali sono disponibili fumi di scarto da forni fusori o forni di cottura. Si registrano applicazioni a valle di impianti di cogenerazione, dai quali è possibile attuare un recupero termico sia dalle camicie di raffreddamento che dai fumi di scarico (applicazioni sia su terra che su nave). Altri campi di applicazione sono i recuperi a valle di caldaie a biomassa, applicazioni per solare e geotermico.

La Tabella 6 riporta la descrizione dei principali parametri raccolti durante l'intervista.

Tabella 6 Parametri tecnici e economici rilevati durante la conduzione dell'intervista al fornitore Zuccato Energia S.r.l.

PARAMETRI TECNICI	Tecnologie	Organic Rankine Cycle
	Range di temperatura del calore di scarto	85 – 165 °C (Valori riferiti al fluido vettore in ingresso al modulo ORC. Se non disponibile sottoforma di acqua, vapore o olio diatermico, il calore di scarto dovrà necessariamente essere ad una temperatura superiore)
	Range di potenza installate	30 – 561 kW _e
	Efficienza	Efficienza elettrica 9 – 16%
	Ingombro Specifico	0.07 m ² /kW _{th}
	Vita utile	20 anni
PARAMETRI ECONOMICI	Costo specifico	Dato non riportato perché riservato
	Costi di gestione e manutenzione	Dato non riportato perché riservato
	PayBack Period tipici	2 – 4 anni

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

- Un modulo ORC per poter funzionare correttamente richiede un'impiantistica caratterizzata da ingombri spesso importanti, in quanto sono richiesti altri componenti a contorno quali scambiatori di calore fumi/acqua o caldaie, dissipatori termici (dry cooler, torri evaporative) e l'impiantistica di collegamento. Questa componentistica fa sì che l'investimento iniziale possa talvolta rilevarsi importante, nonostante il PBP rimanga interessante (2-4 anni) nella maggior parte delle applicazioni;

- Il costo del modulo ORC rappresenta circa il 60-65% del costo totale d’impianto, mentre il restante 35-40% è imputabile agli altri componenti.

Robur S.p.A.

ROBUR S.p.A. offre tecnologie avanzate per il riscaldamento e la climatizzazione. L’azienda è attiva nel recupero di calore di scarto attraverso la produzione di refrigeratori ad assorbimento a fiamma indiretta, cioè attivati termicamente da calore sotto forma di olio diatermico o acqua surriscaldata. Il fluido di lavoro è un fluido binario acqua-ammoniaca che riesce a produrre temperature fino a circa -10 °C (temperatura non raggiungibile con le macchine ad assorbimento a bromuro di litio).

I refrigeratori sono prodotti in tre versioni diverse: TK per il condizionamento, HT per il funzionamento con alte temperature dell’ambiente esterno e LB che producono acqua a bassissime temperature (-10°C).

Il ciclo termodinamico viene attivato termicamente con temperature del calore di scarto superiori a circa 200°C. Invertendo il ciclo termodinamico è possibile ottenere un funzionamento della tecnologia a pompa di calore. Sono in fase di studio preliminare eventuali modifiche di configurazione dei sistemi proposti per poter essere idonei al funzionamento con calore di scarto a più bassa temperatura (es.100 °C); vista la tecnologia proposta da ROBUR e il know-how completo in materia di assorbimento si potrebbe aprire anche a questo aspetto.

Le principali applicazioni riguardano i sistemi di climatizzazione (pompe di calore e refrigeratori a gas, generatori d’aria calda a scambio diretto, sistemi combinati caldaie/aerotermini e radiatori a gas). Un’applicazione rilevante per il recupero termico è stata installata in un panificio per con la produzione di energia frigorifera per il raffreddamento di alimenti.

La Tabella 7 riporta la descrizione dei principali parametri raccolti durante l’intervista.

Tabella 7 Parametri tecnici e economici rilevati durante la conduzione dell’intervista al fornitore Robur S.p.A.

PARAMETRI TECNICI	Tecnologie	Frigoriferi ad Assorbimento	Pompe di Calore
	Range di temperatura del calore di scarto	190-230°C	190-230°C
	Range di potenza installate	17-100 kWt	40-200 kWt
	Efficienza	COP=0,7	COP=1,64
	Ingombro Specifico	1 m ² per 17 kWt	1 m ² per 40 kWt
	Vita utile	20 anni	20 anni
PARAMETRI ECONOMICI	Costo specifico	Dato non riportato perché riservato	Dato non riportato perché riservato
	Costi di gestione e manutenzione	Dato non riportato perché riservato	Dato non riportato perché riservato
	PayBack Period tipici	Dipende dall’utilizzo e dalle condizioni del confronto	Dipende dall’utilizzo e dalle condizioni del confronto

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

- Il costo del modulo rappresenta circa il 40-50% del costo totale d’impianto, mentre il restante è imputabile al contributo di installazione, regolazione e piping.

Turboden S.p.A.

Turboden, società del gruppo Mitsubishi Heavy Industries, è un’azienda italiana leader mondiale nella progettazione, produzione e manutenzione di sistemi ORC. Il fornitore è attivo sul fronte del recupero di calore di scarto attraverso le unità ORC che possono produrre elettricità recuperando il calore dai processi industriali e attraverso cicli combinati con motori alternativi e turbine a gas. La potenza dei turbogeneratori Turboden in questa applicazione varia generalmente da 0,5 a 10 MW_e.

Tra le tecnologie più innovative che l'azienda sta proponendo ai clienti vi sono le grandi pompe di calore (Large Heat Pumps) per applicazioni di potenza variabile tra i 3 e i 30 MW_t per singola unità.

Tra le principali industrie coinvolte, per quanto riguarda l'applicazione di impianti ORC, spiccano tra tutte le acciaierie, le vetrerie e i cementifici.

La Tabella 8 riporta la descrizione dei principali parametri raccolti durante l'intervista.

Tabella 8 Parametri tecnici e economici rilevati durante la conduzione dell'intervista al fornitore Turdoden S.p.A.

PARAMETRI TECNICI	Tecnologie	Organic Rankine Cycle	Pompe di calore
	Range di temperatura del calore di scarto	200° ÷ 1000°C	60°÷ 200°C
	Range di potenza installate	0.5 ÷ 10 MW	3 ÷ 30 MW _t per singola unità
	Efficienza	$\eta_{Rankine} = 20 \div 27\%$	COP = 2 ÷ 15 in funzione delle temperature in gioco
	Ingombro Specifico	25 ÷ 100 m ² /MW	25 m ² /MW
	Vita utile	20+ anni	20+anni
PARAMETRI ECONOMICI	Costo specifico	Dato non riportato perché riservato	Dato non riportato perché riservato
	Costi di gestione e manutenzione	Dato non riportato perché riservato	Dato non riportato perché riservato
	PayBack Period tipici	5-10 anni	4-9 anni

Studio Caramelli S.r.l.

Lo studio Caramelli è il promotore di mercato dell'azienda tedesca SPH Sustainable Process Heat GmbH che propone una pompa di calore ad alta temperatura ancora in fase di sviluppo (uscita del prodotto prevista per la fine del 2021). La macchina è progettata specificamente per la produzione di calore industriale ed è in grado di produrre energia termica a temperature sino a 165°C (si prevede la gran parte delle applicazioni a 130-140°C), anche direttamente sotto forma di vapore. Ogni macchina ha una potenza termica in uscita fra i 500 e i 1000 kW. Il compressore della pompa di calore è di derivazione automotive; quindi, progettato per funzionare a temperature elevate.

Sono state condotte alcune applicazioni per Svizzera e Austria su scala minore.

Lo studio Caramelli è molto attento ad accompagnare il cliente nell'installazione della pompa di calore per trovarne la giusta applicazione (es. ottimizzazione del sistema termico attraverso l'analisi pinch), essendo questi interventi difficilmente standardizzabili e richiedono quindi analisi dettagliate. Il fornitore si occuperà della fornitura del componente pompa di calore ma, in base alle richieste del cliente, può offrire supporto nella progettazione dell'intero sistema in ottica di ottimizzarne le prestazioni.

La tecnologia è particolarmente indicata per la decarbonizzazione del settore industriale e per tutte quelle applicazioni dove è richiesta acqua calda o vapore a bassa pressione a T>80-90°C. Alcuni esempi:

- Settore agroalimentare, in quanto necessita di grandi quantità di vapore a bassa pressione (la pompa di calore proposta può produrre direttamente vapore a bassa pressione);
- Processo di bollitura;
- A valle o in sostituzione di impianti a compressore di vapore;
- Cartiere, dove si può recuperare aria satura dal processo di essiccazione;
- Recupero di fumi;
- Insieme con cogeneratore;
- Conciatura, tessile, tinteggiatura, farmaceutico;
- Caseifici (pastorizzazione, produzione di latte in polvere);

- Teleriscaldamento (si recupera energia ad 80-90 °C e si riutilizza a 120 °C, temperatura tipica delle reti di teleriscaldamento). Inoltre, tramite la pompa si può estendere la fornitura ad utenti nelle zone dove la rete è più saturata.

La Tabella 9 riporta la descrizione dei principali parametri raccolti durante l'intervista.

Tabella 9 Parametri tecnici e economici rilevati durante la conduzione dell'intervista al fornitore Studio Caramelli S.r.l.

PARAMETRI TECNICI	Tecnologie	Pompe di calore ad alta temperatura
	Range di temperatura del calore di scarto	20 - 120°C in acqua calda o olio diatermico
	Range di potenza installate	400 kW - 1MWt Regolabile dal 30 a 100% della potenza con potenza termica minima in ingresso tra 200-300 kW .
	Efficienza	COP= 3-8 Il COP è stabile se il ΔT della pompa di calore si mantiene stabile. C'è un controllo in frequenza sul compressore.
	Ingombro Specifico	3.5m*2m (solo macchina) +1 m² per sistemi di controllo
	Vita utile	>10 anni
PARAMETRI ECONOMICI	Costo specifico	Dato non riportato perché riservato
	Costi di gestione e manutenzione	Dato non riportato perché riservato
	PayBack Period tipici	Circa un 1 anno (con CB). Si prevede in generale un PBP<4

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

- Per il corretto funzionamento della pompa di calore, in termini di COP accettabile, il ΔT non deve essere superiore a 70 °C, meglio se mantenuto sotto i 50°C;
- I ΔT di scambio previsti in ingresso-uscita evaporatore e condensatore sono compresi tra 5 e 10°C;
- Come fluido di lavoro sono stati testati quattro refrigeranti sintetici a basso impatto ambientali, ma c'è flessibilità nell'utilizzo di altri refrigeranti se venisse espressamente richiesto dal cliente;
- La pompa di calore ad alta temperatura proposta si presta bene agli Energy Performance Contract (EPC), in quanto c'è elevata flessibilità per eventuali variazioni sul processo produttivo.

IBT Group

IBT Group è partner esclusivo per il mercato italiano di Capstone, società californiana leader e unico produttore al mondo di sistemi energetici con turbine a gas con tecnologia "oil-free" (per impianti cogenerativi) e dal 2003 distributore esclusivo per l'Europa dell'azienda Century Corporation (azienda sud-coreana parte del Gruppo Kiturami), leader da oltre 50 anni nella produzione di frigoriferi ad assorbimento, frigoriferi elettrici e sistemi HVAC chiavi in mano per i settori civile, industriale, nucleare e marino.

Per il recupero termico la tecnologia di riferimento è quella dei frigoriferi ad assorbimento a bromuro di litio Century. Su richiesta del cliente oltre alla fornitura del singolo modulo assorbitore possono provvedere della fornitura dei componenti a completamento del sistema di recupero (torre evaporativa, unità di trattamento acqua, piping, service, etc.).

Tra le tecnologie più innovative che sta proponendo il fornitore vi sono i nuovi assorbitori ad acqua calda versione LC1, ovvero ad alta efficienza. Il Coefficient Of Performace (COP) raggiunto è maggiore di 0,8.

I gruppi frigoriferi ad assorbimento Century sono particolarmente adatti ad essere accoppiati ad impianti cogenerativi per ottenere un impianto trigenerativo. I settori, sia civili che industriali, sono molteplici: dall'alimentare al farmaceutico, dal chimico all'ospedaliero.

La Tabella 10 riporta la descrizione dei principali parametri raccolti durante l'intervista.

Tabella 10 Parametri tecnici e economici rilevati durante la conduzione dell'intervista al fornitore IBT Group

PARAMETRI TECNICI	Tecnologie	Frigoriferi ad Assorbimento a Bromuro di litio
	Range di temperatura del calore di scarto	80-120°C (In acqua calda)
	Range di potenza installate	50 kW_t - 2,2MW _t
	Efficienza	COP=0,8
	Ingombro Specifico	Fortemente dipendente dalle condizioni operative
	Vita utile	20-25 anni
PARAMETRI ECONOMICI	Costo specifico	Dato non riportato perché riservato
	Costi di gestione e manutenzione	Dato non riportato perché riservato
	PayBack Period tipici	< 5 anni

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

- Potenze, temperature, portate e quindi i costi specifici sono molto variabili per gli assorbitori Century in quanto sono altamente customizzabili per soddisfare le richieste dell'end-user.

Termoleader S.r.l

La tecnologia di riferimento proposta da Termoleader è rappresentata dallo scambiatore di calore a piastre. Il regime di moto presente nelle tubazioni, laminare o turbolento, influenza notevolmente lo scambio termico. Lo scambiatore a piastre nasce dall'idea di ottenere moto turbolento, caratterizzato da un coefficiente di scambio termico di un ordine di grandezza superiore rispetto a quanto avviene nel moto laminare, anche a velocità molto basse (non a velocità così elevate come avviene in un generico tubo). Le piastre vengono assemblate per creare un percorso più o meno tortuoso. Mentre per un generico tubo si parla di moto laminare per numeri di Reynolds (Re) < 2500, negli scambiatori a piastre si ha turbolenza per numeri di Re pari a circa 100. Questo permette di ottenere scambi termici elevati con superfici molto ridotte. Ci si avvicina molto come temperature tra il circuito primario e il secondario dello scambiatore (mantenendo superfici comunque contenute) con un ΔT anche di un grado. Lo scambiatore è realizzato da piastre generalmente in acciaio (possono essere usati diversi materiali, ad esempio titanio) con un telaio in acciaio e carbonio. Tra le piastre vi sono delle guarnizioni per garantire la tenuta.

È però necessario definire i campi di applicazione di tale tecnologia per determinare l'applicabilità o meno dello scambiatore:

- I passaggi molto stretti creano perdite di carico in funzione del grado di turbolenza, non è quindi adatto all'utilizzo di fluidi particolarmente sporchi;
- Altre variabili assolutamente rilevanti sono le caratteristiche del fluido in termini di tipologia di pressione e temperatura. Si parla principalmente di liquidi di diversa natura (acqua, olio, soluzione di acido solforico) per i quali deve essere rispettata la compatibilità con i componenti dello scambiatore (piastre e guarnizioni). È di norma possibile adattare lo scambiatore alle caratteristiche del fluido, ma è da tenere sotto osservazione l'economicità dello scambiatore;
- Il range di temperature di esercizio è fortemente influenzato dal tipo di guarnizioni: con guarnizioni in NBR si arriva ai 100°C, con guarnizioni in EPDM si arriva a 150°C (non compatibile con l'olio), con guarnizioni in VITON si arriva ai 200°C (principalmente con olio) che rappresenta la temperatura superiore limite di questa tecnologia;
- Per le basse temperature la guarnizione migliore è l'EPDM, che arriva a sostenere temperature fino a -40°C.

È essenziale quindi valutare l'applicabilità dello scambiatore a piastre, ma, se tali condizioni risultano rispettate, esso rappresenta una soluzione ad elevata efficienza con dispersioni termiche che possono

arrivare a pochi punti percentuali (grazie alla sua compattezza anche le dispersioni verso l'esterno sono ridotte).

La tecnologia Termoleader può essere applicata in molti campi, tra i più rappresentativi si citano: impianti di riscaldamento, produzione di acqua calda sanitaria, raffreddamento e riscaldamento olio, teleriscaldamento o teleraffrescamento, settore alimentare (processi di pastorizzazione, riscaldamento e raffreddamento dei fluidi alimentari).

La Tabella 11 riporta la descrizione dei principali parametri raccolti durante l'intervista.

Tabella 11 Parametri tecnici e economici rilevati durante la conduzione dell'intervista al fornitore Termoleader S.r.l.

PARAMETRI TECNICI	Tecnologie	Scambiatori di calore a piastre
	Range di temperatura del calore di scarto	-40 : 200 °C
	Range di potenza installate	Il campo di applicazione è fortemente influenzato dal tipo di fluido e dalle sue caratteristiche. Per i modelli standard si va da portate elaborate da 300 l/h a 1000 m ³ /h
	Efficienza	Efficienza di scambio termico fino al 99%
	Ingombro Specifico	Dipende dal livello di efficienza desiderato. Il dimensionamento è il risultato di un trade-off tra calore recuperato e dimensioni dell'impianto (e quindi costi)
	Vita utile	Dipende dal materiale utilizzato sia per le piastre sia per le guarnizioni e dalla tipologia di fluido
PARAMETRI ECONOMICI	Costo specifico	Dato non riportato perché riservato
	Costi di gestione e manutenzione	Dato non riportato perché riservato
	PayBack Period tipici	PBP generalmente molto bassi. L'investimento è fortemente influenzato dalle caratteristiche richieste dallo scambiatore per garantire la compatibilità con il fluido di scambio

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

- Il range di potenze installabili è un parametro di difficile stima, in quanto è fortemente influenzato dal tipo di fluido e dalle sue caratteristiche e dalle numerose variabili in gioco. Sono disponibili diversi telai con specifici modelli per ciascuno di esso. Anche le piastre possono essere realizzate in differenti materiali con diversi tipi di guarnizioni. Inoltre, lo scambiatore può essere costituito da un numero di piastre variabili da poche unità fino a centinaia;
- Per i modelli standard si va da portate elaborate da 300 l/h a 1000 m³/h. Al di sotto di queste portate si può scambiare in moto laminare, ma non si hanno più le efficienze caratteristiche degli scambiatori di calore a piastre.

2.1.2 Risultati

I risultati delle prime interazioni con i fornitori di tecnologie hanno rappresentato un contributo fondamentale nello sviluppo delle linee di attività del gruppo di ricerca. In particolare, hanno permesso di:

- **Revisionare e validare 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;
- Avanzare nel **popolamento del database di tecnologie**;
- Raccogliere informazioni tecniche ed economiche sulle tecnologie analizzate per lo **sviluppo della metodologia di valutazione preliminare** degli interventi di recupero di calore.

È doveroso sottolineare come tutte le aziende intervistate si siano mostrate estremamente disponibili nel fornire dati sia tecnici sia economici (che per riservatezza non sono stati riportati nel presente report), ritenuti indispensabili dal gruppo di ricerca per il miglioramento degli strumenti in fase di sviluppo. Inoltre, le aziende

fornitrici di tecnologie hanno reso disponibili informazioni relative ad alcune applicazioni sul campo che contribuiranno alla validazione di tali strumenti.

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 Il database

In questo capitolo vengono descritte tutte le attività legate alla progettazione ed all'implementazione di un database di tecnologie di recupero. Come continuazione dell'attività del primo anno, è stata prevista una revisione della struttura del database e la sua contestualizzazione nello scenario industriale italiano. Tra le linee di attività più rappresentative troviamo:

- Continuazione dell'attività di ricerca ed analisi di database simili disponibili e della letteratura scientifica significativa sul tema;
- Contestualizzazione del database di tecnologie di recupero al mercato italiano, grazie alle risultanze relative agli incontri svolti con aziende fornitrici di tecnologie di recupero di calore industriale a bassa temperatura;
- Revisione della struttura del database a fronte dell'interazione con le parti interessate e dal confronto con gli altri partner di progetto circa le risultanze della prima annualità di ricerca;
- Ridefinizione dei campi del database e delle informazioni necessarie da raccogliere;
- Definizione di un protocollo e continuazione nel popolamento del database tramite il proseguimento delle attività di analisi della letteratura e sulla base delle tecnologie rilevate nelle attività di interazione con i fornitori di tecnologie.

Sulla base di tali linee di attività, l'output principale consiste in una nuova versione del database nella sua forma revisionata e validata tramite l'interazione con i fornitori di tecnologie ed aggiornata con i record raccolti per l'annualità 2020. Il database è stato realizzato sia su un foglio di calcolo Excel sia tramite Access.

3.1 *Continuazione dell'attività di analisi dei database disponibili*

Una delle attività previste nel secondo anno del progetto di ricerca è rappresentata dalla continuazione dell'attività di analisi dei database disponibili e della letteratura scientifica di riferimento. Oltre ai già discussi progetti europei EINSTEIN [1] e Greenfoods [2] e al database presentato nell'ambito del progetto EU-MERCI [3] (descritti nel dettaglio nel report del primo anno del progetto), negli ultimi anni altri progetti si sono occupati dello sviluppo di database con l'obiettivo comune di superare le barriere non tecniche alla diffusione di misure di efficienza energetica.

Un importante strumento è quello proposto dall' IAC (Industrial Assessment Centers): un database online contenete un gran numero di audit pubblici e "raccomandazioni"[4]. In particolare, il database contiene informazioni sul tipo di azienda valutata (dimensioni, settore, utilizzo di energia, ecc.) e risultati delle raccomandazioni effettuate (tipologia, risparmi energetici ed economici, ecc.). Al 06/04/2021 (data dell'ultima consultazione), il database proposto da IAC contiene 19.456 valutazioni (tutte riferite ad aziende manifatturiere degli Stati Uniti) e 146.493 raccomandazioni. Come mostrato in Figura 2, il database può essere investigato sia dal lato valutazione (settore, tipologia, dimensioni, anno, costi energetici, prodotti), sia dal lato raccomandazioni (tipologia, risparmi, costi, implementazione), sia per tipologia di azienda (mediante i codici identificativi SIC-Standard Industrial Classification e NAICS - North American Industry Classification System).

19,401

matching assessments

146,011

matching recommendations

Center

State

Year

Products

SIC NAICS

ARC Year

Center

State

Year

Savings

Cost SIC

NAICS

Figura 2 Interfaccia per la consultazione del database proposto da IAC [4]

Il database è composto da diverse sezioni e sottosezioni. Tra le varie sottosezioni disponibili, ne è presente una dedicata al recupero di calore (2.24xx HEAT RECOVERY), a sua volta composta da diverse sottocategorie più specifiche come riportato in Figura 3.

TOP	ARC	Description	Recommendations	Recommended \$ Savings	Average Payback (yrs)	Implementation Rate
back	2.xxxx	ENERGY MANAGEMENT	129,571	\$1,721,662,279	1.8	50.9%
back	2.2xxx	Thermal Systems	18,710	\$392,699,920	3.1	41.9%
back	2.24xx	HEAT RECOVERY	7,036	\$195,330,655	1.6	27.3%
	2.244x	Other Process Waste Heat	1,223	\$46,271,338	1.6	28.3%
	2.2441	PREHEAT BOILER MAKEUP WATER WITH WASTE PROCESS HEAT	152	\$6,329,302	1.6	29.9%
	2.2442	PREHEAT COMBUSTION AIR WITH WASTE HEAT	248	\$11,647,882	1.8	23.1%
	2.2443	RE-USE OR RECYCLE HOT OR COLD PROCESS EXHAUST AIR	301	\$7,495,746	1.8	28.2%
	2.2444	USE HOT PROCESS FLUIDS TO PREHEAT INCOMING PROCESS FLUIDS	209	\$7,632,614	1.5	30.9%
	2.2445	RECOVER HEAT FROM EXHAUSTED STEAM	65	\$5,021,624	1.3	31.1%
	2.2446	RECOVER HEAT FROM HOT WASTE WATER	148	\$4,146,094	1.3	28.5%
	2.2447	HEAT WATER WITH EXHAUST HEAT	100	\$3,998,075	1.7	30.5%

Figura 3 Dettaglio di alcune delle sottocategorie della sezione “HEAT RECOVERY”[4]

Ad esempio, selezionando tra le sottocategorie disponibili “RECOVERY HEAT FROM WASTE WATER” (2.2446), è possibile ottenere informazioni sugli interventi di recupero individuati (implementati o non ancora implementati). In Figura 4 è possibile notare come le informazioni riportate non permettono l’analisi dettagliata dell’intervento né tantomeno della tecnologia utilizzata.

# Description	Savings Cost	Status	Electricity Usage		Electricity Demand		Electricity Fees	
			\$	kWh	\$	kW-months/year	\$	\$
01: 2.2446 RECOVER HEAT FROM HOT WASTE WATER	\$20,467 \$29,138	✓	\$10,936	286,272	\$9,531	605	-	-

Figura 4 Informazioni disponibili per gli interventi di efficientamento individuati [4]

Altro progetto interessante è il progetto MAESTRI (progetto Europeo che si inserisce all'interno del programma di finanziamento Horizon 2020) [5], il cui scopo è quello di sviluppare una piattaforma innovativa e integrata che combini diversi strumenti di valutazione dell'efficienza, un nuovo sistema di gestione e un approccio innovativo per l'implementazione delle simbiosi industriali. Tra i risultati più significativi del progetto c'è la creazione di un database di casi di studio (Library of Case Studies) contenente diversi esempi di implementazioni di simbiosi industriale esistenti in tutto il mondo e un database di "scambi" (Exchanges Database) per supportare l'identificazione del potenziale riutilizzo dei flussi energetici (e non) di scarto.

Il "Library of Case Studies" fornisce, per ogni caso di studio individuato, una breve descrizione seguita da cinque sezioni:

1. Le principali "sfide" (business challenge) affrontate;
2. Le barriere incontrate durante l'implementazione;
3. L'approccio utilizzato da persone/organizzazioni per superare queste barriere;
4. Il processo di individuazione (raccolta dati, individuazione dei possibili utilizzi), terminato con uno scambio simbiotico;
5. I presupposti che hanno reso possibile lo scambio simbiotico.

L' "Exchanges Database" contiene invece descrizioni dettagliate sul processo di trattamento e l'uso finale di ogni scambio, inclusi i settori industriali e i materiali coinvolti. Il database può essere consultato secondo differenti modalità:

- Attraverso l'inserimento del codice NACE (Nomenclature statistique des Activités économiques dans la Communauté européenne) identificativo del settore industriale per indagare su quali sinergie sono già state realizzate dalle differenti aziende appartenenti allo stesso settore;
- Attraverso l'inserimento del codice CER (Codice Europeo del Rifiuto), identificativo del rifiuto, per indagare su come questo è già stato trasformato in un sottoprodotto redditizio da altre aziende;
- Attraverso l'inserimento del codice CPA (Classification of Products by Activity), identificativo dei prodotti o sottoprodotti (ad esempio, la melassa dalla produzione di zucchero, o calore/elettricità di scarto), per scoprire riutilizzi alternativi;
- Attraverso l'inserimento del codice CAS RN (Chemical Abstracts Service Registry Number), identificativo delle sostanze chimiche/metalli contenuti tra i rifiuti aziendali (o sottoprodotti), per identificarne le opportunità di riutilizzo.

Il database MAESTRI è stato analizzato con particolare attenzione in quanto, in termini di struttura e tipo di informazioni da raccogliere, un processo di recupero del calore di scarto (interno o esterno al sito industriale) non è del tutto dissimile ad uno scambio di materiali, energia o prodotti tra diversi impianti industriali.

Il database SHIP (Solar Heat for Industrial Processes) [6] è un database online creato nel contesto del framework IEA Task 49/IV. Lo strumento contiene una panoramica mondiale degli impianti solari termici esistenti, che forniscono energia termica per i processi di produzione per diversi settori industriali. In Figura 5 sono riportati i campi di ricerca da utilizzare per investigare il database proposto.

FILTER

Name contains

Country

Year of operation start

From year To year

Industry sector

Unit operation

Gross collector area, m²

Min Max

Kind of solar thermal collectors installed

Solar energy storage

Point of Solar Heat Integration

Solar thermal engineering company

[show all](#)

Figura 5 Interfaccia per la consultazione del database proposto nel progetto SHIP [6]

Per ciascun record sono disponibili diversi tipi di informazioni: informazioni generali (General); informazioni relative al campo solare (Solar); informazioni relative al processo in cui il calore generato viene utilizzato (Process); Informazioni economiche (Eco); “lessons learned” (Lesson); riferimenti della fonte (Source). Di particolare interesse sono le informazioni relative al processo di utilizzo del calore come riportato a titolo di esempio in Figura 6.

PROCESS

Solar thermal energy used for	steam cooking
Unit operation	cooking
Point of Solar Heat Integration	A3) Heating of supply heat storage

--> Integration how and where: Dishes with heat storage & integrated to boilers are able to cook food for 1000 students even during non sunshine hours.

--> Temperature range process:

--> Temperature range solar loop (min/max), C°:

Process

Figura 6 Informazioni sull’utilizzo del calore proveniente da un impianto solare per uno dei casi riportati nel database SHIP [6]

Un ulteriore strumento è il "Matrix of Industrial Process Indicators" [7], un database online costantemente sviluppato in vari progetti dell'AEE INTEC (AEE - Institute for Sustainable Technologies). Il database è concepito come uno strumento di supporto decisionale per guidare l'industria in materia di efficienza energetica e nell'identificazione di applicazioni solari adeguate.

L'interfaccia principale del database è rappresentata dalla matrice mostrata in Figura 7, le cui righe riportano i processi industriali, mentre le colonne sono relative a tecnologie e settori di riferimento.

	technologies		industry sectors						
	solar integration schemas	heat pump integration schemas	Subsection DC automotive	Subsection DG chemicals	Subsection DA food	Subsection DC leather	Subsection DJ metals	Subsection DC paper	Subsection DB textiles
	INFO	INFO	INFO	INFO	INFO	INFO	INFO	INFO	INFO
CP, EE, RE, PI									
CLEANING	info	info	x	x	x	x	x	x	x
CASTING	info	info	x						x
PRESSING	info	info						x	
DRYING	info	info	x		x	x	x	x	x
EVAPORATION AND DISTILLATION	info	info			x				
BLANCHING	info	info			x				
PASTEURIZATION	info	info			x				
STERILIZATION	info	info			x				
COOKING	info	info			x				x
OTHER PROCESS HEATING	info	info	x	x	x		x	x	x
GENERAL PROCESS HEATING	info	info			x				
HEATING OF PRODUCTION HALLS	info	info			x				
COOLING OF PRODUCTION HALLS		info			x				
COOLING PROCESSES		info	x	x	x		x		
MELTING	info	info			x				
EXTRACTION				x	x				
SIZING								x	
BLEACHING			x		x	x			x
PAINTING			x			x		x	x
SURFACE TREATMENT	info	info	x			x	x		
LAMINATION			x				x		

Figura 7 Interfaccia principale del database proposto in [7]

Entrando nel dettaglio di un processo industriale è possibile ottenere informazioni circa i metodi, le applicazioni, le temperature caratteristiche, ma soprattutto sulle tecnologie più competitive e i potenziali saving energetici ottenibili. Un esempio di quanto si ottiene selezionando il processo di pastorizzazione è riportato in Figura 8. Anche in questo caso è possibile notare come le informazioni riportate non permettono l'analisi dettagliata dell'intervento né tantomeno della tecnologia utilizzata.

Industry Sector	UO per sector	Method	Applications	Temperature (°C)	Competitive technologies and energy saving potentials
Food	Pasteurization	Batch pasteurizers	<ul style="list-style-type: none"> Milk production (72°C) Condensed and powder milk production (72-100°C) Sweetened condensed milk production (85-90°C) Curdled milk production (80-90°C) Butter production (>95°C) Cheese production (60-72°C) 	60-120	<ul style="list-style-type: none"> Use of continuous pasteurizers Regenerative heat exchange in a pasteurization process In-line storage tanks to minimize product recirculation in pasteurizers Membrane processes High hydrostatic pressure pasteurization Electron beam pasteurization
		Continuous pasteurizers	<ul style="list-style-type: none"> Yogurt production (80-95°C) Ice cream production (80-85°C) Other fermented milk products (75-95°C) Fruit juice production (87°C) Fruit pulp production (90-120°C) Mashed fruit production (115°C) Dessert sauce production (115°C) Beer production (~70°C) Meat production (55-74°C) 	60-120	

Figura 8 Informazioni su processo di pastorizzazione nell'industria alimentare riportate in [7]

L'analisi dettagliata di questi database, con la ricerca di punti di forza e debolezza, ha permesso di ottenere numerosi input al perfezionamento dello strumento proposto nell'ambito del progetto di ricerca.

Sebbene questi strumenti siano densi di informazioni, non permettono di superare completamente le numerose barriere alla diffusione del recupero termico di calore. I database come "IAC" e "Matrix of Industrial Process Indicators" (così il progetto EU-MERCI descritto nella precedente annualità) contengono numerose applicazioni ma non forniscono informazioni dettagliate sulle tecnologie utilizzate. Inoltre, questi database si basano solo su un sottoinsieme di progetti o, come nel caso del database "IAC", si riferiscono a una singola area geografica specifica (Stati Uniti). I database "MAESTRI" e "SHIP" sono invece focalizzati solo su applicazioni specifiche come usi esterni del calore di scarto (simbiosi industriale) e applicazioni di recupero da impianti solari termici.

Di conseguenza, si conferma la necessità di realizzare uno strumento completamente focalizzato sul recupero di calore ed in grado di fornire informazioni sufficientemente dettagliate sulle tecnologie disponibili e soprattutto sul loro possibile utilizzo.

3.2 *Revisione della struttura*

La struttura del database sviluppata durante la prima annualità di ricerca è stata frutto della volontà di generare uno strumento ampio, in grado di contenere sia tecnologie di recupero di calore, sia progetti e casi di studio implementati o in corso di implementazione. Se da un lato la creazione di un unico strumento ampio contenente sia tecnologie sia casi di studio presenti aspetti positivi dal punto di vista della quantità di informazioni, questo può comportare delle difficoltà nella sua applicabilità.

Viste inoltre le attività svolte da ENEA nella prima annualità di ricerca (LA3.18) circa lo sviluppo di un database contenente progetti di recupero termico, sia per evitare la creazione di strumenti contenenti informazioni eccessivamente ridondanti, ma soprattutto per la volontà di creare strumenti maggiormente focalizzati, è stato deciso separare le informazioni in due database distinti: un database di tecnologie e un database di casi di studio.

Mentre ENEA continuerà le attività di sviluppo di un database contenente casi di studio, integrando il grande contributo proveniente dall'analisi delle diagnosi energetiche di settore, il gruppo di ricerca dell'Università di Roma "Tor Vergata" ha focalizzato il database precedentemente sviluppato nell'ambito delle tecnologie di recupero di calore a bassa temperatura.

La scelta di creare due database distinti si conferma positiva nell'ottica di rafforzare la modularità dello strumento di supporto decisionale finale, consentendo di ottenere due strumenti correlati ma non vincolati, da utilizzare in fasi distinte del processo decisionale. Nel paragrafo 3.2.4 "Integrazione con il database ENEA" viene fornito un esempio di utilizzo integrato dei due strumenti.

3.2.1 *Nuova struttura del database e le informazioni da raccogliere*

La struttura finale del database è organizzata come segue: ad ogni riga corrisponde una tecnologia di recupero di calore. 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 raccolte sono organizzate in cinque macrocategorie:

1. *Identificazione*: contiene i campi che permettono di localizzare la tecnologia all'interno del database. Ad ogni fornitore possono essere associate a più tecnologie;
2. *Fonte*: contiene le informazioni necessarie a definire la fonte utilizzata e a garantirne la reperibilità;
3. *Fornitore di tecnologia*: contiene le informazioni necessarie ad 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 12 è riportata una descrizione dei campi inclusi nella versione rivista del database.

Tabella 12 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 stata 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 generazione o 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)
		Temperature 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 di scarto).
		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.
		Temperature di output	Range di temperatura di output del fluido in uscita (effetto utile).
	ALTRE INFORMAZIONI		Efficienza
		Dimensioni	Dimensione richiesta dalla tecnologia (es. m ² /kW _{assorbito})
		Vita utile attesa	Vita utile di progetto della tecnologia.
		PBP atteso	Misura di 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 campi riportati in Tabella 12 è frutto delle approfondite indagini della letteratura svolte circa le principali tecnologie di recupero a bassa temperatura. Tali attività, iniziate nella precedente annualità, hanno permesso di identificare quali siano le informazioni necessarie da raccogliere per la caratterizzazione

delle tecnologie di recupero termico a bassa temperatura disponibili e quindi da dover essere incluse nel database.

La raccolta di queste informazioni definisce inoltre la procedura da seguire per estrarre i dati necessari all'analisi delle tecnologie rilevate e, conseguentemente, procedere al popolamento del database.

3.2.2 Interazione con le parti interessate

Contributo fondamentale alla revisione della nuova struttura e alla validazione della stessa è stato fornito dall'interazione con i rappresentanti del mercato italiano delle tecnologie mediante le interviste realizzate e descritte nel paragrafo 2.1 "Fornitori di tecnologie".

Sebbene la struttura si sia dimostrata valida in termini di informazioni da contenere, sono state riscontrate alcune criticità nel popolamento. Inizialmente erano stati previsti principalmente campi chiusi, ma è stato necessario mantenere una struttura più flessibile. Tale necessità è riconducibile alla grande varietà e diversità delle tecnologie di recupero termico, ma anche dalla tipologia dei fornitori attivi sul mercato. Non tutti i fornitori presentano prodotti descritti a catalogo sotto forma di singoli modelli, serie di modelli o gamma di prodotti, poiché, in molti casi, i produttori offrono design specifici per l'applicazione. Per questo motivo, è stato preferito optare per una struttura più flessibile prevedendo la possibilità di inserire range di valori e campi a compilazione libera, in modo da poter inserire le diverse tipologie di prodotti (dallo specifico modello al range di applicabilità di alcune tecnologie).

I campi come "Potenza termica in ingresso", "Temperature di input", "Potenza di Output" che nella prima versione del database erano stati previsti come campi chiusi (caratterizzati da un valore univoco), in questa nuova versione sono caratterizzati da un range di valori. Questa scelta è motivata dalla difficoltà dei fornitori di tecnologie nel fornire un unico valore, viste le differenti soluzioni possibili e le diverse condizioni operative riscontrabili. È stato deciso di mantenere il campo "Temperatura minima" come campo chiuso rappresentato da un unico valore, in quanto questo limite tecnico rappresenta un discriminante importante nel determinare l'applicabilità o meno di una tecnologia.

Inoltre, alla definizione e revisione della nuova struttura si è proceduto parallelamente ad integrare le tecnologie proposte dai fornitori intervistati all'interno del database, estendendone i contenuti. In tal senso l'interazione con i fornitori ha permesso di:

- I. arricchire il popolamento del database con le tecnologie proposte dai fornitori intervistati grazie ai dati raccolti durante le interviste (vedi paragrafo 2.1.1 "Primo ciclo di interviste");
- II. verificare l'esistenza sul mercato italiano delle tecnologie precedentemente identificate in letteratura e consolidarne la conoscenza tramite approfondimenti tecnici dedicati;
- III. individuare tecnologie presenti nel mercato non riscontrate durante le ricerche di letteratura.

È bene evidenziare come tale interazione sia stata fondamentale per l'ultimo punto citato (punto III). Alcuni dei fornitori intervistati presentano delle tecnologie di recupero di calore a bassa temperatura non descritte a catalogo, che quindi non sarebbe stato possibile rilevare se non interagendo con il fornitore stesso.

3.2.3 Query e consultazione del database

A fronte della nuova struttura del database è stata rivista la definizione delle query a disposizione dell'utente. Sono stati previsti principalmente 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'utilizzatore, 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'utilizzatore, 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;

Nel caso l'ipotetico utente sia a conoscenza di entrambe le tipologie di informazioni, può integrare l'utilizzo delle due query.

In Tabella 13 sono riportate le nuove due possibilità di utilizzo individuate e i campi selezionati con una breve descrizione degli stessi.

Mentre nella precedente versione del database (LA3.21) per la definizione delle query si era partiti dalla conoscenza delle informazioni che necessariamente devono essere a disposizione per descrivere efficacemente un progetto/tecnologia di recupero di calore (temperatura sorgente, tipologia sorgente, destinazione recupero, maturità progetto/tecnologia, PBP atteso), in questa nuova versione del database le query sono state definite sulla base dei processi comuni pensati per l'utilizzo del database, oltre al naturale aggiornamento dovuto all'aver focalizzato il database sulle tecnologie di recupero.

Tabella 13 Query a disposizione dell'utente per la consultazione del database

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

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.

Così come previsto nella prima versione del database, le informazioni richieste per la consultazione del database a disposizione sono costituite da un campo chiuso, attraverso il quale l'utente può scegliere tra opzioni predefinite, e per ogni campo sarà possibile selezionare preferenze multiple.

In Tabella 14 sono riportate alcune delle voci di compilazione selezionate per ogni campo.

Tabella 14 Voci di compilazione delle query per la consultazione del database

Temperatura sorgente	Potenza termica di scarto disponibile	Tipologia di Recupero	Tecnologia	Stato di maturità tecnologia
≤ 100°C	$P_t \leq 50 \text{ kW}_t$	Produzione di energia elettrica	Organic Rankine Cycle	Formulazione teorica
100°C < T ≤ 150°C	$50 \text{ kW}_t < P_t \leq 500 \text{ kW}_t$	Produzione di energia termica	Pompa di calore	In fase di sviluppo
150°C < T ≤ 200°C	$500 \text{ kW}_t < P_t \leq 2000 \text{ kW}_t$	Produzione di Energia Frigorifera	Frigorifero ad assorbimento	Disponibile sul mercato
200°C < T ≤ 250 °C	$P_t > 2000 \text{ kW}_t$	Scambio termico	Scambiatori di calore a piastre	Consolidata
-	-	-	Altro	-

3.2.4 Integrazione con il database ENEA

Il *Database di tecnologie* proposto dal gruppo di ricerca dell'Università di Roma "Tor Vergata" e il *Database di casi di studio* proposto dal gruppo di ricerca di ENEA rappresentano due elementi chiave dello strumento più ampio previsto come output dell'intero progetto di ricerca. Nonostante le differenze e le motivazioni già discusse che hanno portato alla definizione di due distinti database, grazie ad una simile e coerente struttura e ad una logica di realizzazione comune, i due strumenti sono in grado di essere utilizzati in maniera integrata.

Sono stati condotti dei tavoli di lavoro interni a cui hanno preso parte il gruppo di ricerca dell'Università di Roma "Tor Vergata" e i ricercatori ENEA, nei quali sono state definite le modalità e le attività da svolgere per favorire l'utilizzo integrato dei due strumenti. In particolare, sebbene i due database siano stati focalizzati su due aspetti diversi (tecnologie e casi di studio), i due strumenti presentano dei campi comuni come, ad esempio, "Tipologia di recupero", "Tecnologia", "Stato di maturità tecnologia" per i quali è stato necessario definire una nomenclatura comune. Inoltre, si è analizzata la contestualizzazione dei due database nel loro ruolo di supporto all'interno del processo di supporto alla valutazione di un intervento di recupero di calore: mentre il database dei casi di studio vede la sua principale applicazione nella fase di individuazione dei possibili interventi di recupero, il database di tecnologie può fornire un importante supporto nella fase di valutazione e scelta della tecnologia più opportuna.

Per fornire un esempio pratico dell'utilizzo integrato dei due database, sono stati identificati due possibili percorsi:

- L'utente A consulta il *Database dei casi di studio* alla ricerca di interventi di recupero di calore effettuati nel suo settore di riferimento. Una volta identificati gli interventi effettuati e le tecnologie utilizzate, può ottenere informazioni più dettagliate sulle tecnologie consultando il *Database di tecnologie*;
- L'utente B consulta il Database delle tecnologie alla ricerca di possibili tecnologie adatte al calore di scarto disponibile. Una volta identificate le possibili tecnologie può ottenere informazioni sull'effettiva implementazione delle stesse consultando il *Database dei casi di studio*.

In Figura 9 è riportata una rappresentazione grafica e la descrizione dei due esempi presentati.

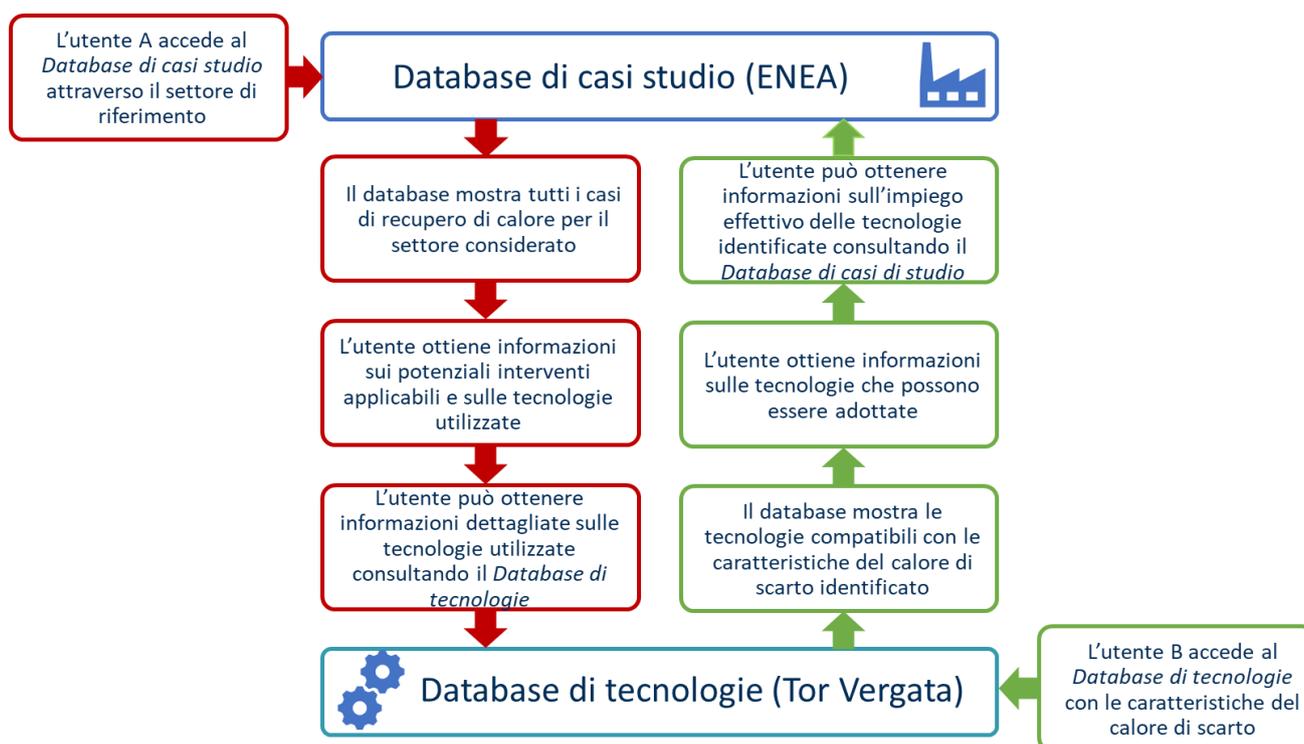


Figura 9 Due differenti esempi di utilizzo integrato dei due database

Quelli proposti in questo paragrafo sono solo due dei possibili utilizzi integrati dei due database. Per entrambi i database possono essere utilizzate diverse query di accesso, ma il processo logico sarà simile a quello mostrato in Figura 9.

Per fornire un esempio più pratico dell'utilizzo integrato dei due database, possiamo immaginare di essere un Energy Manager di un'azienda lattiero-casearia alla ricerca di progetti recupero di calore implementati in questo sottosettore di riferimento. Entrando nel database dei casi di studio (ENEA) con "Produzione di latte e derivati" nel campo dei sottosectori, la ricerca produce quattro risultati (alla versione del database aggiornata al termine dell'annualità 2019). Due di questi si riferiscono al recupero del calore di scarto mediante l'applicazione di pompe di calore. Per ottenere maggiori informazioni su questa tecnologia, l'utente può consultare il database della tecnologia (Tor Vergata) entrando nel database con il campo "Tecnologie" ed inserendo "Pompa di calore". La ricerca produce ventuno risultati, tra i quali l'utente può selezionare quelli compatibili con le caratteristiche del flusso di calore di scarto disponibile dall'azienda lattiero-casearia.

La Tabella 15 mostra un estratto dei risultati ottenuti utilizzando i criteri di ricerca descritti. A causa di problemi di riservatezza, i dati della tabella non forniscono alcuna informazione sulle aziende e sui fornitori di tecnologie coinvolti.

Tabella 15 Estratto dei risultati ottenuti utilizzando i criteri di ricerca specificati nell'esempio di utilizzo dei database

Database dei casi di studio (ENEA)

Tipo di fonte	Sottosettore*	Processo	Processo che riceve calore	Tecnologia	Quantità (flusso, potenza o energia prodotta)	Temperatura utilizzo
Report progetto	Produzione di latte e derivati	Raffreddamento di acqua da 45°C a 22°C	Preriscaldamento aria per produzione di latte in polvere	Pompa di calore	7,2 MW	73 °C
Report progetto	Produzione di latte e derivati	Recupero del calore di scarto dal condensatore dell'impianto di refrigerazione	Produzione di acqua calda di processo e riscaldamento di una serra adiacente	Pompa di calore	1,25 MW	80 °C
Database delle tecnologie (Tor Vergata)			Database delle tecnologie (Tor Vergata)			
Tipo di fonte	Destinazione recupero	Tecnologia*	Stato di maturità	Fluido vettore	Potenza di Output	Temperatura di output
Catalogo	Produzione di energia termica	Pompa di calore	Tecnologia consolidata	Acqua	0,6-2,0 MW	80
Catalogo	Produzione di energia termica	Pompa di calore	Tecnologia consolidata	Acqua	0,6-10 MW	70-90

I campi contrassegnati con * sono i campi utilizzati per la consultazione del database nello specifico esempio riportato

3.3 Modalità di utilizzo del database

Successivamente alle modifiche alla struttura del database di tecnologie, si è proceduto alla revisione della versione del database su piattaforma Access. Come già introdotta nella prima annualità di ricerca, la versione in access è destinata alla consultazione dell'utente esterno, con l'obiettivo di realizzare uno strumento user friendly e di renderlo interrogabile.

Al fine di allineare la struttura del database con le modalità di utilizzo definite nel precedente paragrafo sono stati introdotti due ulteriori campi di ricerca inseriti per favorire l'interrogazione del database pur non aggiungendo informazioni a quanto precedentemente raccolto. In particolare:

1. Range di temperatura ammissibile: suddivide i record in quattro tipologie in funzione del range di temperatura del calore di scarto ammissibile per la tecnologia di recupero considerata, in accordo con le query definite e consultabili in Tabella 14;

2. Range di potenza termica di scarto in ingresso: suddivide i record in quattro tipologie in funzione del range potenza termica in input alla tecnologia di recupero, in accordo con le query definite e consultabili in Tabella 14;

All'apertura del file Access, viene mostrata automaticamente all'utente una schermata principale, riportata in Figura 10, in cui viene brevemente descritto il database, il suo obiettivo e la sua struttura e ne vengono fornite le modalità di utilizzo.



Menu Principale ×

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)

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 10 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 10) si ottiene l'apertura automatica delle maschere di ricerca corrispondenti alle due modalità di consultazione previste e descritte nel paragrafo 3.2.3 Query e consultazione del database. In particolare, la modalità di ricerca A partendo dalla conoscenza delle caratteristiche del calore di scarto (Figura 11) e la modalità di ricerca B dedicata all'ottenimento di ulteriori informazioni sulla specifica tipologia di recupero termico (Figura 12). Attraverso l'utilizzo di queste due maschere di ricerca avviene la consultazione del database.

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.

A- Ricerca dal calore di scarto

Temperatura del calore disponibile

Potenza termica in ingresso



ID_tecnologi	ID_fonte	Tipologia fonte	Anno	Riferime	Tipologia di	Destinazione recu	Tecnologia	Descrizione della tecn	Stato di mat	Campi di Applicaz	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 micro-ORC per la produzione di energia elettrica dal	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 pressurizzata 180 °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 pressurizzata 180 °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 UHL 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 UHL 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 UHL 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 UHL 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 11 Maschera di ricerca A – Ricerca dal calore di scarto

B - Ricerca per tipologia di recupero

Seleziona tipologia di recupero

Seleziona Tecnologia

Seleziona stato di maturità della tecnologia



ID_tecnologi	ID_fonte	Tipologia fonte	Anno	Riferime	Tipologia di	Destinazione recu	Descrizione della tecnologia	Campi di Applicazione	Modello	Fluido vettore
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 2 a 6 MW elettrici, recupero	Recupero a bassa temperatura, solare termico, caldaie a biomassa std	LT	Acqua
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 2 a 10 MW elettrici, recupero	recupero calore a media temperatura (fumi <280°), solare a concentrazione, caldaie a biomassa ad olio diatermico	MT	Acqua pressurizzata - olio diatermico
3	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 2 a 10 MW elettrici, recupero	recupero su motori a combustione interna	HT	Olio diatermico
4	2	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 2 a 10 MW elettrici, recupero	Recupero a valle di turbine a gas, recupero di calore nel settore industriale (principalmente settori del cemento, vetro, fonderia, etc)	-	Olio diatermico, acqua, vapore
5	3	Intervista	2020	Italia	Produttore	Scambio termico	Produttori di scambiatori di calore di varia natura e materiali che possano funzionare sia in regime di recupero	Applicazioni in molti settori industriali (tessile, caseario, prodotti da forno, alimentare, farmaceutico, cemento, fonderie)	-	Non sono previsti particolari limiti
6	4	Intervista	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia termica	Pompe di calore indirect fired	Condizionamento edifici, riscaldamento radiatori.	-	Acqua pressurizzata - olio diatermico
7	4	Intervista	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia frigorifera	Absorbitori Power Fluid Robur (indirect Fired) ovvero refrigeratori che utilizzano un ciclo termodinamico con una soluzione di acqua ammoniacale	Industria metallurgica, industria agro alimentare e lattiero casearia, in generale ogni realtà produttiva che dispone di cascami termici sopra i 100°C e che necessita	Unità Power Fluid disponibili in 3 diversi modelli: ACF 60-00 TK ACF 60-010 ACF 60-	Acqua pressurizzata - olio diatermico
8	5	Catalogo	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Moduli ORC per recupero di cascami 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	ZE-30-UHL	Acqua calda
9	5	Catalogo	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Moduli ORC per recupero di cascami 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	ZE-40-UHL	Acqua calda
10	5	Catalogo	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Moduli ORC per recupero di cascami 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	ZE-50-UHL	Acqua calda
11	5	Catalogo	2020	Italia	Produttore	Produzione di energia elettrica	Moduli ORC per recupero di cascami 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	ZE-100-UHL	Acqua calda

Figura 12 Maschera di ricerca B – Ricerca per tipologia di recupero

3.4 Popolamento del database e protocollo di indagine

Definita la nuova struttura, si è proceduti nella continuazione del popolamento del database che nella prima annualità era stata affrontata solo dal punto di vista metodologico.

Al fine di stabilire i criteri per garantire la replicabilità del processo di popolamento, è stato definito un protocollo sistematico di indagine della letteratura che definisca con chiarezza la procedura da seguire per l'analisi delle informazioni riguardo le tecnologie di recupero (anche in termini di completezza e qualità) per poter essere incluse nel database. Di seguito viene descritta la procedura seguita per l'indagine della letteratura finalizzata al popolamento del database.

Il primo passo ha visto l'individuazione delle keywords della ricerca che sono state suddivise in riferimento a tre categorie:

1. *Contesto*, di cui fanno parte parole chiave come: "Recupero di calore", "Calore di scarto", "Calore a bassa temperatura", "calore di scarto industriale", "Tecnologie di recupero di calore", ecc.
2. *Tecnologie*, di cui fanno parte parole chiave come: "Cicli Rankine Organici", "Pompa di calore", "Scambiatori di calore"; "Scambiatori a piastre", "Pompe di calore termoacustiche", "Frigoriferi ad assorbimento", ecc.
3. *Applicazione* di cui fanno parte parole chiave come: "Calore di scarto per produzione di energia elettrica", "Calore di scarto per produzione di energia termica", "Calore di scarto per produzione di energia frigorifera", "Recupero di calore pastorizzazione"; "Recupero di calore compressori"; "Recupero di calore fumi", ecc.

Grazie alle keywords definite, utilizzate sia nella versione italiana sia nella traduzione inglese, sono state condotte diverse ricerche sui principali motori di ricerca come "Web of Science", "Scopus", "ScienceDirect", "Google Scholar", "Google", grazie alle quali è stato possibile reperire un numero elevato di fonti suddivise in:

- Articoli scientifici;
- Report di progetti;
- Cataloghi disponibili online sul sito web dei fornitori.

Inoltre, per i fornitori di tecnologie individuati, si è provato ad instaurare un contatto tramite mail o tramite apposito modulo di contatto disponibile sul sito web, al fine di organizzare un'intervista. L'intervista, oltre a garantire una maggiore qualità dei dati raccolti, permette 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, abbinando il contenuto del documento ai 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 vengono considerate tecnologie per applicazioni puramente nel settore residenziale).

Le tecnologie al di fuori dai confini del progetto di ricerca non vengono pertanto inserite nel database. 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 contiene informazioni provenienti da 22 diverse fonti per un totale di 65 record.

La continuazione nel popolamento del database ha visto principalmente l'analisi di tre tipologie di fonti: fonti provenienti dalla continuazione dell'analisi di letteratura (articoli scientifici e report di progetto); tecnologie rilevate durante le interviste con i fornitori di tecnologie; cataloghi online di fornitori di tecnologie.

Le interviste realizzate con i fornitori di tecnologie risultano essere le fonti dalla quali è possibile ottenere i risultati migliori in termini di completezza delle informazioni raccolte (ma ovviamente più impegnative in termini di tempo richiesto). Le tecnologie contenute in articoli scientifici, report di progetto e cataloghi dei fornitori non risultano essere caratterizzate sempre da un numero di informazioni idonee da poter essere inserite nel database. A tale riguardo, si precisa come i record contenuti attualmente nel database rappresentano solo una minima parte delle fonti totali analizzate in quanto molte di queste, approssimativamente il 50%, conteneva informazioni non adeguate da poter essere inserite con successo nel database.

Altra criticità nel popolamento è rappresentata dall'assenza di schede tecniche o cataloghi per le tecnologie proposte da numerose aziende (soprattutto per applicazioni non standard e per tecnologie ancora non consolidate). Per ovviare a questo problema, laddove possibile, si è provato ad instaurare un primo contatto (generalmente tramite mail) che non sempre si è riuscito a concretizzare; al termine della seconda annualità di ricerca sono state contattate circa 30 aziende attive nel mercato delle tecnologie, ricevendo risposta da 9 (30%) che sono state pertanto intervistate.

Come mostrato in Figura 13, le tecnologie identificate derivano principalmente dalla consultazione dei cataloghi dei fornitori (77%) e dalle interviste realizzate (18%). La Figura 14 mostra invece la divisione delle tecnologie per tipologia di recupero di calore.

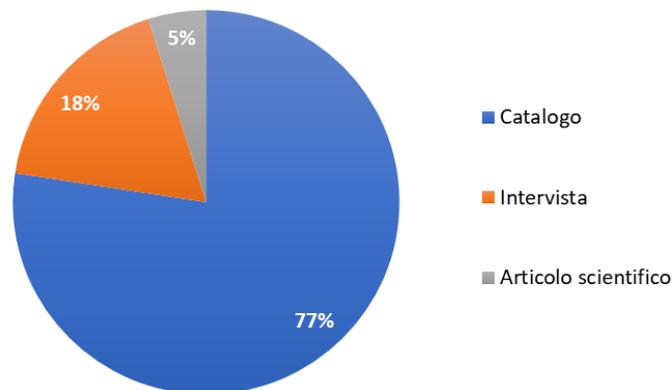


Figura 13 Primi risultati del popolamento del database: il tipo di fonte

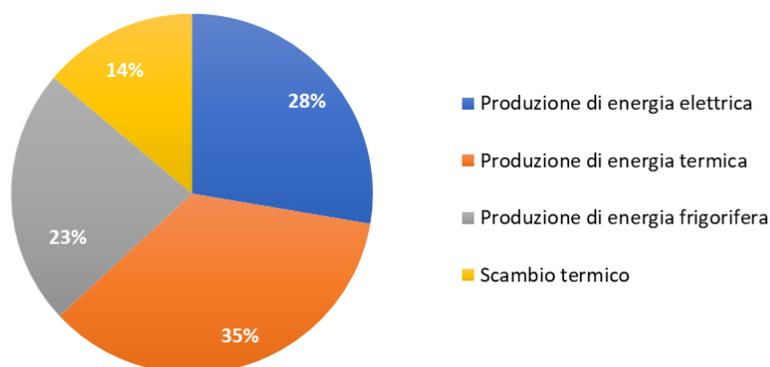


Figura 14 Primi risultati del popolamento del database: la tipologia di recupero termico

In Figura 15 viene riportata la suddivisione per tecnologie. È possibile constatare come gli ORC (26%), le pompe di calore (32%) ed i frigoriferi ad assorbimento (22%), siano le tecnologie maggiormente rappresentate.

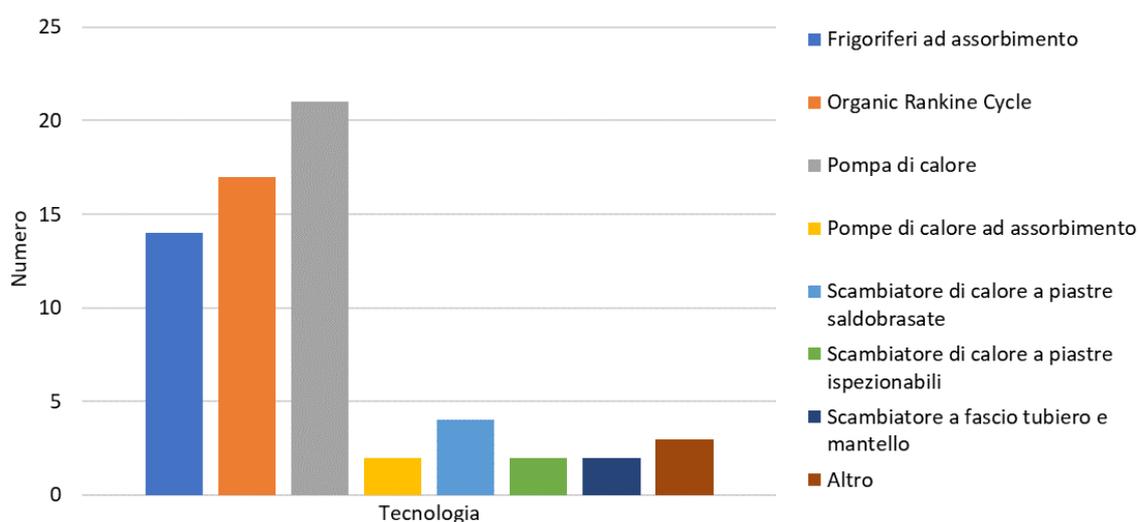


Figura 15 Primi risultati del popolamento del database: le tecnologie identificate

Si ritiene interessante rilevare come, per le tecnologie presenti all'interno del database, circa l'80% dei rilievi sia riconducibile a tre sole tecnologie. Questo aspetto, dovuto sicuramente ad un'importante presenza di queste tecnologie sul mercato in quanto consolidate, è stato tuttavia accentuato dalla tipologia di ricerca effettuata, dalla maggiore disponibilità (e maggiore completezza) di informazioni circa queste tecnologie e dal maggior tasso di risposta alle interviste da parte dei fornitori contattati.

Il popolamento verrà ampliato e terminato nel successivo anno del progetto di ricerca (come previsto da capitolato) con l'obiettivo di incrementare il numero di rilievi e coprire un maggior numero di tecnologie. Oltre alla continuazione dell'analisi della letteratura di settore (articoli scientifici e cataloghi di fornitori), un contributo rilevante sarà fornito dal proseguimento delle interviste ai rappresentanti del mercato e dall'analisi approfondita dei casi di studio previsti per la successiva annualità del progetto.

4 Metodologia per l'identificazione e l'analisi dei flussi energetici e degli interventi di efficientamento

In questo capitolo del documento di sintesi sono descritte le principali attività che gruppo di ricerca ha condotto nello sviluppo di una metodologia per l'identificazione e l'analisi dei flussi energetici e degli interventi di efficientamento. In particolare:

- Continuazione delle attività del primo anno nel quale, grazie all'analisi della letteratura condotta, erano state identificate, a livello di diagramma di flusso, le fasi della metodologia da sviluppare;
- Realizzazione di un modulo di valutazione preliminare che, a partire da pochi dati in ingresso, possa offrire una prima valutazione dei possibili interventi di recupero termico implementabili nel caso specifico considerato;
- Aggiornamento e sviluppo degli strumenti da utilizzare nella rappresentazione dei flussi di calore per fornire in maniera efficace le complesse e diverse informazioni necessarie alla valutazione e distinzione delle diverse opportunità di recupero di calore di scarto a bassa temperatura.

Il principale risultato atteso prevede la realizzazione di strumenti preliminarmente validati grazie alle risultanze delle analisi di letteratura e alle interazioni con i fornitori di tecnologie e pronti ad essere sperimentati sul campo nei casi di studio individuati in collaborazione con ENEA.

4.1 Le fasi della metodologia

Il primo passo nello sviluppo di una metodologia prevede l'individuazione delle sue fasi. L'approccio 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.

In Figura 16 è riportata una rappresentazione grafica delle fasi della metodologia.



Figura 16 Fasi della metodologia

Gli strumenti realizzati all'interno di questo ampio progetto di ricerca sono in grado di fornire valido supporto nelle fasi della metodologia proposta: il database dei casi di studio realizzato da ENEA ed il database delle tecnologie realizzato dall'Università di Roma "Tor vergata" possono offrire supporto nell'identificazione del

calore di scarto e nella prima valutazione delle tecnologie di recupero utilizzabili (fasi 2 e 3); 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 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 posto sulla fase centrale di questa metodologia: la fase di valutazione preliminare. Le successive fasi della metodologia ("Dimensionamento" e "Supporto decisionale") saranno 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 nella letteratura scientifica.

Molte delle metodologie presenti forniscono approcci dettagliati per il dimensionamento delle singole tecnologie di recupero termico, come ad esempio per ORC [8]–[13], pompe di calore [9], [14], frigoriferi ad assorbimento [15]–[18]. Questi approcci se bene strutturati non risultano essere sempre di facile utilizzo. Altre metodologie come quella proposta in [19] e rivista in [20] si pongono l'obiettivo di definire un processo per l'identificazione e la successiva combinazione di sorgenti e utilizzatori di flussi. Non vengono considerate le differenti tecnologie disponibili per il recupero termico ma ci si limita a identificare le condizioni ideali di scambio termico. Altri approcci come quello proposto in [21] non forniscono una vera e propria metodologia strutturata, ma un'analisi di fattibilità delle varie tecnologie basate sostanzialmente sui range di temperatura applicabili.

Lavoro più allineato con quanto si vuole proporre in questa sede è l'approccio proposto da [22], già descritto dettagliatamente nel report oggetto della prima annualità di ricerca, 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.

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

Per superare i gap identificati, viene quindi proposto un modello per la valutazione preliminare, che utilizzando pochi dati di input, possa fornire una panoramica chiara e completa delle tecnologie di recupero termico applicabile per lo specifico caso di studio considerato.

L'idea è quella di sviluppare uno strumento perfettamente integrabile con gli altri gli strumenti di efficienza energetica comunemente utilizzati dalle aziende. Ad esempio, grazie alla tipologia di dati richiesti, questo strumento 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.

4.2 Modulo di valutazione preliminare

In questo paragrafo vengono descritte le attività e gli strumenti realizzati al fine di supportare le aziende nelle fasi preliminari della valutazione di un'opportunità di recupero di calore di scarto.

Il primo passo per definire un metodo strutturato è stato quello di identificare e definire le fasi coinvolte in questo processo di valutazione. L'approccio si divide in quattro step (Figura 17):

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). Conoscere i fabbisogni permette di non limitarsi a selezionare le tecnologie compatibili con le caratteristiche del calore di scarto ma di investigare quelle implementabili nel sito industriale oggetto di valutazione. 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). In Tabella 16 sono sintetizzate le principali informazioni da raccogliere.

Tabella 16 Dati di input al modello

Tipologia	Grandezza
Calore di scarto	Tipo di fluido
	Disponibilità (es. ore/anno)
	Portata
	Temperature
	Pressione
Fabbisogno di energiatermica	Tipologia di fluido a cui cedere calore
	Domanda (es. ore/anno)
	portata
	Temperatura richiesta
	Temperatura iniziale
	Pressione
	Informazioni sulla produzione del flusso (es. efficienza di produzione, costo del vettore)
Fabbisogno di energiafrigorifera	Tipologia di fluido da raffreddare
	Domanda (es. ore/anno)
	Portata
	Temperatura richiesta
	Temperatura iniziale
	Pressione
	Informazioni sulla produzione del flusso (es. tipologia e d efficienza di produzione, costo del vettore)
Fabbisogno di energiaelettrica	Fabbisogno di energiaelettrica (es. kWh/anno)
	Energia elettrica da autoproduzione (es. kWh/anno)
	Costo dell'energiaelettrica

- Valutazione tecnica** - In questa fase si sottopongono ad una prima analisi i dati precedentemente raccolti, con lo scopo di effettuare una selezione delle possibili tecnologie implementabili. Attraverso l'utilizzo di modelli specifici, vengono individuate le diverse tecnologie tecnicamente implementabili e per ciascuna delle quali ne viene fornito un primo dimensionamento;
- 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;
- Analisi dei risultati** - Per tutte le soluzioni analizzate, in seguito alla valutazione 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.

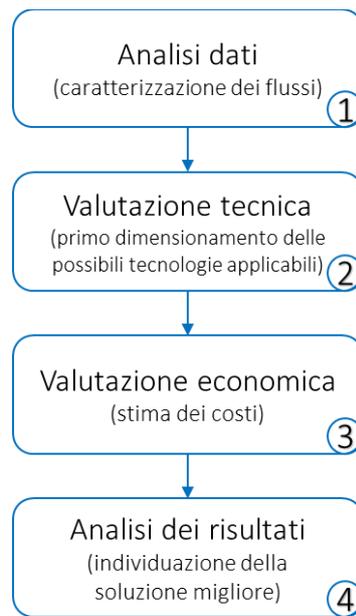


Figura 17 Fasi principali del modulo di valutazione preliminare

È bene sottolineare come l'esito di una valutazione preliminare non è da intendersi esaustivo. 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. 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.

Inoltre, nella fase di analisi dei risultati è stato citato come criterio di scelta il PBP. Si è scelto di basare la decisione su un criterio di tipo economico come la valutazione del PBP essendo tale parametro particolarmente significativo nel campo industriale. 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. La scelta delle tecnologie e la realizzazione dei modelli sono descritti nei successivi paragrafi.

4.2.1 Le tecnologie considerate e la realizzazione dei modelli

Come suggerito da [23], le tecnologie per utilizzare il calore di scarto dell'industria possono essere classificate a seconda della destinazione di utilizzo del calore di scarto recuperato: può essere utilizzato direttamente (allo stesso livello o a un livello di temperatura inferiore), oppure può essere trasformato in un'altra forma di energia o utilizzato ad una temperatura più elevata.

Possiamo identificare quattro categorie di recupero di calore:

1. Produzione di calore: contiene le tecnologie attraverso le quali il calore di scarto recuperato viene utilizzato per produrre energia termica a un livello di temperatura più elevato (pompe di calore, compressione meccanica del vapore, ecc.);
2. Produzione di energia frigorifera: contiene le tecnologie attraverso le quali il calore di scarto recuperato viene utilizzato per produrre energia frigorifera (chiller ad assorbimento e adsorbimento, ecc.);
3. Produzione di energia elettrica: contiene le tecnologie attraverso le quali il calore di scarto recuperato viene convertito in elettricità (cicli Rankine organici, cicli Kalina, ecc.);

4. Scambio termico: contiene le tecnologie attraverso le quali il calore di scarto recuperato viene utilizzato direttamente alla stessa temperatura o ad una temperatura inferiore. Scambiatori di calore e accumulo di energia termica sono le due tecnologie dominanti di questa categoria.

In Tabella 17 sono riportate le principali tecnologie di recupero di calore a bassa e bassissima temperatura per quattro categorie sopra definite.

Tabella 17 Principali tecnologie di recupero suddivise per temperatura, tipologia di recupero e stato di maturità [23]-[27]

Categorie	Tecnologie consolidate		Tecnologie emergenti	
	<120°C	120-250°C	<120°C	120-250°C
Produzione di calore	Pompe di calore	Pompe di calore	Pompe di calore termoacustiche	<u>Heat transformer</u>
	Pompe di calore ad assorbimento		Pompe di calore ad alta temperatura	Pompe di calore ad alta temperatura
Produzione di energia frigorifera	Frigoriferi ad assorbimento	-	Frigoriferi ad assorbimento	Refrigeratori termoacustici
Produzione di energia elettrica	ORC	ORC	Sistemi elettrochimici	Generatori termoelettrici
		<u>Cicli Kalina</u>	Sistemi piezoelettrici e piroelettrici	
Scambio termico	Scambiatori a fascio tubiero e mantello o a piastre	Scambiatori a fascio tubiero e mantello o a piastre	Scambiatori di calore non metallici resistenti alla corrosione	Recuperatori con innovative geometrie
	Preriscaldatori d'aria	<u>Heat Pipes</u> (tubi di calore)	Sistemi a membrana per recupero di calore latente	Progettazione avanzata di rigeneratori rotanti metallici e scambiatori a tubi di calore
	Scambiatori per acqua a contatto diretto	Scambiatore di calore rotante	Sistemi essiccanti per il recupero di calore da umidità	Bruciatori <u>autorecuperanti</u>
	Scambiatori di calore non metallici	Recuperatori a convezione (metallici)	Sistemi con materiale in cambio di fase	Sistemi con materiale in cambio di fase

Grazie ai risultati della ricerca bibliografica condotta per ciascuna di queste macro-tipologie ne è stata selezionata la tecnologia più rappresentative: 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 per la categoria di scambio termico. Per ciascuna di queste tecnologie saranno 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.

Al termine della seconda annualità del progetto di ricerca sono stati sviluppati i modelli delle prime tre tecnologie (ORC, pompe di calore e frigoriferi ad assorbimento).

Per lo sviluppo di questi modelli, e quindi per ciascuna tecnologia, è stata seguita una procedura comune suddivisibile in tre fasi:

1. Vengono raccolti i dati tecnici e le specifiche di moduli delle singole tecnologie disponibili sul mercato e ne vengono registrati i parametri fondamentali per caratterizzare il funzionamento (es. temperatura minima ammissibile del calore di scarto, potenza termica in input, potenza di output, efficienza, ecc.). Laddove disponibili, vengono raccolte informazioni di natura economica (costo di investimento, costi di gestione e manutenzione, costo specifico, ecc.);
2. Tra le variabili raccolte, viene ricercata l'esistenza di una relazione tra le caratteristiche del flusso termico in ingresso e parametri dimensionali specifici delle tecnologie considerate (es. relazione tra la potenza termica in ingresso e la potenza termica in uscita di un ORC);

3. In dipendenza dal tipo di tecnologia, si costruiscono le relazioni necessarie al calcolo dell'energia generabile e del corrispondente risparmio energetico ottenibile;
4. Grazie ai dati raccolti e alle risultanze delle analisi della letteratura e del primo ciclo di interviste ai fornitori di tecnologie, si definiscono le relazioni da utilizzare per stimare l'investimento iniziale necessario in funzione della taglia dell'impianto (€/kW). Tali relazioni risultano necessarie al calcolo di parametri a supporto delle decisioni come il PBP.

Nei prossimi paragrafi vengono descritte le attività condotte per la realizzazione dei modelli evidenziando le specificità adottate per ciascuna tecnologie e fornendo una linea guida per comprenderne il funzionamento.

4.2.2 Generazione di energia elettrica: ORC

Sono stati raccolti i dati tecnici di 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 riscontrata 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 18.

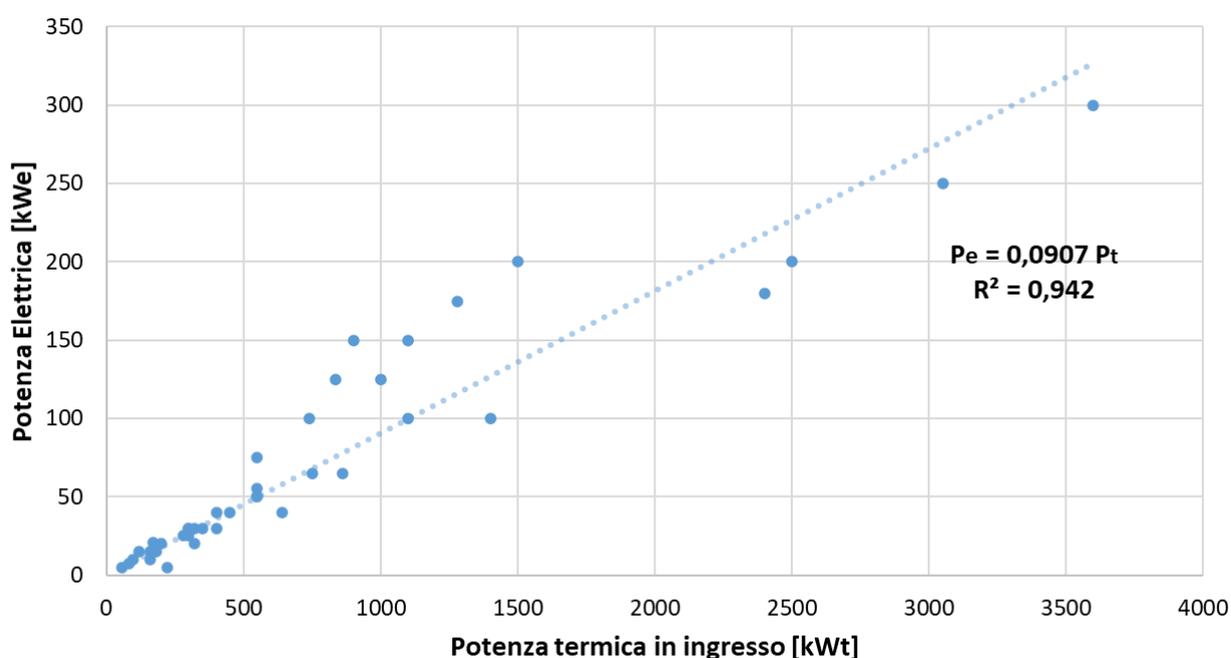


Figura 18 Relazione lineare tra potenza termica in ingresso e potenza elettrica in output per ORC

Oltre all'elevato valore del coefficiente di correlazione ($R^2 = 0,942$), particolarmente soddisfacente risulta essere la significatività statistica ottenuta 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_t mentre la potenza elettrica di output è variabile tra 5 e 300 kW_e per singolo modulo. In Tabella 18 è riportato l'output sintetico dell'analisi di regressione condotta.

Tabella 18 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	$< 1,0E-25$

Grazie al risultato ottenuto, è possibile determinare una stima della potenza elettrica ottenibile a partire dal flusso termico di scarto dalla relazione ricavata e riportata in tabella. Se la potenza termica in ingresso al modulo ORC non fosse direttamente fornita, sarà possibile stimarla dalla conoscenza delle caratteristiche del fluido di scarto come portata, calore specifico e differenza di temperatura tra ingresso e uscita del flusso termico.

È bene precisare che i moduli ORC in commercio prevedono l’utilizzo, come fluido vettore in ingresso, generalmente di acqua, vapore o olio diatermico. Se il fluido da cui recuperare calore fosse di natura diversa (ad esempio, fumi di combustione), al fine ottenere un fluido vettore idoneo ad essere elaborato dal modulo ORC, sarà necessario considerare un’efficienza di scambio termico (comunemente compresa tra 0,80 e 0,90).

Inoltre, specifiche tecniche come temperatura di uscita del fluido vettore, temperature caratteristiche nei vari stadi del fluido di lavoro o caratteristiche del condensatore non sono informazioni disponibili. Queste grandezze, in particolare la temperatura di ingresso del fluido freddo all’evaporatore ed il salto di temperatura dal lato freddo, sono state assunte sulla base dei dati individuati nella ricerca bibliografica, lasciando sempre all’utente la possibilità di modifica.

Determinata la potenza elettrica, è possibile passare si passa 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 [28].

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.

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 principalmente provenienti da interventi realizzati, ha permesso di individuare una relazione, di tipo esponenziale, tra potenza elettrica e costo specifico d’impianto:

$$c_s = 17.495 \cdot (P_e)^{-0,353}$$

La relazione individuata, riportata in Figura 19, risulta essere coerente con relazioni simili riscontrate in letteratura scientifica [29], soprattutto nel campo delle basse potenze (<100kWe). Inoltre, le prime 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.

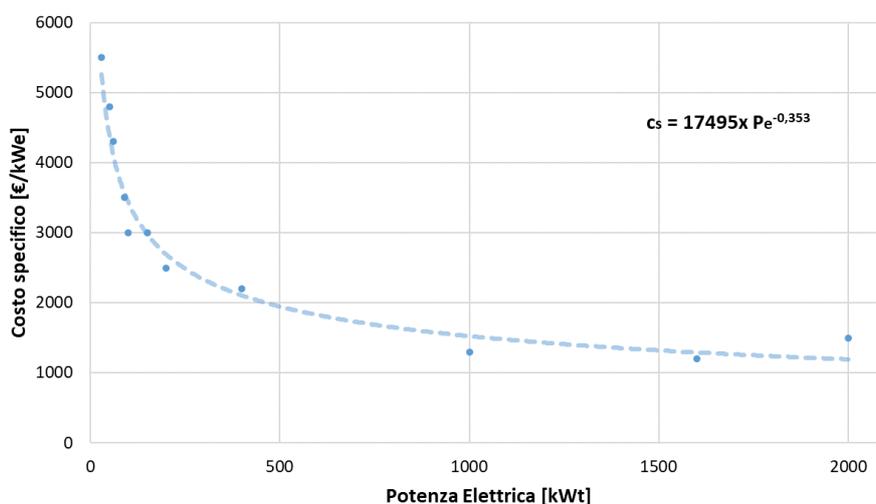


Figura 19 Relazione tra costo specifico e potenza elettrica di output per ORC

Inoltre, in accordo con [30], 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 sarà seguita per ciascuno dei flussi di calore di scarto a disposizione.

4.2.3 Generazione di energia termica: pompe di calore

La seconda tecnologia analizzata è stata la 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 ΔT_{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 riscontata una relazione lineare significativa tra il salto di temperatura della pompa di calore (ΔT_{lift}) e il coefficiente di prestazione COP. È stata condotta un'analisi di regressione lineare riportata graficamente in Figura 20.

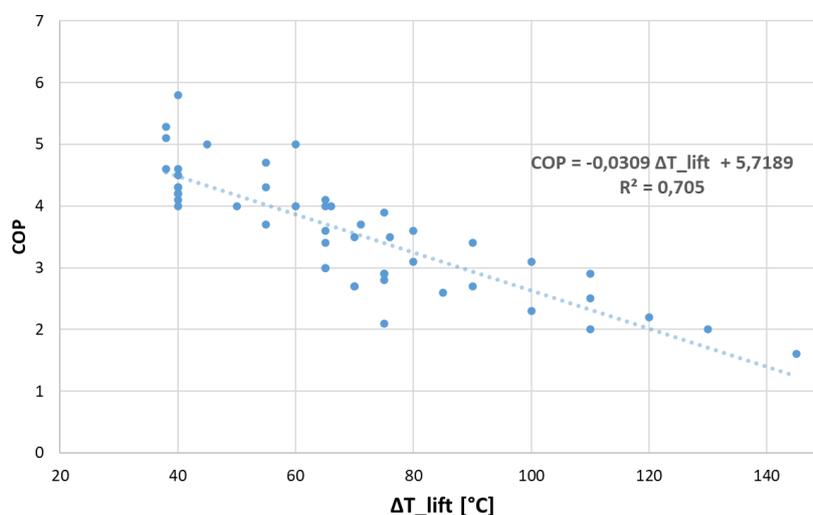


Figura 20 Relazione lineare tra ΔT_{lift} e COP per una pompa di calore

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 ΔT_{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_t). In Tabella 19 è riportato l'output sintetico dell'analisi di regressione condotta.

Tabella 19 Output dell'analisi di regressione tra ΔT_{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 ΔT_{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 ΔT_{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 19, 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 kWh/Sm³), 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 [28]. 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 (€/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 €/kW_t [31], [32]. 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 €/kW_t per il solo componente pompa di calore fino ad arrivare a valori superiori a 500 €/kWh per l'intero sistema.

In virtù dei risultati ottenuti, è stato scelto di assumere un costo specifico di 500 €/kW_t per potenze di output inferiore a 200 kW_t e di 400 €/kW_t per potenze superiori.

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.

4.2.4 Generazione di energia frigorifera: frigoriferi ad assorbimento

L'ultima tecnologia per la quale è stata sviluppato un modello riguarda i frigoriferi ad assorbimento, tecnologia dedicata all'utilizzo del calore di scarto per la generazione di energia frigorifera. Come nel caso precedente, la valutazione preliminare è basata sull'ipotesi esclusiva di corrispondenza temporale tra il calore di scarto e quello il fabbisogno di energia dell'utilizzatore.

Anche in questo caso 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 21.

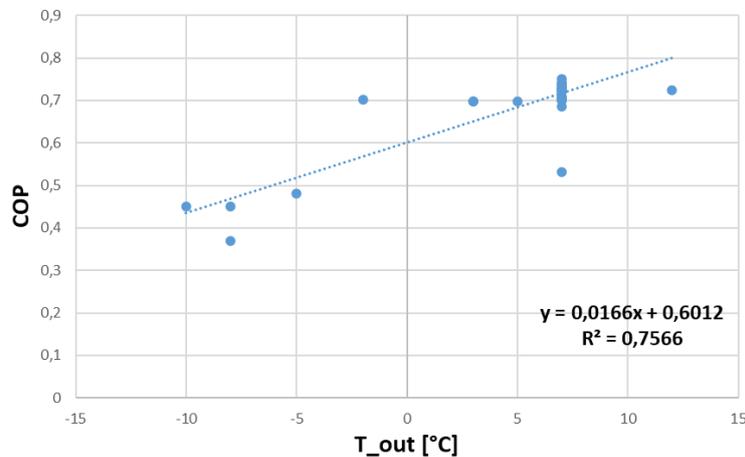


Figura 21 Relazione lineare tra T_{out} e COP per frigoriferi ad assorbimento

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_{out} 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_f). In Tabella 20 è riportato l'output sintetico dell'analisi di regressione condotta.

Tabella 20 Output dell'analisi di regressione tra T_{out} e COP per frigoriferi ad assorbimento

Statistica della regressione	
R multiplo	0,870
R al quadrato	0,757
Osservazioni	43
Equazione	$COP = 0,0166 T_{out} + 0,6012$
Valore di significatività	3,72E-14

Nel caso la soluzione sia tecnicamente implementabile, è possibile utilizzare la temperatura frigorifera (T_{out}) 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 15°C.

Utilizzare valori di T_{out} 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.

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 [28]) 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 (€/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 €/kW_f [33]–[35]. 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 €/kW_f per potenze fino a 100 kW_f
2. 500 €/kW_f per potenze comprese tra 100 e 200 kW_f
3. 350 €/kW_f per potenze comprese tra 200 e 1000 kW_f
4. 250 €/kW_f per potenze superiori ai 1000 kW_f

Ci si pone l'obiettivo di apportare, se ritenuto necessario, le opportune integrazioni in seguito al proseguimento delle interazioni con i rappresentanti del mercato, ricostruendo in maniera più dettagliata la curva dei costi in funzione della potenza frigorifera installata.

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.

4.2.5 Fattori di sicurezza

Per mitigare l'effetto delle possibili stime ed assunzioni proprie dei metodi utilizzati, si è scelto di adottare dei fattori di sicurezza per alcune delle grandezze ritenute maggiormente soggette a tale rischio. I fattori di sicurezza sono stati previsti per:

- Maggiorazione dell'investimento iniziale relativo a ORC, pompe di calore e frigoriferi ad assorbimento per tener in conto, oltre dell'incertezza dei valori rilevati, anche di ulteriori costi come, ad esempio, i costi per componentistica extra o costi di progettazione;
- Riduzione del risparmio annuo nel caso di recupero termico tramite pompe di calore e frigoriferi ad assorbimento al fine di considerare i costi di gestione e manutenzione;
- Riduzione dell'energia prodotta (effetto utile) di ORC, pompe di calore e frigoriferi ad assorbimento per tenere in conto possibili variazioni rispetto delle ore di funzionamento ipotizzate e alle diverse condizioni operative rispetto alle nominali a cui fanno riferimento le specifiche tecniche dei moduli;

I fattori selezionati, che inizialmente sono stati assunti a seconda dei casi variabili tra 0,8 e 0,9, sono stati oggetto di validazione, insieme al resto del modello, come descritto nel successivo paragrafo.

Inoltre, è bene precisare che per gli interventi di efficientamento energetico, quali sono quelli relativi al recupero termico di calore di scarto, sono previsti diversi meccanismi di incentivazione come i certificati bianchi e il conto termico. A causa dell'incertezza legata all'ottenimento di tali contributi, in questa fase di valutazione preliminare è stato scelto di non considerare gli incentivi nei flussi di cassa per il calcolo del tempo di ritorno dell'investimento, consapevoli dell'eventuale effetto puramente positivo che tale fattore potrebbe comportare.

4.2.6 Validazione e discussioni

Prima di testare i modelli sviluppati su casi di studio reali individuati nell'ambito del progetto di ricerca, si è ritenuto opportuno eseguire una prima validazione dello stesso tramite l'applicazione dei singoli modelli per casi di studio rilevati in letteratura. Tra i casi di studio, provenienti principalmente dall'analisi di letteratura condotta durante la prima annualità di ricerca, sono state selezionate alcune applicazioni sulla base della disponibilità delle informazioni minime necessarie per effettuare il confronto tra valori rilevati e valori stimati tramite l'utilizzo dei modelli sviluppati.

Per valutare l'esito del confronto, è stato definito il parametro ε (errore relativo), che per la generica grandezza g risulta essere pari a:

$$\varepsilon = \frac{|g_{fonte} - g_{modello}|}{g_{fonte}} \cdot 100$$

dove con g_{fonte} si indica il valore rilevato della grandezza considerata, mentre con $g_{modello}$ il valore della grandezza stimato tramite il modello. Considerando la natura del modello, che si pone l'obiettivo di fornire una stima di alto livello delle performance ottenibili, si è ritenuto lecito considerare accettabili errori relativi fino al 15%.

Per ognuno dei tre modelli realizzati è stato scelto un parametro tecnico e un parametro economico su cui basare il confronto tra quanto rilevato e quanto stimato dal modello. I parametri tecnici scelti sono la potenza elettrica di output per ORC e il COP per pompe di calore e frigoriferi ad assorbimento. Tale scelta è stata basata sia sulla rilevanza del parametro sia sulla disponibilità dello stesso nei casi di studio individuati. Per la validazione dei parametri economici è stato scelto preferibilmente di utilizzare l'investimento iniziale, o, qualora questo non disponibile, il PBP.

È doveroso sottolineare come i dati utilizzati per la validazione dei modelli siano provenienti da fonti diverse da quelle utilizzati per la loro creazione.

Di seguito vengono riportati e analizzati i risultati ottenuti per la prima validazioni per i tre modelli realizzati.

Validazione modello "ORC"

I parametri selezionati sulla base dei quali è stata basata la validazione sono la potenza elettrica in output come parametro tecnico ed il tempo di ritorno dell'investimento come parametro economico.

Il primo caso considerato è quello riportato in [36] e relativo alla produzione di energia elettrica a partire dal calore di scarto di un'industria cartaria. Il flusso è disponibile 24 ore al giorno e 365 giorni l'anno a una

temperatura compresa tra i 76 e gli 81 °C. Il secondo confronto è basato sul caso studio riportato in [37], riguardante il recupero del calore di scarto proveniente dal sistema di raffreddamento di una raffineria di petrolio alla temperatura di 130°C.

In Tabella 21 sono riportati i risultati della validazione.

Tabella 21 Risultati della prima validazione per il modello di valutazione preliminare per ORC

Temperatura calore di scarto [°C]	$P_{c,ora}$ [kW _e]	Disponibilità [ore/anno]	VALIDAZIONE TECNICA			VALIDAZIONE ECONOMICA			Fonte
			$P_{e,modello}$ [kW _e]	$P_{e,fonte}$ [kW _e]	ϵ [%]	$PBP_{modello}$ [anni]	PBP_{fonte} [anni]	ϵ [%]	
76-81	6717 (stimata)	8760	609	580	5,7	2,88 ($c_{co} = 0,10 \text{ €/kW}_e$)	3	4,0	[36]
130	8600	8760	780	840	7,1	2,64 ($c_{co} = 0,10 \text{ €/kW}_e$)	4,7	43,8	[37]

Per entrambi i casi analizzati possono essere fatte considerazioni analoghe: l'errore relativo alla potenza elettrica generata risulta essere in entrambi i casi contenuto (<10%). Per quanto riguarda invece il tempo di ritorno dell'investimento lo scostamento nel secondo caso analizzato risulta essere importante. Tuttavia, in accordo con quanto detto precedentemente, la difformità nel tempo di ritorno dell'investimento è da imputarsi alla differenza tra le tariffe nazionali italiane (considerate nel modulo) e di altri paesi oggetto della validazione (Svezia [36] e Ungheria [37]) nettamente inferiori; tale errore non è dunque da considerarsi invalidante.

Per la stima dei parametri sono stati utilizzati due fattori correttivi entrambi fissati al valore di primo tentativo di 0,9 riguardanti rispettivamente: la maggiorazione dell'investimento iniziale relativo pompe di calore per tener conto di altri costi come ad esempio i costi di progettazione o 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). Visti i risultati ottenuti si è deciso di mantenere tali fattori correttivi.

Questa attività di validazione ci ha permesso di ottenere informazioni utili circa la flessibilità del modello. Gli impianti ORC dei casi di studio [36] e [37] sono caratterizzati da potenze elettriche ben oltre il range di potenza dei moduli ORC considerati per la creazione del modello (fino a 300 kW_e). La bontà dei risultati ottenuti sta ad indicare che il modello può essere esteso, con un errore contenuto, anche a potenze superiori.

Queste considerazioni non possono essere rispetto al range di temperature del calore di scarto in ingresso al modulo in virtù dell'elevata influenza che questo parametro ha sulle prestazioni del sistema. Sono stati presi in considerazione ulteriori due casi studio trattati in [38] e [39], il primo riguardante il recupero del calore di scarto di un'industria ceramica alla temperatura di 287 °C, nel secondo invece viene valutato il recupero dei gas di scarico di una turbina a gas di piccola taglia alla temperatura di 270 °C. In entrambi i casi il modello ha mostrato errori nella stima della potenza elettrica in output superiori al 30%, quindi non accettabili.

Dal confronto effettuato attraverso i fornitori di tecnologia questo aspetto è stato confermato: sebbene la taglia influenzi il rendimento di un ciclo ORC, l'effetto scala è più evidente nel campo delle alte potenze (>1MW_e), situazione peraltro descritta dalla significativa relazione lineare riscontrata e riportata nel paragrafo 4.2.2. Il rendimento del ciclo ORC è significativamente influenzato 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%;

Da qui l'esigenza di rimodulare le relazioni realizzate, sia in termini di parametri tecnici sia economici, inserendo l'informazione legata alla temperatura d'ingresso del flusso di scarto. Tale attività sarà oggetto della terza annualità del progetto di ricerca.

Validazione modello "Pompa di calore"

Per validare la sezione di modello riguardante la valutazione delle pompe di calore sono stati utilizzati i casi di studio riportati da un progetto di ricerca intitolato "Application of Industrial Heat Pumps" sviluppato dalla collaborazione di IETS (Industrial Energy-related Technologies and Systems) e HPP (Heat Pump Program) [40]. Tra le molteplici applicazioni riportate nei report del progetto, interamente dedicato alle pompe di calore industriali, sono stati selezionati cinque casi studio ritenuti più significativi anche a livello di quantità di informazioni disponibili. Le cinque applicazioni riguardano:

- **Caso 1:** l'implementazione di una pompa di calore nello stabilimento di Skjern (Danimarca) di un'industria cartaria. La pompa di calore ha lo scopo di impiegare il calore di scarto del processo industriale di asciugatura (temperatura compresa tra i 50 e i 55 °C) per alimentare la rete di teleriscaldamento della città di Skjern tramite acqua calda a 68 °C circa; Il calore di scarto viene recuperato sia attraverso uno scambiatore diretto di calore sia attraverso la pompa di calore (con ingresso del calore di scarto a 40°C);
- **Caso 2:** Utilizzo del calore di scarto (T=35°C) proveniente da una serra in Danimarca e riutilizzo dello stesso per riscaldamento (proprio o immesso in rete di teleriscaldamento) tramite pompa di calore che fornisce acqua calda a 60°C;
- **Caso 3:** Istanza di un sistema pompa di calore per la generazione di acqua calda di processo per la utilizzando calore di scarto alla temperatura di 20 °C;
- **Caso 4:** Pompa di calore che utilizza calore di scarto proveniente da diversi processi industriali alla temperatura di 27°C e riutilizzo dello stesso per il soddisfacimento del fabbisogno termico dell'azienda che richiede acqua calda alla temperatura di 55°C;
- **Caso 5:** Recupero di calore di scarto (T= 27°C) dal processo di taglio laser e riutilizzo dello stesso, tramite pompa di calore, alla temperatura di 65 °C per macchine per lo sgrassaggio e la fosfatazione.

Per la validazione tecnica il parametro selezionato è stato il COP della pompa di calore, mentre per la validazione economica l'investimento iniziale richiesto (*I*) o, se quest'ultimo non presente, il PBP.

In Tabella 22 sono riportati i risultati della validazione.

Tabella 22 Risultati della prima validazione per il modello di valutazione preliminare per pompa di calore

Temperatura calore di scarto [°C]	ΔT_{lift} [°C]	$P_{t,out}$ [kW]	Disponibilità [ore/anno]	VALIDAZIONE TECNICA			VALIDAZIONE ECONOMICA			ID
				$COP_{modello}$	COP_{fonte}	ϵ [%]	$PBP_{modello}$ [anni]	PBP_{fonte} [anni]	ϵ [%]	
40	43	1335	8000	4,4	5,0	12,0	3,35	2,5	34	1
35	40	1000	Non disp.	4,5	4,0	12,5	-	Non disp.	-	2
20	85	800	Non disp.	3,1	3,4	8,82	-	Non disp.	-	3
Temperatura calore di scarto [°C]	ΔT_{lift} [°C]	$P_{t,out}$ [kW]	Disponibilità [ore/anno]	$COP_{modello}$	COP_{fonte}	ϵ [%]	$I_{modello}$ [k€]	I_{fonte} [€]	ϵ [%]	ID
27	43	220	Non disp.	4,4	5,0	12,0	98	70	40	4
27	53	260	Non disp.	4,1	4,0	2,5	115	85	35	5

Per tutti i casi analizzati possono essere fatte considerazioni analoghe: l'errore relativo alla stima del COP rientra sempre nei limiti di tollerabilità stabiliti (<15%). Nei casi 1, 3 e 4 questo risulta essere sottostimato mentre nei casi 2 e 5 esso risulta superiore a quanto dichiarato. Analogamente a quanto riscontrato per gli ORC, la stima dei parametri economici è invece caratterizzata da elevati scostamenti. In particolare, sia il PBP nel caso 1, sia l'investimento iniziale per i casi 4 e 5, risultano essere sovrastimati. Per il caso 1, lo scostamento sul PBP può essere dovuto alle differenze delle tariffe energetiche tra i vari paesi considerati o, come anche per i casi 3 e 4 all'aver considerato un costo specifico per la tecnologia più alto. In tal senso nei casi di studio non viene espressamente specificato se i valori economici riportati tengono conto di eventuali incentivi ricevuti o se sono riferiti al solo componente pompa di calore piuttosto che al sistema nel suo complesso. Ad esempio, nel report di progetto del caso 5 è espressamente indicato che il l'investimento iniziale (70 k€) si riferisce al solo componente pompa di calore il che giustifica il basso valore di investimento iniziale.

Come per il caso precedente, per la stima dei parametri sono stati utilizzati due fattori correttivi entrambi fissati al valore di primo tentativo 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). Allo stato attuale non si è ritenuto opportuno modificare tali parametri che saranno oggetto di successive validazioni parallelamente all'affinamento della metodologia come previsto da capitolato.

Un ulteriore confronto è stato effettuato tra il modello proposto e lo strumento "Heat Pump Check" reso disponibile da sito web "Industrial Heat Pumps" [41]. In virtù della completezza dei dati si è scelto di effettuare il confronto utilizzando i dati dell'applicazione della pompa di calore per il caso 1 in Tabella 22. Le informazioni richieste sono dallo strumento "Heat Pump Check" (HPC) sono sostanzialmente analoghe a quelle in input al modulo qui proposto. In particolare: tipo di fluido, temperatura e portata del calore di scarto; processo di destinazione; tipo di fluido, portata, temperatura di ingresso e temperatura richiesta del flusso di calore da riscaldare. Inoltre, per la stima dei parametri economici vengono richieste informazioni circa l'attuale produzione del flusso per soddisfare il fabbisogno termico (tipo di sistema e rendimento), i costi dei vettori energetici coinvolti e le ore di funzionamento simultanee tra il flusso di scarto e il flusso da riscaldare. Inoltre, viene data la possibilità di selezionare l'utilizzo di refrigeranti naturale o massimizzare i parametri in funzione di ottenere il maggior risparmio energetico o alternativamente il minor PBP possibile. In Figura 22 sono riportati i risultati ottenuti dall'applicazione dello strumento ai dati del caso 1 (Tabella 22).

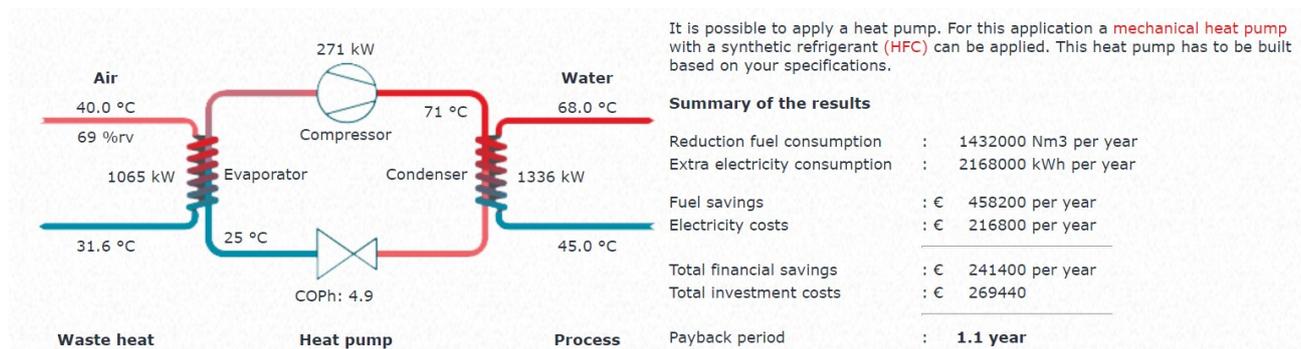


Figura 22 Risultati dell'applicazione dello strumento Heat Pump Check

Si registra uno scostamento tra il COP stimato nostro modello e quello stimato con lo strumento HPC (4,4 contro i 4,9 di HPC), quest'ultimo più allineato rispetto a quanto dichiarato nel caso di studio. Lo strumento risulta molto completo ma di contro la stima del COP è subordinata alla conoscenza di tutti i parametri di ingresso mentre per il nostro modello viene stimata dalla sola conoscenza di tipo di fluido, temperatura del calore di scarto e temperatura richiesta (parametri sicuramente disponibili nella valutazione preliminare di questa opportunità di efficientamento). Tale confronto, limitato ad un solo caso di studio, non risulta sicuramente esaustivo e verrà quindi approfondito considerando ulteriori casi di studio.

Per quanto riguarda i parametri economici, quelli stimati dallo strumento HPC risultano inferiori a quanto stimato attraverso il nostro strumento. Tale differenza è solo in parte dovuta al COP più elevato (e quindi maggiore efficienza), ma è soprattutto riconducibile all'aver utilizzato un costo specifico molto inferiore (200 €/kWt), la metà di quanto previsto dal nostro modello. Pur non essendo specificato, si suppone che questo costo specifico sia relativo al solo componente pompa di calore il che risulterebbe perfettamente in linea con le assunzioni fatte.

Validazione Frigoriferi ad assorbimento

L'ultima sezione del modello soggetto a procedura di validazione riguarda gli impianti frigoriferi ad assorbimento. Analogamente a quanto effettuato per le altre due tecnologie, sono stati considerati tre casi di produzione di energia di raffreddamento a partire dal calore di scarto. Le fonti utilizzate per la validazione di questo modulo non sono relative ad applicazioni di frigoriferi ad assorbimento su casi di studio reali ma si riferiscono a procedure di dimensionamento e ottimizzazione che utilizzano modelli matematici dettagliati. Si vogliono quindi valutare le differenze in termini di errore relativo sui parametri dei risultati generabili da un modello specifico rispetto al modello di valutazione preliminare sviluppato.

Per la validazione tecnica il parametro selezionato è stato il COP dell'impianto ad assorbimento, mentre essendo tali applicazioni derivanti dall'utilizzo di modelli matematici, non sono disponibili informazioni di natura economica.

Il primo caso analizzato è quello trattato in [17], dove si sfrutta il calore di scarto a una temperatura di 170 °C per portare il fluido freddo da 12 a 8,9 °C. Il secondo caso è quello descritto in [18], dove viene ricercato il matching ottimale tra flusso termico a disposizione (alla temperatura di 110 °C) ed energia di raffreddamento necessaria a raffreddare acqua da 12 a 7 °C. Il terzo ed ultimo confronto è effettuato sul secondo caso studio riportato in [18], in cui si considera una temperatura del calore di scarto pari a 110 °C per portare il fluido freddo da 12 a 7 °C.

In Tabella 23 sono riportati i risultati della validazione.

Tabella 23 Risultati della prima validazione per il modello di valutazione preliminare per frigoriferi ad assorbimento

Temperatura calore di scarto [°C]	T_{out} [°C]	P_f [kW]	VALIDAZIONE TECNICA			Fonte
			$COP_{modello}$ [kW]	COP_{fonte} [kW]	ϵ [%]	
170	8,9	2445,6	0,749	0,640	17,03	[17]
120	7	599,5	0,717	0,590	21,59	[18]
110	7	1102,0	0,717	0,660	8,64	[18]

A differenza dei modelli precedenti, per i primi due casi analizzati l'errore relativo alla stima del COP non rientra nei limiti di tollerabilità stabiliti (<15%). Inoltre, è possibile notare come il COP stimato dal modello sia sempre superiore di quello riportato dalle fonti analizzate. Per correggere questo bias è stato introdotto un fattore correttivo sulla stima del COP pari a 0,90.

Inoltre, 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.

4.3 Rappresentazione dei flussi energetici

L'ultima fase nello sviluppo di una metodologia per l'identificazione e l'analisi dei flussi energetici e degli interventi di efficientamento ha visto l'aggiornamento, rispetto a quanto identificato nella precedente annualità, 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.

Sono state individuate tre tipologie di informazioni necessarie all'esaustiva rappresentazione di flussi energetici coinvolti in un intervento di recupero termico:

1. Informazioni quantitative (potenza, energia);
2. Temperatura dei flussi in gioco;
3. Tipologia di fluidi coinvolti.

Queste tre caratteristiche risultano essere indispensabili per valutare la tecnologia più idonea da utilizzare ed è quindi necessario che risultino rappresentate.

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. Inoltre, introducendo ulteriori regole grafiche nella costruzione del diagramma, come ad esempio l'utilizzo di diverse campiture, è possibile fornire informazioni sulla natura dei fluidi coinvolti (es. acqua, vapore, fumi, ecc.).

In Figura 23 è riportato un esempio di legenda per la realizzazione di un diagramma di Sankey. Tale legenda verrà presa come riferimento nelle applicazioni pratiche nel proseguo del paragrafo.

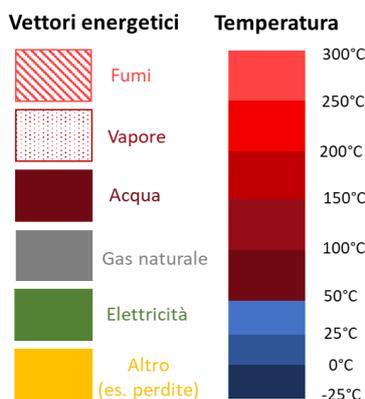


Figura 23 Esempio di una legenda per la realizzazione del diagramma di Sankey

Il diagramma di Sankey potrà avere un livello di dettaglio ed una complessità variabile in funzione della tipologia del sistema da rappresentare e dei dati a disposizione.

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;
2. *Sankey dell'intervento di recupero di calore*: diagramma di dettaglio dell'intervento di recupero di calore analizzato.

4.3.1 Sankey di stabilimento, reparto o processo

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. La complessità ed il livello di dettaglio di questo diagramma possono essere fortemente variabili. È necessario rilevare tutti i flussi energetici di interesse per il sistema considerato e, per ciascuno di essi, fornire informazioni circa:

- Consumi energetici, tipicamente su base annuale espressi in kWh. Nel caso non fossero disponibili dati provenienti da misure è necessario ricorrere a stime o calcoli;
- La provenienza e l'utenza di destinazione;
- Tipologia di fluido;
- Temperatura;
- Posizione, in quanto vincoli logistici possono incidere fortemente sulla scelta tra le diverse soluzioni di recupero termico;
- Altri dati supplementari come i parametri prestazionali dei sistemi di conversione (rendimento caldaie, COP gruppi frigo, efficienza dei sistemi di scambio), numero di ore di funzionamento, fattori di carico dei macchinari. Questi dati sono indispensabili quando, in assenza di misure, si ha la necessità di ricorrere a stime.

È bene sottolineare come tali informazioni, oltre ad essere necessarie alla realizzazione del diagramma di Sankey, saranno indispensabili nelle fasi successive della valutazione delle possibili soluzioni di recupero di calore. Tabella 24, Tabella 25 e Tabella 26 mostrano un esempio di format da utilizzare per la raccolta dei dati propedeutici alla realizzazione del diagramma di Sankey. In particolare, i dati presenti nelle tabelle fanno riferimento ad alcuni dei principali flussi energetici coinvolti in un reparto produttivo tipo.

Tabella 24 Raccolta dati per utenze elettriche

Utenza	Consumo	Metodo di rilevazione	Descrizione	Posizione	Provenienza
Linea 1	120.000 kWh	Misurata	Forza motrice linea 1	Reparto 1	Energia elettrica da rete
Linea 2	100.000 kWh	Misurata	Forza motrice linea 1	Reparto 1	Energia elettrica da rete
Linea 3	60.000 kWh	Misurata	Forza motrice linea 1	Reparto 1	Energia elettrica da rete
Chiller	172.000 kWh	Stimata	Azionamento chiller elettrici	Centrale frigorifera	Energia elettrica da rete

Tabella 25 Raccolta dati per utenze termiche

Utenza	Consumo	Metodo di rilevazione	Vettore	Temperatura di utilizzo	Descrizione	Posizione	Provenienza
Caldaia 1	400.000 kWh	Misurata	Gas naturale	-	Caldaia per la produzione di acqua calda	Centrale termica	Gas naturale da rete
Caldaia 2	200.000 kWh	Misurata	Gas naturale	-	Caldaia per la produzione di vapore	Centrale termica	Gas naturale da rete
Linea 1	200.000 kWh	Stimata	Vapore	90 °C	Pastorizzazione	Reparto 1	Caldaia 1
Linea 2	160.000 kWh	Stimata	Vapore	90 °C	Pastorizzazione	Reparto 1	Caldaia 1
Linea 3	180.000 kWh	Stimata	Acqua	120 °C	Cottura	Reparto 1	Caldaia 2

Tabella 26 raccolta dati per utenze frigorifere

Utenza	Consumo	Vettore	Metodo di rilevazione	Temperatura di utilizzo	Descrizione	Posizione	Provenienza
Linea 1	140.000 kWh	Acqua	Stimata	7°C	Raffreddamento prodotto linea 1	Reparto 1	Caldaia 1
Linea 2	140.000 kWh	Acqua	Stimata	7°C	Raffreddamento prodotto linea 1	Reparto 1	Caldaia 1
Linea 3	140.000 kWh	Acqua	Stimata	7°C	Raffreddamento post pastorizzazione	Reparto 1	Caldaia 2

Il diagramma Sankey sarà costituito da differenti livelli, ciascuno dei quali caratterizzato dalla presenza di nodi verso i quali confluiranno i diversi flussi coinvolti. Il diagramma sarà caratterizzato da un minimo di tre livelli:

1. Livello di “Approvvigionamento” da cui originano i vettori energetici in ingresso allo stabilimento/reparto/processo;
2. Livello di “Conversione” dove sono presenti i nodi relativi ai processi di conversione e trasformazione dell’energia. Esempi tipici sono le caldaie, gli scambiatori di calore, i gruppi frigoriferi, ecc.;
3. Livello degli “Usi finali” nel quale sono presenti i nodi relativi alle utenze verso le quali confluiscono i vettori energetici precedentemente individuati.

In funzione della complessità del sistema (ad esempio la presenza di autoproduzione di energia) e del livello di dettaglio dei dati (numero e tipologia di contatori disponibili) potranno essere presenti ulteriori livelli intermedi.

Con riferimento ai dati riportati nelle precedenti tabelle (Tabella 24, Tabella 25 e Tabella 26) e utilizzando la legenda riportata in Figura 23, a seguire viene riportato un esempio di un diagramma di Sankey per un reparto produttivo tipo (Figura 24).

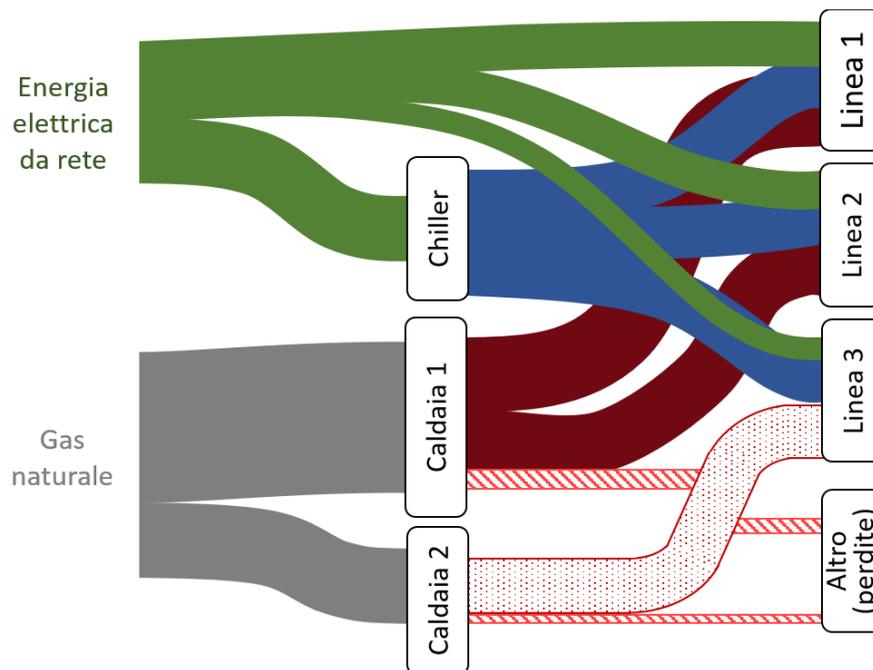


Figura 24 Rappresentazione dei flussi di un reparto produttivo attraverso un diagramma Sankey

4.3.2 Sankey dell'intervento di recupero di calore

I dati disponibili alla realizzazione del diagramma per la valutazione di un intervento di recupero termico dipenderanno dallo stato di implementazione della tecnologia: nel caso di una tecnologia non ancora implementata (situazione più verosimile) non saranno ovviamente disponibili i dati circa l'effettivo consumo di energia, si dovrà quindi ai dati di targa dell'impianto. Inoltre, se la valutazione è ancora ad uno stato preliminare non saranno noti i dati tecnici specifici della tecnologia da implementare (ad esempio i rendimenti di conversione) e si dovrà quindi ricorrere ad assunzioni, con buon senso tecnico, dei parametri caratteristici.

In linea generale, è possibile suddividere le informazioni necessarie in tre categorie:

- *Informazioni qualitative e quantitative sul calore di scarto.* In particolare, informazioni relative a tipologia fluido di scarto, temperatura e portata.
- *Informazioni sulla tecnologia di recupero.* In particolare, tipo di tecnologia, potenza in input e output, la tipologia del fluido vettore in ingresso alla tecnologia e la sua temperatura;
- *Parametri tecnici specifici della tecnologia analizzata.* In particolare, rendimento globale, fluido di lavoro, tipologia di condensatore (ad acqua o ad aria), temperatura del fluido vettore in output, ecc.

Così come nel caso precedente il diagramma Sankey prevede differenti livelli ciascuno dei quali caratterizzato dalla presenza di diversi nodi verso i quali confluiranno i flussi coinvolti. In funzione della complessità del sistema potranno essere presenti un numero di livelli variabile (ad esempio dovuti alla presenza di sistemi di scambiatori intermedi).

Per fornire un esempio della realizzazione di un diagramma di Sankey relativo ad uno specifico intervento di recupero termico, è stato preso come riferimento un impianto di un ORC realmente implementato le cui le informazioni disponibili sono riportate in Tabella 27. Coerentemente con la legenda definita per l'interpretazione del diagramma (Figura 23), in Figura 25 viene riportato il corrispondente diagramma di Sankey.

Tabella 27 Dati di input per la rappresentazione di un ORC

Caratteristiche ORC	
Processo che genera calore	Processo di laminazione
Vettore calore di scarto	Fumi
Temperatura calore di scarto	300°C
Portata calore di scarto	70.000 Nm ³ /h
Tecnologia di recupero	ORC
Fluido vettore	Acqua
Temperatura di ingresso fluido vettore	160 °C
Potenza termica in ingresso	3500 kW _t
Rendimento sistema ORC	16%
Potenza output	561 kW _e
Tipologia condensatore	Acqua
Potenza dissipata condensatore	2909 kW _t
Temperatura uscita condensatore	38 °C

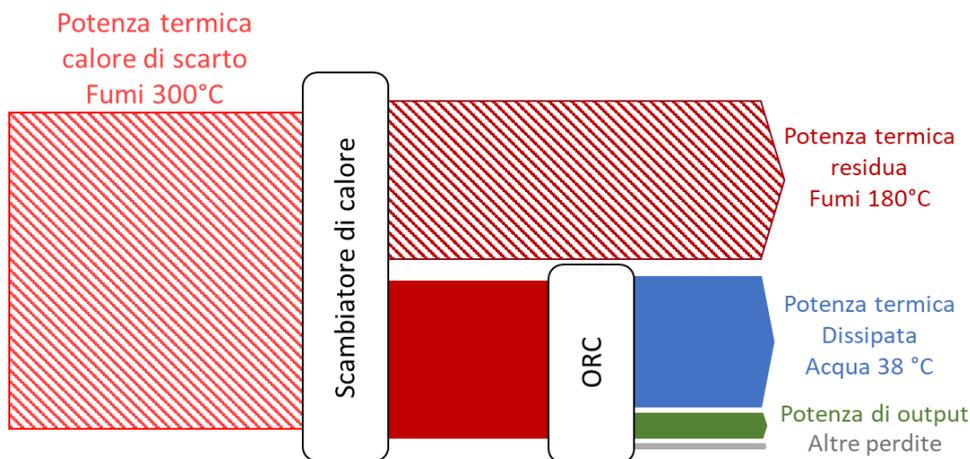


Figura 25 Rappresentazione di un impianto ORC attraverso un diagramma Sankey

Si precisa inoltre che, in aggiunta ai dati riportati in Tabella 27, sono stati assunti valori opportuni per densità dei fumi, calore specifico dei fumi, efficienza di scambio termico (fumi-acqua) e rendimento elettromeccanico dell'ORC.

I prossimi step nello sviluppo degli strumenti per la rappresentazione di interventi di recupero termico prevederanno la definizione di moduli predefiniti per la raccolta dati per ciascuna delle quattro macrotipologie di recupero di calore identificate (produzione di energia elettrica, produzione di energia termica, produzione di energia frigorifera e scambio termico). Come già previsto per il modulo di valutazione preliminare (paragrafo 4.2), per i moduli di raccolta dati per la realizzazione del Sankey sarà prevista la possibilità di essere precompilati con i dati tecnici di riferimento raccolti sia durante l'attività di ricerca bibliografica sia grazie all'interazione con i fornitori di tecnologie. Verrà comunque lasciata possibilità di modifica in caso siano disponibili informazioni dettagliate sulla specifica tecnologia in esame.

4.3.3 Realizzazione del Sankey e Software disponibili

Dopo aver definito i requisiti per la realizzazione dei diagrammi in termini di qualità e quantità di informazioni necessarie da contenere si è passati alla ricerca di strumenti per sistematizzarne la realizzazione. Sebbene esistano numerosi software in grado di realizzare diagrammi di Sankey anche molto elaborati, in linea con gli obiettivi del progetto, la ricerca si è focalizzata su software che coniugassero fruibilità dello strumento e facilità di realizzazione.

Il primo test è stato eseguito tramite l'utilizzo di Excel in virtù dell'alta diffusione e conoscenza dello strumento a livello aziendale. Sebbene il Sankey Diagram non sia presente tra i grafici standard messi a disposizione dal software, è possibile realizzarlo tramite l'installazione di componenti aggiunti come ad esempio "Advanced Data Flow Chart". I dati di input consistono in una semplice tabella a tre colonne che indicano rispettivamente la provenienza (source), la destinazione (target) e la grandezza (value) dei flussi energetici da rappresentare. A titolo di esempio, in Tabella 28 sono riportati i dati utilizzati in input per la realizzazione di un diagramma Sankey per un ORC mentre in Figura 26 è riportato il risultato ottenuto.

Tabella 28 Dati di input per la realizzazione del diagramma di Sankey con Excel

Sorgente di calore di scarto	ORC	80
Sorgente di calore di scarto	Calore residuo sorgente	20
ORC	Energia termica condensatore	55
ORC	Energia elettrica netta	10
ORC	Perdite elettriche generatore	5
ORC	Energia elettrica pompa di alimento	5
ORC	Altre perdite	2,5
ORC	Perdite meccaniche	2,5

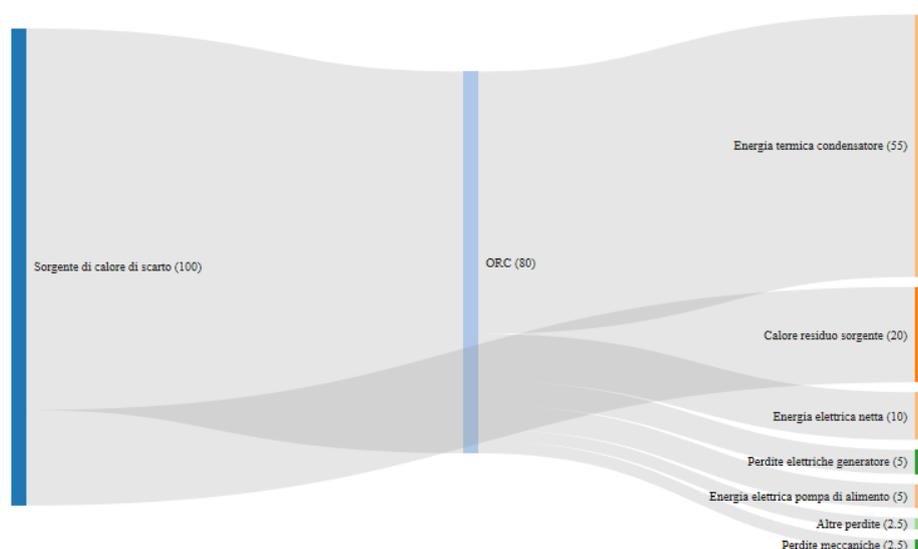


Figura 26 Esempio di Sankey realizzato con un Add-On di Excel

Lo strumento risulta particolarmente semplice e fruibile ma di contro non permette di tenere conto di tutte le informazioni necessarie, in particolar modo, i livelli di temperatura e la tipologia dei fluidi coinvolti.

È possibile ottenere un risultato analogo con l'utilizzo di altri strumenti come ad esempio "Google charts" [42]. Tramite la scrittura di un codice in JavaScript è possibile realizzare un diagramma Sankey e visualizzarlo in una pagina HTML. In alternativa, è possibile utilizzare un esempio di codice editabile messo a disposizione da [43] che ne permette la visualizzazione sulla pagina stessa.

A seguire è riportato il codice utilizzato per la realizzazione del medesimo esempio di diagramma Sankey per un ORC e il relativo risultato ottenuto (Figura 27).

```

<html>
<body>
<script type="text/javascript" src="https://www.gstatic.com/charts/loader.js"></script>
  <div id="sankey_basic" style="width: 900px; height: 300px;"></div>
<script type="text/javascript">
google.charts.load('current', {'packages':['sankey']});
google.charts.setOnLoadCallback(drawChart);
function drawChart() {
  var data = new google.visualization.DataTable();
  data.addColumn('string', 'From');
  data.addColumn('string', 'To');
  data.addColumn('number', 'Weight');
  data.addRows([
    [ 'Sorgente di calore di scarto', 'ORC', 80 ],
    [ 'Sorgente di calore di scarto', 'Calore residuo sorgente', 20 ],
    [ 'ORC', 'Energia termica condensatore', 55 ],
    [ 'ORC', 'Energia elettrica netta', 10 ],
    [ 'ORC', 'Perdite elettriche generatore', 5 ],
    [ 'ORC', 'Altre perdite', 2.5 ],
    [ 'ORC', 'Perdite meccaniche', 2.5 ]
  ]);
  // Sets chart options.
  var options = {
    width: 600,
  };
  // Instantiates and draws our chart, passing in some options.
  var chart = new
  google.visualization.Sankey(document.getElementById('sankey_basic'));
  chart.draw(data, options);
}
</script>
</body>
</html>

```

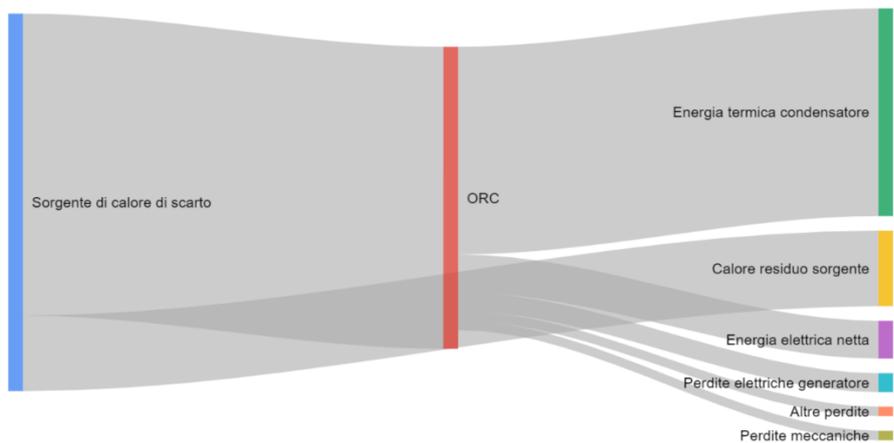


Figura 27 Esempio di Sankey realizzato tramite Google charts

Oltre alla fruibilità dello strumento, per i grafici Sankey realizzati tramite Google Charts c’è la possibilità di impostare colori personalizzati per nodi e collegamenti e selezionare diverse modalità di colorazione. Ciò non risulta però essere immediato.

Ulteriore test è stato effettuato tramite l’utilizzo del software “Power BI” strumento Microsoft perfettamente integrato con Excel. La fase di input dei dati risulta essere estremamente semplice in virtù dell’integrazione con Excel (è possibile importare dati anche da SQL Server). 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.

Per fornire un'applicazione dell'utilizzo del software è stato realizzato Sankey Diagram di reparto riprendendo l'esempio definito nel paragrafo 4.3.1 (e riportato schematicamente in Figura 24) ed utilizzando, laddove possibile, la legenda precedentemente definita in Figura 23.

In Tabella 29 sono riportati i dati utilizzati sottoforma di tabella Excel, mentre la Figura 28 riporta il risultato ottenuto.

Tabella 29 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

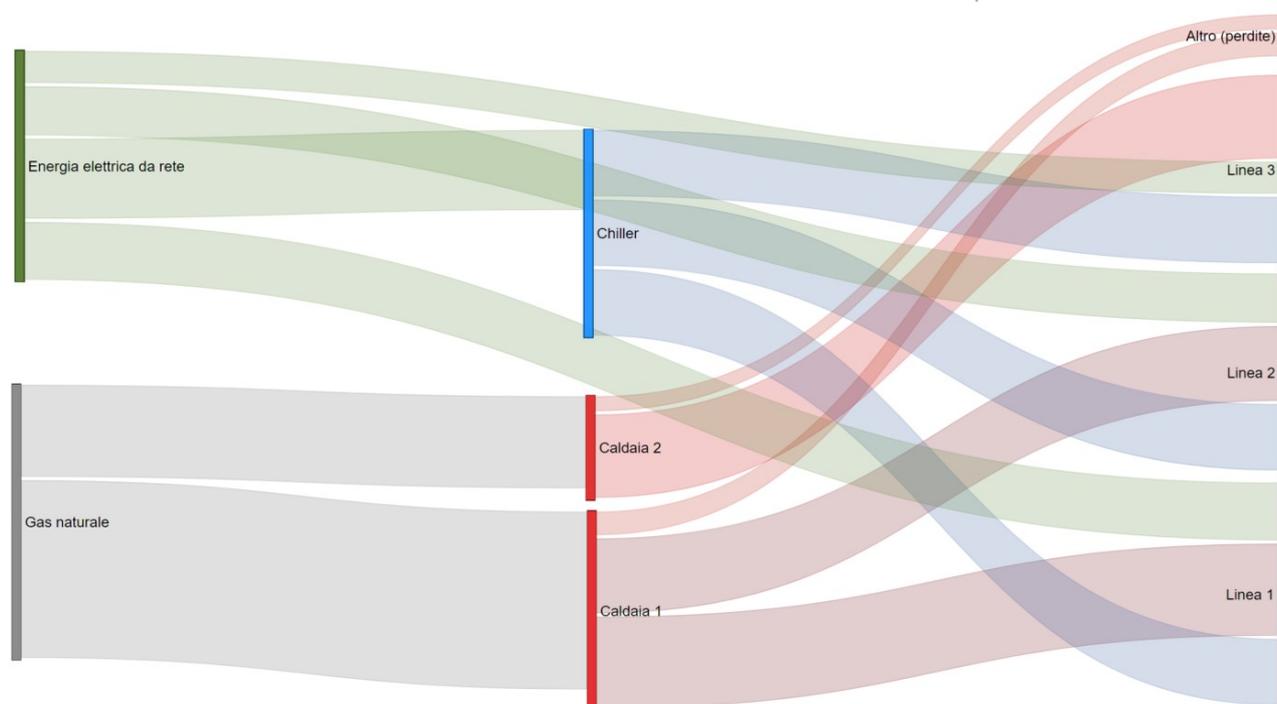


Figura 28 Esempio di un diagramma Sankey per un reparto produttivo realizzato utilizzando Power BI

Attraverso il software è possibile “evidenziare” i singoli collegamenti o i singoli nodi ed avere un dettaglio dei flussi energetici coinvolti come riportato Figura 29.

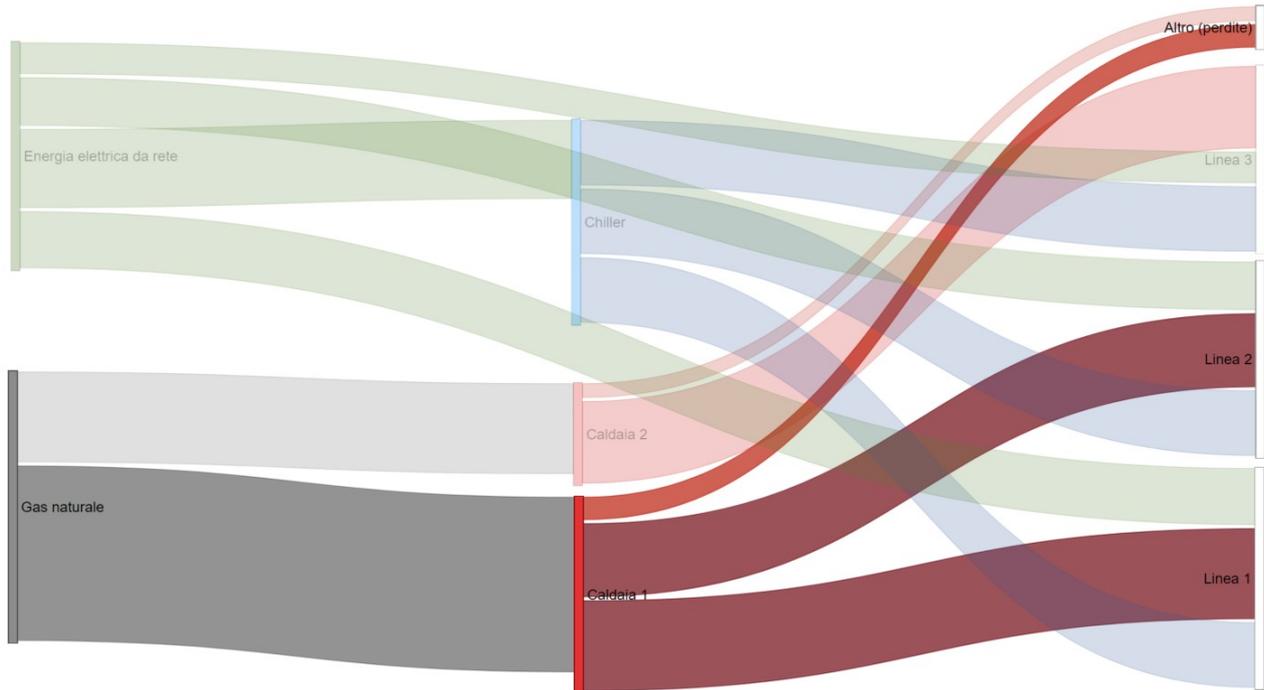


Figura 29 Esempio di un diagramma Sankey per un reparto produttivo realizzato utilizzando Power BI con dettaglio dei flussi di energia per la “Caldaia 1”.

L’esempio proposto mostra come, tramite l’uso di questo software, sia possibile ottenere un ottimo risultato utilizzando un metodo di input semplice e sistematizzabile. Sebbene sia possibile impostare semplicemente differenti colorazioni per collegamenti e nodi, più complicata risulta essere l’introduzione dell’informazione relativa ai differenti fluidi. Nonostante il buon risultato ottenuto è necessario indagare sull’effettiva diffusione e conoscenza dello strumento nel contesto industriale.

I prossimi step circa gli strumenti per la rappresentazione dei flussi energetici coinvolti saranno principalmente dedicati allo sviluppo software per sistematizzare la realizzazione dei diagrammi di rappresentazione.

5 Casi di Studio

Con l'obiettivo principale di testare sul campo gli strumenti preliminarmente sviluppati, sono stati avviati i contatti con aziende di produzione del settore industriale potenzialmente utilizzatrici finali degli output del progetto. Tali interazioni sono state principalmente basate su contatti precedenti tra le aziende e i vari partner del progetto di ricerca. I contatti si sono svolti principalmente a distanza e, laddove possibile, attraverso sopralluoghi in stabilimento.

Di seguito viene fornita una descrizione delle attività svolte riguardanti le due principali aziende coinvolte per l'annualità 2020. Per garantire la riservatezza delle informazioni forniteci dalle aziende, queste vengono presentate sempre in forma anonima.

5.1 Grande azienda del settore caseario

L'interazione con l'azienda appartenente al settore caseario è avvenuta mediante due incontri: il primo, online, dedicato alla presentazione del progetto e degli obiettivi prefissati per questa attività di interazione; un secondo incontro in presenza attraverso un sopralluogo in stabilimento. A tali incontri hanno partecipato congiuntamente il team dell'Università di Roma "Tor vergata" e il team del gruppo di ricerca ENEA. Ulteriori informazioni sull'organizzazione e le modalità di tale contatto sono riportate nel report ENEA relativo alla LA3.19.

L'azienda si è dimostrata notevolmente sensibile alla tematica del recupero di calore in virtù dell'elevato fabbisogno di energia termica dei numerosi processi produttivi.

L'obiettivo principale di questo caso di studio è stato quello di convalidare la fase di raccolta dei dati. Sono stati preparati dei format di raccolta dati che sono stati condivisi con l'azienda ospitante per discutere di quanto necessario all'applicazione degli strumenti proposti.

Di seguito sono elencate le principali informazioni raccolte e i format di raccolta dati utilizzati:

1. Informazioni generali sull'azienda quali dimensioni, prodotti e processi produttivi, principali impianti per la generazione di energia e principali usi energetici (Figura 30);

ANAGRAFICA IMPIANTO		
AZIENDA:		
INDIRIZZO IMPIANTO:		
SETTORE INDUSTRIALE:		
ORARIO DI APERTURA:	Dalle:	Alle:
GIORNI SETTIMANALI DI APERTURA:	Dal:	Al:
CONSUMI IMPIANTO		
Fonte energetica utilizzata	Consumo annuale	Costo Specifico
Energia elettrica [kWh]		
Gas naturale [Sm ³]		
Olio combustibile [t]		
GPL [t]		
Gasolio [t]		
Altro:		
Altro:		

Figura 30 Format utilizzato per la raccolta delle informazioni generali

3. Informazioni sugli interventi di recupero termico già effettuati dall'azienda per verificare la corrispondenza, soprattutto in termini di tecnologie, con quanto riscontrato durante le analisi di letteratura condotte (Figura 32);

	Informazioni	Intervento 1	Intervento 2
Informazioni generali	Riferimento Geografico		
	Settore		
	Fornitore/produttore		
	Anno Implementazione		
Produzione del calore di scarto	Processo che genera calore		
	Vettore		
	Quantità (potenza o energia prodotta)		
	Stagionalità produzione		
	Temperatura		
	Portata		
	Disponibilità (ore)		
Processo di recupero	Tecnologia di recupero impiegata		
	Maturità tecnologia		
	Vettore di scambio		
	Quantità vettore di scambio		
Utilizzo del calore di scarto	Impiego calore di scarto		
	Quantità (potenza o energia prodotta)		
	Stagionalità utilizzo		
	Temperatura di utilizzo		
Altro	Principali barriere		
	Soluzioni identificate		
	Investimento		
	Dimensioni impianto		
	Risparmio energia primaria		
	Tempo di ritorno dell'investimento		
	Altro (informazioni più dettagliate sulla tecnologia impiegata, altre informazioni economiche, ecc...)		

Figura 32 Format utilizzato per la raccolta dei dati relativi agli interventi di recupero termico già effettuati dall'azienda

4. Prima identificazione di flussi di calore di scarto per la valutazione delle opportunità di recupero termico non ancora sfruttate e quindi meritevoli di ulteriore approfondimento (Figura 33).

Valutazione flussi di CALORE DI SCARTO				
Informazioni	Esempio	Flusso 1	Flusso 2	Flusso 3
Processo di provenienza	es. pastorizzazione, compressori, ecc.			
Tipologia fluido	es. acqua calda, vapore, ecc.			
Disponibilità	es. continua, intermittente, ecc.			
Ore annue	-			
Portata [m³/s]	-			
Temperatura [°C]	-			
Pressione [bar]	-			
Ulteriori informazioni	Es. vincoli strutturali o ambientali, ecc.			
Possibili destinazioni	Es. produzione di acqua refrigerata per un processo vicino			

Figura 33 Format utilizzato per la raccolta dei dati relativi ai flussi di flussi di calore di scarto disponibili al recupero

Di seguito viene fornita una breve descrizione dello stabilimento.

Lo stabilimento industriale si autoproduce gran parte dell'energia elettrica di cui necessita grazie alla presenza di un trigeneratore da 1200 kW_e (al momento utilizzato in assetto puramente cogenerativo), alimentato a gas naturale funzionante ad inseguimento elettrico. Il motore risulta stabilmente a carico nominale, eccezione fatta per il sabato e la domenica dove sono attivi solo alcuni dei processi (lavaggi e ricevimento latte).

Per quanto riguarda l'energia termica, questa viene in parte prodotta dal generatore di vapore a recupero del motore, in grado di produrre circa 500-600 kg/h di vapore alla pressione di 11 atm, che sono tutti ampiamente utilizzati, vista l'elevata richiesta termica dello stabilimento (mediamente 2000 kg/h). La restante parte del fabbisogno termico è soddisfatta grazie alla disponibilità di tre caldaie funzionanti a gas naturale (ciascuna da 3 ton/h), di cui solo una è stabilmente in funzione.

Il cogeneratore è dotato di due economizzatori, grazie ai quali è possibile ridurre la temperatura di uscita dei fumi a circa 130-140°C (dai circa 400°C di partenza). Il primo economizzatore viene utilizzato per il preriscaldamento dell'acqua di alimento del generatore di vapore, mentre il secondo aumenta di un ulteriore ΔT l'acqua calda che viene poi utilizzata nello stabilimento (a circa 90°C).

L'acqua di raffreddamento del motore (circa 700-750 kW ad una temperatura di 90-91°C e restituita tassativamente ad una temperatura T>75°C) non viene spesso utilizzata per alimentare l'assorbitore, ma si preferisce utilizzarla per il soddisfacimento di altri fabbisogni termici dello stabilimento. Non sempre si riesce

ad utilizzare tutto il flusso di acqua calda disponibile (di solito lo si usa principalmente per alimentare i lavaggi).

L'assorbitore (con COP=0.6-0.7 funzionante con acqua calda a 85-90°C) è stato solo collaudato ma non messo in funzione. Per la produzione del freddo vengono utilizzati chiller a compressione funzionanti ad ammoniaca (COP approssimativamente pari a 3).

Per le informazioni circa il processo produttivo e l'individuazione degli interventi di recupero già effettuati, che sono stati censiti durante il sopralluogo in stabilimento, si rimanda al report ENEA relativo alla LA3.19.

Durante il sopralluogo sono stati individuati dei flussi di calore di scarto potenzialmente recuperabili:

- Non viene recuperato il calore di scarto dai circuiti di raffreddamento dei compressori (30 bar con acqua di raffreddamento disponibile alla temperatura di 45°C) e dei chiller. Attualmente tale calore viene dissipato attraverso torri evaporative.
- Non viene integralmente recuperato il calore relativo al processo di raffreddamento del latte pastorizzato dalla temperatura di 90°C alla temperatura di circa 5°C. Tale raffreddamento viene operato per mezzo di acqua refrigerata (oltre il 90% del calore viene già recuperato grazie allo scambio termico tra latte non ancora pastorizzato e latte già pastorizzato).
- Non viene del tutto utilizzata l'acqua proveniente dal riscaldamento del cogeneratore (il tasso di utilizzo è inferiore al 20%);

Nei successivi incontri in programma, che come previsto dal capitolato del progetto di ricerca saranno parte integrante anche della successiva annualità, verrà completata la fase di raccolta dati che permetterà l'applicazione di altri strumenti sviluppati, in particolare la metodologia di valutazione preliminare delle tecnologie di recupero.

5.2 Grande azienda del settore della lavorazione della gomma

L'interazione con l'azienda del settore della lavorazione della gomma è avvenuta grazie a contatti precedenti esistenti tra quest'ultima e il gruppo di ricerca dell'Università di Roma "Tor Vergata". Viste le difficoltà logistiche, i contatti si sono tenuti interamente con modalità a distanza. L'azienda in questione è leader nel settore della lavorazione della gomma e, in virtù degli elevati consumi di energia termica, soprattutto in forma di vapore utilizzato nel processo produttivo, si è dimostrata da subito interessata alla tematica del recupero di calore.

Dopo un primo contatto dedicato alla presentazione del progetto di ricerca, si è proceduto alla fase di raccolta dei dati, che ha permesso l'applicazione dei principali strumenti sviluppati, in particolare, 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.

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, oggetto di studio, non è al momento dotato di sistemi per l'autoproduzione di energia, e acquista interamente l'energia elettrica necessaria dalla rete in media tensione. Nell'impianto elettrico sono presenti quattro trasformatori allocati nelle rispettive cabine di trasformazione per la riduzione della tensione ai valori tipici di bassa tensione a 230V fase-neutro e 400V fase-fase.

Il fabbisogno di energia termica dello stabilimento è quasi integralmente dovuto alla richiesta di vapore di processo. Il vapore viene prodotto in una centrale termica costituita da due caldaie ad olio diatermico alimentate a gas naturale dalla potenza termica di 7 MWt ciascuna. Il rendimento medio della centrale termica è di circa il 93%. All'interno della centrale termica è inoltre presente un serbatoio di raccolta condense (degassatore) provenienti dallo stabilimento. Le utenze produttive dello stabilimento richiedono vapore su tre livelli di pressione: 9, 12 e 15 bar in condizioni di vapore saturo. Le condense recuperate

vengono in parte utilizzate, tramite opportuni scambiatori di calore, per la produzione di acqua calda sanitaria e riscaldamento degli ambienti.

L'energia frigorifera richiesta dall'impianto viene fornita grazie all'impiego di chiller elettrici dislocati nelle varie zone dello stabilimento (in modo tale da minimizzare il percorso effettuato dal fluido termovettore) per un totale di circa 2000 kW_f installati. La principale richiesta di energia frigorifera è dovuta alla produzione di acqua refrigerata per il processo di vulcanizzazione, per la cui produzione sono destinati i quattro principali gruppi frigoriferi, per un totale di circa 1900 kW_f, installati con un COP variabile tra 3 e 5. La restante richiesta di energia termica è dovuta alla refrigerazione delle camere condizionate dove vengono stoccate le materie prime a temperatura controllata. Per tutte le utenze la temperatura dell'acqua refrigerata richiesta è di 7 °C con ingresso a 12°C.

Per quanto riguarda il monitoraggio dei consumi energetici, sono presenti contatori elettrici su tutte le principali utenze elettriche, e misuratori di temperatura, pressione e portata del vapore sulle tre linee. Per le altre grandezze coinvolte nel bilancio energetico dello stabilimento l'azienda ricorre a stime.

Grazie alla collaborazione dei referenti aziendali, e, utilizzando il format di raccolta dati presentato nel precedente paragrafo (in particolare, Figura 31), è stato possibile procedere alla raccolta dei dati (misurati o stimati) propedeutici alla realizzazione del diagramma di Sankey di stabilimento (Figura 34). I dati utilizzati per la realizzazione del Sankey fanno riferimento ai consumi energetici dell'azienda espressi in kWh per l'annualità 2020. I dati calcolati e stimati erano già disponibili all'azienda, mentre sono state integrate le informazioni su provenienza, destinazione e temperatura (laddove applicabile) per ogni flusso energetico coinvolto.

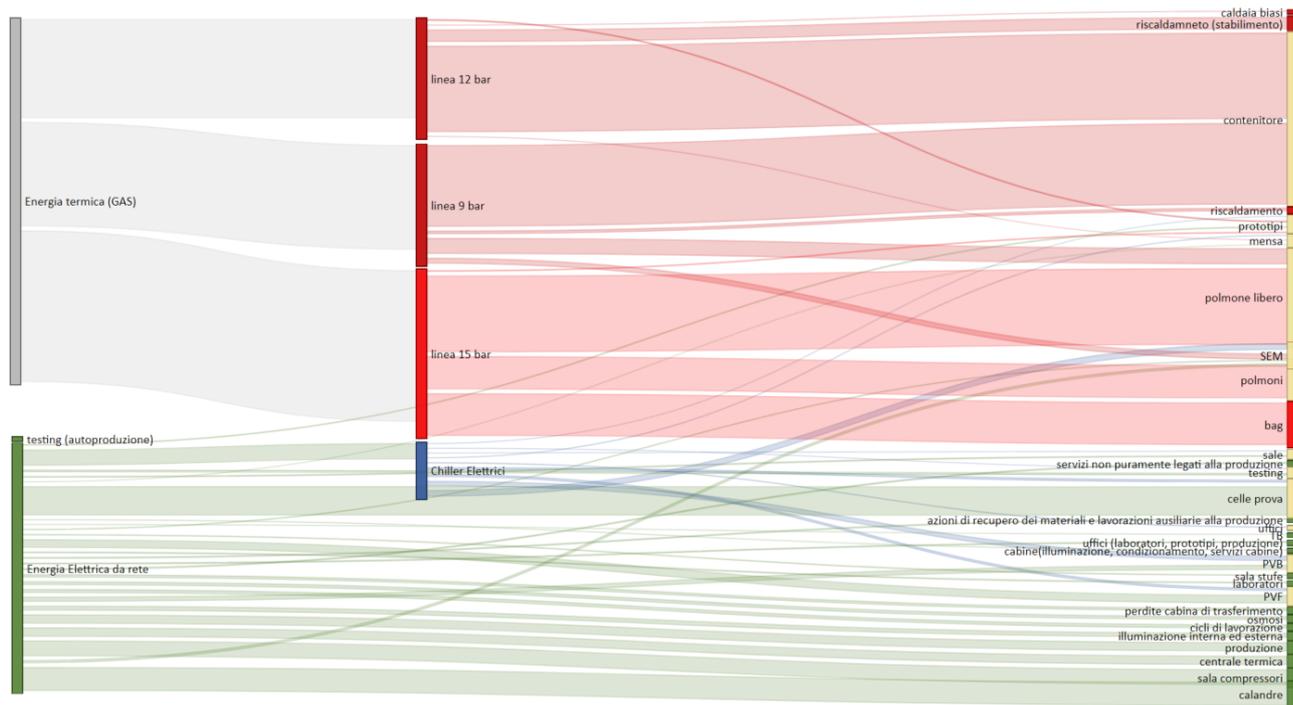


Figura 34 Diagramma Sankey di stabilimento realizzato utilizzando Power BI

Per la realizzazione del diagramma di Sankey è stata utilizzata la legenda di colori definita precedentemente e riportata in Figura 20. Per quanto riguarda la colorazione dei nodi dal lato utenze, se l'utenza è servita da un unico flusso energetico, è stato rispettato il colore del flusso di provenienza, mentre nel caso l'utenza sia servita da diverse tipologie di flussi energetici viene riportata in colorazione neutra.

Attraverso il software utilizzato (Power BI), è possibile "evidenziare" i singoli collegamenti o i singoli nodi ed avere un dettaglio dei flussi energetici coinvolti. Ad esempio, in Figura 35 è riportato un dettaglio dei flussi energetici per la linea a 15 bar, l'utenza termica più energivora dello stabilimento.

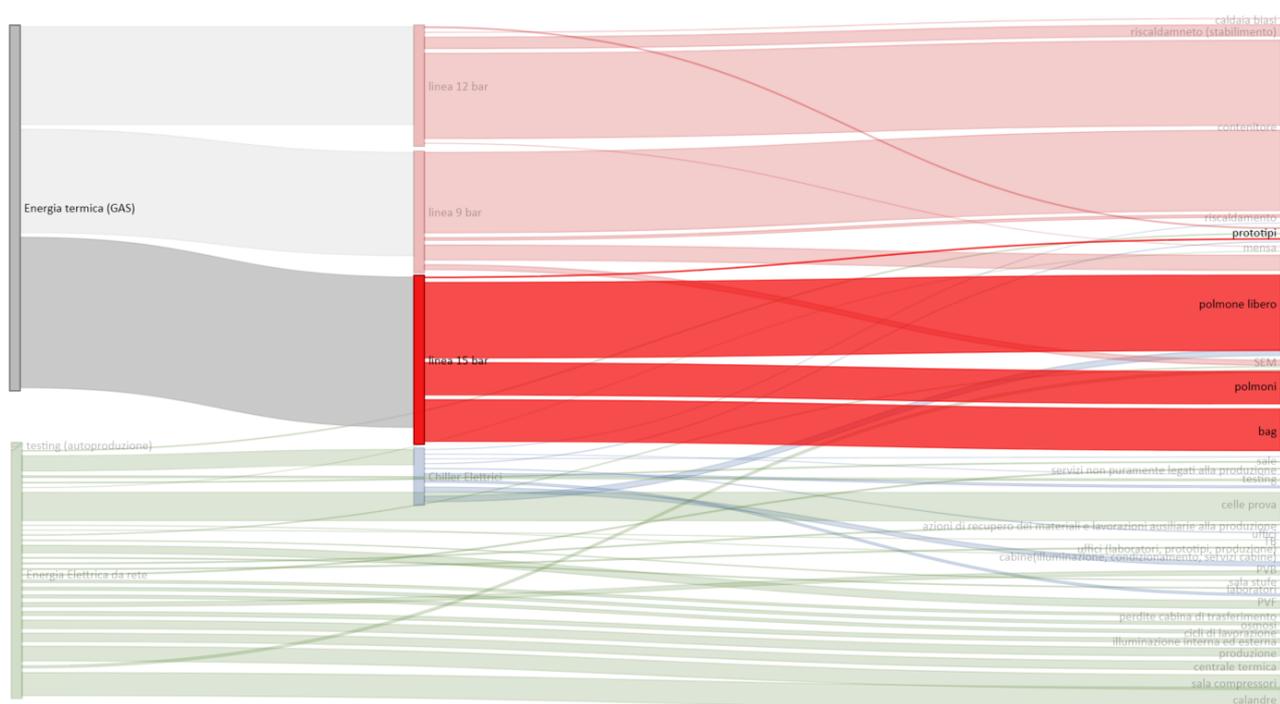


Figura 35 Dettaglio dei flussi energetici coinvolti e delle utenze servite dalla linea vapore a 15 bar

A titolo di esempio, in Figura 36 è invece riportata l’utenza “SEM” che utilizza energia elettrica, energia frigorifera ed energia termica sotto forma di vapore saturo a 9 bar.

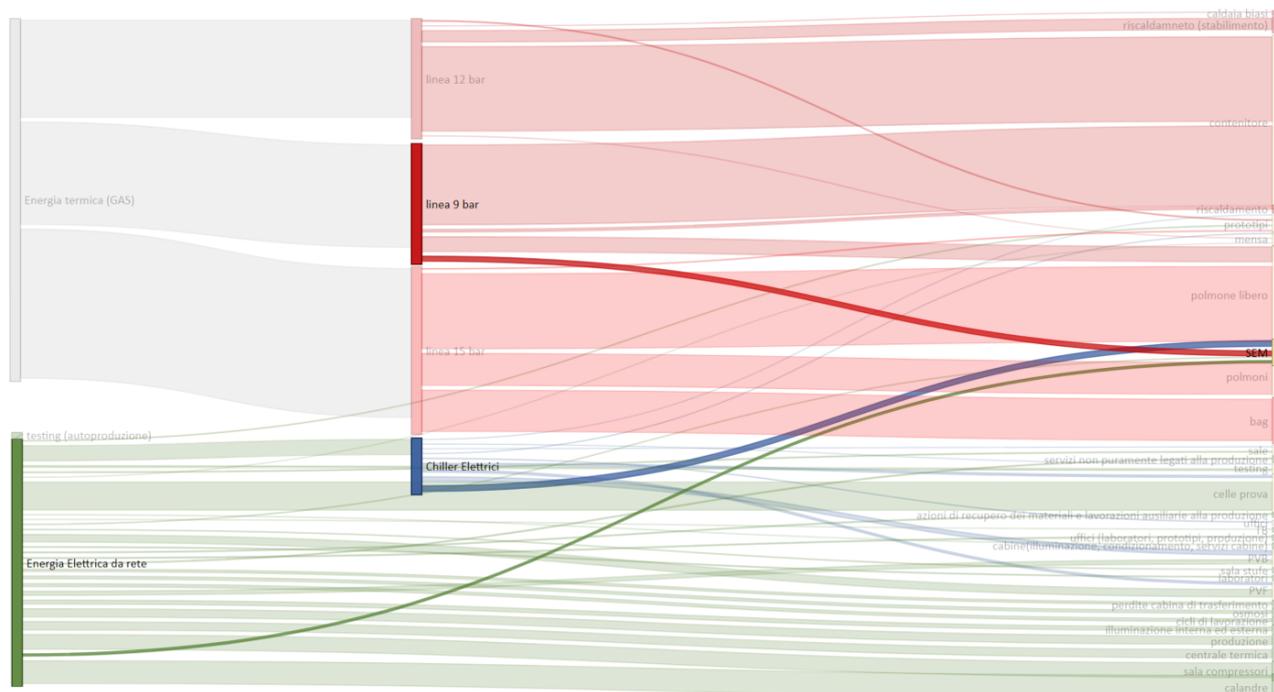


Figura 36 Dettaglio dei flussi energetici coinvolti e “SEM” caratterizzata da fabbisogno di energia termica, elettrica e frigorifera.

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).

Analizzando il diagramma di Sankey di stabilimento, risulta evidente come i principali utilizzi termici sono legati alle tre linee di vapore (9, 12 e 15 bar).

In collaborazione con l'azienda sono stati individuati dei potenziali flussi di scarto non ancora recuperati potenzialmente valorizzabili. Tali flussi si riferiscono alla condensa di vapore a valle del processo produttivo, che non risulta essere integralmente recuperata. In Tabella 30 sono elencate le informazioni relative alle condense del vapore delle tre linee.

Tabella 30 Caratteristiche dei flussi di scarto identificati

Linea	Pressione di ritorno condensa	Temperatura condensa	Portata totale linea	Condensa recuperata	Disponibilità
Linea a 9 bar	721 kPa	155-165 °C	1868 kg/h	77%	8000 h/anno
Linea a 12 bar	1050 kPa	170-180 °C	1463 kg/h	75%	8000 h/anno
Linea a 15 bar	1050 kPa	170-180 °C	2966 kg/h	40%	8000 h/anno

In collaborazione con i referenti aziendali è stata valutata la possibilità di recuperare sotto forma di un unico flusso le condense relative alla linea a 12 e 15 bar. Nell'ipotesi di recuperare integralmente la condensa, l'intervento renderebbe disponibile una portata di circa 0,6 kg/s di acqua surriscaldata a temperatura e pressione indicate in Tabella 30.

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

Essendo le temperature richieste dalle utenze termiche molto elevate (> 180°C), non risulta possibile l'utilizzo del calore di scarto per soddisfare parte del fabbisogno termico dello stabilimento.

Nel caso di studio considerato, l'utilizzo del calore di scarto per la produzione di energia frigorifera è invece impedito da vincoli di natura logistica.

Per la valutazione dell'applicazione dei frigoriferi ad assorbimento è possibile fare delle considerazioni aggiuntive. Le caratteristiche del calore di scarto, vista la bassa portata (0,6 kg/s), l'elevata temperatura (175 °C) e l'elevata pressione (1050 kPa), non permettono comunque un utilizzo diretto del calore di scarto per le tecnologie al momento considerate per la realizzazione dei modelli. Sarebbe comunque possibile prevedere l'utilizzo di uno scambiatore di calore acqua surriscaldata-acqua calda con il successivo utilizzo di acqua calda per alimentare l'assorbitore. Questo implicherebbe sicuramente un costo extra per lo scambiatore di calore, ma permetterebbe l'utilizzo di un classico assorbitore con costo di investimento contenuto. Tali considerazioni comportano l'assunzione di parametri aggiuntivi che richiedono una valutazione più dettagliata.

In virtù di queste considerazioni, l'unica alternativa disponibile riguarda il riutilizzo di calore di scarto per la produzione di energia elettrica che verrà pertanto valutata.

Per quanto riguarda la corrispondenza tra disponibilità del calore di scarto e la richiesta di energia elettrica, questa risulta sempre garantita e stimabile a circa 8000 ore/anno (lo stabilimento è operativo 24 ore al giorno per circa 340 giorni l'anno). Inoltre, vista la portata relativamente bassa delle condense potenzialmente recuperabili, il loro recupero garantirà un soddisfacimento solo marginale dei fabbisogni di energia elettrica.

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 dei modelli sviluppati per la valutazione preliminare delle tecnologie di recupero di calore.

In Tabella 31 sono sintetizzate le informazioni raccolte necessarie all'applicazione del modello per la valutazione preliminare di ORC.

Tabella 31 Dati di input al modello

Calore di scarto	Tipo di fluido	Acqua surriscaldata
	Disponibilità (es. ore/anno)	8000 ore/anno
	Portata	0,6 kg/s
	Temperature	175 °C
	Pressione	1050 kPa
Fabbisogno di energia elettrica	Fabbisogno di energia elettrica (es. kWh/anno)	> 10 GWh/anno
	Energia elettrica da autoproduzione (es. kWh/anno)	Non presente autoproduzione
	Costo dell'energia elettrica	0,142 €/kWh

Per l'applicazione del modello di valutazione preliminare è stata seguita la procedura illustrata nel paragrafo "4.2.2 Generazione di energia elettrica: ORC". I risultati dell'applicazione del modello di valutazione preliminare per la tecnologia ORC sono riportati in Tabella 32. In aggiunta ai dati utilizzati riportati in Tabella 31, è stata assunta una temperatura in uscita dall'evaporatore di 145°C (a cui corrisponde un ΔT tra ingresso e uscita del fluido di scarto di 30°C).

Tabella 32 Risultati dell'applicazione del modello di valutazione preliminare per la tecnologia ORC

VALUTAZIONE PRELIMINARE ORC

POTENZA RECUPERATA [kWt]:	75,35
POTENZA ELETTRICA PRODOTTA [kWe]:	6,83
ENERGIA ELETTRICA ANNUA [MWh]:	56,38
RISPARMIO ANNUO [€/a]:	7205,49
INVESTIMENTO [€]	67407,58
COSTI DI GESTIONE E MANUTENZIONE [€/a]	563,81
GUADAGNO NOMINALE [€/a]	6641,68
PAYBACK TIME PBT [anni]	10,15

L'investimento iniziale risulta essere relativamente elevato in virtù della bassa potenza e quindi dell'alto costo specifico (circa 10.000 €/kW_e). Come già discusso nel paragrafo di validazione del modello, per temperature medio-alte (>150°C) del calore di scarto il modello sottostima il rendimento globale d'impianto. Ad esempio, utilizzando un'efficienza maggiore (es. 12%), caratteristica delle più elevate temperature, il PBP scenderebbe al di sotto dei 9 anni. Inoltre, vista la temperatura in uscita del fluido di lavoro ancora relativamente elevata (stimata a circa 145 °C), potrebbe essere considerato un ulteriore recupero termico in cascata. In conclusione, sebbene il PBP sia elevato, si consiglia comunque di approfondire l'investimento.

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 37 è riportata la rappresentazione grafica tramite diagrammi di Sankey dell'impianto ORC proposto.

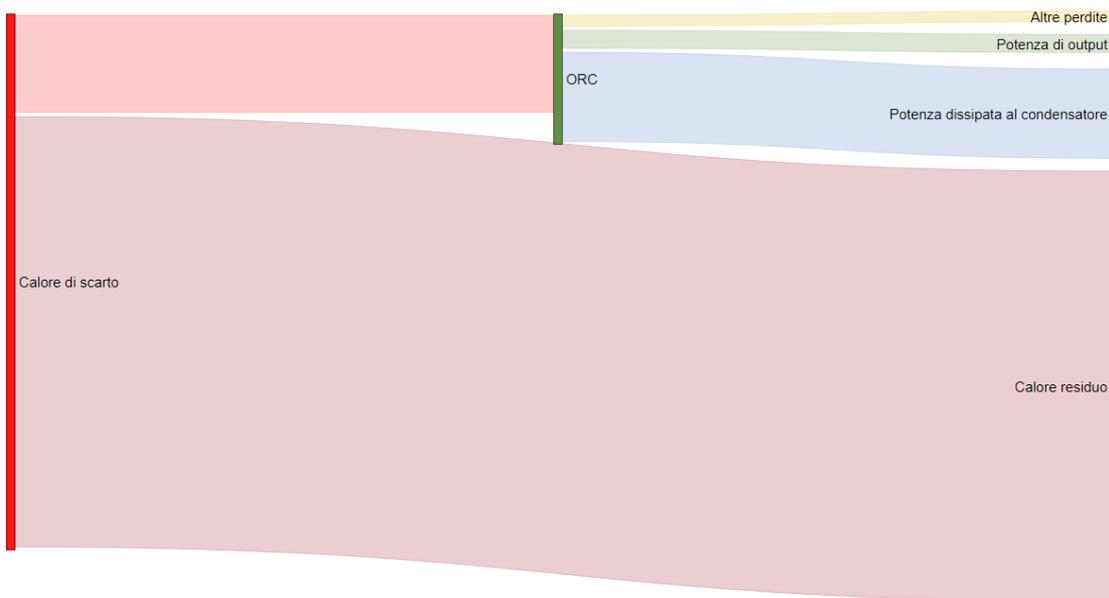


Figura 37 Rappresentazione tramite diagramma di Sankey dell’ORC

Analizzando il diagramma di Sankey è possibile constatare l’ancora elevato potenziale del calore di scarto residuo che può essere ulteriormente valorizzato.

5.2.4 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 delle attività precedentemente svolte è stato identificato un flusso di calore di scarto potenzialmente recuperabile ed eseguita una valutazione preliminare dell’implementazione di un impianto ORC. L’azienda dispone quindi di tutte le informazioni sufficienti per poter consultare il database ed ottenere informazioni più dettagliate sulle tecnologie effettivamente disponibili. In riferimento alle query definite nel paragrafo 3.2.3 “Query”, l’azienda può consultare il database dalla conoscenza della temperatura del calore di scarto, della potenza termica disponibile e del tipo di tecnologia da ricercare (Tabella 33).

Tabella 33 Criteri di ricerca utilizzati per la consultazione del database di tecnologie

Temperatura minima sorgente	Potenza termica di scarto disponibile	Tecnologia
150°C < T ≤ 200°C	50 kW _t < P _t ≤ 500 kW _t	Organic Rankine Cycle

Con i criteri di ricerca inseriti, il database mostra l’esistenza di due tecnologie compatibili con l’applicazione considerata, che pertanto possono essere ulteriormente approfondite dall’azienda. In Tabella 34 sono riportati i risultati della ricerca. Per garantire la riservatezza delle informazioni, in Tabella 34 non sono riportate informazioni sui riferimenti del fornitore.

Tabella 34 Risultati della ricerca nel database di tecnologie

CAMPI	RECORD 1	RECORD 2
Destinazione recupero	Produzione di energia elettrica	Produzione di energia elettrica
Tecnologia utilizzata	Organic Rankine Cycle	Organic Rankine Cycle
Descrizione tecnologia	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	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
Stato di maturità	Tecnologia consolidata	Tecnologia consolidata
Campi di applicazione	Recupero a bassa temperatura, solare termico, caldaie a biomassa	Recupero calore a media temperatura (fumi <280°), solare a concentrazione, caldaie a biomassa ad olio diatermico
Modello	LT	MT
Fluido vettore	Acqua	Acqua surriscaldata - olio diatermico
Temperatura di input	70:110	110:200
Minima temperatura di input	70	110
Portata fluido vettore	0,7 - 22 portata fluido anello HT	0,7 - 13,5 portata fluido anello HT
Fluido di lavoro	R134a	R245fa
Potenza termica in ingresso	34-1500	50-1000
Tipo di output	Energia Elettrica	Energia Elettrica
Potenza di Output	3 - 100 kW _e	5 - 100 kW _e
Temperatura di output	-	-
Efficienza	6-7%	10%
Dimensioni	0,045 m ² /kW _t	0,027 m ² /kW _t
Vita utile attesa	10-15 anni	10-15 anni
PBP atteso	2-3 anni	2-3 anni
Note	-	-

5.3 Risultati

Il primo caso di studio individuato riferito ad all'azienda "Grande azienda del settore caseario" ha visto come obiettivo principale quello di convalidare e sistematizzare la fase di analisi di contesto e di raccolta dei dati. Sono stati infatti realizzati dei format di raccolta dati, riportati in Figura 30, Figura 31, Figura 32 e Figura 33, che sono stati condivisi con l'azienda durante il sopralluogo in stabilimento effettuato. L'azienda ha valutato positivamente i format proposti non riscontrando criticità nel loro popolamento.

Nella fase di sopralluogo ci si è focalizzati sull'effettuazione di un'analisi del contesto accurata e sulla prima individuazione di flussi di scarto per la valutazione dell'applicabilità degli strumenti sviluppati; sono state inoltre raccolte alcune informazioni preliminari relative ai processi produttivi, ai principali consumi energetici, ai flussi di calore di scarto e agli interventi di recupero già realizzati. Vista la presenza di flussi di scarto potenzialmente recuperabili, è stata proposta all'azienda la possibilità di fornire i dati per uno dei casi di studio della terza annualità di progetto. La proposta, accolta positivamente, verrà formalizzata nei successivi incontri.

Il secondo caso di studio individuato riferito ad all'azienda "Grande azienda del settore della lavorazione della gomma" si è dimostrato particolarmente rilevante, in quanto ha permesso di testare i diversi strumenti realizzati dal gruppo di ricerca.

La fase di raccolta dati convalidata durante il primo caso di studio ha permesso di raccogliere tutte le informazioni necessarie per effettuare una dettagliata analisi dei flussi energetici caratteristici dello stabilimento ed individuare potenziali flussi di calore di scarto da poter valorizzare. I dati raccolti hanno consentito di ottenere una rappresentazione grafica dei flussi energetici dello stabilimento mediante la realizzazione di un diagramma Sankey. Nonostante un diagramma di stabilimento richieda una quantità di

informazioni notevoli, queste risultano essere di norma già disponibili alle aziende, specialmente se soggette ad obbligo di diagnosi energetica. Si può concludere come tale diagramma, realizzato tramite il software power BI, risulta essere quindi di facile realizzazione, in quanto vede come input dati una tabella realizzata con Excel (vedi Tabella 29); allo stesso tempo, comunque, riesce a rappresentare in maniera efficace i flussi energetici di uno stabilimento anche molto complesso, dando una immediata visione complessiva delle quantità e delle caratteristiche dei flussi coinvolti.

Considerazioni interessanti possono essere fatte circa l'applicazione dei modelli per la valutazione preliminare delle tecnologie di recupero. Sebbene il modello sia risultato di semplice applicazione vista la quantità molto limitata di informazioni necessaria, sono stati individuati alcuni spunti per il miglioramento successivo dello strumento. In particolare, per quando riguarda il modello ORC, come già anticipato nel paragrafo 4.2.6 "Validazione e discussioni", l'inserimento di valori in ingresso al di fuori di quelli utilizzati per la costruzione del modello può comportare degli errori non trascurabili. Ad esempio, la disponibilità di un calore di scarto a temperatura relativamente elevata porta ad una sottostima di efficienza che si ripercuote in maniera significativa sui parametri economici come il PBP. È necessario quindi affinare la metodologia, ad esempio, dividendo le relazioni individuate in più sotto intervalli in funzione della temperatura del calore di ingresso e della taglia dell'impianto.

Particolarmente positiva risulta la realizzazione del diagramma di Sankey relativo alla tecnologia oggetto di valutazione (in questo caso, l'ORC). La esecuzione di questo diagramma può essere facilmente automatizzata e resa parte integrante del modello stesso, in quanto, per la sua realizzazione, sono sufficienti i dati di output del modello di valutazione preliminare.

Positivo risulta essere anche l'utilizzo del database nel suo ruolo di supporto nell'individuazione delle tecnologie. Utilizzando un numero limitato di dati di input, in particolare temperatura del calore di scarto, range di potenza termica disponibile e tipologia di tecnologia da ricercare, il database ha riportato la presenza di due tecnologie disponibili sul mercato, che possono essere successivamente approfondite dall'azienda. È bene notare come l'utilizzo del database a valle di una valutazione preliminare permetta di ottenere risultati maggiormente focalizzati su quelle che possono essere le tecnologie realmente implementabili.

Come previsto dal capitolato del progetto di ricerca, l'affinamento degli strumenti sviluppati sarà parte integrante delle attività previste nella successiva annualità, attraverso la sperimentazione degli stessi sui casi di studio individuati in collaborazione con ENEA e gli altri partner di progetto.

6 Conclusioni

La conclusione della attività previste per la seconda annualità del progetto di ricerca ha permesso di ottenere una versione revisionata ed aggiornata del database di tecnologie, della metodologia da applicare per l'identificazione e la mappatura dei flussi energetici, e degli strumenti di rappresentazione dei flussi di calore. Tali strumenti sono stati contestualizzati nello scenario industriale italiano e preliminarmente validati attraverso casi di studio.

L'interazione con i fornitori di tecnologie ha rappresentato un contributo fondamentale nello sviluppo delle linee di attività del gruppo di ricerca. In particolare, ha permesso di revisionare e validare la struttura del database di tecnologie, verificandone l'adeguatezza nel contenere le informazioni necessarie a caratterizzare esaurientemente le tecnologie identificate, ed ha permesso di integrare il popolamento del database con le tecnologie rilevate durante le interviste. Inoltre, la raccolta delle numerose informazioni tecniche ed economiche sulle tecnologie analizzate ha consolidato sviluppo della metodologia di valutazione preliminare degli interventi di recupero di calore.

Il database di tecnologie proposto è stato revisionato in maniera sostanziale rispetto a quanto sviluppato nella prima annualità di ricerca, sulla base della continuazione delle attività di analisi di database simili disponibili, e delle risultanze relative agli incontri svolti con aziende fornitrici di tecnologie di recupero di calore industriale a bassa temperatura. È stata quindi descritta la nuova versione del database, completamente focalizzata sulle tecnologie di recupero, ridefinendone i campi, le query e le informazioni necessarie da raccogliere. Inoltre, al fine di sistematizzare l'attività di popolamento, è stato definito un protocollo di indagine di letteratura che definisca con chiarezza la procedura da seguire per l'analisi delle informazioni necessarie per l'inserimento delle tecnologie nel database.

Parallelamente allo sviluppo del database, il gruppo di ricerca ha proseguito le attività del primo anno circa mediante la creazione 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, 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 e i frigoriferi ad assorbimento per la generazione di energia frigorifera, 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. Il modulo di valutazione verrà esteso anche agli scambiatori di calore nella successiva annualità.

Sono state inoltre aggiornati gli strumenti da utilizzare nella rappresentazione dei flussi di calore, definendo le informazioni necessarie che tali strumenti dovranno essere in grado di contenere come temperatura, quantità e tipologia di flusso. Lo strumento selezionato è il diagramma Sankey, in quanto coniuga semplicità di visualizzazione con quantità di informazioni in grado di fornire. Il diagramma di Sankey potrà avere un livello di dettaglio ed una complessità variabile in funzione della tipologia del sistema da rappresentare e dei dati a disposizione. Sono state previste due modalità di utilizzo di questo strumento: un diagramma 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 dell'intervento di recupero di calore (diagramma di dettaglio dell'intervento di recupero di calore analizzato).

Gli strumenti sviluppati nell'ambito del progetto di ricerca sono stati preliminarmente validati grazie a dei casi di studio reali individuati in collaborazione con ENEA. Il primo caso di studio individuato riferito ad all'azienda "Grande azienda del settore caseario" ha visto come obiettivo principale quello di convalidare e sistematizzare la fase di analisi di contesto e di raccolta dei dati; il secondo caso di studio riferito all'azienda "Grande azienda del settore della lavorazione della gomma" si è dimostrato particolarmente rilevante in

quanto ha permesso di testare i diversi strumenti realizzati dal gruppo di ricerca, come il diagramma di Sankey, la metodologia di valutazione preliminare degli interventi di efficientamento e il database di tecnologie.

Tale applicazione si è rivelata molto positiva, confermando la fruibilità ed il livello di dettaglio degli strumenti proposti. Inoltre, sono stati ottenuti importanti feedback e spunti per l'ulteriore affinamento di questi strumenti, come ad esempio quello di dettagliare le relazioni costituenti i diversi modelli sviluppati in funzione delle differenti caratteristiche del flusso di scarto (es. tipo di fluido, portata, livello di temperatura).

In linea generale, le interazioni con i fornitori di tecnologie e con le aziende possibili utilizzatrici degli strumenti proposti hanno avuto esito positivo. Gli strumenti sviluppati all'interno del progetto di ricerca sono stati infatti ritenuti un utile supporto nel superamento delle barriere non tecnologiche riconosciute come principale ostacolo per la diffusione delle tecnologie di recupero di calore.

Come previsto dal capitolato del progetto di ricerca, la prossima annualità prevederà l'ulteriore affinamento degli strumenti sviluppati, attraverso la sperimentazione degli stessi sui casi di studio individuati in collaborazione con ENEA e gli altri partner di progetto, e grazie alla continuazione delle interviste con i fornitori di tecnologie.

7 Attività di disseminazione

Nel corso dell'annualità 2020 il gruppo di ricerca in collaborazione con ENEA è stato impegnato in attività di disseminazione scientifica. In seguito, vengono riportate le principali attività condotte:

1. Intervento dal titolo "Il Recupero di Calore" all'evento "KEY ENERGY 2020 - Ricerca e innovazione per l'efficienza energetica". Relatore Prof. Ing. Vito Introna del Dipartimento di Ingegneria dell'Impresa dell'Università di Roma "Tor Vergata"; 06 novembre 2020.



The flyer features a green header with the TOR VERGATA logo on the right. The main title "KEY ENERGY" is in large orange letters, with "THE RENEWABLE ENERGY EXPO" in smaller orange text below it. The subtitle "Ricerca e innovazione per l'efficienza energetica: sfide e prospettive future" is in black, followed by the date "Venerdì 06 Novembre 2020". The main topic "Il Recupero di Calore" is in bold black. The speaker is identified as "Relatore Prof. Ing. Vito Introna" from the "Dipartimento di Ingegneria dell'Impresa dell'Università di Roma 'Tor Vergata'", with the email "vito.introna@uniroma2.it". Logos for TOR VERGATA and ENEA are positioned at the bottom left and right respectively.

Figura 38 Flyer di presentazione all'evento KEY ENERGY 2020

2. Presentazione dell'articolo "Design and Development of a Database to Identify and Evaluate Waste Heat Recovery Opportunities" alla conferenza "XXV Summer School Francesco Turco - Industrial Systems Engineering"; Relatore Ing. Daniele Dadi del Dipartimento di Ingegneria dell'Impresa dell'Università di Roma "Tor Vergata"; 09 settembre 2020.

XXV Summer School "Francesco Turco" - Industrial Systems Engineering

EDUCATION FOR THE FUTURE

Challenges and opportunities from the digital world

9th-11th September 2020

Design and development of a database to identify and evaluate waste heat recovery opportunities

Dadi D. *, Introna V. *, Cesarotti V. *, Benedetti M. **

* Department of Enterprise Engineering, University of Rome Tor Vergata, Rome 00133, Italy
(daniele.dadi@uniroma2.it, vito.introna@uniroma2.it, cesarotti@uniroma2.it)

** Energy, New Technology and Environment Agency (ENEA), Rome 00123, Italy (Miriam.benedetti@enea.it)

Section A.1 - Analysis and sustainable design of goods and services production systems

Figura 39 Flyer di presentazione alla conferenza XXV Summer School "Francesco Turco"

3. Presentazione dell'articolo "Proposal of a Methodology for the Preliminary Assessment of Low Temperature Heat Recovery Opportunities for Industrial Applications" alla conferenza "ICAE 2020";

Relatore Prof. Ing. Vito Introna del Dipartimento di Ingegneria dell'Impresa dell'Università di Roma "Tor Vergata"; 08 dicembre 2020.



Proposal of a methodology for the preliminary assessment of low temperature heat recovery opportunities for industrial applications

Benedetti M. *, Dadi D. **, Introna V. **, Santolamazza A. **

* Energy, New Technology and Environment Agency (ENEA), Rome 00123, Italy

** Department of Enterprise Engineering, University of Roma Tor Vergata, Rome 00133, Italy

8th December 2020 - Clean Energy Conversion Technology



Speaker
Prof. Vito Introna
vito.introna@uniroma2.it



Figura 40 Flyer di presentazione alla conferenza ICAE 2020

8 Riferimenti bibliografici

- [1] C. Brunner, H. Schweiger, B. Muster, e C. Vannoni, «Einstein – Expert System for an Intelligent Supply of Thermal Energy in Industry Audit Methodology and Software Tool», in *Proceedings of the EuroSun 2010 Conference*, Graz, Austria, 2010, pagg. 1–6, doi: 10.18086/eurosun.2010.11.01.
- [2] W. Glatzl e C. Brunner, «GREENFOODS – energy efficiency in the food and beverage industry», pag. 6.
- [3] «Progetto EU-MERCI». <http://www.eumerci.eu> (consultato apr. 06, 2021).
- [4] «IAC: Industrial Assessment Centers», *Industrial Assessment Centers*. <https://iac.university> (consultato apr. 06, 2021).
- [5] «Progetto MAESTRI». <http://maestri-spire.eu/> (consultato apr. 06, 2021).
- [6] «SHIP Plants». <http://ship-plants.info> (consultato apr. 06, 2021).
- [7] «AEE Institut für Nachhaltige Technologien - “Matrix of Industrial Process Indicators”». http://wiki.zero-emissions.at/index.php?title=Main_Page (consultato apr. 06, 2021).
- [8] M. Kermani, «Generic superstructure synthesis of organic Rankine cycles for waste heat recovery in industrial processes», *Appl. Energy*, pag. 23, 2018.
- [9] 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.
- [10] 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 Convers. Manag.*, vol. 157, pagg. 409–422, feb. 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2017.12.015.
- [11] D. Budisulistyo, «A novel design methodology for waste heat recovery systems using organic Rankine cycle», *Energy Convers. Manag.*, pag. 12, 2017.
- [12] 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.
- [13] 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», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 87, pagg. 574–585, ago. 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.04.034.
- [14] 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», *Appl. Energy*, vol. 253, pag. 113504, nov. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113504.
- [15] L. Ding, «Modeling and analysis of an ammonia-water absorption refrigeration system utilizing waste heat with large temperature span», *Int. J. Refrig.*, pag. 11, 2019.
- [16] J. Pátek e J. Klomfar, «Simple functions for fast calculations of selected thermodynamic properties of the ammonia-water system», *Int. J. Refrig.*, vol. 18, n. 4, pagg. 228–234, mag. 1995, doi: 10.1016/0140-7007(95)00006-W.
- [17] 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», *Int. J. Refrig.*, vol. 23, n. 7, Art. n. 7, nov. 2000, doi: 10.1016/S0140-7007(99)00077-8.
- [18] Y. Wang, C. Wang, e X. Feng, «Optimal match between heat source and absorption refrigeration», *Comput. Chem. Eng.*, vol. 102, pagg. 268–277, lug. 2017, doi: 10.1016/j.compchemeng.2016.11.003.
- [19] A. Simeone, Y. Luo, E. Woolley, S. Rahimifard, e C. Boër, «A decision support system for waste heat recovery in manufacturing», *CIRP Ann.*, vol. 65, n. 1, Art. n. 1, 2016, doi: 10.1016/j.cirp.2016.04.034.
- [20] E. Woolley, Y. Luo, e A. Simeone, «Industrial waste heat recovery: A systematic approach», *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 29, pagg. 50–59, ott. 2018, doi: 10.1016/j.seta.2018.07.001.
- [21] G. P. Hammond e J. B. Norman, «Heat recovery opportunities in UK industry», *Appl. Energy*, vol. 116, pagg. 387–397, mar. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.11.008.
- [22] G. Oluleye, M. Jobson, R. Smith, e S. J. Perry, «Evaluating the potential of process sites for waste heat recovery», *Appl. Energy*, vol. 161, pagg. 627–646, gen. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.07.011.

- [23] 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», *Appl. Energy*, vol. 151, pagg. 157–167, ago. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.147.
- [24] Z. Y. Xu, R. Z. Wang, e C. Yang, «Perspectives for low-temperature waste heat recovery», *Energy*, vol. 176, pagg. 1037–1043, giu. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.04.001.
- [25] J. Ling-Chin, H. Bao, Z. Ma, W. Taylor, e A. Paul Roskilly, «State-of-the-Art Technologies on Low-Grade Heat Recovery and Utilization in Industry», in *Energy Conversion - Current Technologies and Future Trends*, I. H. Al-Bahadly, A c. di IntechOpen, 2019.
- [26] Department of Energy., «Waste Heat Recovery Systems. Chapter 6: Innovating Clean Energy Technologies in Advanced Manufacturing - Technology Assessments», in *Quadrennial Technology Review 2015 - An Assessment of energy technologies and research opportunities*, 2015.
- [27] H. Jouhara, N. Khordehgah, S. Almahmoud, B. Delpech, A. Chauhan, e S. A. Tassou, «Waste heat recovery technologies and applications», *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 6, pagg. 268–289, giu. 2018, doi: 10.1016/j.tsep.2018.04.017.
- [28] «Prezzi e tariffe», *ARERA*. <https://www.arera.it/it/prezzi.htm> (consultato apr. 06, 2021).
- [29] D. Chinese, M. Santin, A. D. Angelis, O. Saro, e M. Biberacher, «What to do with industrial waste heat considering a water-energy nexus perspective», pag. 13.
- [30] N. Palestra e R. Vescovo, «Applicazione di Cicli ORC a Recupero Termici da Processi Industriali», pag. 8.
- [31] G. Kosmadakis, «Estimating the potential of industrial (high-temperature) heat pumps for exploiting waste heat in EU industries», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 156, pagg. 287–298, giu. 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.04.082.
- [32] «AEE INTEC- Cost Analysis of Industrial Heat Pumps». http://wiki.zero-emissions.at/index.php?title=Cost_Analysis_of_Industrial_Heat_Pumps (consultato apr. 06, 2021).
- [33] R. M. Lazzarin e M. Noro, «Past, present, future of solar cooling: Technical and economical considerations», *Sol. Energy*, vol. 172, pagg. 2–13, set. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2017.12.055.
- [34] R. Gabbrielli, 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.
- [35] 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.
- [36] H. Öhman, «Implementation and evaluation of a low temperature waste heat recovery power cycle using NH₃ in an Organic Rankine Cycle», *Energy*, vol. 48, n. 1, Art. n. 1, dic. 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.02.074.
- [37] Z. Varga e B. Palotai, «Comparison of low temperature waste heat recovery methods», *Energy*, vol. 137, pagg. 1286–1292, ott. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.07.003.
- [38] B. Peris, J. Navarro-Esbrí, F. Molés, e A. Mota-Babiloni, «Experimental study of an ORC (organic Rankine cycle) for low grade waste heat recovery in a ceramic industry», *Energy*, vol. 85, pagg. 534–542, giu. 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.03.065.
- [39] G. Bonvicini, «Applicazione di cicli ORC per il recupero di potenza in impianti turbogas di piccola taglia», *La Termotecnica*, vol. 68, pagg. 49–52, 2014.
- [40] IEA, «Annex XIII - Application of Industrial Heat Pumps», *Industrial Energy-related Technologies and Systems*, 2014. <https://iea-industry.org/annexes-completed/> (consultato ott. 28, 2020).
- [41] «Heat Pump Check», *Industrial Heat Pumps*, 2014. http://tools.industrialheatpumps.nl/warmtepompwijzer/EN_index.html (consultato apr. 06, 2021).
- [42] «Sankey Diagram», *Google Charts*. <https://developers.google.com/chart/interactive/docs/gallery/sankey> (consultato apr. 06, 2021).
- [43] «Sankey Code», *JSFiddle*. <https://jsfiddle.net/api/post/library/pure/> (consultato apr. 06, 2021).

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.