



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



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

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

Vito Introna, Luca Andreassi, Daniele Dadi



Report RdS/PTR2020/228

## PROGETTAZIONE E SVILUPPO DI UN DATABASE DI TECNOLOGIE DI RECUPERO E DI UNA METODOLOGIA PER L'IDENTIFICAZIONE E L'ANALISI DEI FLUSSI ENERGETICI

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 3.21 – Progettazione e sviluppo di un database di tecnologie di recupero e di una metodologia per l'identificazione e l'analisi dei flussi energetici

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 IL DATABASE.....	8
2.1 ANALISI DI DATABASE E PROGETTI SIMILI ESISTENTI.....	8
2.1.1 <i>I progetti EINSTEIN &amp; EINSTEIN-II</i> .....	8
2.1.2 <i>I progetti GREENFOODS &amp; TrustEE</i> .....	11
2.1.3 <i>Il Database EU-MERCI</i> .....	13
2.2 STATO DELL'ARTE: LA RICERCA BIBLIOGRAFICA.....	17
2.2.1 <i>Metodologia della ricerca</i> .....	20
2.2.2 <i>Risultati della ricerca</i> .....	21
2.2.2.1 Recupero termico per produzione di calore: le pompe di calore.....	23
2.2.2.2 Recupero termico per produzione di energia elettrica: Organic Rankine Cycle.....	28
2.3 DEFINIZIONE DEL DATABASE.....	31
2.3.1 <i>Primo popolamento del database e protocollo di indagine</i> .....	34
2.3.2 <i>La consultazione del database</i> .....	36
2.3.3 <i>L'utilizzo del database</i> .....	37
2.4 CONCLUSIONI DEL CAPITOLO.....	38
3 METODOLOGIA PER L'IDENTIFICAZIONE E L'ANALISI DEI FLUSSI ENERGETICI E DEGLI INTERVENTI DI EFFICIENTAMENTO.....	40
3.1 LO STATO DELL'ARTE: METODOLOGIE PER L'ANALISI DEI FLUSSI ENERGETICI E LA VALUTAZIONE DEL RECUPERO TERMICO.....	40
3.2 METODOLOGIA PER L'ANALISI DEI FLUSSI ENERGETICI E LA VALUTAZIONE DEL POTENZIALE DI RECUPERO TERMICO.....	44
3.2.1 <i>Le fasi della metodologia</i> .....	45
3.3 RAPPRESENTAZIONE DEI FLUSSI TERMICI.....	47
3.3.1 <i>Grafici a torta</i> .....	47
3.3.2 <i>Sankey Diagram</i> .....	49
3.4 CHECK-LIST DI INTERVENTI PRELIMINARI AL RECUPERO TERMICO.....	50
3.5 CONCLUSIONI DEL CAPITOLO.....	52
4 CONCLUSIONI.....	54
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	55
6 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	58
7 BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	59
8 APPENDICE A.....	60

## Sommario

La continua ricerca dell'efficienza energetica, che nell'ultimo decennio ha caratterizzato il settore industriale, spinta dalla necessità di riduzione delle emissioni atmosferiche inquinanti e dal sempre più crescente prezzo dei combustibili, ha portato i sistemi di recupero di calore di scarto ad essere una delle aree di ricerca più promettenti.

Il lavoro presentato nel seguente report è il risultato della prima annualità di un'attività triennale di ricerca 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.

Il focus di questo progetto di ricerca sarà dedicato al recupero termico a basse e bassissime temperature (inferiori ai 250 °C) per applicazioni in campo industriale, in quanto, nonostante l'alto potenziale dovuto alla grande quantità di calore di scarto disponibile, l'introduzione di tecnologie per il recupero termico di calore è ostacolata da numerose barriere dovute principalmente a difficoltà tecniche ed economiche.

In questa prima annualità sono state condotte parallelamente due attività: lo sviluppo di un database atto a contenere tecnologie per il recupero di calore di scarto e loro applicazioni ed una metodologia per l'identificazione, la mappatura e l'analisi dei flussi energetici, finalizzata all'individuazione e alla valutazione di opportunità di recupero termico di calore.

Entrambe le attività sono state supportate da un'approfondita analisi della letteratura scientifica, che ha fornito una indispensabile base di conoscenza delle tecnologie, delle metodologie e dei diversi approcci per il recupero di calore di scarto a bassa temperatura in campo industriale.

Per la prima attività i principali risultati raggiunti consistono nella definizione di una versione preliminare della struttura del database, contenente i criteri di classificazione, le informazioni utili da raccogliere per archiviare in maniera completa tecnologie e applicazioni e la definizione delle possibili query da utilizzare per la consultazione dello stesso.

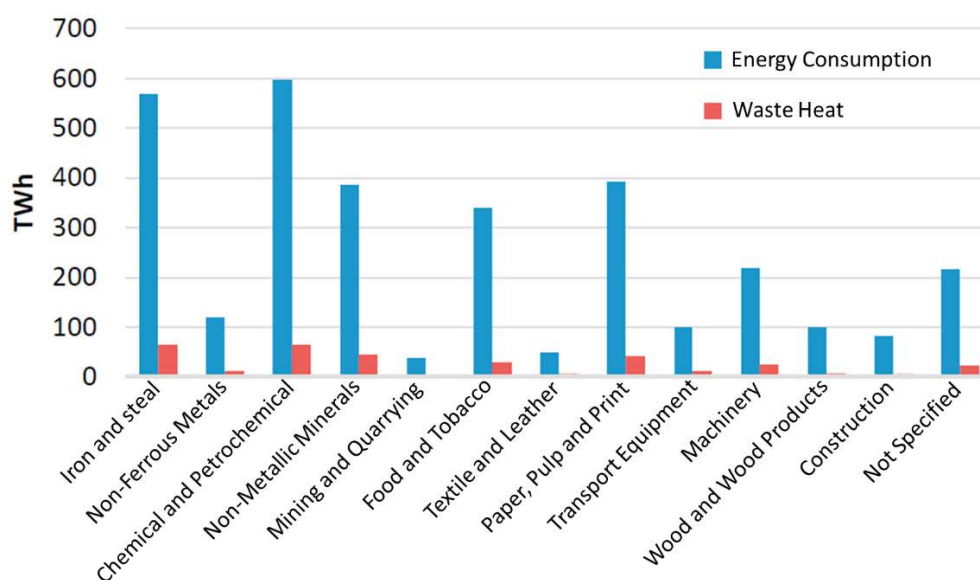
Per quanto riguarda la seconda linea di attività, sono stati definiti gli elementi e le fasi fondamentali per lo sviluppo di una metodologia che consente di valutare, dal punto di vista sia qualitativo che quantitativo, i flussi energetici in gioco nei processi di recupero termico; per questi ultimi, sono poi stati individuati metodi di rappresentazione grafica in grado di fornire informazioni facilmente leggibili in relazione a processi anche complessi. Infine, sono state individuate ed elaborate delle check-list, che consistono in una serie di buone pratiche da applicare preliminarmente alla valutazione e alla messa in atto di un'attività di recupero termico.

Tali risultati, seppure in una versione preliminare, costituiscono la base di partenza per le attività in programma nel successivo biennio, che permetteranno un progressivo sviluppo e consolidamento degli strumenti, grazie alla collaborazione con ENEA ed al coinvolgimento delle parti interessate.

## 1 Introduzione

La sfida dell'efficienza energetica sta caratterizzando nell'ultimo decennio il settore industriale, spinta dalla necessità di riduzione delle emissioni atmosferiche inquinanti e dal sempre più crescente prezzo dei combustibili. A questo proposito, i sistemi di recupero di calore di scarto a livello industriale appaiono come una delle aree di ricerca più promettenti, al fine di ridurre il fabbisogno energetico e quindi il consumo di combustibili, con conseguenti miglioramenti sia dal punto di vista economico, ma soprattutto dell'impatto ambientale [1]. Ciò deriva anche dalla considerazione che il 70% del totale dell'energia utilizzata nel settore industriale viene indirizzata in processi termici e fino ad un terzo di questa energia viene normalmente dispersa [2].

In Figura 1 sono riportati a confronto i consumi energetici per i principali settori industriali europei ed una stima del calore di scarto potenzialmente recuperabile [2]; tale stima, riportata in valori percentuali in Tabella 1, è stata calcolata considerando i principali processi utilizzati nei differenti settori industriali, i differenti tipi di vettori energetici e le loro temperature caratteristiche [3].



**Figura 1 Consumo energetico per diversi settori industriali in Europa (EU28) nel 2016 e stima del calore di scarto disponibile [2]**

Settore	Potenziale calore di scarto
<i>Iron and Steel</i>	11,40 %
<i>Chemical and Petrochemical</i>	11,00 %
<i>Non-Ferrous Metals</i>	9,59 %
<i>Non-Metallic Minerals</i>	11,40 %
<i>Food and Tobacco</i>	8,64 %
<i>Paper, Pulp and Print</i>	10,56 %
<i>Wood and Wood Products</i>	6,00 %
<i>Textile and Leather</i>	11,04 %
<i>Other</i>	10,38 %

**Tabella 1 Potenziale di calore di scarto per i maggiori settori industriali europei [3]**

I processi industriali sono caratterizzati da una moltitudine di flussi energetici di scarto a differenti temperature. I processi di recupero di calore di scarto consistono nel catturare calore da questi flussi di

energia, al fine di utilizzarlo in maniera diretta, innalzarlo ad un livello di temperatura necessario, convertirlo in energia elettrica o raffreddarlo [3].

Il focus di questo progetto di ricerca sarà dedicato al recupero termico a basse e bassissime temperature (temperature inferiori ai 250 °C), in quanto la maggior parte del calore di scarto è disponibile al recupero a temperature comprese tra i 100 e i 200 °C [4], il che testimonia l'enorme potenzialità di queste tecnologie. Tuttavia, la loro introduzione e applicazione è ostacolata da numerose barriere, dovute principalmente a difficoltà tecniche ed economiche, in quanto basse efficienze di conversione, proprie delle basse temperature, sono in genere caratterizzate da tempi di ritorno dell'investimento piuttosto lunghi [5].

Il lavoro presentato nel seguente report è il risultato della prima annualità di un'attività triennale, che si pone come principale obiettivo lo sviluppo di un database di tecnologie di recupero di calore e la definizione di metodologie e strumenti a supporto delle aziende per l'identificazione e l'analisi dei flussi termici per il recupero di calore di scarto in ambito industriale. In Figura 2 sono riportati, in maniera schematica, gli obiettivi previsti, suddivisi per linee di attività, del triennio di ricerca.



**Figura 2 Descrizione attività del triennio di ricerca**

In questo primo anno, la ricerca è stata indirizzata ad un preliminare sviluppo di metodologie e strumenti che verranno validati e perfezionati nel corso del triennio e forniranno un supporto alle aziende per la valutazione e la scelta di opportunità di recupero termico. In particolare, il carattere applicativo di tale progetto sarà accentuato nel prossimo biennio, con il coinvolgimento delle parti interessate, come le aziende stesse, ma anche ESCo e fornitori di tecnologie.

L'attività della presente annualità è stata suddivisa in due fasi, descritte nei due capitoli corrispondenti del report:

- 1 La strutturazione di un database in grado di contenere tecnologie e applicazioni per il recupero termico di calore di scarto da processi industriali;
- 2 Lo sviluppo di una metodologia per l'analisi e la rappresentazione dei flussi energetici.

Inoltre, si vuole sottolineare la complementarità tra il lavoro del svolto da questo gruppo di ricerca e quanto svolto da ENEA nell'ambito dell'Accordo di Programma: mentre il focus del progetto descritto in questo report sarà quello di individuare e caratterizzare le tecnologie di recupero termico disponibili allo stato attuale e differenziarle in base alle loro peculiarità applicative (es. temperatura di esercizio, vettori energetici coinvolti, ecc.), il lavoro di ENEA sarà indirizzato ad individuare sorgenti e pozzi di calore nei processi produttivi, per operare una pre-mappatura funzionale alle attività degli anni successivi. Sarà in seguito

possibile confrontare i risultati di entrambi i lavori di ricerca ed eventualmente integrarli, in modo da valutare la possibilità di unificare la base dati.

Il presente documento è stato strutturato in due principali capitoli, in cui sono descritte tutte le attività svolte al fine di ottenere i risultati prefissati: il primo è dedicato allo sviluppo del database di opportunità di recupero termico e al suo preliminare popolamento, mentre il secondo riguarda le fasi di lavoro per lo sviluppo della metodologia per l'analisi e la rappresentazione dei flussi energetici. Entrambe le fasi, come verrà successivamente dettagliato, sono state precedute da un'approfondita analisi della letteratura riguardante sia le metodologie che i contenuti utilizzati.

## 2 Il Database

In questo capitolo si procederà a una descrizione di tutte le attività svolte che hanno portato alla definizione del database ed al suo preliminare popolamento al fine di validarne la funzionalità. Tale paragrafo sarà articolato in due macro-fasi: una prima fase di ricerca ed analisi della letteratura scientifica e una seconda fase di progettazione e sviluppo del database di tecnologie di recupero del calore di scarto.

Allo scopo di implementare degli strumenti utili per guidare realtà aziendali nella valutazione e ottimizzazione dei processi di recupero del calore di scarto, è stato in primo luogo necessario definire uno stato dell'arte dettagliato circa le potenzialità, opportunità e tecnologie disponibili oggi in ambito industriale. Sono stati analizzati i contenuti di progetti e database simili esistenti, in modo tale da poter estrarre informazioni utili circa la struttura, le caratteristiche ed i requisiti del database da realizzare. Inoltre, complementare questa attività, è stata svolta un'approfondita indagine della letteratura scientifica significativa del settore allo scopo di identificare le tecnologie di recupero disponibili ed i progetti di recupero già realizzati.

Uno degli output più significativi ottenuto da questa prima fase è stata la preliminare identificazione delle variabili di classificazione del database, come ad esempio la temperatura delle sorgenti di calore o la tipologia dei fluidi coinvolti, giungendo in tal modo ad una prima definizione della struttura del database. Sulla base di questi preliminari criteri di classificazione e sulla base della ricerca bibliografica svolta, è stato possibile, quindi, procedere ad un primo popolamento del database, con lo scopo di validarne la struttura e la sua effettiva funzionalità.

L'ultima fase descritta in questo capitolo è stata infine dedicata all'interfaccia tra il database e l'utente, con l'analisi e l'identificazione delle query da mettere a disposizione per la consultazione del database.

### 2.1 *Analisi di Database e progetti simili esistenti*

Il primo passo da compiere nella strutturazione di un database che raccolga possibili opportunità per il recupero di calore di scarto è sicuramente la ricerca e lo studio di database e progetti simili già realizzati.

Nell'ambito di questa prima fase di analisi della letteratura, sono stati individuati diversi progetti europei che, seppure riferiti solo in parte alla tematica del recupero termico (es. progetti relativi a differenti opportunità di efficientamento) o specifici di alcune tecnologie o settori industriali, hanno fornito contenuti validi per lo sviluppo di questo progetto di ricerca.

Nei seguenti paragrafi verranno descritti alcuni dei progetti analizzati ed in particolare ci si focalizzerà sui risultati che sono stati ritenuti particolarmente utili e sono stati presi come riferimento per la creazione del database.

#### 2.1.1 I progetti EINSTEIN & EINSTEIN-II

L'acronimo EINSTEIN, **Expert-system for an INtelligent Supply of Thermal Energy in INdustry and other large scale application**, si riferisce ad un tool-kit sviluppato nell'ambito dell'omonimo progetto europeo IEE (Intelligent Energy Europe – [www.iee-einstein.org](http://www.iee-einstein.org), 2007-2009)[6].

Tale progetto europeo ha avuto come obiettivo l'efficientamento nell'utilizzo di energia termica nel campo industriale, sia attraverso un'ottimizzazione dei processi volta a ridurre il fabbisogno energetico, sia vagliando le opportunità di recupero termico di calore. La realtà industriale a cui il progetto è stato indirizzato è rappresentata dalle piccole e medie imprese, dove i costi di audit energetici, le competenze specifiche nel settore e un budget limitato per progetti di energy saving possono rappresentare delle importanti barriere all'introduzione di tecnologie efficienti[7].

Lo sviluppo successivo del progetto EINSTEIN è rappresentato dal progetto EINSTEIN-II (2010-2012). Quest'ultimo aveva lo scopo di consolidare la metodologia di audit precedentemente sviluppata, testandola e valutandola all'interno di una campagna di audit in differenti Paesi europei per differenti realtà industriali [7].

Il principale output dei progetti EINSTEIN è costituito da una guida, che propone e descrive una metodologia per l'attività di audit, e da un software tool, che funge da supporto per l'auditor nei vari step dell'audit: dalla preparazione della visita e acquisizione dei dati, al trattamento, l'elaborazione, la progettazione e la valutazione quantitativa (energetica ed economica) di soluzioni alternative.

La metodologia di "audit termico" proposta si concentra su industrie caratterizzate da un'elevata domanda di energia termica (caldo e freddo) a basse e medie temperature (fino ad un massimo di 400°C): per esempio l'industria alimentare e delle bevande, l'industria della lavorazione del legno, del trattamento di superfici metalliche, e altri settori industriali come carta, chimico, farmaceutico, tessile, ecc. [6].

La metodologia di audit proposta da EINSTEIN può essere schematizzata in quattro fasi:

- Pre-audit;
- Audit;
- Valutazione delle alternative;
- Proposta.

Le quattro fasi possono essere a loro volta suddivise in dieci step, come riportato in Figura 3.

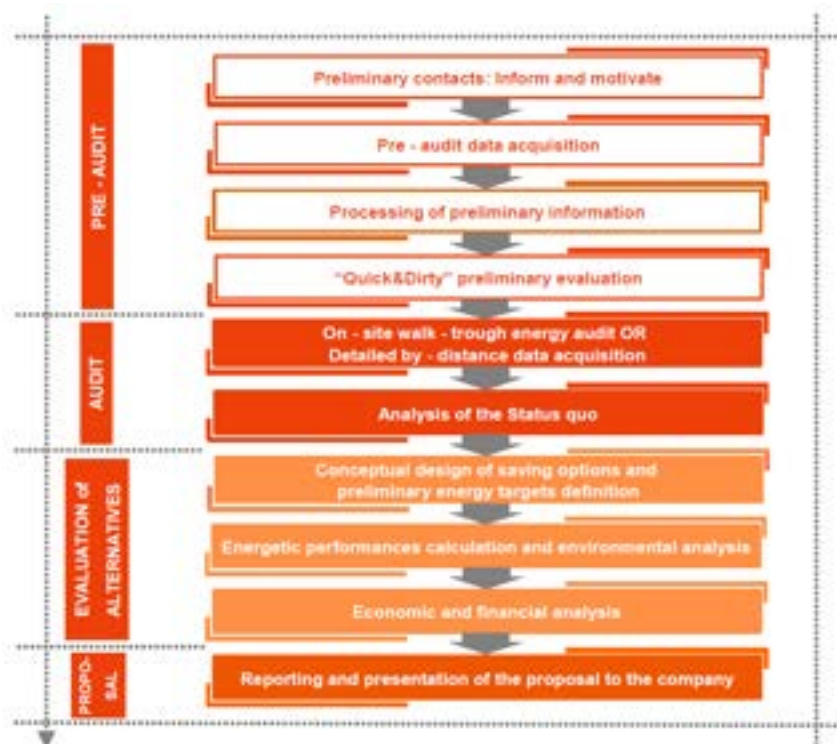


Figura 3 Metodologia di audit proposta nel progetto EINSTEIN [8]

Di particolare interesse per la realizzazione del database contenente opportunità e tecnologie per il recupero termico del calore di scarto è lo studio dei risultati provenienti dalla campagna di audit realizzata nell'ambito dei progetti EINSTEIN ed EINSTEIN-II.

Le attività all'interno dei progetti sono state eseguite da gruppi tecnici esperti, con l'obiettivo di eseguire audit rapidi ed esaustivi [7]. In totale sono state selezionate 72 compagnie, comprese tra industrie e grandi utilizzatori di energia termica e frigorifera, nei dieci Paesi partner (Bulgaria, Lussemburgo, Austria, Irlanda, Regno Unito, Francia, Germania, Italia, Slovacchia, Spagna)[9].

Le tipologie degli interventi di efficientamento energetico proposti in fase di audit possono essere raccolte in cinque categorie [9]:

- Efficientamento dei sistemi di produzione di energia termica;

- Passaggio a sistemi cogenerativi (CHP);
- Recupero di calore;
- Solare termico;
- Ottimizzazione dei processi.

Per ciascun audit, le diverse proposte di interventi sono state valutate sia in modalità stand-alone, sia come combinazione dei singoli interventi di energy saving. L'opzione migliore tra le proposte analizzate è stata individuata considerando:

- Massimo potenziale di risparmio di risorsa primaria (combustibile, biomassa, acqua);
- Significativa riduzione dei costi energetici e tempi di ritorno dell'investimento (PBP) inferiori a tre anni;
- Possibilità di recupero termico interno e passaggio a sistemi di approvvigionamento a più basso impatto ambientale, utilizzando risorse locali ed energia solare.

I report dei 72 audit sono disponibili sul sito di riferimento del progetto (<https://www.einstein-energy.net/index.php/downloads>).

In Italia, sono stati svolti 8 audit secondo la metodologia proposta per aziende operanti su differenti settori [9]. In particolare:

- Industria alimentare (produzione di prodotti da forno e farinacei, produzione di prodotti a base di carne, catering industriale);
- Packaging alimentare.

A titolo di esempio, focalizzando la nostra attenzione sul settore industriale italiano, in Tabella 2 sono riportati in maniera qualitativa alcuni degli interventi inerenti al recupero termico di calore di scarto proposti durante gli audit EINSTEIN.

N°Audit	Settore	Codice ATECO	Descrizione intervento
20	LAVORAZIONE E CONSERVAZIONE DI FRUTTA E ORTAGGI	10.3	Scambiatori di calore per la produzione di acqua calda di processo e preriscaldamento dell'acqua di alimento della caldaia mediante recupero del calore di scarto proveniente dai processi di pulizia e dal processo di concentrazione a valle dell'installazione di un nuovo sistema di ricompressione meccanica del vapore (MVR);
38	LAVORAZIONE E CONSERVAZIONE DI CARNE E PRODUZIONE DI PRODOTTI A BASE DI CARNE	10.1	Scambiatore di calore per il preriscaldamento di acqua calda di processo mediante recupero di calore di scarto proveniente dai processi di pulizia e dai gas di scarico della caldaia; Preriscaldamento dell'aria in ingresso al processo di essiccazione del salame utilizzando l'aria calda in uscita dallo stesso.
49	FORNITURA DI PASTI PREPARATI (CATERING) E ALTRI SERVIZI DI RISTORAZIONE	56.2	Scambiatore di calore per il preriscaldamento di acqua calda di processo mediante recupero di calore di scarto proveniente da acqua di processo di scarto; Scambiatore di calore per il preriscaldamento di aria (UTA) mediante recupero di calore di scarto proveniente da fumi e vapori estratti dai processi di cottura in cucina.
57	FABBRICAZIONE DI ARTICOLI IN MATERIE PLASTICHE	22.2	Scambiatore di calore per il riscaldamento di ambienti mediante recupero di calore di scarto proveniente dal sistema di raffreddamento a rulli post estrusione;
68	PRODUZIONE DI PRODOTTI DA FORNO E FARINACEI	10.7	Scambiatore di calore per il preriscaldamento di acqua calda di processo mediante recupero di calore di scarto proveniente dal processo di cottura della lasagna; Preriscaldamento dell'aria in ingresso al processo di essiccazione utilizzando l'aria calda in uscita dallo stesso.

69	FORNITURA DI PASTI PREPARATI (CATERING) E ALTRI SERVIZI DI RISTORAZIONE	56.2	Scambiatore di calore per il preriscaldamento di acqua calda di processo mediante recupero di calore di scarto proveniente dal processo di ebollizione di pasta e riso. Inoltre, è stato previsto un sistema di accumulo per l'acqua calda.
71	PRODUZIONE DI ALTRI PRODOTTI ALIMENTARI	10.8	Scambiatore di calore per la produzione di acqua calda di processo mediante recupero di calore di scarto proveniente dai gruppi frigo e dal raffreddamento post pastorizzazione per la produzione di crema.
72	PRODUZIONE DI PRODOTTI DA FORNO E FARINACEI	10.7	Ottimizzazione dei processi di cottura nei forni e di raffreddamento del prodotto in uscita.

**Tabella 2 Alcuni degli interventi di recupero termico proposti per il panorama italiano nell'ambito del progetto EINSTEIN. Report consultabili su [www.einstein-energy.net](http://www.einstein-energy.net).**

Ulteriore e interessante output dei progetti EINSTEIN è la metodologia adottata per la stima e la rappresentazione dei flussi energetici [8]. Tale metodologia e gli strumenti utilizzati verranno ripresi nel successivo capitolo.

### 2.1.2 I progetti GREENFOODS & TrustEE

Il progetto europeo GREENFOODS (IEE) è nato con l'idea di sviluppare degli strumenti per favorire l'efficientamento nel settore alimentare e delle bevande. In particolare, nell'ambito del progetto è stato sviluppato quello che viene definito "*GREENFOODS Branch Concept*", ovvero uno strumento completo che consente una facile, rapida e completa valutazione delle misure di efficienza energetica per aziende operanti nel F&B (Food & Beverage). L'obiettivo generale era quello di condurre il settore alimentare e delle bevande all'ottimizzazione dell'efficienza energetica, all'integrazione delle fonti energetiche rinnovabili e alla conseguente riduzione delle emissioni di carbonio fossile, al fine di assicurare e promuovere la competitività mondiale, migliorare la sicurezza dell'approvvigionamento energetico e garantire una produzione sostenibile in Europa[10].

Il progetto GREENFOODS ha visto come sviluppo successivo il progetto TrustEE, appartenente al programma di finanziamento Horizon 2020. Quest'ultimo è stato condotto con schemi di finanziamento innovativi (es. *market oriented funds*), con l'obiettivo principale di favorire la diffusione dell'efficientamento energetico e l'incremento dello sfruttamento delle fonti di energia rinnovabili nel settore F&B [11].

Lo sviluppo di questi progetti è stato basato sull'esperienza acquisita da attività e progetti precedenti, in particolare i già descritti progetti IEE EINSTEIN I & II e dai primi risultati dei 204 audit eseguiti nell'ambito del progetto GREENFOODS [10].

Così come per i precedenti progetti EINSTEIN, è stato ritenuto il progetto GREENFOODS meritevole di approfondimento in virtù del focus che esso pone sull'utilizzo di energia termica a bassa temperatura e sulla possibilità di recupero di calore di scarto.

Il settore europeo alimentare e delle bevande è responsabile di più del 10% (dati Eurostat 2015) dell'intero settore industriale ed è costituito per più del 99% da piccole e medie imprese. Inoltre, per il soddisfacimento di oltre il 50% della domanda di energia termica, nell'industria F&B è richiesto un basso livello di temperatura (sotto i 100°C). A titolo di esempio, in [Figura 4](#) vengono riportati schematicamente i range di temperatura tipici dei processi caratteristici dell'industria F&B, in particolare i processi caratterizzati da elevate richieste di energia termica [11].

Essendo la domanda termica per lo più soddisfatta a basse e medie temperature, questo settore mostra grandi potenzialità dal punto di vista dell'integrazione di fonti di energia rinnovabili e dell'introduzione di tecnologie per il recupero termico di calore di scarto da processi industriali.

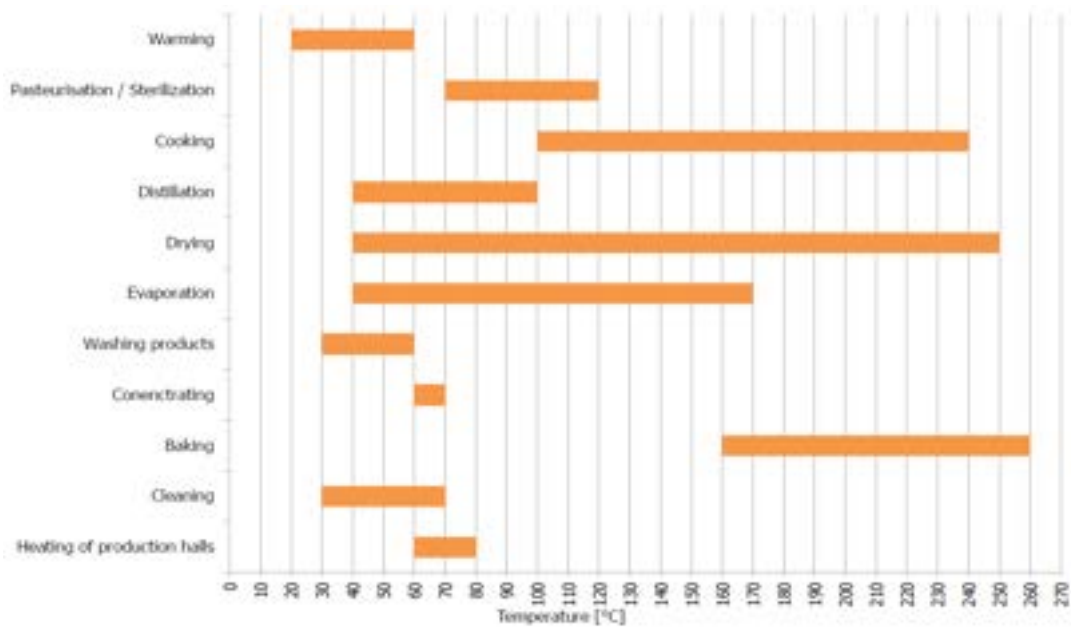


Figura 4 Range di temperatura tipici dei processi caratteristici dell'industria alimentare e delle bevande [11].

Secondo i ricercatori di GREENFOODS [10], la necessità dello sviluppo di strumenti di efficienza energetica nasce dalla non disponibilità di strumenti semplici ed intuitivi, che richiedano l'utilizzo di pochi dati di input, in grado di supportare esperti nel F&B ad identificare misure di efficienza energetica nel loro rispettivo settore.

All'interno del progetto, sono stati individuati i processi più significativi nel settore e per essi sono stati progettati schemi dedicati dettagliati in grado di rappresentare i flussi energetici di processo.

In [10] è descritta la metodologia prevista dallo strumento sviluppato dal progetto GREENFOODS. Al fine di ottenere suggerimenti per migliorare l'efficienza energetica della società indagata, l'utente viene guidato nella definizione dello status quo dei flussi di energia all'interno dell'azienda. La metodologia è articolata in quattro sezioni:

- Input energetici: si definiscono le tipologie di vettori energetici utilizzati e vengono richieste informazioni circa la quantità e il costo del vettore;
- Utilities: in questa sezione vengono studiati i sistemi di conversione e le rispettive efficienze, congiuntamente alle utilities presenti all'interno dell'azienda (caldaie, gruppi frigoriferi, ecc.);
- Distribuzione: viene analizzato il processo di distribuzione dei vettori energetici e ne vengono caratterizzate le perdite energetiche;
- Processi: rappresenta sicuramente la sezione principale dello strumento nella quale viene consentita la definizione dei processi rilevanti e della domanda energetica.

In Figura 5 viene riportata l'interfaccia grafica dello strumento nelle sezioni Distribuzione e Processi.

L'utente è supportato in tutte le fasi del processo descritto ed è guidato all'inserimento di *variabili libere* del bilancio energetico, come ad esempio efficienza di utilities e processi, fattori di carico parziale e ore di funzionamento, input di prodotti nei processi, tasso di recupero del calore e perdite di distribuzione.

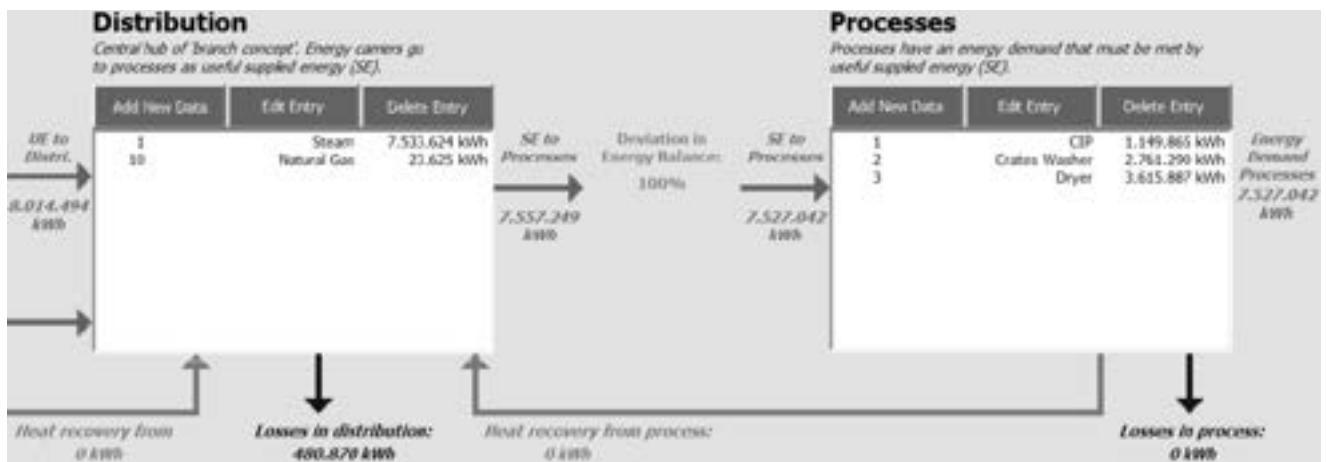


Figura 5 Esempio del bilancio energetico nel **GRENFOODS Branch Concept** per le sezioni di distribuzione e processo [10].

Una volta completate le quattro sezioni con l’inserimento dei dati “obbligatori”, il bilancio energetico viene chiuso e l’utente può avanzare ai suggerimenti di ottimizzazione, i quali possono essere classificate in tre differenti tipologie:

- Tecnologie e/o ottimizzazione di processo;
- Ottimizzazione del sistema;
- Integrazione di fonti di rinnovabili.

In particolare, “ottimizzazione del sistema” si riferisce alle possibilità di recupero di calore di scarto all’interno di un’azienda. Nella fase di rappresentazione dello status quo, tutti i possibili flussi di processo che devono essere riscaldati o raffreddati vengono salvati, incluse anche le perdite di calore da utenze come caldaie, refrigeratori e compressori d’aria. Tramite un algoritmo di *pinch analysis* vengono automaticamente suggeriti i fattibili scambiatori di calore da poter adottare combinando i diversi flussi termici all’interno dell’azienda. Gli scambiatori di calore proposti vengono classificati in base a dimensione, energia trasferita e perdite energetiche. Inoltre, in una sezione correlata, l’utente può identificare possibili implementazioni di pompe di calore industriali ad alta temperatura: i flussi caldi con una temperatura troppo bassa per poter essere utilizzati direttamente in scambiatori di calore possono essere utilizzati come sorgenti per pompe di calore [10].

Nell’ambito del progetto GREENFOODS è stata sviluppata una pagina web “GREENFOODS WikiWeb” ([wiki.zero-emissions.at](http://wiki.zero-emissions.at)), che rappresenta un ulteriore strumento di supporto per gli utenti nei differenti topics trattati (unità operative, tecnologie, fornitura di energia, efficienza energetica, esempi pratici ecc.).

### 2.1.3 Il Database EU-MERCI

Il progetto EU-MERCI, **EU coordinated MEthods and procedures based on Real Cases for the effective implementation of policies and measures supporting energy efficiency in the Industry**, è un progetto europeo che si inserisce all’interno del programma di finanziamento Horizon 2020.

Tratto dal sito di riferimento del progetto ([www.eumerci.eu](http://www.eumerci.eu)), “L’obiettivo principale di EU-Merci è di supportare, in modo coordinato, la crescita dell’efficienza energetica nei processi industriali, sviluppando e diffondendo metodi e strumenti per assistere l’industria europea nel miglioramento dell’efficienza energetica e nel monitoraggio in applicazione della direttiva europea sull’efficienza energetica 2012/27/EU. La metodologia si baserà sull’analisi di migliaia di progetti di efficienza energetica reali attuati secondo le attuali politiche e misure energetiche in diversi stati membri e riguardanti diversi settori e processi industriali. Le soluzioni di efficienza energetica saranno identificate in base a criteri concordati riguardanti applicazioni, processi e tecnologie: le migliori pratiche, gli algoritmi e le procedure di valutazione dell’efficienza saranno derivati, armonizzati e standardizzati. I risultati di EU-MERCI saranno specificamente convalidati a livello

paneuropeo per l'industria agroalimentare attraverso SPES e negli altri settori industriali attraverso il coinvolgimento delle parti interessate”.

Ai fini del progetto di ricerca che intendiamo sviluppare, l'output più significativo del progetto EU-MERCI è rappresentato dallo sviluppo della piattaforma EIEEP (European Industrial Energy Efficiency good Practices platform). In particolare, questa piattaforma rende disponibili un database contenente progetti di efficientamento energetico e una libreria di buone pratiche, rilevate nell'ambito del progetto stesso o provenienti dalla letteratura scientifica.

Sebbene il progetto EU-MERCI non sia stato focalizzato esclusivamente sul recupero termico di calore di scarto ma tratti da un punto di vista più generale i progetti di efficientamento energetico, è risultata significativamente utile l'analisi della struttura del database proposto. Nello specifico, appaiono di particolare interesse la definizione dei campi del database individuati e le query messe a disposizione all'utente per la consultazione dello stesso.

In **Tabella 3** sono riportati i campi selezionati dal database EU-MERCI e una loro breve descrizione.

CAMPI	DESCRIZIONE
<b>ID</b>	Codice numerico che identifica univocamente il progetto nel database EU-MERCI
<b>Source</b>	Nome di chi ha fornito il record
<b>DB Source-Db Key</b>	Codice numerico che identifica univocamente il progetto nel dataset nazionale
<b>Location</b>	Paese nel quale il progetto è stato implementato
<b>NACE Code</b>	Codice standard utilizzato per identificare il settore nel quale la compagnia. In EU-MERCI, quando possibile viene utilizzato il codice a quattro cifre (es. NACE C23.13).
<b>Company size</b>	Definisce le dimensioni dell'azienda che ha realizzato il progetto di efficientamento energetico. Small, fino a 50 dipendenti; Medium, da 51 a 250; Large, più di 250 dipendenti
<b>Implementation Status</b>	Definisce lo stato del progetto ("implemented" o "not implemented")
<b>Implementation year</b>	Anno di implementazione del progetto
<b>Technical Life time</b>	Vita attesa del progetto (in anni);
<b>Taxonomy</b>	Articolata su più livelli e sezioni (generale e specifica) fornisce una comprensione di quali componenti e sistemi sono stati interessati dal progetto
<b>Measure Description Original</b>	Descrizione testuale del progetto in lingua originale
<b>Measure Description Translated</b>	Descrizione testuale del progetto tradotta in inglese dalla descrizione in lingua originale
<b>Case</b>	Vengono distinti i progetti con azioni singole da quelli con azioni multiple
<b>Energy Carriers</b>	Specifica i vettori energetici (fino ad un massimo di 5) coinvolti prima e dopo l'implementazione del progetto
<b>Baseline Category</b>	Specifica se la baseline è stata calcolata prima della realizzazione del progetto e se si riferisce all'intero stabilimento o al singolo processo (identificato in "taxonomy")
<b>Baseline consumption</b>	Fornisce il valore del consumo di baseline per ciascun vettore energetico
<b>Final energy saving</b>	Fornisce per ogni vettore energetico la quantità finale di energia risparmiata grazie all'implementazione del progetto
<b>Saving calculation approach</b>	Specifica quale approccio di calcolo è stato adottato per il calcolo del saving (fatture, metodologie standard, misuratori)
<b>Overall Cost of implementation</b>	Rappresenta il costo per l'implementazione del progetto (CAPEX) escludendo i costi operativi
<b>Investment Subsidy Qualitative</b>	È un campo booleano che specifica se il progetto ha ricevuto sussidi dai responsabili politici
<b>Investment Subsidy Quantitative</b>	Se è stato ricevuto un sussidio ne viene specificato il valore
<b>Energy Price</b>	Per ciascun vettore energetico viene specificato il costo in €/toe (si utilizzano i costi medi EU-28 per tutti i vettori energetici)
<b>Reference Scheme</b>	Specifica con quale sistema il progetto è stato incentivato (es. certificati bianchi)
<b>Measure Identified through external Audit</b>	Specifica se il progetto è stato identificato in seguito ad audit previsto dall'articolo 8 della direttiva europea 2012/27/EU (EED)
<b>Primary Energy Savings (PES)</b>	Espressi in toe, sono calcolati per poter confrontare i risparmi finali di energia (FES) provenienti da diverse fonti, in particolare i risparmi di energia termica ed elettrica [toe]
<b>Energy Consumption Improvement (ECI)</b>	Miglioramento percentuale delle prestazioni energetiche rispetto alla situazione precedente all'implementazione del progetto [%]

<b>Consumption Reduction per Unit product (CRU)</b>	Misura la riduzione dell'intensità energetica. Si ottiene dividendo i risparmi di energia primaria per il valore prodotto cumulativo del settore [toe <sub>p</sub> /k€]
<b>Cost of Energy Savings (CES)</b>	Si ottiene dividendo il costo del capitale investito per i toe di energia primaria risparmiati in seguito all'implementazione del progetto [€/toe]
<b>Cost of Carbon Savings (CCS)</b>	Si ottiene dividendo il costo del capitale investito per le tonnellate di CO <sub>2</sub> non rilasciate in atmosfera in seguito all'implementazione del progetto [€/tonCO <sub>2</sub> ]
<b>Renewable Energy Source (RES)</b>	Tiene conto della quantità di energia utilizzata (nell'ambito del progetto di energy saving) prodotta con fonti di energia rinnovabile [%]
<b>Simple Pay-back Time (PBT)</b>	Misura il tempo di ritorno dell'investimento (in questa sede non vengono effettuate considerazioni sul tasso di interesse e su meccanismi incentivanti) [Years]
<b>Cumulative Cash Flow (CCF)</b>	Misura il flusso di cassa generato dal risparmio energetico conseguente all'implementazione del progetto di efficientamento energetico (in questa sede non vengono effettuate considerazioni sul tasso di interesse e su meccanismi incentivanti) [€]
<b>Share of Project Cost Subsidized (SPCS)</b>	Misura per quantificare la parte del progetto che ha avuto accesso a meccanismi di incentivazione [%]
<b>Good Practice</b>	Proposta come "Buona Pratica" da parte di chi ha registrato il progetto sulla base delle informazioni nazionale e del giudizio di esperti nel settore [Yes/No]

**Tabella 3 Descrizione dei campi utilizzati nel database EU-MERCI [12]**

Ogni campo è in genere composto da più colonne. Ad esempio, il campo "taxonomy", al fine di assicurare che i progetti all'interno del database EU-MERCI siano categorizzati seguendo una classificazione standard, è suddiviso in due sezioni:

- Sezione "Generic Taxonomy", la quale consente una classificazione di base, non correlata a nessun settore specifico o processo. Questa sezione è a sua volta suddivisa in tre livelli:
  1. Il primo livello classifica il progetto in base a dove esso viene implementato all'interno dell'organizzazione;
  2. Il secondo livello è dipendente dal livello 1 e classifica la misura in base ad un processo o fase;
  3. Il terzo livello si riferisce al livello 2 e applica una classificazione specifica a ciascuna soluzione tecnologica.
- Sezione "Specific Taxonomy", che definisce il quadro tecnico (processo industriale, fase o tecnologia) specifico per ciascun settore industriale. Per differenti settori industriali considerati nel database EU-MERCI (alimentare, bevande, ferro e acciaio, alluminio, rame, chimico, ceramica, cemento, macchinari, vetro, carta, coke e petrolio), è stata svolta una caratterizzazione dei differenti processi produttivi e delle corrispondenti tecnologie. Anche questa sezione è a sua volta costituita da tre livelli:
  1. Il primo livello è analogo a quanto previsto dalla sezione generale e si riferisce alla destinazione del progetto;
  2. Il secondo livello dipende dal livello 1 e si riferisce alla fase specifica del processo in cui la misura viene implementata;
  3. Il terzo livello si riferisce alla specifica tecnologia nella specifica fase del processo in cui il progetto viene implementato.

Inoltre, per favorire un corretto ed efficace popolamento del database, nonché per garantirne un funzionale utilizzo, sono state introdotte delle regole di validazione circa i valori che ciascun campo del database può assumere. Per la maggior parte dei campi è stata introdotta una colonna extra di normalizzazione. Un esempio viene riportato in [Tabella 4](#) e in [Tabella 5](#), rispettivamente per i campi "Saving Calculation Approach" e "Baseline Category".

Baseline Category	N - Value
Before Implementation	10
Before – Baseline site consumption	20
Before – Process relevant consumptions	30
N/A, blank	99

Tabella 4 Normalizzazione del campo “Baseline Category” [12]

Saving Calculation Approach	N - Value
Deemed saving	10
Metered Saving	20
N/A, blank	99

Tabella 5 Normalizzazione del campo “Saving Calculation Approach” [12]

L’interfaccia con l’utente avviene attraverso la definizione di query. Per l’utente è possibile consultare ed effettuare il download relativo ai campi del database secondo i seguenti criteri (ciascun criterio può essere a scelta singola o multipla):

- Company size;
- Implementation year;
- Reference scheme;
- Country;
- Generic taxonomy (Level 3);
- Specific taxonomy (Level 3);
- Good practice (Yes/No)
- Reference sector (NACE).

In Figura 6 viene riportata l’interfaccia disponibile all’utente per la consultazione del database attraverso la selezione delle query.

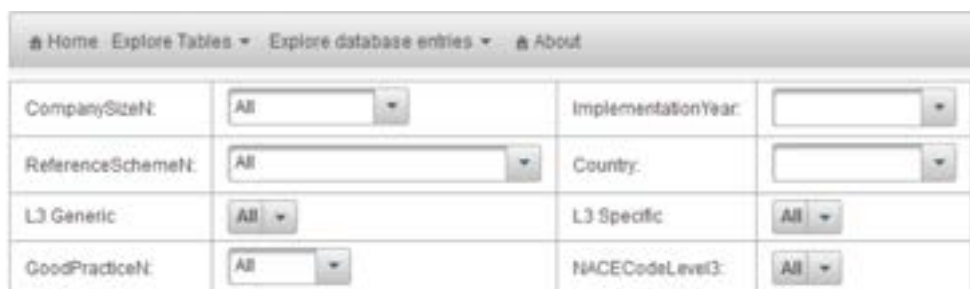


Figura 6 Query a disposizione dell'utente per la consultazione del database EU-MERCI ([www.eumerci.eu](http://www.eumerci.eu))

Un altro risultato rilevante del progetto EU-MERCI è stato la creazione di una *Library*, ovvero un insieme di documenti contenente i report descrittivi delle “Buone Pratiche”, selezionate sia nell’ambito del progetto stesso sia tramite l’analisi della letteratura per ogni specifico settore e processo analizzato. Come lo stesso database, la library è accessibile tramite un’interfaccia dedicata open source. Tale interfaccia è denominata “EU-MERCI Portal”[12].

## 2.2 Stato dell'arte: la ricerca bibliografica

Nel campo industriale è disponibile una vasta gamma di metodologie ed apparecchiature per il recupero termico del calore di scarto proveniente da processi industriali. Esistono differenti metodi per poter classificare gli approcci e le tecnologie di recupero; uno tra questi, consiste nell'utilizzare la temperatura alla quale la sorgente di calore di scarto è disponibile al recupero. È possibile attribuire le applicazioni in esame a differenti categorie, alle quali corrispondono differenti range di temperature. Tra le molteplici possibilità si riporta la classificazione riscontrata in [13], [14], [15], i quali suddividono le applicazioni in altissima, alta, media, bassa e bassissima temperatura. In **Tabella 6** ne sono riportati i corrispondenti range di temperatura.

Range	Temperature [°C]	Temperature [°F]
Ultra low temperature	<120°C	<250°F
Low temperature	120°C–230°C	250°F–450°F
Medium temperature	230°C–650°C	450°F–1200°F
High temperature	650°C–870°C	1200°F–1600°F
Ultra high temperature	>870°C	>1600°F

**Tabella 6** Classificazioni per range di temperatura di sorgenti di calore di scarto [13].

Come già introdotto, questo progetto di ricerca si focalizza sui metodi e le tecnologie di recupero utilizzabili a basse ma soprattutto bassissime temperature. Per avere una panoramica su quali possano essere le destinazioni di utilizzo di tali approcci di recupero, in **Tabella 7** sono riportati differenti processi, appartenenti a diversi settori industriali, che potrebbero potenzialmente essere alimentati con calore di scarto proveniente da altri processi.

Settore industriale	Processo	Temperature di input al processo [°C]
Alimentare e Bevande	Cleaning	60;
	Cooking	110-115;
	Pasteurizing	65; 80-110;
	Whitening	85;
	Drying	30-90; 30-120; 50-90;
	Washing	40-85; 40-80;
	Sterilizing	140-150; 80-90;
	Boiling	95-105;
	Heat treatment	40-60;
Tessile	Drainage	38-104;
	Dry heating	88;
	Ironing	100;
	Washing	40-80;
	Bleaching	60-100;
	Dyeing	100-160;
	Drying	75-250;
Chimica	Steaming	100-130;
	Boiling	95-105;
	Distilling	110-300; 90-130;
Cartaria	Various chemical processes	120-180;
	Pulp drying	95-120;
Minerali non metallici	Paper drying	95-120; 50-120;
	Drying of rocks, bricks, sand and other minerals	35-150;
Legno		70-90;
Altro	Drying	70-90;
	Metal cleaning	60-90;
	Painting drying	80-120;

**Tabella 7** Temperature di input caratteristiche di alcuni processi industriali a bassa temperatura [16].

In **Tabella 8** sono per l'appunto elencati esempi di processi industriali che potrebbero essere potenzialmente utilizzati per recuperare calore. Tra questi, sorgenti di calore a bassa temperatura come gas di scarico delle

caldaie, calore di scarto proveniente dai sistemi di raffreddamento o dai circuiti di ritorno delle condense del vapore utilizzato nei processi produttivi, sono spesso presenti nella maggior parte dei settori industriali [17].

<b>Utilities</b>	<b>Sorgente a bassa temperatura</b>	<b>Temperatura [°C]</b>
Caldaie	Flue gases	110-260
Compressori	Waste heat from compressor cooling system	30-60
<b>Processi</b>	<b>Sorgente a bassa temperatura</b>	<b>Temperatura [°C]</b>
Riscaldamento e Raffrescamento	Condensate from steam heating and spent cooling water from cooling systems	60-90
<b>Settore industriale</b>	<b>Sorgente a bassa temperatura</b>	<b>Temperatura [°C]</b>
Petrochimico	Stack gas from crude distillation	156
	Stack gas from vacuum distillation	216
	Exhaust from ethylene furnace	149
Ferro e Acciaio	Waste gas from coke oven	200
	Blast furnace gas	93
	Blast stove exhaust	250
Alluminio	Exhaust from aluminum casting with a stack melter	121
Alimentare e Bevande	Extracted air from cooking with fryers or ovens	150-200
	Exhaust from drying with spray/rotary dryers	110-160
	Water vapor from evaporation and distillation	100
Tessile	Dyed waste water from drying	90-94
	Stenter exhaust for fabric drying and finishing	180
	Waste water rejected from heat exchangers	58-66
Cartaria	Waste steam from slag flushing in furnace	95-100
	Wastewater from slag flushing in furnace	65-85
	Cooling water from furnace wall cooling	35-45
Cemento	Exhaust from cement kilns using 5- or 6-stage preheaters	204-300
	Hot air discharged from clinker coolers	100

**Tabella 8 Sorgenti di calore a bassa temperatura [17].**

In merito all'individuazione di sorgenti e pozzi di calore a bassa temperatura e le relative caratteristiche nei diversi processi industriali, sarà possibile trovare un commento più diffuso nel lavoro svolto da ENEA, incentrato in questo primo anno di ricerca su questo tipo di valutazioni.

Per il recupero di calore di scarto, l'industria utilizza numerose tecnologie già consolidate. Gran parte di queste sono progettate per applicazioni industriali specifiche. Basandoci sulla classificazione prima introdotta, in [Figura 7](#) è riportato un quadro riassuntivo dei sistemi comunemente applicati al fine di recuperare il calore di scarto per ciascun range di temperatura. Tali sistemi, anche se consolidati, sono caratterizzati da un continuo sviluppo in termini di miglioramento della prestazione energetica, fattibilità economica, costi di O&M (operation & maintenance), utilizzo di materiali differenti, ecc. [15].

Ultra-Low Temperature (< 250°F)	Low Temperature (250°F to 600°F)	Medium Temperature (600°F to 1200°F)	High Temperature (1200°F to 1600°F)	Ultra-High Temperature (> 1600°F)
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Shell and tube type heat exchangers</li> <li>■ Plate type heat exchangers</li> <li>■ Air heaters for waste heat from liquids</li> <li>■ Heat pumps</li> <li>■ HVAC applications (i.e., recirculation water heating or glycol-water recirculation)</li> <li>■ Direct contact water heaters</li> <li>■ Non-metallic heat exchangers</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Convection recuperator (metallic) of many different designs</li> <li>■ Finned tube heat exchanger (economizers)</li> <li>■ Shell and tube heat exchangers for water and liquid heating</li> <li>■ Heat pumps</li> <li>■ Direct contact water heaters</li> <li>■ Condensing water heaters or heat exchangers</li> <li>■ Metallic heat wheel</li> <li>■ Heat pipe exchanger</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Convection recuperator (metallic) of many different designs</li> <li>■ Finned tube heat exchanger (economizers)</li> <li>■ Shell and tube heat exchangers for water and liquid heating</li> <li>■ Self-recuperative burners</li> <li>■ Waste heat boilers for steam or hot water condensate</li> <li>■ Load-charge (convection section) preheating</li> <li>■ Metallic heat wheel</li> <li>■ Heat pipe exchanger</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Convection recuperator (metallic) – mostly tubular</li> <li>■ Radiation recuperator</li> <li>■ Regenerative burners</li> <li>■ Heat recovery boilers</li> <li>■ Waste heat boilers including steam turbine-generator based power generation</li> <li>■ Load or charge preheating</li> <li>■ Metallic heat wheels (regenerative system)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Refractory (ceramic) regenerators</li> <li>■ Heat recovery boilers</li> <li>■ Regenerative burners</li> <li>■ Radiation recuperator</li> <li>■ Waste heat boilers including steam turbine-generator based power generation</li> <li>■ Load or charge preheating</li> </ul>

Figura 7 Tecnologie di recupero di calore di scarto consolidate [15].

In Figura 8, sono invece riportate le tecnologie di recupero termico da calore di scarto che sono ancora in una fase iniziale di sviluppo e validazione. In particolare, come poi verrà rimarcato dai risultati della ricerca bibliografica condotta nell'ambito del progetto, tra le tecnologie più investigate vi sono la conversione del calore di scarto in una forma di energia più flessibile dal punto di vista di trasporto e utilizzo, come quella elettrica, ed il recupero di calore per sorgenti a temperature ultra basse (minori di 120°C) [15].

Ultra-Low Temperature (< 250°F)	Low Temperature (250°F to 600°F)	Medium Temperature (600°F to 1200°F)	High Temperature (1200°F to 1600°F)	Ultra-High Temperature (> 1600°F)
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Non-metallic (polymer or plastic) corrosion resistant heat exchangers of many different designs</li> <li>■ Systems with phase change material</li> <li>■ Desiccant systems for latent heat recovery from moisture laden gases</li> <li>■ Membrane type systems for latent heat recovery from water vapor</li> <li>■ Condensing water heaters or heat exchangers</li> <li>■ Thermally activated absorption systems for cooling and refrigeration</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Recuperators with innovative heat transfer surface geometries</li> <li>■ Advanced design of metallic heat wheel type regenerators</li> <li>■ Self-recuperative burners</li> <li>■ Systems with phase change material</li> <li>■ Advanced heat pipe exchanger</li> <li>■ Advanced design of metallic heat wheel</li> <li>■ Thermoelectric electricity generation systems</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Recuperators with innovative heat transfer surface geometries</li> <li>■ Advanced design of metallic heat wheel type regenerators</li> <li>■ Self-recuperative burners</li> <li>■ Systems with phase change material</li> <li>■ Advanced heat pipe exchanger</li> <li>■ Advanced design of metallic heat wheel</li> <li>■ Thermoelectric electricity generation systems</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Recuperators with innovative heat transfer surface geometries</li> <li>■ Thermo-chemical reaction recuperators</li> <li>■ Advanced design of metallic heat wheel type regenerators</li> <li>■ Advanced load or charge preheating systems</li> <li>■ Systems with phase change material</li> <li>■ Self-recuperative burners</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Regenerative burners</li> <li>■ Systems with phase change material</li> <li>■ Advanced regenerative systems</li> <li>■ Advanced load or charge preheating systems</li> </ul>

Figura 8 Tecnologie di recupero del calore di scarto in fase di sviluppo [15].

Nonostante l'alto potenziale dovuto alla grande quantità di calore disponibile, il recupero del calore di scarto a basse e bassissime temperature viene complicato da una serie di fattori. Tale processo, infatti, risulta non immediato dal punto di vista della fattibilità tecnica ed economica, in quanto sono in genere necessari tempi di ritorno dell'investimento elevati. Inoltre, spesso ci si trova di fronte ad un non semplice allineamento tra la fonte di calore residuo e la domanda da soddisfare [18]. Queste considerazioni trovano riscontro in diverse fonti della letteratura scientifica, che difatti eleggono, come particolarmente efficaci e promettenti, tecnologie come pompe di calore per incrementare il livello di temperatura della sorgente o la conversione del calore di scarto in energia elettrica [19],[20].

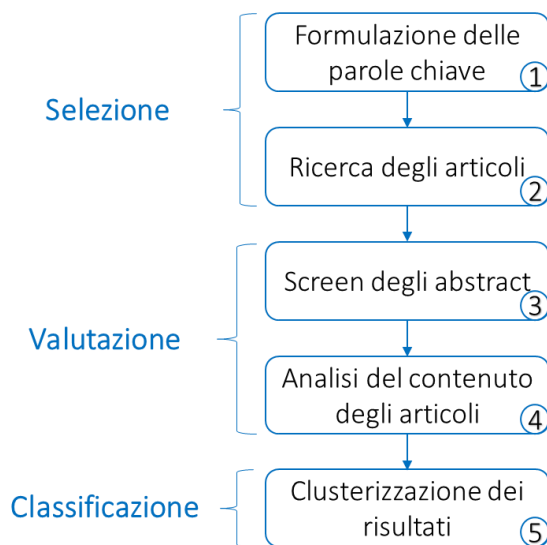
### 2.2.1 Metodologia della ricerca

La ricerca bibliografica è stata condotta allo scopo di orientare l'attenzione verso quelle che sono le attuali tendenze, i progetti realizzati e le tecnologie di recupero termico disponibili e maggiormente utilizzate. Le informazioni sono state raccolte con la finalità principale di fornire un input alla definizione della struttura del database e successivamente contribuire al suo popolamento.

L'analisi della letteratura è stata effettuata tramite l'utilizzo del database online SCOPUS (www.scopus.com). L'approccio utilizzato consiste in tre principali passaggi (elaborato da [21]):

- Selezione: vengono formulate le parole chiave di input alla ricerca e si procede con il reperimento degli articoli;
- Valutazione: si effettua un primo screening degli articoli basato sull'analisi degli abstract, si rimuovono gli articoli non inerenti e si procede all'approfondimento del contenuto degli articoli ritenuti validi;
- Classificazione: si suddividono gli articoli in categorie in base al loro contenuto.

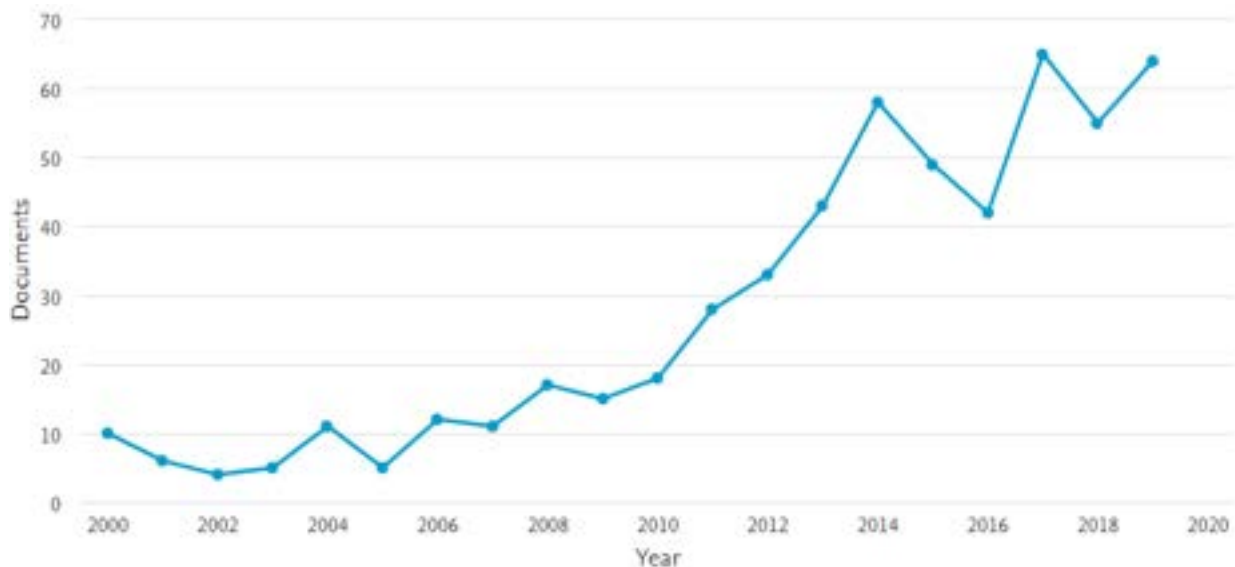
In Figura 9 è riportata una rappresentazione schematica della metodologia di ricerca utilizzata.



**Figura 9 Rappresentazione schematica della metodologia di ricerca bibliografica.**

Inserendo nel motore di ricerca parole chiave come "heat recovery" o "waste heat recovery" e ricercandole in titolo dell'articolo, abstract e keywords, sono stati ottenuti un numero elevato di risultati (rispettivamente 49'939 risultati per "heat recovery" e 19'009 per "waste heat recovery"). Si è deciso pertanto di restringere il campo di ricerca per ottenere un numero mirato di articoli analizzabili, limitando la ricerca ad un periodo temporale compreso tra gli anni 2000 e 2019 e utilizzando la combinazione di parole chiave "heat recovery"AND"low temperature"AND"industrial". Tale ricerca ha portato ad ottenere 547 risultati.

Per i documenti selezionati, in [Figura 10](#) è mostrato il numero di documenti per ciascun anno di pubblicazione. È interessante notare come la tematica del recupero termico a bassa temperatura sia stata caratterizzata da un interesse fortemente crescente nell'ultimo decennio.

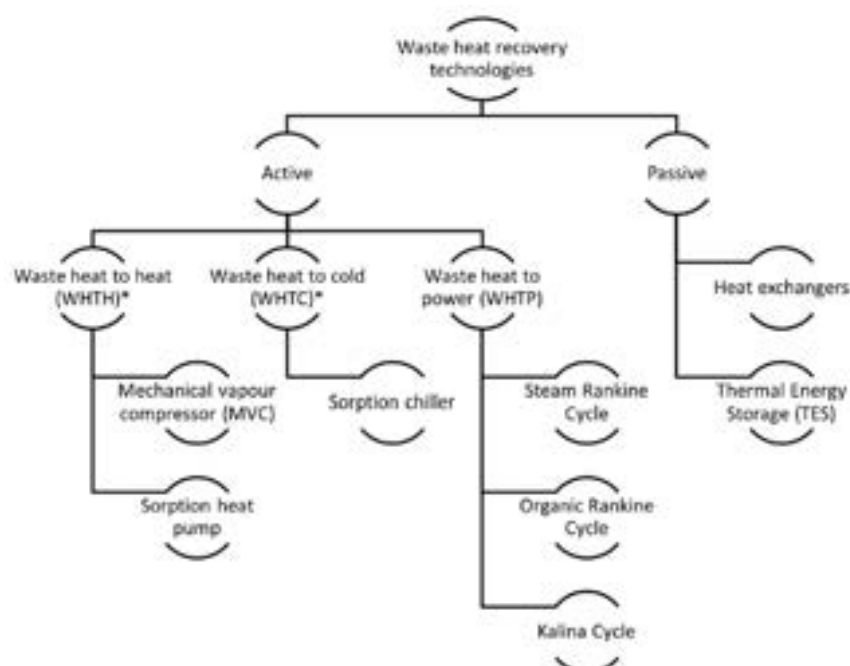


**Figura 10** Numero di documenti per anno di pubblicazione

### 2.2.2 Risultati della ricerca

Tramite scopus è stato possibile effettuare il download di tutti gli abstract. Si è proceduto al primo screening dei risultati e all'individuazione delle categorie di classificazione.

Proposto da [16] ed utilizzato nell'ambito della ricerca bibliografica svolta, un'utile classificazione delle tecnologie di recupero termico del calore di scarto può essere effettuata in funzione della sua destinazione di utilizzo, come schematicamente riportato in [Figura 11](#).



**Figura 11** Schema a blocchi delle più diffuse tecnologie di recupero termico [16].

A seguire si riportano le categorie identificate con una breve descrizione delle stesse:

- Recupero di calore per produzione di energia elettrica: in questa categoria sono raccolte tutte le applicazioni in cui il calore di recupero è destinato alla conversione in energia elettrica;
- Recupero di calore per produzione di calore: di questa categoria fanno parte tutte le applicazioni in cui il calore di recupero è destinato alla produzione di energia termica;
- Recupero di calore per produzione di freddo: raccoglie tutte le applicazioni in cui il calore di recupero è destinato alla produzione di energia frigorifera;
- Soluzioni ibride: la categoria raccoglie le applicazioni dove il recupero di calore è utilizzato per la produzione di differenti vettori energetici, ad esempio approcci cogenerativi con produzione di energia elettrica e calore o approcci misti per produzione di caldo e freddo;
- Storage termico: la categoria raccoglie le applicazioni dove il calore recuperato è destinato all'accumulo (Thermal energy storage, TES), sia su piccola sia su grande scala, e all'integrazione con la tecnologia del solare termodinamico e della geotermia;
- District Heating e integrazione di processo tra plant: categoria che raccoglie le applicazioni di recupero termico su larga scala, come il teleriscaldamento o l'interazione tra diversi plant nella stessa zona industriale;
- Scambio termico: contiene i rilievi nei quali viene affrontata da un punto di vista generale la tematica dello scambio termico a bassa temperatura. Fanno parte di questa categoria articoli su scambiatori di calore (ad esempio la progettazione), i materiali utilizzati per il recupero di calore e lo studio del comportamento dei differenti fluidi;
- Altri approcci e metodologie di recupero termico: metodologie e applicazioni di recupero termico peculiari o difficilmente generalizzabili;
- Review: raccoglie gli articoli nei quali vengono condotte analisi di letteratura sulle tecnologie, i metodi, i materiali e i fluidi di scambio maggiormente utilizzati nel il recupero termico di calore a bassa temperatura;
- Non inerenti: fanno parte di questa categoria i rilievi non inerenti al recupero termico di calore o applicazioni fuori dai confini del progetto di ricerca in esame, come recupero di calore per temperature elevate o applicazioni per centrali termoelettriche (ad esempio finalizzate alla cattura della CO<sub>2</sub>).

In [Tabella 9](#) è riportato il numero di documenti rilevati per ciascuna categoria. Dei 547 risultati prodotti dalla ricerca, 333 sono stati considerati rilevanti e sono pertanto stati analizzati.

Categorie	Numero di risultati
<i>Recupero calore per produzione di EE</i>	116
<i>Recupero calore per produzione di calore</i>	51
<i>Altri approcci e metodologie per il recupero termico</i>	36
<i>Storage Termico</i>	32
<i>Scambio termico</i>	28
<i>Review</i>	25
<i>District Heating e Integrazione di processo tra plant</i>	21
<i>Soluzioni ibride</i>	13
<i>Recupero calore per produzione di freddo</i>	11
<i>Non inerenti</i>	214
<b>Totale</b>	<b>547</b>

**Tabella 9 Numero di risultati per categoria**

Per i 333 risultati rilevanti analizzati, in [Figura 12](#), tramite un grafico a torta, è rappresentato il popolamento percentuale delle categorie di appartenenza.



**Figura 12 Risultati della ricerca bibliografica**

Analizzando i risultati della ricerca condotta, le categorie maggiormente rappresentate sono state il recupero termico per la produzione di energia elettrica e il recupero termico per la produzione di calore. In particolare, entrando nel dettaglio di queste due categorie, tra le tecnologie rilevate i Cicli Rankine Organici (ORC) per la produzione di energia elettrica e le differenti tipologie di pompe di calore per la produzione di energia termica si sono dimostrate le tecnologie più utilizzate (rispettivamente con 72 e 41 risultati). Seguirà quindi una breve introduzione a queste due tecnologie.

#### *2.2.2.1 Recupero termico per produzione di calore: le pompe di calore*

L'utilizzo diretto del calore di scarto da recuperare, ad esempio attraverso l'utilizzo di scambiatori di calore, implica necessariamente che il flusso di energia sia caratterizzato da temperature "in discesa". Ciò può limitare le opportunità di recupero del calore quando la temperatura del calore di scarto è inferiore alla temperatura necessaria per un determinato processo. In questi casi, l'utilizzo di una pompa di calore può offrire un'opportunità valida di recupero, innalzando il livello di temperatura del calore disponibile alla temperatura desiderata. La convenienza economica dell'innalzamento della temperatura tramite l'utilizzo di una pompa dipende sostanzialmente dal delta di temperatura richiesto e dall'analisi dei costi di combustibile ed energia elettrica [14].

Sono disponibili diverse tipologie di pompe di calore per applicazioni industriali ed esistono svariati modi per classificarle. Secondo [22], le pompe di calore per applicazioni industriali possono suddividersi nelle seguenti categorie: ciclo a compressione di vapore (ciclo a compressione meccanica), ciclo a ricompressione meccanica di vapore, ciclo a ricompressione termica del vapore, ciclo ad assorbimento e pompe di calore chimiche.

Tra i fattori più influenti nel determinare la fattibilità delle pompe di calore vi sono sicuramente la temperatura del calore di scarto disponibile e l'incremento di temperatura desiderato. Tali fattori giocano un ruolo fondamentale nel determinare il tipo di ciclo da utilizzare e la scelta del fluido di lavoro: la loro variabilità, ad esempio, influenza parametri operativi come l'efficienza della pompa di calore, che diminuisce all'aumentare della temperatura desiderata [14].

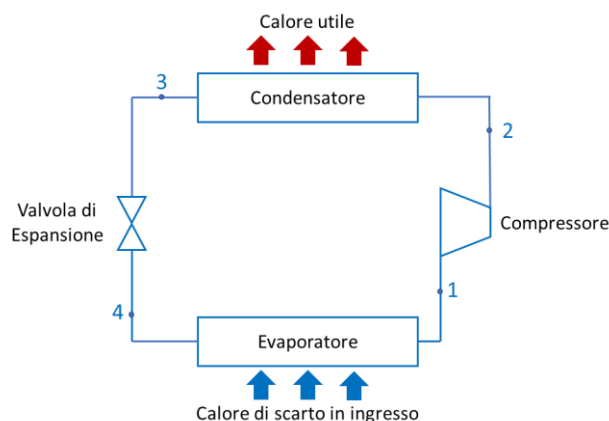
L'indicatore più utilizzato per valutare le prestazioni di una pompa di calore è il coefficiente di prestazione COP (Coefficient Of Performance), che è definito come il rapporto tra l'effetto energetico utile e l'energia necessaria in input per ottenerlo [22].

$$COP = \frac{Q}{P}$$

Dove  $Q$  è il calore utile e  $P$  l'energia in input al sistema. Il valore di questo coefficiente è fortemente variabile a seconda della tipologia di pompa di calore considerata (ciclo di lavoro, refrigerante utilizzato, ecc.) e delle condizioni operative di funzionamento. Per applicazioni convenzionali (ad esempio pompe di calore a compressione meccanica) il COP assume in genere un valore superiore a 3 [23]. Per le pompe di calore a motore o le pompe di calore azionate termicamente (es. pompe ad assorbimento), le prestazioni possono essere indicate dal rapporto di energia primaria PER (Primary Energy Ratio). Per le pompe di calore ad azionamento elettrico è anche possibile definire un PER, moltiplicando il COP per l'efficienza di generazione di energia[24].

In Figura 13 è riportato lo schema di funzionamento generale di una pompa di calore meccanica a compressione di vapore, che rappresenta l'applicazione più classica di una pompa di calore. Il principio di funzionamento può essere suddiviso in quattro fasi, corrispondenti ai quattro stati del fluido refrigerante (punti 1, 2, 3, 4 in Figura 13)[22]:

1. In ingresso all'evaporatore, il liquido refrigerante evapora assorbendo calore (dalla sorgente di calore di scarto in un assetto finalizzato al recupero termico);
2. Il fluido refrigerante, in condizioni di vapore surriscaldato, viene compresso mediante l'utilizzo di un compressore meccanico, con conseguente aumento del suo contenuto entalpico (aumento di pressione e temperatura);
3. Il fluido refrigerante in condizioni di vapore surriscaldato, in uscita dal compressore, passa attraverso uno scambiatore di calore, nel quale condensa cedendo calore all'ambiente esterno o al fluido da riscaldare (acqua, aria o altri vettori energetici);
4. Il liquido refrigerante passa attraverso una valvola di espansione, che riporta il fluido nelle condizioni di pressione iniziale in ingresso all'evaporatore, completando il ciclo termodinamico.



**Figura 13 Schema di funzionamento generale di una pompa di calore meccanica a compressione di vapore**

Nella progettazione di una pompa di calore a compressione a ciclo chiuso, la scelta del refrigerante gioca un ruolo fondamentale. Per le temperature tipiche richieste dall'industria, generalmente prossime ai 100°C o superiori, i refrigeranti devono possedere temperature critiche elevate [25]. Inoltre, sono richieste altre caratteristiche fondamentali, come range di pressioni di lavoro basse, un potenziale di riduzione dell'ozono nullo (Ozone Depletion Potential, ODP), un basso potenziale di riscaldamento globale (Global Warming Potential, GWP), non infiammabilità e assenza di tossicità [22].

Nella maggior parte delle pompe di calore offerte oggi vengono utilizzate miscele sintetiche di refrigeranti come R410a e R134a. Tali refrigeranti trovano largo impiego nel settore residenziale, ma la bassa temperatura critica di entrambi ne preclude l'utilizzo nella maggior parte dei processi industriali. Le pompe di calore che utilizzano R410a e R134a possono fornire acqua calda a temperature massime di 60°C-80°C [21].

In campo industriale vengono comunemente impiegati refrigeranti naturali come R600 (butano), R717 (ammoniaca), R744 (anidride carbonica) o refrigeranti come l’R245fa, in grado di rispondere a richieste di temperature più elevate. Tuttavia, ad oggi, i ricercatori non hanno trovato un refrigerante ideale in grado di soddisfare tutti i requisiti sopra descritti, ma tali requisiti vengono soddisfatti solo in parte rendendo il settore di ricerca sui refrigeranti un campo molto attivo [18]. Refrigeranti come DR-2 e SES36 hanno recentemente mostrato di essere caratterizzati da proprietà particolarmente interessanti per applicazioni in ambito industriale [25].

In **Tabella 10** viene riportata una panoramica dei refrigeranti maggiormente utilizzati in campo industriale per pompe di calore a compressione operanti a ciclo chiuso.

Refrigerante	Temperatura massima [°C]	Temperatura critica [°C]	Pressione critica [Mpa]	ODP	GWP/100a	Tossicità	Infiammabilità
NH <sub>3</sub>	110	132,5	11,35	0	0	Si	Media
CO <sub>2</sub>	130	31,1	7,38	0	1	No	No
R245fa	140	154,0	3,65	0	950	Si	No
R600a	140	134,7	3,63	0	<1	No	Alta
DR-2	160	171,3	2,903	0	9,4	No	No
SES36	160	-	-	-	Basso	Bassa	No
R134a	<90	101,06	4,059	0	1300	Bassa	No
R1234ze(z)	-	150,1	3,64	0	<10	No (atteso)	Bassa (atteso)
HTR01	90	124,3	3,759	0,04	1500	No	No
HTR03	85	111,42	3,8797	0	1300	No	No
R500/R245fa	-	153,9	3,66	0	966	-	-
R123	<100	183,60	3,662	0,02	77	Bassa	No
R142b	<100	137,2	4,12	0,07	2310	Bassa	Bassa
BY-4	110	150,2	4,44	0	755	-	-

**Tabella 10 Refrigeranti maggiormente utilizzati in campo industriale per pompe di calore a compressione [22]**

Di seguito è riportata una panoramica, con una breve descrizione del principio di funzionamento, delle tecnologie di pompe di calore maggiormente riscontrate nell’ambito della ricerca bibliografica svolta per le applicazioni di recupero termico.

- **Pompe di calore a compressione di vapore:** le pompe di calore a compressione di vapore, anche note come pompe di calore meccaniche, sono una delle applicazioni più comunemente utilizzata e commercialmente affermata [19]. Il ciclo di lavoro è rappresentato in **Figura 13**: uno specifico fluido (refrigerante) è utilizzato come mezzo di trasferimento tra la fonte di calore di scarto da recuperare ed il calore utile da fornire. Il fluido refrigerante attraversa l’evaporatore, dove esso evapora assorbendo calore dalla sorgente a bassa temperatura. Un compressore meccanico comprime il fluido e lo spinge all’interno del condensatore, dove il fluido condensa ad alta pressione rilasciando calore (effetto utile). Dopo il condensatore, il fluido attraversa la valvola di laminazione, che riduce la pressione del fluido e lo riporta in ingresso all’evaporatore chiudendo il ciclo [19]. Durante il processo, l’energia termica alla temperatura dell’evaporatore è innalzata alla temperatura di condensazione: questo calore a temperatura più elevata può essere utilizzato per vari processi industriali.
- **Pompe di calore a motore:** le pompe di calore a motore sono composte da una pompa di calore meccanica e un motore a gas. La principale differenza rispetto a una pompa di calore convenzionale risiede nell’alimentazione del compressore. In una pompa di calore meccanica il compressore è azionato da un motore elettrico, mentre in una pompa di calore a motore esso è azionato da un motore a combustione interna. Inoltre, il calore proveniente dal raffreddamento del motore e dai gas di combustione esausti può essere recuperato, incrementando in tal modo l’efficienza del sistema [26].

- **Ricomprensione meccanica di vapore:** le pompe di calore a ricomprensione meccanica di vapore (MVR) utilizzano calore proveniente da una sorgente gassosa (vapore d'acqua) [25]. Sono disponibili molte possibili configurazioni di sistema. La configurazione più comunemente utilizzata è quella a ciclo semi-aperto, in cui il vapore utilizzato come fonte di calore viene compresso attraverso un compressore meccanico (azionato elettricamente o tramite motore a combustione interna), il quale porterà il vapore stesso ad una pressione e temperatura più elevata [22]. Successivamente alla fase di compressione, il fluido può essere utilizzato direttamente come fluido di processo o può trasferire il suo calore per mezzo di uno scambiatore di calore. L'uso di una pompa di calore MVR presuppone l'utilizzo come fonte di calore di un fluido in forma già gassosa, che di solito implica una temperatura della fonte elevata. Condizioni di lavoro tipiche per un MVR sono infatti una temperatura della sorgente superiore a 80 °C, con un lieve incremento della temperatura di circa 20 °C [25].
- **Ricomprensione termica di vapore:** una particolare variante dell'MVR è la *Thermal Vapor Recompression* (TVR). Nella ricomprensione termica il ciclo di ricomprensione del vapore è guidato da calore e non meccanicamente come avviene nelle MVR. Il funzionamento di questa tipologia di pompa di calore è caratterizzato dall'utilizzo di vapore in pressione e dalla presenza di un eiettore di vapore. L'eiettore di vapore usa l'effetto Venturi per aumentare la pressione, mediante iniezione di vapore in una tubazione a diametro variabile (tuttavia il sistema è caratterizzato da un'efficienza relativamente bassa nell'aumentare la pressione) [27]. Le pompe di calore TVR sono prive di organi in movimento e l'assenza di vibrazioni significative le rendono sistemi a manutenzione ridotta. Alla luce dei vantaggi dell'eiettore di vapore, tali pompe di calore risultano una tecnologia ampiamente implementata nell'industria, soprattutto per i grandi utilizzatori di acqua e vapore di processo [27].
- **Pompa di calore ad assorbimento:** originariamente i cicli ad assorbimento venivano utilizzati esclusivamente per la refrigerazione, mentre più di recente le pompe di calore ad assorbimento hanno suscitato un notevole interesse, dovuto al loro potenziale utilizzo in sistemi che sfruttano calore di scarto a bassa temperatura come fonte di energia [28]. Il principio di funzionamento di una pompa di calore ad assorbimento è basato sull'evaporazione di un refrigerante e sul suo assorbimento all'interno di un mezzo assorbente. I componenti chiave di un ciclo ad assorbimento sono generatore, assorbitore, evaporatore e condensatore (oltre che scambiatore di calore, pompa e valvola di laminazione che sono necessariamente implementati). Il processo di funzionamento del ciclo ad assorbimento è illustrato in [Figura 14](#) [22]. I cicli ad assorbimento più utilizzati e commercialmente diffusi utilizzano come coppie soluto-solvente (refrigerante-assorbitore) acqua-bromuro di litio (H<sub>2</sub>O-LiBr) o ammoniaca-acqua (NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O). I sistemi commercialmente disponibili sono caratterizzati da un COP di circa 0,7 per cicli H<sub>2</sub>O-LiBr ad effetto singolo e da un COP di circa 0,3 per cicli NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O ad effetto singolo [29]. Nonostante il COP inferiore, i cicli NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O presentano vantaggi rispetto ai cicli H<sub>2</sub>O-LiBr, in quanto possono operare a temperature inferiori a 0°C. Le pompe di calore ad assorbimento risultano una tecnologia particolarmente vantaggiosa quando sia produzione di calore che produzione di freddo sono necessarie [28].

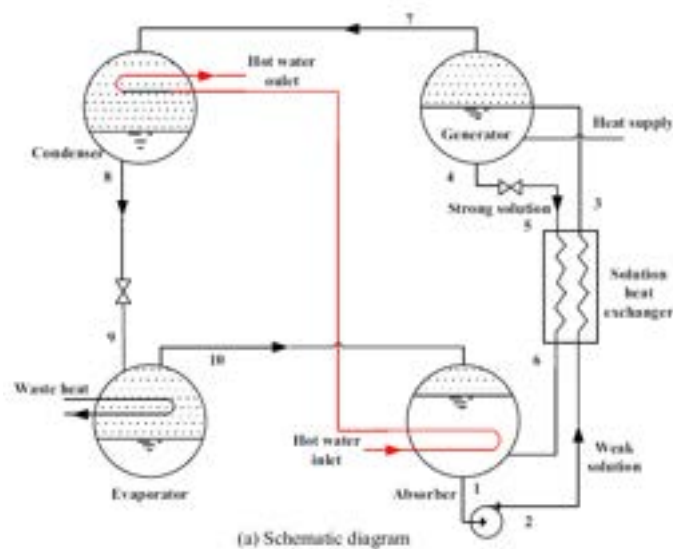


Figura 14 Rappresentazione schematica di una pompa di calore ad assorbimento [22]

- Pompa di calore ad adsorbimento:** le pompe di calore ad adsorbimento appartengono alla famiglia delle pompe di calore alimentate per via termica come quelle ad assorbimento. Queste due tipologie sono basate sullo stesso principio di funzionamento, con alcune differenze sostanziali: in un ciclo ad assorbimento il refrigerante viene disciolto (assorbito) nell'assorbente, mentre in un ciclo ad adsorbimento il refrigerante viene assorbito dai pori del mezzo assorbente. Questa differenza nel ciclo di funzionamento si traduce nell'utilizzo di assorbenti solidi. Tra le coppie di lavoro più utilizzate vi sono zeolite-acqua, gel di silice-acqua, carbone attivo-metanolo[30].
- Pompe di calore Trans-critiche a CO<sub>2</sub>:** tali pompe di calore appartengono alla famiglia delle pompe di calore a compressione meccanica, ma sono basate su un ciclo trans-critico, ovvero un ciclo termodinamico in cui il fluido di lavoro attraversa entrambi gli stati subcritico e supercritico, e ciò accade quando si utilizza CO<sub>2</sub> come fluido refrigerante. Il vantaggio principale di una pompa trans-critica a CO<sub>2</sub> è che la sua efficienza può essere superiore rispetto alle pompe di calore convenzionali, ottenendo un innalzamento di temperatura di almeno 30-40°C. Tuttavia, per raggiungere elevate temperature alla mandata del compressore (es. 120°C) sono richieste alte pressioni di esercizio del refrigerante (oltre 100 bar), il che si traduce in costi di gestione e delle apparecchiature elevato [19].
- Pompe di calore ibride:** anche note come "Compression-Resorption Heat Pump" (CRHP), le pompe di calore ibride possono essere considerate come combinazione di pompe di calore meccaniche e ad assorbimento. Nelle pompe CRHP vengono sfruttati i processi di assorbimento termochimici ed è possibile raggiungere livelli di incremento di temperatura elevati, con un COP relativamente alto. Queste pompe di calore utilizzano uno schema funzionale analogo a quanto visto per le pompe a compressione di vapore, ma il fluido di lavoro viene sostituito da una coppia di assorbimento: tra le più utilizzate vi è ad esempio ammoniaca-acqua (NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O). I vantaggi dell'utilizzo delle pompe CHRP sono legati all'uso di questi particolari refrigeranti, che oltre ad essere ecologici contribuiscono al miglioramento delle prestazioni, che in alcuni casi (ad esempio nel riscaldamento industriale), per specifiche condizioni operative, possono garantire un miglioramento significativo delle prestazioni rispetto al ciclo a VCHP (valori superiori al 20%) [19]. L'uso di una miscela NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O consente di ottenere una serie di vantaggi: COP più elevato a causa dell'uso della transizione di fase non isoterma della miscela negli scambiatori di calore a pressione costante; la miscela consente il raggiungimento di un funzionamento ad alta temperatura con pressioni di esercizio relativamente basse [19].
- Pompe di calore termoacustiche:** le pompe di calore termoacustiche sono sistemi in grado di utilizzare calore di scarto a bassa temperatura per ottenere energia termica a temperatura più

elevata sfruttando l'effetto termoacustico. Tramite un generatore viene generata potenza acustica, che viene trasferita nel sistema utilizzando un gas come mezzo di propagazione (es. elio). Le onde acustiche sono in grado di generare un aumento di temperatura all'interno delle molecole del gas. Tale fenomeno avviene principalmente nel rigeneratore interposto tra due scambiatori di calore: da un lato la sorgente a bassa temperatura da cui recuperare calore (lato freddo), dall'altro il calore di output a temperatura più elevata (lato caldo). In questo modo è possibile trasferire energia termica da una sorgente all'altra [31].

Tratta da [14], in **Tabella 11** si riporta una panoramica di diverse tipologie di pompe di calore con riferimenti su parametri operativi e costi associati.

Tipologia di pompa di calore	Temperatura massima	Massimo incremento di temperatura	Costi d'installazione [\$/kW]		
			0,5 MW	1 MW	4 MW
Compressione di vapore meccaniche	120°C	80°C	450-700	320-550	240-420
Compressione a motore	130°C	90°C	520-770	390-620	300-490
MVR	190°C	90°C	520-770	390-620	300-490
TVR	150°C	40°C	Non Disponibile	210-270	100-120
Pompe di calore ad assorbimento	100°C	50°C	340-390	300-350	250-290

**Tabella 11 Parametri operativi ed economici di diverse tipologie di pompe di calore [14]**

Inoltre, sempre dal punto di vista applicativo, si segnala la piattaforma "Industrial heat pump" ([industrialheatpumps.nl](http://industrialheatpumps.nl)), nella quale sono presenti informazioni sulle varie tipologie di pompe di calore, i fluidi refrigeranti maggiormente utilizzati e le diverse applicazioni in campo industriale.

Le pompe di calore risultano essere una delle tecnologie più competitive per il recupero calore a bassa temperatura soprattutto per valori inferiori a 100°C. Al superare di questa soglia, i sistemi di conversione del calore di scarto in energia elettrica, tra tutti i cicli ORC, rappresentano una tecnologia altrettanto valida [19]. L'evoluzione tecnologica per quanto riguarda le pompe di calore oltre che all'utilizzo di nuove tipologie di fluidi refrigeranti a basso impatto ambientale è finalizzata al raggiungimento di temperature di output sempre più elevate. Alcune recenti applicazioni vedono pompe di calore, cosiddette *pompe di calore ad alte temperature*, che raggiungono temperature di output prossime ai 200°C con  $\Delta T$  anche superiori a 100 °C, prevedendo anche la produzione diretta di vapore.

#### 2.2.2.2 Recupero termico per produzione di energia elettrica: Organic Rankine Cycle

La tecnologia più frequentemente utilizzata per la generazione di energia elettrica dal calore di scarto prevede l'utilizzo del calore per generare vapore. Il vapore prodotto viene utilizzato come fluido di lavoro nei cicli Rankine tradizionali con turbina a vapore. Per applicazioni a basse e bassissime temperature, il calore disponibile non è sufficiente per garantire un adeguato surriscaldamento del vapore, requisito necessario per evitare danneggiamenti della turbina durante la fase di espansione. Pertanto, per applicazioni di recupero di calore a bassa temperatura, sono utilizzati differenti tipi di cicli come gli ORC o i cicli Kalina, caratterizzati dall'utilizzo di fluidi di lavoro con un basso punto di ebollizione [14].

In particolare, i cicli Rankine organici, per le loro caratteristiche intrinseche (prima tra tutte le basse temperature di lavoro), si prestano ottimamente alla generazione di energia da fonti rinnovabili come solare, geotermiche e biomasse, ma soprattutto per applicazioni di recupero del calore di scarto [14].

In **Tabella 12** sono riportate, in maniera qualitativa, le principali differenze tra i cicli a vapore tradizionali ed i cicli Rankine organici, con particolare riferimento alle caratteristiche del fluido di lavoro.

<b>Caratteristiche</b>	<b>Ciclo a vapore</b>	<b>ORC</b>
<b>Fluido</b>	Acqua	Composto Organico
<b>Pressione critica</b>	Elevata	Bassa
<b>Temperatura critica</b>	Elevata	Bassa
<b>Punto di ebollizione</b>	Elevato	Basso
<b>Pressione di condensazione</b>	Bassa	Accettabile
<b>Calore specifico</b>	Elevato	Basso
<b>Viscosità</b>	Bassa	Relativamente alta
<b>Infiammabilità</b>	No	Si (dipende dal fluido)
<b>Tossicità</b>	No	Si
<b>Impatto ambientale</b>	No	Alto (dipende dal fluido)
<b>Disponibilità</b>	Disponibile	Problemi di fornitura
<b>Costo</b>	Economico	Costoso

**Tabella 12** Confronto tra le caratteristiche dei fluidi utilizzati nei cicli ORC ed il ciclo a vapore [32]

In **Figura 15** è riportato lo schema di funzionamento generale di un ORC. Il principio di funzionamento può essere suddiviso in quattro fasi seguendo i quattro stati del fluido evolvente (punti 1, 2, 3, 4 in **Figura 15**) [1]:

- Il fluido di lavoro in uscita dal condensatore viene pressurizzato mediante l'utilizzo di una pompa, per ottenere il livello di pressione richiesto dal ciclo (punto 2);
- Il fluido organico pressurizzato scorre attraverso uno scambiatore di calore, dove, grazie all'apporto termico fornito dal calore di scarto recuperato, viene portato in condizioni di vapore surriscaldato (punto 3);
- Il fluido organico in condizioni di vapore surriscaldato espande in turbina, con conseguente generazione di potenza elettrica;
- Il liquido di lavoro in uscita dalla turbina (punto 4) entra nel condensatore, dove cede calore tornando alle condizioni iniziali (punto 1), completando il ciclo termodinamico;

Per applicazioni industriali, il calore in eccesso rilasciato nel condensatore può rappresentare una fonte di energia termica direttamente utilizzabile anche per altri usi: preriscaldamento o essiccazione della biomassa (riducendone così il contenuto di umidità ed aumentandone il valore energetico), riscaldamento ambientale, produzione di acqua calda per processi produttivi industriali, ecc. Qualora ciò non avvenga, il calore residuo può essere dissipato tramite una torre evaporativa oppure un dry-cooler.

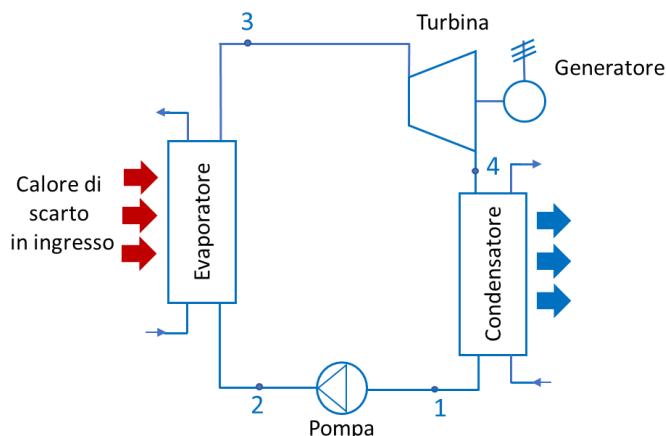


Figura 15 Schema di funzionamento generale di un Ciclo Rankine Organico

Il ciclo Rankine organico lavora in modo molto simile al ciclo Rankine a vapore, ma utilizza un fluido di lavoro organico. Così come visto per le pompe di calore, per i cicli ORC la selezione del fluido di lavoro gioca un ruolo fondamentale nel determinare le performance e la fattibilità tecnico economica del sistema [32]. Questo giustifica l'abbondante letteratura dedicata alla selezione dei fluidi per le differenti applicazioni di recupero del calore. Sono diverse le potenziali sostanze identificate: idrocarburi (HC), idrofluorocarburi (HFC), idroclorofluorocarburi (HCFC), clorofluorocarburi (CFC), perfluorocarburi (PFC), silossani, alcoli, aldeidi, eteri, idrofluoroeteri (HFE), ammine, miscele fluide (zeotropiche e azeotropiche), liquidi inorganici [32].

Tali fluidi possono essere classificati in tre grandi categorie: refrigeranti organici, idrocarburi e silossani. I refrigeranti organici sono adatti per temperature comprese tra 100 e 175 ° C, i refrigeranti idrocarburici per temperature comprese tra 175–250 ° C, mentre i silossani per temperature comprese tra 250–400 ° C. Poiché le fonti di calore di scarto da processi industriali sono generalmente caratterizzate da temperature inferiori a 175 °C, i refrigeranti organici sono i più idonei per questo tipo di applicazioni [17].

In generale, i fluidi di lavoro per ORC sono caratterizzati da un basso punto di ebollizione, una bassa temperatura critica, una bassa pressione critica, un basso calore di vaporizzazione, un'alta densità di vapore e un alto peso molecolare [33]. Tra i refrigeranti più utilizzati, caratterizzati da un ODP nullo, vi sono ad esempio l'R245fa e l'SES36 [34]. In Figura 16 è riportato il diagramma T-s di alcuni dei refrigeranti più utilizzati nei cicli ORC, posti a confronto con il diagramma termodinamico dell'acqua.

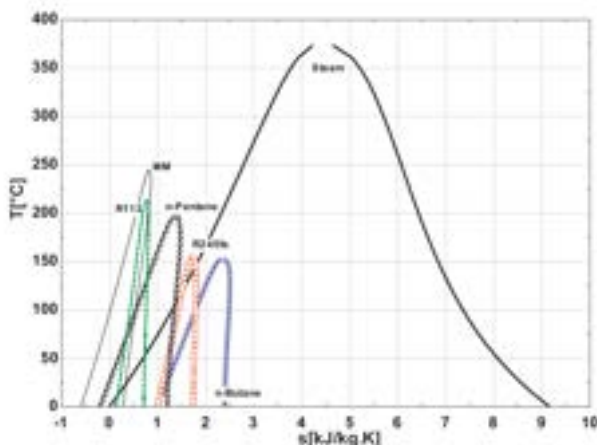


Figura 16 Diagramma T-s per l'acqua ed alcuni dei refrigeranti utilizzati nei cicli ORC [32]

Una variante dei cicli Rankine organici è rappresentata dai cicli Rankine supercritici (SRC), in quanto il fluido di lavoro opera in condizioni supercritiche. Un tipico esempio è rappresentato dall'utilizzo di CO<sub>2</sub> come fluido di lavoro caratterizzato da una pressione ed una temperatura critica bassa, rispettivamente 73,8 bar e 31,1°C.

Poiché gli SRC bypassano una regione bifase durante il processo di riscaldamento, si ha una migliore corrispondenza termica con la fonte di calore, il che si traduce in una minore irreversibilità [17].

In Tabella 13 viene riportata una panoramica di alcuni dei refrigeranti utilizzati in campo industriale per i sistemi ORC [33].

Refrigerante	Massa molare [kg/kmol]	Pressione critica [Mpa]	Temperatura critica [K]	ODP	GWP	Tipo
R245fa	134,05	3,64	427,2	0	950	Secco
R123	152,93	3,66	456,8	1,3	0,012	Isentropico
R11	137,37	4,40	471,1	45	1	Isentropico
R141b	116,95	4,46	305,2	0,086	700	Isentropico
R134a	102,03	4,06	374,2	0	1550	Umido

**Tabella 13 Proprietà di fluidi di lavori tipici per cicli ORC [33]**

Dal punto di vista prestazionale, i fluidi utilizzati negli ORC hanno una massa molecolare elevata, consentendo la progettazione di sistemi compatti con rendimenti isentropici della turbina elevati (fino all'80-85%), caratterizzata da pochi stadi di espansione. Tuttavia, poiché il ciclo funziona a temperature più basse, è intrinsecamente meno efficiente di un ciclo Rankine tradizionale (sulla base dell'efficienza massima teorica del ciclo di Carnot). L'efficienza globale del sistema è compresa tra il 10 ed il 20% a seconda delle temperature in gioco (più bassa rispetto ad un convenzionale ciclo a vapore la cui efficienza si attesta tra il 30 e il 40%).

In conclusione, sebbene i cicli ORC risultino una tecnologia particolarmente idonea per la conversione in energia elettrica di calore di scarto, è doveroso citare altre tecnologie come ad esempio i cicli Kalina, anch'essi caratterizzati da ottime potenzialità per il recupero termico [35]. Il ciclo Kalina è una variazione del ciclo Rankine nella quale viene utilizzato come fluido di lavoro una miscela di due fluidi (in genere acqua-ammoniaca). L'utilizzo di una miscela, costituita da un fluido avente elevata temperatura di evaporazione ed un fluido avente bassa temperatura di evaporazione, permette di contenere le irreversibilità nella fase di evaporazione e condensazione, che saranno quindi caratterizzate da temperature variabili [35].

### 2.3 Definizione del Database

L'analisi di letteratura riassunta in Tabella 9 ha fornito un'utile base di conoscenza delle tecnologie, delle metodologie e dei diversi approcci utilizzati per il recupero di calore di scarto a bassa temperatura in campo industriale. Parallelamente allo studio e approfondimento dei progetti simili sviluppati nel campo, la ricerca svolta ha permesso di identificare quale possa essere una struttura appropriata del database da realizzare.

In particolare, sono stati individuati a livello preliminare i criteri di classificazione e le informazioni utili da raccogliere per archiviare le fonti riscontrate all'interno del database.

Poiché il database dovrà essere uno strumento per supportare le imprese, in particolare nel contesto industriale italiano, nella ricerca di opportunità nel recupero di calore di scarto, è evidente la necessità di realizzare un sistema che possa essere il più completo possibile, ma allo stesso tempo semplice nella consultazione, in modo da poter essere utilizzato efficacemente.

L'approccio adottato è stato quello di definire una struttura in grado di contenere progetti di diversa natura provenienti dalle più svariate fonti disponibili, come ad esempio articoli di letteratura, rilievi provenienti da progetti e database simili già sviluppati, tecnologie disponibili da fornitori, applicazioni teoriche, rilievi sul campo non disponibili in letteratura.

Alla luce di ciò, sono state individuate categorie riferibili a tre principali aree: informazioni generali, informazioni tecniche e informazioni economiche.

Tra le informazioni generali che è stato ritenuto opportuno inserire come campi del database ci sono: informazioni relative alla fonte dalla quale proviene il rilievo, in modo tale da garantirne un agevole reperimento; informazione relative allo stato di implementazione del progetto e dell'impresa che lo adotta; descrizione del progetto.

Nelle informazioni tecniche sono contenute specifiche riguardo la tipologia di recupero termico. Per valutare la fattibilità di recupero termico di calore di scarto, è necessario caratterizzare la sorgente di calore ed il flusso a cui esso verrà trasferito. Quindi, in particolare, è necessario che nel database siano contenute informazioni su: qualità del calore da recuperare (livello di temperatura), quantità di calore disponibile; tipologia dei fluidi coinvolti; disponibilità. Inoltre, sono contenute informazioni sulla tecnologia utilizzata.

Questi parametri sono imprescindibili per valutare, da un punto di vista qualitativo e quantitativo, lo scambio termico, ma anche per fare considerazioni sulla fattibilità tecnologica e sulle possibili limitazioni in fase progettuale (ad esempio limitazioni sui materiali per problemi di corrosione)[14].

Nell'ultima categoria sono invece compresi parametri economici: risparmio conseguibile, investimento necessario e tempo di ritorno dell'investimento. Tali parametri sono stati inclusi in quanto fondamentali per l'impresa nella scelta della tipologia di progetto, al pari dei parametri tecnici.

La quantità e la qualità delle informazioni disponibili sarà fortemente dipendente dalla tipologia di fonte e per ciascuna di queste non sarà semplice ottenere il popolamento completo di tutti i campi; tuttavia, si è preferito mantenere una struttura più articolata del database in quanto, qualora disponibili, tutte le informazioni sopra descritte possono contribuire in maniera importante alla valutazione della fattibilità di un intervento di recupero termico.

Per ogni categoria, almeno in questa fase preliminare, saranno disponibili opzioni di compilazione come "informazione non disponibile" o "non applicabile". Per alcuni campi del database, inoltre, sono previste opzioni multiple, in quanto non di rado un singolo progetto coinvolge più fluidi di scarto, diverse tecnologie o destinazioni di utilizzo del calore. Il database contiene, infine, campi che potranno essere compilati con testo libero e altri da completare con opzioni a scelta. Si cercherà, tuttavia, nelle fasi successive, al fine di favorire il popolamento e la consultazione del database, di ridurre al minimo la compilazione con testo libero.

Al fine di validare la struttura del database è stato svolto un preliminare popolamento, utilizzando principalmente i risultati dell'attività di ricerca bibliografica effettuata. La definizione finale delle categorie del database sarà parallela all'avanzamento nel suo popolamento, affiancando al contributo bibliografico anche il coinvolgimento delle parti interessate come esco, aziende e fornitori di tecnologie.

In **Tabella 14** è riportata una descrizione dei campi inclusi nella versione preliminare del database.

CAMPI	DESCRIZIONE
<b>ID</b>	Codice numerico che identifica univocamente il progetto/tecnologia nel database.
<b>Tipologia fonte</b>	Tipologia di fonte dalla quale è stato reperito il progetto o la tecnologia di recupero (es. articolo in letteratura, progetti/database simili, fornitori di tecnologie ecc.).
<b>Riferimento fonte</b>	Informazioni identificative della fonte per garantirne il reperimento (es. "doi", URL, sito web ecc.).
<b>Stato di maturità del progetto/tecnologia</b>	Definisce lo stato della tecnologia di recupero o dell'applicazione (formulazione teorica, tecnologia in fase di sviluppo, tecnologia disponibile sul mercato, tecnologia consolidata, progetto implementato, progetto non implementato, in corso di implementazione, ecc.).
<b>Anno</b>	Anno di riferimento (es. anno di implementazione del progetto o anno di pubblicazione della fonte).
<b>Paese</b>	Per progetti implementati, paese nel quale il progetto è stato implementato. Per tecnologie di recupero, paese di riferimento del fornitore/produttore della tecnologia.
<b>Dimensioni impresa</b>	Definisce le dimensioni dell'azienda che ha realizzato il progetto di efficientamento energetico. Piccola, fino a 50 dipendenti; Media, da 51 a 250; Grande, più di 250 dipendenti.
<b>Settore</b>	Codice ATECO utilizzato per identificare il settore nel quale la compagnia opera. Quando possibile viene utilizzato il codice a quattro cifre (es. C23.13).
<b>Descrizione del progetto/tecnologia</b>	Descrizione del progetto/tecnologia di recupero di calore riportandone le principali caratteristiche.
<b>Processo</b>	Indica il processo dal quale viene recuperato calore (asciugatura, bollitura, pastorizzazione ecc.).
<b>Vettore sorgente</b>	Specifica il vettore energetico dai quali è possibile recuperato calore (es. acqua calda, olio diatermico, vapore).
<b>Temperatura sorgente</b>	Indica la temperatura alla quale è disponibile/recuperabile il calore di scarto.
<b>Portata sorgente</b>	Vettore sorgente la portata della sorgente disponibile al recupero di calore.
<b>Variabilità sorgente</b>	Descrive su scala temporale la variabilità nella continuità della sorgente (oraria, giornaliera, mensile, stagionale).
<b>Destinazione recupero</b>	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.).
<b>Tecnologia utilizzata</b>	Tecnologia rappresentativa del recupero termico (es. pompa di calore, scambiatore di calore, ORC ecc.).
<b>Tipo di Output</b>	Tipologia di vettore energetico (es. elettricità, energia termica, energia frigorifera) in output (effetto utile).
<b>Dimensioni</b>	Informazione sulla dimensione necessaria richiesta dalle apparecchiature per il progetto di recupero termico.
<b>Risparmio energia primaria</b>	Espresso in MWh, è riportato il risparmio totale annuo conseguibile o conseguito grazie all'implementazione del progetto.
<b>Metodo di calcolo</b>	Specifica che input è stato utilizzato per il calcolo delle voci di saving (fatture, metodologie standard, misuratori, stime ecc.).
<b>Risparmio economico</b>	Espresso in k€, è riportato il risparmio totale annuo conseguibile o conseguito grazie all'implementazione del progetto.
<b>Investimento</b>	Investimento iniziale necessario per l'implementazione del progetto.
<b>PayBack Period atteso</b>	Misura il tempo di ritorno dell'investimento (in questa sede non vengono effettuate considerazioni sul tasso di interesse e su meccanismi incentivanti).
<b>Incentivi</b>	In caso di progetti implementati indicare se si è avuto accesso ai meccanismi incentivanti (Si/No).
<b>Note e assunzioni di calcolo</b>	Altre informazioni rilevanti sul progetto/tecnologia di recupero di calore. Assunzioni adottate per il calcolo dei precedenti parametri (es. costo dell'energia elettrica e del gas ecc.).

**Tabella 14 Descrizione dei campi utilizzati nel database**

### 2.3.1 Primo popolamento del database e protocollo di indagine

Per la realizzazione del database è stato utilizzato in un primo momento un foglio di lavoro Excel, destinato all'utilizzo interno al gruppo di ricerca, utile soprattutto nelle prime fasi di validazione della struttura del database e delle prime raccolte dati. In una seconda fase è stata realizzata una versione del database su piattaforma Access, le cui modalità di utilizzo verranno descritte nel successivo paragrafo, destinata alla consultazione dell'utente esterno con l'obiettivo di migliorarne l'interfaccia e di renderlo interrogabile.

Sulla base delle risultanze dell'analisi di letteratura, è stato poi condotto un primo popolamento del database per effettuare una prima validazione della sua struttura.

Tale popolamento preliminare è stato affrontato soprattutto dal punto di vista metodologico, con l'obiettivo di inserire rilievi provenienti dalle diverse tipologie di fonti, in modo tale da testare la versatilità della struttura proposta. In particolare, sono stati inseriti rilievi provenienti da:

1. Letteratura scientifica (articoli scientifici);
2. Progetti simili esistenti (report di progetto);
3. Fornitori di tecnologie (sito web o catalogo);

In questa prima fase di popolamento sono state principalmente utilizzate le fonti provenienti dall'analisi di letteratura condotta le cui modalità e criteri sono stati descritti nel paragrafo 2.2.1 "Metodologia della ricerca". Inoltre, utilizzando le stesse parole chiave definite, tali fonti sono state integrate con ricerche sul web per ricercare cataloghi disponibili online sul sito web dei fornitori di tecnologie attivi nel settore del recupero di calore.

Per garantire la replicabilità e la coerenza del processo di popolamento del database viene definita una procedura da seguire per l'analisi delle informazioni riguardo le applicazioni e le tecnologie per poter essere incluse nel database.

Per tutte le diverse tipologie di fonti reperite è stato effettuato un primo screening per valutarne la pertinenza al progetto di ricerca. In particolare:

- Progetti/tecnologie per applicazioni a bassissime e basse temperature ( $\leq 250$  ° C);
- Applicazioni (o applicabilità) nel settore industriale.

Successivamente è stato effettuato un secondo screening atto a valutare la completezza dei dati disponibili. Sono state quindi identificate le informazioni minime che la fonte deve necessariamente contenere per poter essere correttamente inserita nel database:

- Intervallo di temperatura del calore di scarto in ingresso;
- Descrizione del progetto/tecnologia di recupero;
- Tipologia di fluido di scarto recuperato/recuperabile;
- Destinazione del recupero (es. produzione di energia elettrica, produzione di energia termica, produzione di energia frigorifera, ecc.).

Al termine di questa prima annualità di progetto il database conta 45 record provenienti principalmente da cataloghi disponibili online su sito web di fornitori di tecnologie (84%), articoli scientifici (11%), report di progetti (5%).

In [Tabella 15](#) viene riportato un breve estratto del database con alcuni esempi del suo preliminare popolamento.

Descrizione del progetto/tecnologia	Temperatura sorgente [°C]	Destinazione recupero	Tecnologia utilizzata	Tipologia fonte	Riferimenti fonte
Scambiatore di calore per il preriscaldamento dell'aria in ingresso alle asciugatrici mediante recupero di calore di scarto proveniente dall'asciugatrice a vapore principale.	120	Produzione energia termica	Scambiatore di calore	Report di progetto	Progetto EINSTEIN AT02 <a href="http://www.iee-einstein.org">www.iee-einstein.org</a>
Scambiatore di calore tra il calore di scarto del processo di finitura e l'ingresso del tunnel di lavaggio.	200	Produzione energia termica	Scambiatore di calore	Report di progetto	Progetto EINSTEIN AT02 <a href="http://www.iee-einstein.org">www.iee-einstein.org</a>
Progettazione di un sistema di recupero termico di calore da un flusso di gas a 120 °C tramite un ciclo ad assorbimento per generare contemporaneamente acqua refrigerata e acqua calda da utilizzare per il condizionamento di ambienti e / o riscaldamento di processo.	120	Produzione combinata di energia termica e frigorifera	Ciclo ad assorbimento acqua-ammoniaca	Articolo scientifico	[36]
Progettazione e sviluppo di un sistema di conversione di calore di scarto in energia elettrica. Il sistema basato sull'effetto "Shape Memory Alloy" (SMA) utilizza come sorgente acqua calda ad una temperatura inferiore a 100°C.	100	Produzione di energia elettrica	Exergyn Drive	Articolo scientifico	[37]
Recupero termico di calore da una miscela di vapori a 98°C dal processo di coacervazione per la produzione di gomma sintetica. Il calore recuperato viene utilizzato per riscaldare acqua da 95 a 110 °C tramite un trasformatore termico ad assorbimento (AHT) ed utilizzata in feedback al processo.	98	Produzione energia termica	Absorption Heat Transformer (AHT)	Articolo scientifico	[38]
Sviluppo di due pompe di calore per il recupero di calore adatte ad un uso industriale. Una pompa di calore fornisce acqua calda (90 °C) proveniente da acqua a 10 – 50 °C. La capacità è 547 kW e il COP è di 3,7. La seconda pompa di calore fornisce acqua calda (130 °C) proveniente da acqua a 55 °C. La capacità di riscaldamento e COP è di 627kW e 3.0, rispettivamente. Entrambe le pompe di calore utilizzano un compressore centrifugo azionato da un inverter.	10-55	Produzione energia termica	Pompa di calore centrifuga	Articolo scientifico	[39]
Modulo ORC serie LT (low temperature) modello ZE-75-LT di Zuccato Energia per la generazione di elettricità recuperando cascami termici da una grande varietà di processi industriali.	160	Produzione di energia elettrica	ORC	Catalogo fornitore	<a href="http://www.zuccatoenergia.it">www.zuccatoenergia.it</a>
Pompa di calore compatta per carichi di calore medio-piccoli. Dotata di compressore alternativo GEA Grasso V HP, disponibile in tre diverse dimensioni e adatto a tutte le comuni applicazioni a pompa di calore.	10-40	Produzione energia termica	Pompa di calore	Catalogo fornitore	<a href="http://gea.com/refrigeration">gea.com/refrigeration</a>

Tabella 15 Estratto del database con alcuni esempi del suo preliminare popolamento

Il popolamento del database, nel successivo biennio, verrà portato avanti con l'obiettivo di estendere il numero di rilievi e di sistematizzarne ulteriormente il processo di inserimento, introducendo regole di compilazione e tecniche per favorire la "coerenza" dei dati e la loro analisi. L'introduzione di regole, come ad esempio la normalizzazione delle categorie, ha mostrato di poter fornire un contributo significativo in applicazioni simili [12].

### 2.3.2 La consultazione del database

Parallelamente alla definizione dei campi del database, si è proceduto alla preliminare definizione delle possibili query da utilizzare per la consultazione dello stesso. Il criterio scelto per la selezione delle query più opportune è stato quello di favorire l'utilizzo e la comprensione dello strumento sviluppato. Per l'individuazione delle query di base, si è partiti dalla conoscenza di quelle che necessariamente devono essere le informazioni disponibili all'utilizzatore per permettere una preliminare valutazione di un possibile intervento di recupero termico di calore.

In **Tabella 16** sono riportate le query selezionate con una descrizione delle stesse:

QUERY	DESCRIZIONE
<b>Temperatura sorgente</b>	Indica la temperatura alla quale è disponibile il calore destinato al recupero (per definiti range di temperatura selezionabili).
<b>Tipologia sorgente</b>	Tipologia del vettore disponibile/utilizzabile per il recupero termico.
<b>Tipologia recupero</b>	Indica l'output di interesse dal progetto di recupero termico (es. produzione di calore, produzione di freddo, produzione di energia elettrica, ecc.).
<b>Maturità progetto/tecnologia</b>	Tipologia di progetto/tecnologia da consultare (es. progetto implementato, fornitori di tecnologie, applicazione teorica ecc.)
<b>PBP atteso</b>	Tempo di ritorno dell'investimento atteso (per definiti range selezionabili).

**Tabella 16 Query a disposizione dell'utente**

Ognuna delle query a disposizione è costituita da un campo chiuso, attraverso il quale l'utente può scegliere tra opzioni predefinite. Le query saranno suddivise in campi obbligatori e campi facoltativi che non dovranno essere necessariamente selezionati. In questa prima versione del database l'unica query obbligatoria individuata è la temperatura della sorgente, in quanto informazione imprescindibile e discriminante nella valutazione e nella scelta della tecnologia più opportuna per una potenziale opportunità di recupero termico di calore di scarto.

Come necessario per la definizione delle categorie, soprattutto per la selezione delle query è necessario un periodo di valutazione consistente parallelamente all'avanzamento nel popolamento del database. A tal proposito, come previsto nel successivo biennio del progetto di ricerca, sarà essenziale il coinvolgimento delle parti interessate, che forniranno un feedback sull'effettiva efficacia e la fruibilità dello strumento.

In **Tabella 17** sono riportate le voci di compilazione selezionate per ogni query:

Temperatura sorgente *	Tipologia sorgente	Destinazione recupero	Maturità progetto/tecnologia	PBP
≤100°C	Acqua	Produzione di energia elettrica	Progetto implementato	≤ 3 anni
100°C<T≤150°C	Aria	Produzione di energia termica	Progetto non implementato	≤ 4 anni
150°C<T≤200°C	Fumi di combustione	Produzione di energia frigorifera	Progetto in corso di implementazione	≤ 5 anni
200°C<T≤ 250°C	Vapore	Scambio termico	Progetto in fase di progettazione preliminare	≤ 7 anni
-	Vapori di scarto	Produzione combinata di energia termica e frigorifera	Formulazione teorica	≤ 10 anni
-	Olio diatermico	Produzione combinata di energia termica ed elettrica	Tecnologia in fase di sviluppo	Non dichiarato
-	Acqua glicolata	Produzione combinata di energia elettrica e frigorifera	Tecnologia disponibile sul mercato	-
-	Altro	-	Tecnologia consolidata	-

*I campi contrassegnati con \* identificano le query obbligatorie*

**Tabella 17 Versione preliminare delle query definite per la consultazione del database**

### 2.3.3 L'utilizzo del database

Il database preliminarmente realizzato su foglio di lavoro Excel, destinato all'utilizzo interno al gruppo di ricerca, è stato utilizzato come base per la realizzazione di una versione del database su piattaforma Access destinata alla consultazione dell'utente esterno, con l'obiettivo di migliorarne l'interfaccia e di renderlo interrogabile.

Il database segue fedelmente la struttura descritta nel precedente paragrafo, ad eccezione dell'introduzione di tre campi di ricerca inseriti per favorirne la consultazione ma che non aggiungono informazioni a quanto precedentemente raccolto. In particolare:

1. Tipologia di record: tale campo è finalizzato a suddividere i record in due sottocategorie, *applicazioni* e *tecnologie*, al fine di permettere una consultazione più agevole del database;
2. Range di temperatura: suddivide i record in quattro tipologie in funzione del range di temperatura del calore di scarto in ingresso in accordo con le query definite e consultabili in [Tabella 17](#);
3. Tempo di ritorno dell'investimento atteso: suddivide i record in sei tipologie in funzione del PBP atteso in accordo in accordo con le query definite e consultabili in [Tabella 17](#).

All'apertura del file Access, viene mostrata automaticamente all'utente una schermata principale, riportata in [Figura 17](#), in cui viene brevemente descritto il database, il suo obiettivo e la sua struttura e ne vengono descritte la modalità di consultazione.

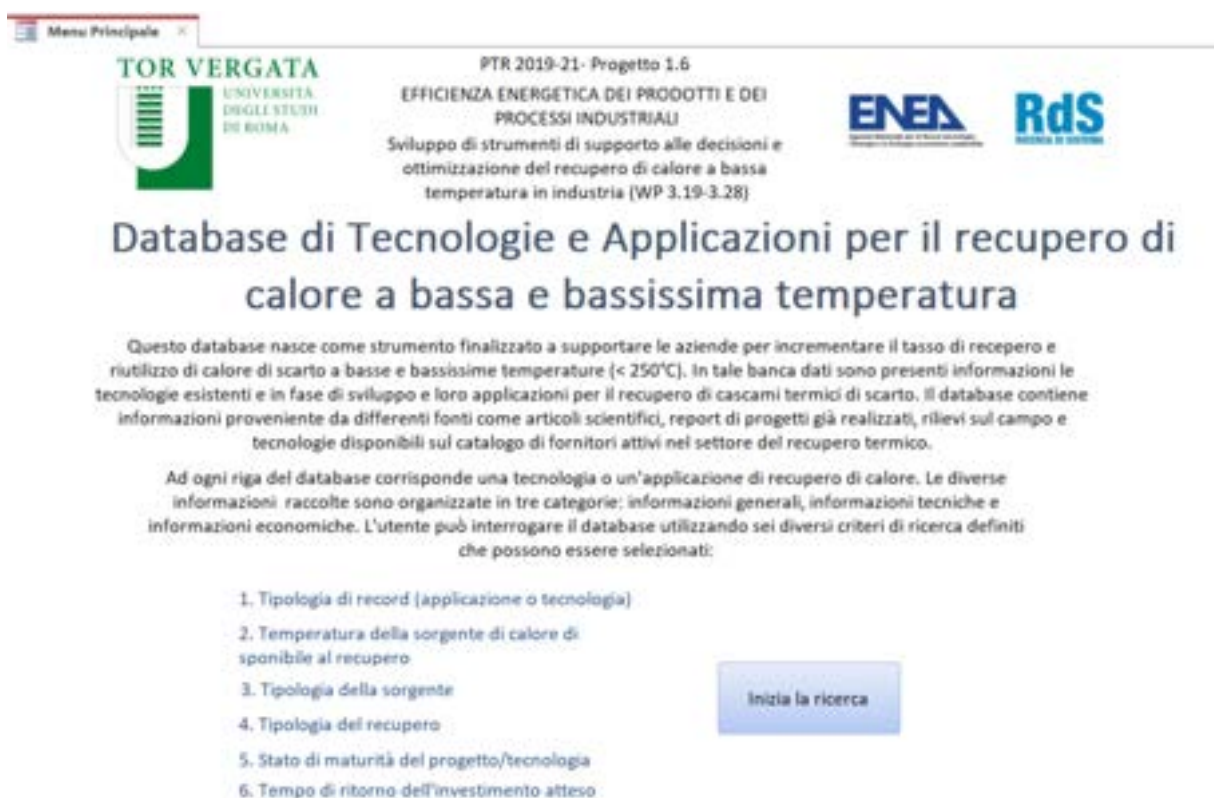


Figura 17 Menù principale del database

Cliccando sul pulsante "Inizia la ricerca" (visibile in [Figura 17](#)) si otterrà l'apertura automatica della maschera di ricerca riportata in [Figura 18](#), attraverso la quale potrà avvenire la consultazione del database.

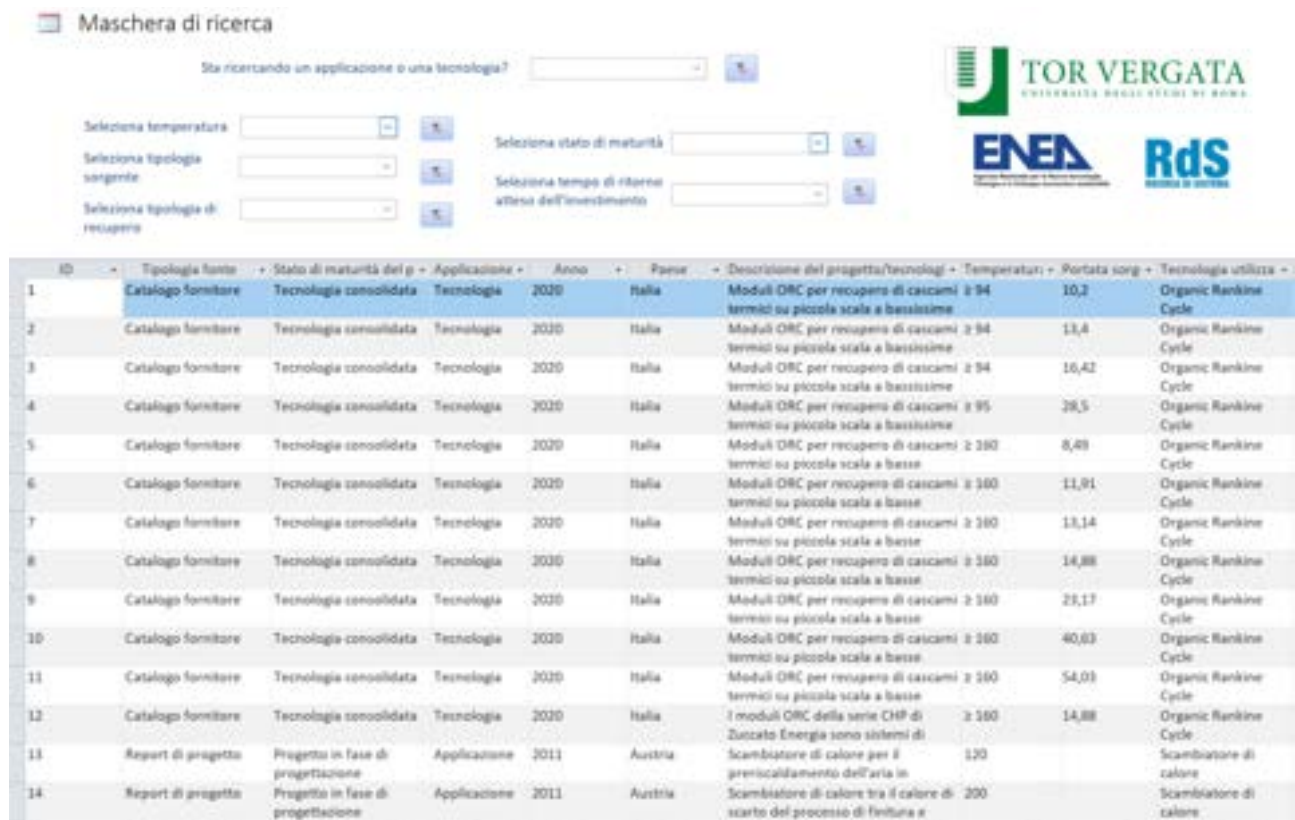


Figura 18 Maschera di ricerca del database sviluppato

All’apertura della maschera di ricerca verranno mostrati tutti i record contenuti nel database. Interrogando il database con differenti criteri previsti (parte alta della maschera di ricerca, Figura 18), i record verranno filtrati in accordo con i parametri inseriti.

## 2.4 Conclusioni del capitolo

Nel presente capitolo sono state descritte tutte le attività che hanno portato allo sviluppo di una preliminare versione di un database in grado di contenere tecnologie e applicazioni per il recupero termico di calore di scarto a bassa temperatura. L’obiettivo di tale strumento è quello di guidare realtà aziendali nella valutazione e ottimizzazione dei processi di recupero del calore.

Dall’esigenza di realizzare uno strumento completo ma allo stesso tempo fruibile alle aziende, supportati dalla ricerca bibliografica svolta, è stata identificata una struttura del database costituita da venticinque campi (Tabella 14) e cinque query (Tabella 16) a disposizione dell’utente per la consultazione dello stesso. Il database progettato è stato inoltre sottoposto ad una prima validazione attraverso un preliminare popolamento di natura metodologica con l’obiettivo di inserire rilievi provenienti dalle diverse tipologie di fonti, in modo tale da testare la versatilità della struttura proposta.

Tale popolamento ha presentato delle criticità dal punto di vista della sua completezza, dovute sia alla tipologia di fonti utilizzate per il preliminare popolamento del database (provenienti per lo più dalla ricerca bibliografica svolta) sia alla struttura scelta caratterizzata da un elevato numero di campi da compilare. Molte fonti non riportavano le informazioni minime necessarie e pertanto non sono state inserite. Sebbene abbia mostrato delle problematiche per quanto riguarda la completezza nel popolamento, la struttura proposta è stata al momento ritenuta la più adatta, in quanto contenente tutte le informazioni che, se disponibili, possono risultare utili nella valutazione di un’opportunità/tecnologia di recupero di calore.

Un ulteriore obiettivo del prossimo biennio sarà quello di sistematizzare la compilazione del database, riducendo il numero di campi a compilazione libera fornendo, per il maggior numero di categorie possibili, opzioni di compilazione predefinite.

Nella fase successiva del progetto sarà possibile ed essenziale il confronto con le parti interessate, come aziende, ESCo e fornitori di tecnologie, le quali potranno dare una valutazione dell'effettiva efficacia dello strumento e contribuire all'apporto delle eventuali modifiche necessarie. In particolare, nella successiva annualità del progetto di ricerca (annualità 2020), verranno organizzate delle interviste mirate a fornitori di tecnologie operanti del mercato italiano con lo scopo di consolidare le conoscenze relative alle tecnologie esistenti nel campo del recupero di calore e allo stesso tempo cogliere le innovazioni legate agli aspetti tecnologici approfondendo tecnologie molto promettenti come, ad esempio, la generazione micro-ORC e le pompe di calore ad alta temperatura.

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

#### 3.1 *Lo stato dell'arte: metodologie per l'analisi dei flussi energetici e la valutazione del recupero termico*

In questo capitolo verrà presentata la prima definizione di una metodologia per l'identificazione e la mappatura dei flussi energetici e per la loro analisi finalizzata all'individuazione e alla valutazione di opportunità di recupero termico di calore di scarto.

Così come per le altre fasi in oggetto a questa prima annualità del progetto ricerca, lo sviluppo di questa metodologia è stato supportato da un'approfondita analisi della letteratura scientifica, con l'obiettivo di individuare le best practices utilizzate nell'ambito dell'analisi e diagnosi di sistemi energetici, con particolare riferimento ai vettori di natura termica.

In seguito, verranno descritti alcuni dei lavori analizzati, focalizzando l'attenzione sui risultati che sono stati ritenuti particolarmente significativi e che sono stati presi come riferimento per l'impostazione della metodologia proposta.

In [40] viene proposta una metodologia atta ad identificare e definire, in maniera quantitativa, il potenziale di recupero del calore di scarto dai diversi processi e sistemi di un sito industriale (processi operativi, utilities, sistemi di generazione, sistemi di raffreddamento, sistemi di riscaldamento, ecc.). Attraverso la caratterizzazione del profilo termico delle sorgenti di calore di scarto e l'utilizzo di modelli matematici sviluppati specificatamente per le differenti tecnologie, vengono analizzate le possibili soluzioni tecnologiche disponibili ed individuate quelle che permettono di massimizzare il recupero di energia.

La metodologia proposta si articola in diverse fasi:

- Estrazione delle informazioni utili dalle potenziali sorgenti di calore di scarto;
- Caratterizzazione del profilo termico delle potenziali sorgenti di calore di scarto del sito (Figura 19);
- Utilizzo del profilo termico per una valutazione preliminare sulla temperatura del recupero termico (ai nodi del profilo termico);
- Selezione delle possibili tecnologie per le diverse temperature;
- Utilizzo di modelli semplificati per le tecnologie disponibili, al fine di valutare e quantificare l'energia utile ottenibile sotto forma di energia elettrica, termica o frigorifera per le temperature preliminarmente individuate;
- Identificazione delle tecnologie, e delle corrispondenti temperature di utilizzo, in grado di garantire il maggiore effetto utile in termini di energia recuperata;
- Valutazione dell'impatto del recupero del calore sull'efficienza energetica del sito.

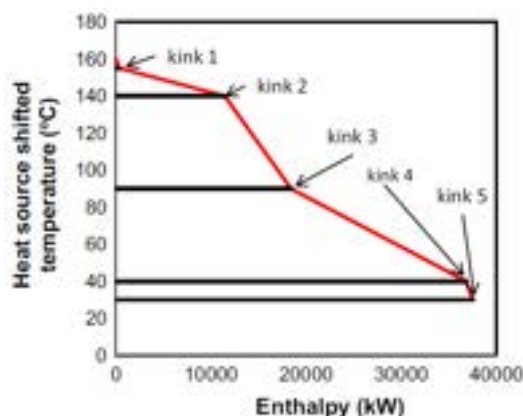


Figura 19 Esempio di profilo di temperatura delle potenziali sorgenti di calore di scarto di un sito industriale [40]

La fase chiave e caratteristica della metodologia introdotta è rappresentata dallo sviluppo e dall'analisi dei profili termici delle sorgenti di calore di scarto.

Il profilo termico globale, rappresentativo delle sorgenti di calore di scarto, per un intero sito industriale, viene costruito mediante la composizione dei profili delle singole sorgenti disponibili al recupero termico. Per la creazione di tale profilo, vengono innanzitutto estratti i dati relativi al calore di scarto disponibile (es. temperatura, portata, destinazione, natura del fluido, limiti operativi, limiti fisici, ecc.). Il profilo della sorgente di calore viene generato tracciando la temperatura della fonte, incrementata di un'adeguata quantità al fine di garantire la fattibilità dello scambio termico (circa 10°C). Generato il profilo, è possibile individuare le più appropriate tecnologie di recupero del calore residuo che possono operare all'interno dei range di temperatura disponibili. Infine, la tecnologia selezionata e la temperatura al quale il recupero termico sarà dimensionato saranno determinate massimizzando l'energia recuperata (sotto forma di energia elettrica, termica o frigorifera) [40].

La metodologia sopra descritta è riportata schematicamente in Figura 20.

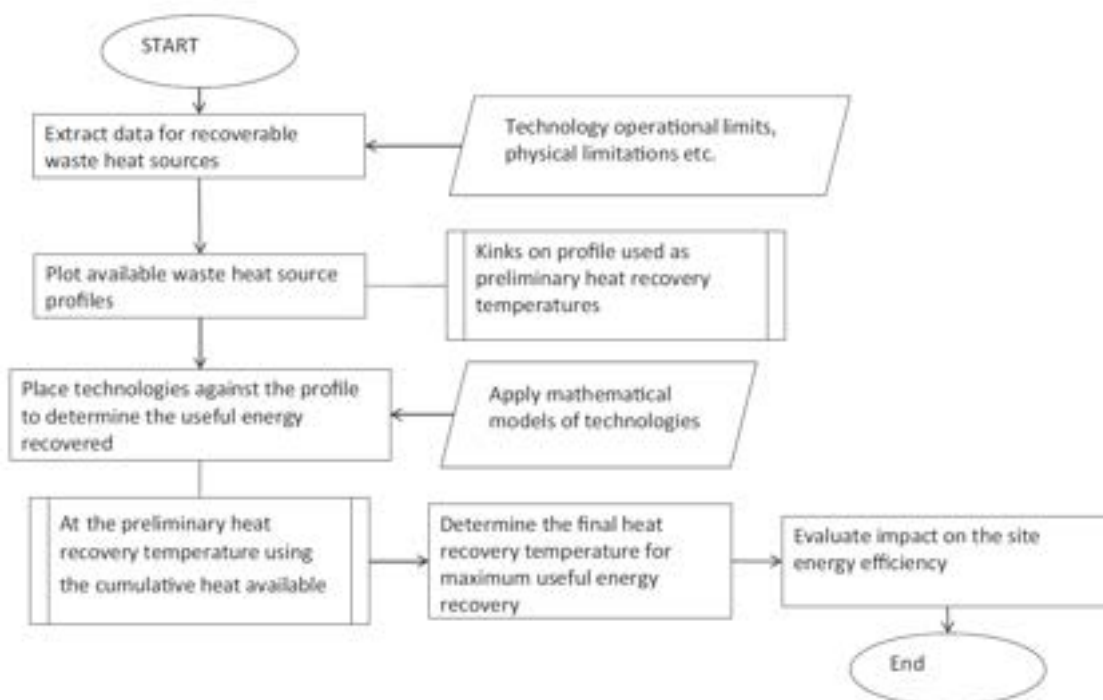


Figura 20 Rappresentazione schematica della metodologia proposta da [40]

Con lo stesso obiettivo di analizzare e selezionare la soluzione più appropriata per ottimizzare un processo di recupero di calore di scarto in uno scenario industriale, si ritiene interessante l'analisi della metodologia proposta in [41].

Riportata schematicamente in Figura 21, la metodologia proposta in [41] si articola in quattro macro-fasi:

1. Waste Heat Survey: dove vengono identificate le sorgenti di calore di scarto disponibili e ne vengono raccolte le informazioni caratteristiche (temperatura, portata, provenienza);
2. Waste Heat Assessment: dove vengono effettuate le analisi qualitative e quantitative del flusso termico disponibile;
3. Technology Selection: sulla base delle risultanze delle precedenti fasi e tramite l'introduzione di criteri di selezione, vengono individuate le possibili soluzioni tecnologiche confrontando i parametri chiave all'interno di database di tecnologie disponibili;
4. Decision Support: vengono analizzate le varie alternative proposte sulla base di valutazioni tecniche, economiche ed ambientali (emissioni di CO<sub>2</sub>).

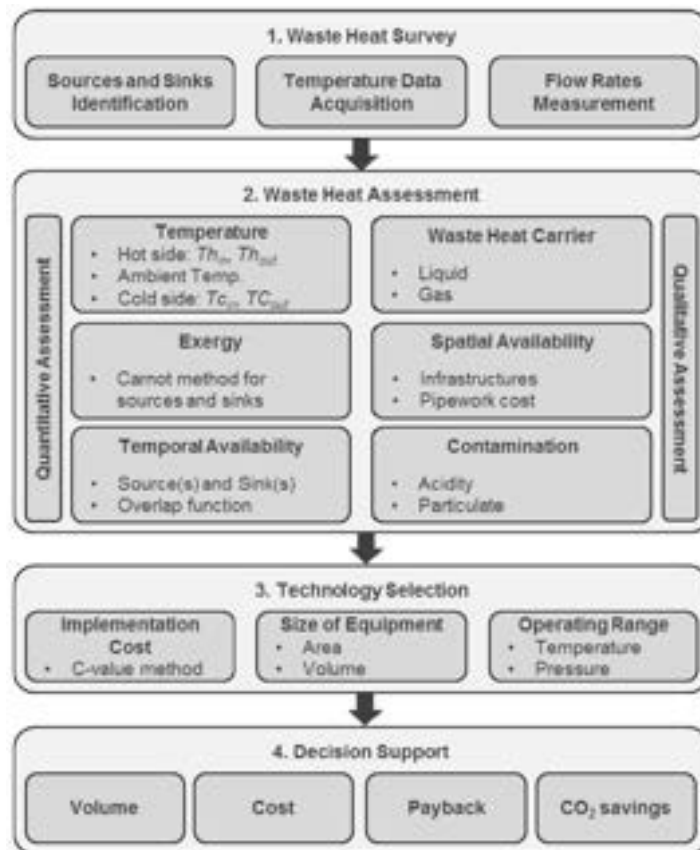


Figura 21 Schema a blocchi della metodologia proposta in [41].

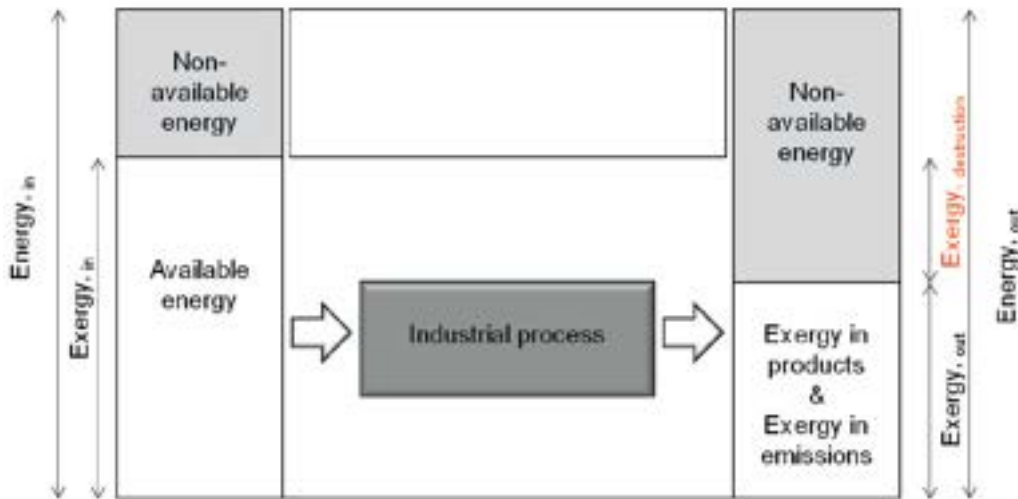
Tale metodologia è stata sviluppata specificatamente per la valutazione di soluzioni di recupero termico, che, tramite l'utilizzo di scambiatori di calore, permettono di recuperare calore da una sorgente a temperatura maggiore, il quale poi potrà essere utilizzato come sorgente di calore per processi caratterizzati da temperature inferiori. Sebbene il focus di questo progetto sia più generale nell'affrontare le diverse soluzioni di recupero termico di calore, non limitandosi solo alle soluzioni che prevedono esclusivamente l'utilizzo di scambiatori di calore, la struttura della metodologia descritta in [41] presenta molti punti in comune con gli obiettivi prefissati per questo lavoro di ricerca.

In particolare, la fase 3 di "Technology Selection" può essere implementata facilmente con il database preliminarmente sviluppato e precedentemente descritto nel capitolo 2, mentre la fase 4 di "Decision

Support” sarà supportata dal lavoro di ENEA che, nel corso del successivo biennio, si pone l’obiettivo di sviluppare delle metodologie per l’analisi economica di investimenti.

Inoltre, sempre riferendoci al lavoro di [41], si vuole sottolineare l’utilizzo di un’analisi di tipo exergetico, approccio piuttosto comune nella valutazione del potenziale energetico di flussi di calore di scarto.

Quando si parla di calore di scarto a bassa temperatura, un approccio di tipo puramente energetico può non essere sufficiente a distinguere tra energia recuperabile e non recuperabile. Come riportato schematicamente in [Figura 22](#), in alcuni casi può risultare conveniente introdurre un approccio di tipo exergetico, utile per identificare e quantificare l’energia recuperabile per ciascun processo [42].



**Figura 22 Energia ed Exergia nei processi industriali [42]**

L'exergia di un flusso di calore dipende dalla temperatura dell'ambiente di riferimento e pertanto viene espressa tramite l'utilizzo del fattore di efficienza di Carnot [42],[14]:

$$E_x = \dot{Q} \left( 1 - \frac{T_{amb}}{T_H} \right) = \dot{Q} \cdot \eta_c$$

Per le applicazioni in esame,  $\dot{Q}$  rappresenta il calore di scarto disponibile al recupero,  $T_{amb}$  è la temperatura dell’ambiente esterno (o più in generale la temperatura del sistema a temperatura inferiore), mentre  $T_H$  è la temperatura del calore di scarto disponibile (il sistema a temperatura superiore). L’exergia risulta essere nulla quando i due sistemi sono in equilibrio termico [42].

Poiché la temperatura alla quale è disponibile il calore di scarto ha un impatto drammatico sulla fattibilità della possibilità di recupero del calore, è importante che nella valutazione delle opportunità di recupero si consideri sia la quantità di calore di scarto sia la sua qualità [14].

In particolare, in [41], nell’ipotetico caso in cui si disponga di diverse sorgenti di calore di scarto (sources) e di diversi possibili utilizzatori di calore a temperatura inferiore (sinks), questo tipo di approccio è utilizzato per valutare quale tra le combinazioni possibili massimizza l’effetto utile del recupero termico di calore.

Il primo passo necessario prevede di definire, per ogni potenziale accoppiamento sorgente-pozzo, le potenze termiche in gioco:

$$P_{source}(t) = \dot{m}_{source}(t) \cdot c_{p_{source}} \cdot \Delta T_{source}(t) \cdot \left( 1 - \frac{T_{amb}(t)}{T_{h,in}(t)} \right)$$

$$P_{sink}(t) = \dot{m}_{sink}(t) \cdot c_{p_{sink}} \cdot \Delta T_{sink}(t) \cdot \left( 1 - \frac{T_{amb}(t)}{T_{c,out}(t)} \right)$$

Dove  $\dot{m}$  rappresenta la portata massica del fluido ( $kg/s$ ),  $c_p$  il suo calore specifico ( $kJ/kgK$ ),  $\Delta T$  è la differenza di temperatura del fluido tra lato caldo e lato freddo,  $T_{amb}$  è la temperatura ambiente,  $T_{h,in}$  è la temperatura in ingresso del fluido caldo, mentre  $T_{c,out}$  è la temperatura in uscita del fluido freddo.

I valori di exergia per la sorgente ed il pozzo possono essere calcolati integrando la potenza sopra definita nell'intervallo temporale  $[0 - T]$  preso in considerazione:

$$Ex_{source} = \int_0^T P_{source}(t) dt$$

$$Ex_{sink} = \int_0^T P_{sink}(t) dt$$

Per calcolare l'energia effettivamente recuperabile, è necessario considerare la disponibilità temporale congiunta del calore di scarto disponibile e la richiesta energetica. L'energia recuperabile per una coppia sorgente-pozzo può essere calcolata come l'integrale nell'intervallo  $[0 - T]$  di una funzione detta di "sovrapposizione" delle due quantità:

$$Ex_{source,sink} = \int_0^T O_{source,sink}(t) dt \quad \text{dove} \quad O_{source,sink}(t) = \begin{cases} P_{sink}(t) & \text{se } P_{sink}(t) < P_{source}(t) \\ P_{source}(t) & \text{se } P_{sink}(t) \geq P_{source}(t) \end{cases}$$

Grazie alla definizione di queste quantità, è possibile definire l'indice di recupero termico RI (Recovery Index) come il rapporto tra l'energia recuperabile ( $Ex_{source,sink}$ ) e l'energia totale disponibile ( $Ex_{source}$ ):

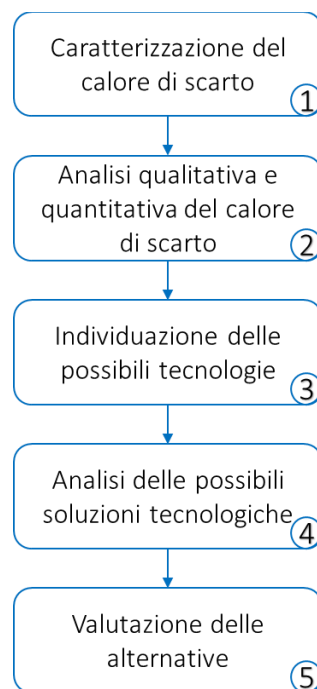
$$RI_{source,sink} = \frac{Ex_{source,sink}}{Ex_{source}}$$

L'indice RI rappresenta la frazione massima della sorgente che è possibile recuperare e permette di confrontare diverse soluzioni disponibili. È bene osservare che, sebbene la definizione di questi indici permetta di individuare gli accoppiamenti migliori tra sorgenti e pozzi, essi non possono essere utilizzati come variabile esclusiva nella selezione di alternative di recupero termico, ma devono essere valutati congiuntamente ad altre caratteristiche (disponibilità, fattibilità tecnica, fattibilità economica ecc.).

In conclusione, sebbene la metodologia proposta da [41] sia stata sviluppata specificatamente per la valutazione di soluzioni di recupero termico tramite l'utilizzo di scambiatori di calore, si ritiene che sia la struttura sia le tecniche di analisi dei flussi termici utilizzati possano essere facilmente generalizzabili ed utilizzabili nell'ambito di questo progetto di ricerca.

### 3.2 Metodologia per l'analisi dei flussi energetici e la valutazione del potenziale di recupero termico

Sulla base delle risultanze dell'analisi di letteratura svolta, è stata individuata una metodologia che definisce i passi da seguire per condurre un'analisi energetica alla base della valutazione di un progetto di recupero termico. Le principali fasi della metodologia proposta, disponibile preliminarmente a livello di diagrammi di flusso, sono riportate schematicamente in [Figura 23](#).



**Figura 23 Diagramma di flusso della metodologia proposta**

### 3.2.1 Le fasi della metodologia

Il primo passo per poter analizzare dal punto di vista energetico un processo di scambio termico prevede necessariamente la caratterizzazione della sorgente dalla quale poter recuperare calore. Individuate le potenziali sorgenti ed eventualmente i potenziali pozzi di calore a bassa temperatura (per i quali, come già dichiarato precedentemente, sarà possibile trovare un commento più diffuso nel lavoro svolto da ENEA), sarà necessario caratterizzare i flussi energetici coinvolti. Possono essere individuate due categorie di descrittori [41]:

Descrittori quantitativi:

- Temperatura e portata della sorgente e di eventuali pozzi di calore individuati;
- Temperatura dell'ambiente esterno;
- Informazioni sulla disponibilità e fabbisogni energetici interessati;
- Densità e calore specifico dei fluidi coinvolti nel processo di recupero termico.

Descrittori qualitativi:

- Tipologia dei fluidi coinvolti nello scambio termico;
- Accessibilità e vincoli progettuali allo sfruttamento del calore di scarto;
- Indicazioni su specifici vincoli o requisiti per il trattamento del calore di scarto (es. rischio di contaminazione, necessità di trattamenti preliminari, ecc.)

La conoscenza delle variabili sopra elencate è indispensabile sia per la quantificazione del calore di scarto sia per la valutazione delle possibili tecnologie implementabili.

Lo sviluppo delle successive fasi della metodologia ha rappresentato un aspetto critico che si ritiene necessario evidenziare.

Visto l'ampio spettro delle tecnologie di recupero termico su cui questo lavoro vuole concentrarsi, risulta difficile sviluppare una metodologia che sia generale ma che allo stesso fornisca risultati sufficientemente

esaustivi. Il tipo di tecnologia di recupero utilizzata, ma soprattutto la destinazione di utilizzo del calore di scarto recuperato, rendono necessario l'utilizzo di metodi di analisi e valutazione differenti.

A tal proposito, sarà quindi necessario, oltre a caratterizzare il processo di recupero termico dal punto di vista della sorgente, individuare delle potenziali destinazioni di utilizzo, alle quali corrisponderanno determinate tecnologie. Si propone quindi di utilizzare una metodologia in accordo con quanto proposto da [40], dove, a partire dai dati caratteristici delle potenziali sorgenti di calore di scarto recuperabili, si selezionano e si valutano le possibili tecnologie applicabili per le caratteristiche del flusso di scarto in esame (range di temperatura disponibile, natura del fluido, ecc.).

Come risultato della ricerca bibliografica svolta e descritta nel paragrafo 2.2.2, le varie tecnologie e soluzioni per il recupero termico possono essere suddivise per destinazione di utilizzo del calore di scarto. Tra le principali si riportano:

- Recupero di calore per produzione di energia elettrica;
- Recupero di calore per produzione di calore a temperatura più elevata;
- Recupero di calore per soddisfare richieste termiche a temperature inferiori;
- Recupero di calore per produzione di freddo;
- Soluzioni ibride;
- Storage termico.

Come obiettivo del successivo biennio di ricerca si propone di realizzare modelli matematici semplificati per alcune di queste categorie riportate, verosimilmente le più rappresentative, attraverso l'analisi delle tecnologie specifiche che maggiormente le caratterizzano (pompe di calore, ORC, ecc.). L'utilizzo di tali modelli permetterà di analizzare in maniera dettagliata le differenti tecnologie potenzialmente applicabili, permettendo una più efficace valutazione delle potenzialità e dei parametri caratteristici del recupero di calore.

L'ultima fase della metodologia prevede la valutazione ed il confronto delle possibili alternative. A tal proposito risulterà particolarmente utile l'integrazione con il lavoro che verrà realizzato da ENEA nel successivo biennio, per lo sviluppo di una metodologia per l'analisi economica degli interventi di recupero termico. L'obiettivo sarà quindi quello di affiancare agli output che emergeranno dall'analisi delle possibili soluzioni tecnologiche strumenti di carattere economico, come la valutazione dell'investimento e gli indici di redditività del medesimo, quali il valore attuale netto (VAN) e il PBP attualizzato.

In conclusione, si riporta in maniera sintetica una descrizione delle varie fasi previste dalla metodologia identificata:

1. **Caratterizzazione del calore di scarto:** raccolta delle informazioni, delle variabili significative e di tutti i dati necessari a condurre le successive analisi dei flussi energetici e la valutazione delle possibili soluzioni per il recupero termico;
2. **Analisi qualitativa e quantitativa del calore di scarto:** analisi dei flussi energetici coinvolti seguendo le buone pratiche rilevate durante l'attività di ricerca bibliografica descritta, in particolare la generalizzazione di quelle dedotte dalla metodologia proposta da [41];
3. **Individuazione delle possibili tecnologie:** tramite l'utilizzo del database di tecnologie ed opportunità di recupero disponibili, si individuano le possibili soluzioni, in funzione dei parametri chiave individuati nella fase 1 e di una prima valutazione delle possibili destinazioni del calore di scarto da recuperare;
4. **Analisi delle possibili soluzioni tecnologiche:** in analogia con la metodologia proposta da [40], tramite l'eventuale utilizzo di modelli matematici semplici dedicati, verranno analizzate e valutate le diverse tecnologie e soluzioni per il recupero termico di calore individuate;

5. **Valutazione delle alternative:** le soluzioni analizzate verranno tra loro confrontate tramite l'utilizzo di parametri tecnici (come rendimento di conversione, efficienza, percentuale di sfruttamento della fonte di calore di scarto, risparmio di energia primaria, ecc.), parametri economici (investimento iniziale, VAN, PBP, ecc.) e ambientali (emissioni di CO<sub>2</sub>).

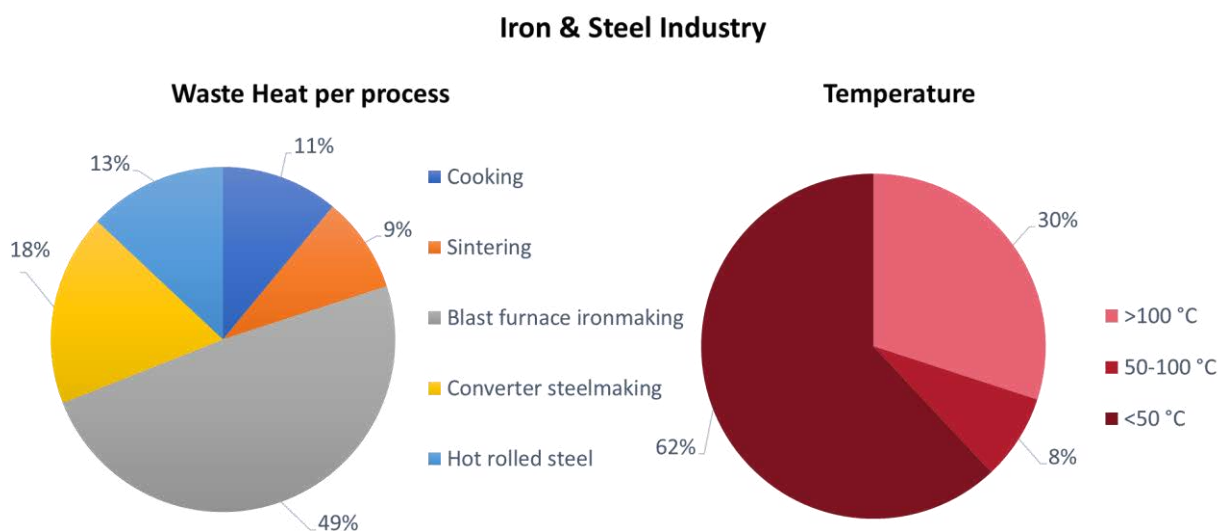
### 3.3 Rappresentazione dei flussi termici

Una sezione di questo lavoro di ricerca è stata dedicata all'identificazione di strumenti utili alla rappresentazione dei flussi energetici in gioco nell'ambito dei processi di recupero di calore. L'obiettivo è stato quello di individuare metodi grafici che siano in grado di fornire, in maniera immediata, numerose informazioni necessarie alla comprensione e distinzione delle opportunità di recupero termico, come ad esempio il contenuto energetico dei vettori interessati ed informazioni circa la loro natura.

#### 3.3.1 Grafici a torta

Il grafico a torta è un tipo di diagramma utilizzato per rappresentare graficamente le dimensioni relative delle parti di un intero. Viene costruito dividendo una forma circolare in spicchi, ciascuno per ogni categoria da rappresentare, la cui ampiezza è inoltre proporzionale al contributo di tale categoria espresso in percentuale rispetto al valore finale. Vista la semplicità costruttiva del diagramma e la sua immediata leggibilità, è uno strumento utilizzato in svariati ambiti tra cui la rappresentazione dei flussi energetici.

Un esempio applicativo, che mostra come tale strumento può essere utilizzato per rappresentare flussi di calore di scarto, è riportato in [Figura 24](#), dove, tratto da [43], vengono riportate le proporzioni e le temperature del calore di scarto per differenti processi industriali del settore metallurgico (Iron&Steel). In particolare, possono essere utilizzati diversi colori per rappresentare i differenti livelli di temperatura.



**Figura 24** Proporzioni e temperature del calore di scarto per differenti processi industriali [43]

Per quanto riguarda le applicazioni relative a questo progetto, i grafici a torta risultano uno strumento valido per la rappresentazione di flussi energetici in gioco in un processo di recupero termico; in particolare, possono essere utilizzati efficacemente in quei casi dove il numero di informazioni rilevanti è contenuto. Il vantaggio dell'utilizzo del metodo grafico del diagramma a torta è quello di poter fornire, parallelamente ad informazioni quantitative, anche altri tipi di informazioni come le temperature o la natura dei fluidi coinvolti, utilizzando opportune scale di colore.

Per fornire un esempio dell'utilizzo di tale strumento, viene analizzata una semplice situazione in cui un flusso di calore di scarto viene recuperato al fine di energizzare un secondo fluido attraverso uno scambiatore di calore. Selezionando alcuni parametri caratteristici, riportati in [Tabella 18](#), e seguendo il diagramma di

scambio termico schematizzato in Figura 25 per uno scambiatore in controcorrente, è stata realizzata una panoramica grafica dello scambio termico, utilizzando appunto i grafici a torta.

Parametro	Valore	Descrizione
$\Delta T_c$	20 °C	Differenza di temperatura tra i due fluidi al lato caldo
$\Delta T_f$	15 °C	Differenza di temperatura tra i due fluidi al lato freddo
$\epsilon$	0,85	Efficienza dello scambiatore
$T_{in,c}$	100 °C	Temperatura di ingresso del fluido caldo
$T_{in,f}$	25 °C	Temperatura di ingresso del fluido freddo

Tabella 18 Parametri caratteristici dello scambio termico

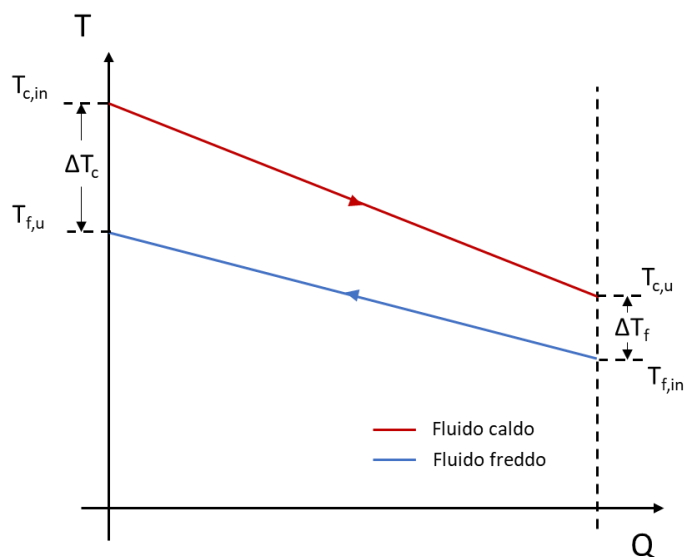


Figura 25 Diagramma di scambio termico controcorrente

In Figura 26, il grafico a torta per la situazione in esame è stato realizzato seguendo una scala di colori corrispondenti a determinati intervalli di temperatura.

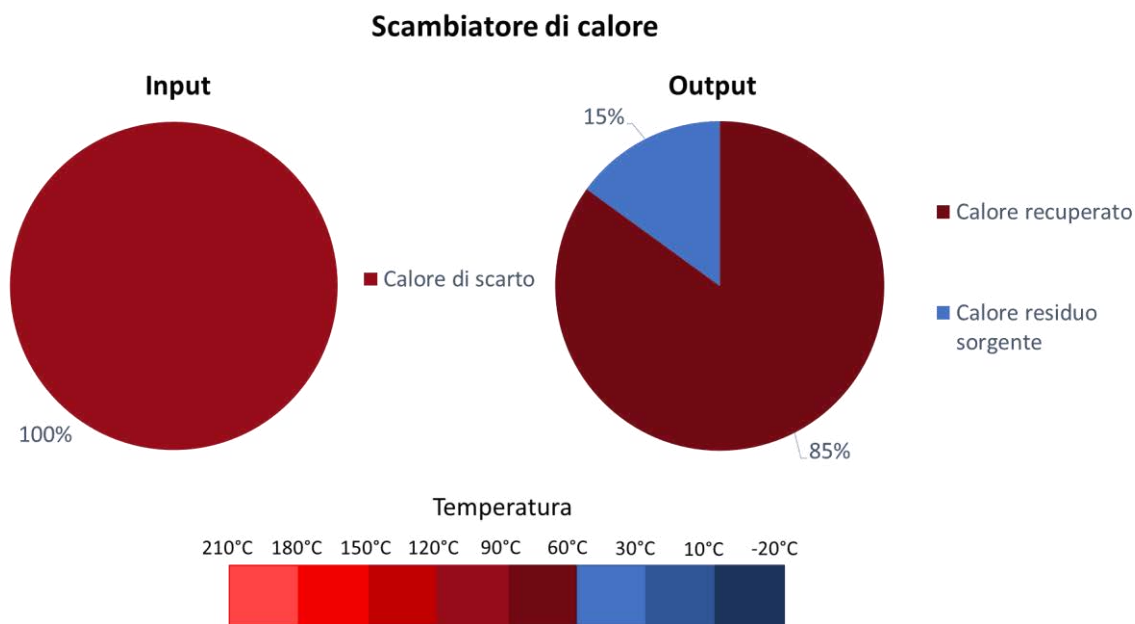


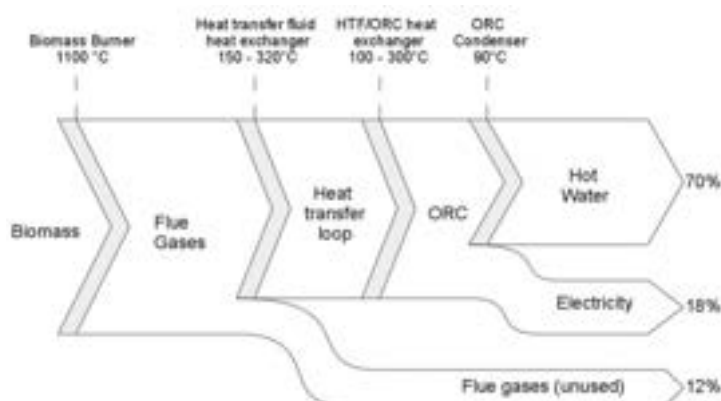
Figura 26 Diagramma a torta per la rappresentazione di un processo di recupero termico

### 3.3.2 Sankey Diagram

L'utilizzo dei grafici a torta, sebbene risulti molto semplice e permetta un'immediata comprensione delle variabili in esame, può presentare limiti in situazioni più complesse nelle quali è preferibile l'utilizzo di altri strumenti.

Tra questi, il diagramma Sankey è uno strumento efficace per rappresentare flussi energetici e la loro distribuzione all'interno di vari sistemi [44]. È costituito da frecce, il cui spessore è proporzionale alle dimensioni del flusso di energia. Nell'ambito di un progetto di recupero termico, tale diagramma può rappresentare i trasferimenti energetici, sia utili sia dispersi, associati al processo che si intende analizzare. Può avere una complessità variabile, che dipende sostanzialmente dal tipo di sistema analizzato e dal livello di dettaglio dei dati a disposizione.

In [Figura 27](#) si riporta un esempio di applicazione del Sankey Diagram per la rappresentazione dei flussi energetici in gioco per un ciclo ORC in assetto cogenerativo [45].



**Figura 27 Esempio dell'utilizzo di un Sankey Diagram per la rappresentazione dei flussi energetici in gioco per un ciclo ORC in assetto cogenerativo [45]**

L'immagine permette di riconoscere gli elementi caratteristici del diagramma Sankey: i diversi flussi energetici si incontrano nei punti di trasformazione, dove possono combinarsi, divergere o terminare; ad ogni punto di trasformazione corrispondono dei flussi in input e output bilanciati.

Per fornire un esempio dell'utilizzo di tale strumento, viene analizzata un'applicazione diffusa come l'utilizzo di un ciclo Rankine organico per il recupero termico di calore di scarto, che vede coinvolti differenti vettori energetici.

Assumendo alcuni parametri caratteristici dei cicli Rankine organici riscontrati nell'ambito della ricerca bibliografica svolta [46] [47], i principali dei quali sono riportati in [Tabella 19](#), è stato possibile effettuare un'analisi di prima approssimazione per la creazione di un diagramma Sankey rappresentativo del processo.

Caratteristiche ORC	
Fluido sorgente calda	Acqua
Temperatura Ingresso sorgente	120°C
Portata sorgente calda	1 kg/s
Fluido di lavoro	R245fa
Temperatura ingresso in turbina	100 °C
Temperatura di condensazione	35°C
Pressione massima	13 bar
Rendimento termodinamico ORC	0,15
Rendimento meccanico	0,95
Rendimento generatore	0,97
Rendimento isentropico turbina	0,75
Rendimento isentropico pompa	0,70

**Tabella 19 Parametri caratteristici assunti per la rappresentazione grafica di un ORC**

Seguendo la legenda riportata in Figura 28, è possibile consultare il Sankey Diagram dell'ORC riportato in Figura 29.

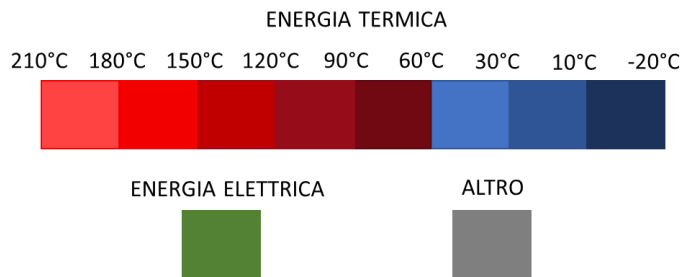


Figura 28 Legenda per l'interpretazione del diagramma Sankey

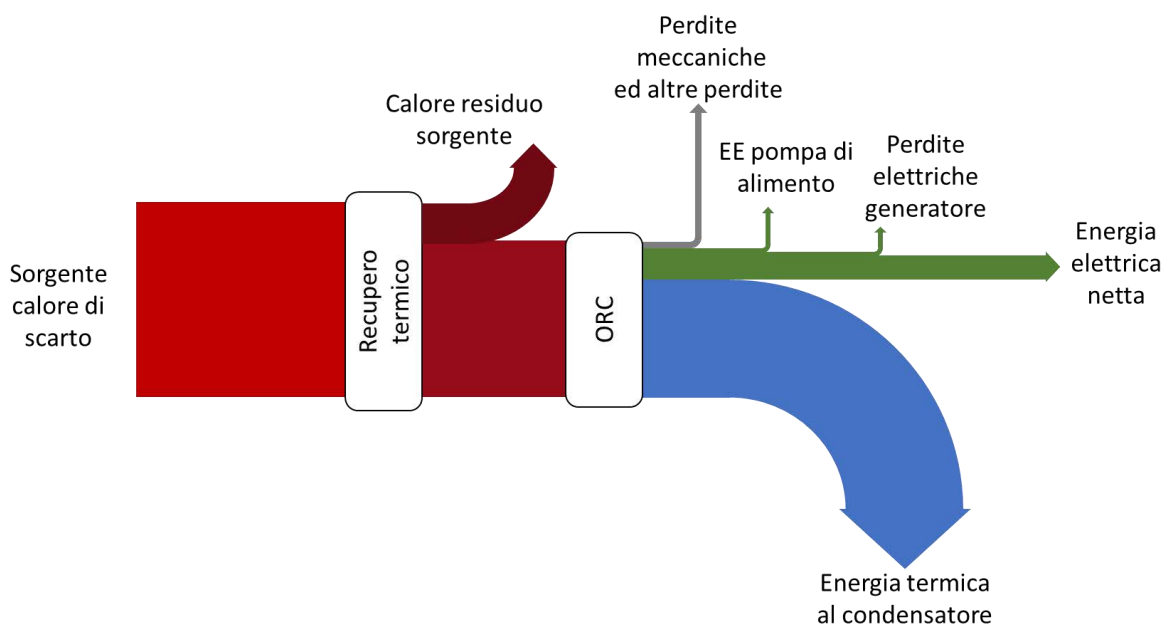


Figura 29 Sankey Diagram per la rappresentazione dei principali flussi energetici in un ORC per il recupero termico di calore di scarto

Nel Sankey Diagram sviluppato, mediante l'introduzione di una semplice legenda, è stato possibile differenziare i vettori energetici coinvolti, distinguendo in particolare energia elettrica da energia termica, quest'ultima differenziata anche in base al corrispondente intervallo di temperatura.

Inoltre, introducendo ulteriori regole grafiche nella costruzione del diagramma, sarebbe possibile fornire anche informazioni sulla natura dei fluidi in gioco nel processo di recupero (es. aria, acqua, tipologia di refrigeranti ecc.).

### 3.4 Check-list di interventi preliminari al recupero termico

La parte conclusiva dello sviluppo della metodologia per l'identificazione e l'analisi dei flussi è stata dedicata all'identificazione di check-list di interventi di efficientamento energetico, da utilizzare preliminarmente alla valutazione delle eventuali opportunità di recupero termico.

Prima di prendere in considerazione il recupero di calore, è necessario assicurarsi che i sistemi esistenti siano gestiti in maniera sufficientemente efficiente. L'assenza di questa condizione necessaria può avere un impatto negativo notevole nella valutazione di opportunità di recupero termico di calore. Tali inefficienze

possono infatti ripercuotersi in maniera diretta sulla disponibilità e sulle caratteristiche della sorgente di calore disponibile al recupero o in maniera indiretta sulla destinazione di utilizzo del calore recuperato, minando la convenienza e la sensatezza della valutazione di un'opportunità di recupero termico di calore di scarto.

In tal senso, l'utilizzo di una check-list adeguata può rappresentare un utile strumento in grado di supportare le aziende nell'effettuare semplici operazioni di efficientamento energetico, propedeutiche a successive valutazioni sulle possibilità di recupero termico.

A tal proposito è stata condotta un'analisi della letteratura scientifica, che ha mostrato l'esistenza di diverse check-list disponibili. In particolare, la check-list proposta da [48], dedicata principalmente al settore terziario, in virtù della sua completezza, ma allo stesso tempo semplicità e facile applicabilità, è stata ritenuta un ottimo punto di partenza per l'elaborazione del modello di check-list da sviluppare nell'ambito di questo progetto.

La check-list sviluppata da [48] conta 102 osservazioni suddivise in otto macroaree:

- A. Contorno dell'edificio;
- B. Occupazione dell'edificio;
- C. HVAC – Controllo, ventilazione, riscaldamento e raffrescamento;
- D. Acqua calda sanitaria;
- E. Illuminazione;
- F. Potenza;
- G. Refrigerazione;
- H. Sistemi ausiliari.

Per ogni macroarea vengono riportate un certo numero di osservazioni, a cui corrispondono diverse tipologie di attività suggerite per la risoluzione dell'eventuale inefficienza. Tali suggerimenti sono suddivisi in due categorie: suggerimenti di O&M (Operation and Maintenance) e misure per il contenimento dei consumi energetici ECM (Energy Conservation Measure).

In **Tabella 20** è riportata la struttura caratteristica della check-list proposta.

SISTEMA		Il problema è presente?		Consigliato		N/A
		SI	NO	SI	NO	
Numero identificativo	Osservazione	[ ]	[ ]			
O&M	Suggerimenti O&Ms			[ ]	[ ]	[ ]
ECM	Suggerimenti di ECMs			[ ]	[ ]	[ ]

**Tabella 20** Struttura della check-list proposta da [48]

Sulla base di questa check-list, utilizzandone i contenuti e la struttura, è stata effettuata un'elaborazione ed integrazione della stessa che verrà utilizzata nell'ambito di questo progetto di ricerca. In **Tabella 21** viene riportato a titolo puramente esemplificativo un estratto della struttura della check-list realizzata, con un esempio del suo popolamento.

HVAC			Il problema è presente?		Consigliato		
			SI	NO	SI	NO	N/A
N°	Osservazione	I dispositivi di controllo non vengono ispezionati regolarmente.	[ ]	[ ]			
	Suggerimenti O&M	Controllare regolarmente il corretto funzionamento di tutti i timer e delle altre apparecchiature di controllo. Controllare che ora e giorno siano correttamente settati e controllare la corretta programmazione dei set point on-off. Proteggere da regolazioni non autorizzate.			[ ]	[ ]	[ ]
	Suggerimenti ECMs	Utilizzare un sistema di gestione automatico			[ ]	[ ]	[ ]

**Tabella 21 Esempio di un’osservazione contenuta nella check-list [48]**

La check-list, nella sua versione integrale, è riportata in appendice del presente report (Appendice A), con la possibilità di poterne eventualmente ampliare i contenuti nel successivo biennio di ricerca, ponendo un focus sugli aspetti critici nel recupero termico, che, parallelamente allo sviluppo delle altre attività, verranno evidenziati.

Inoltre, è interessante valutare l’esistenza di ulteriori check-list, che, oltre a guidare l’utilizzatore nell’individuare eventuali opportunità di efficientamento, siano in grado di fornire informazioni utili all’individuazione di flussi di calore di scarto potenzialmente recuperabili. A tal proposito, risulta particolarmente interessante la check-list sviluppata da Carbon Trust [49] per la preliminare valutazione ed individuazione delle opportunità di recupero.

### 3.5 Conclusioni del capitolo

Nel presente capitolo sono state descritte tutte le attività che hanno portato alla definizione di una metodologia e degli strumenti per l’identificazione e la mappatura dei flussi energetici e per la loro analisi finalizzata all’individuazione e alla valutazione di opportunità di recupero termico di calore di scarto.

Così come per le altre fasi in oggetto a questa prima annualità del progetto ricerca, lo sviluppo di questa metodologia è stato supportato da un’approfondita analisi della letteratura scientifica, con l’obiettivo di individuare le best practices utilizzate nell’ambito dell’analisi e diagnosi di sistemi energetici, con particolare riferimento ai vettori di natura termica.

Sulla base delle risultanze della ricerca di letteratura svolta, dall’analisi delle best practices individuate nell’ambito dell’analisi e nella rappresentazione dei sistemi energetici, è stata individuata una metodologia che definisce i passi da seguire per condurre un’analisi energetica alla base della valutazione di un progetto di recupero termico.

Tale metodologia, disponibile preliminarmente a livello di diagrammi di flusso, sarà oggetto di approfondimento nel corso del successivo biennio di ricerca, in particolare nella caratterizzazione di modelli rappresentativi delle principali tipologie di tecnologie disponibili per il recupero termico. Lo sviluppo di tali modelli permetterà di analizzare in maniera dettagliata le differenti tecnologie potenzialmente applicabili,

permettendo una più efficace valutazione delle potenzialità e dei parametri caratteristici del recupero di calore.

## 4 Conclusioni

Nel presente lavoro di ricerca è stata condotta un'approfondita analisi della letteratura scientifica al fine di individuare gli elementi caratterizzanti ed ottenere uno stato dell'arte dettagliato sulle tecnologie disponibili per il recupero di calore di scarto a basse e bassissime temperature.

All'interno del report è stata proposta e descritta una versione preliminare di un database che possa fornire un supporto utile alle aziende per la ricerca e la selezione delle opportunità di recupero termico. In particolare, le attività più rappresentative sono state la selezione dei campi del database e l'individuazione delle query per la sua consultazione. Inoltre, al fine di validare la struttura del database, è stato condotto un preliminare popolamento di natura metodologica.

In questa prima fase si è preferito mantenere una struttura del database con un numero elevato di campi (ventiquattro) che, sebbene abbia mostrato delle problematiche per quanto riguarda la completezza nel popolamento, è stata al momento ritenuta la più adatta, in quanto contenente tutte le informazioni utili nella valutazione di un'opportunità/tecnologia di recupero di calore. Comunque, in una fase successiva del progetto, sarà possibile ed essenziale il confronto con le parti interessate, come aziende, ESCo e fornitori di tecnologie, le quali potranno dare una valutazione dell'effettiva fruibilità dello strumento e contribuire all'apporto delle eventuali modifiche necessarie.

Parallelamente, sempre supportata da un'attività di ricerca bibliografica, sono stati definiti gli elementi e le fasi fondamentali per lo sviluppo di una metodologia che consenta di valutare, dal punto di vista sia qualitativo che quantitativo, i flussi energetici in gioco nei processi di recupero termico. Tale metodologia, proposta preliminarmente a livello di diagramma di flusso, sarà oggetto di approfondimento nel corso del successivo biennio di ricerca.

Nel contesto di questa seconda attività, sono stati individuati inoltre metodi di rappresentazione grafica dei flussi coinvolti nei processi di recupero termico. A questo scopo, risulta particolarmente valido l'utilizzo di un diagramma di tipo Sankey, in quanto, seppur caratterizzato da una complessità costruttiva ridotta, è in grado di fornire informazioni facilmente leggibili di processi anche complessi.

Infine, sono state individuate ed analizzate diverse check-list che consistono in una serie di buone pratiche da applicare preliminarmente alla valutazione e alla messa in atto di un'attività di recupero termico. Si segnala inoltre che l'utilizzo di check-list opportune può rappresentare un utile strumento anche nell'individuazione delle opportunità di recupero di calore. Tali check-list, provenienti dall'analisi della letteratura, hanno fornito un utile punto di partenza dalla cui elaborazione ed integrazione è stato realizzato lo strumento proposto.

Gli strumenti sviluppati sono stati sottoposti ad una prima validazione di carattere teorico sfruttando le risultanze della ricerca bibliografica svolta. Tuttavia, essendo tali strumenti destinati all'utilizzo nel contesto industriale, sarà necessaria un'importante campagna di validazione sperimentale. Nel successivo biennio di progetto, grazie alla collaborazione di ENEA, si passerà all'applicazione pratica di tali strumenti con particolare riferimento al contesto italiano.

## 5 Riferimenti bibliografici

- [1] H. Jouhara, N. Khordehghah, S. Almahmoud, B. Delpéch, 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.
- [2] R. Agathokleous *et al.*, «Waste Heat Recovery in the EU industry and proposed new technologies», *Energy Procedia*, vol. 161, pagg. 489–496, mar. 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.064.
- [3] G. P. Panayiotou *et al.*, «Preliminary assessment of waste heat potential in major European industries», *Energy Procedia*, vol. 123, pagg. 335–345, set. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.263.
- [4] M. Papapetrou, G. Kosmadakis, A. Cipollina, U. La Commare, e G. Micale, «Industrial waste heat: Estimation of the technically available resource in the EU per industrial sector, temperature level and country», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 138, pagg. 207–216, giu. 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.04.043.
- [5] 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, pagg. 21–24, 2016, doi: 10.1016/j.cirp.2016.04.034.
- [6] 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.
- [7] «EINSTEIN -II Final Report». dic-2012.
- [8] H. Schweiger *et al.*, «Guide for EINSTEIN Thermal Energy Audits». 2012.
- [9] K. Kulterer, «Evaluation of Follow-Up Reports, Estimation of Energy Saving Potential (D3.2, D3.3)». ott-2012.
- [10] W. Glatz, J. Fluch, e C. Brunner, «GREENFOODS – Energy efficiency in the food and beverage industry», in *eceee 2015 Summer Study on energy efficiency*, Berlin, 2015.
- [11] J. Fluch, C. Brunner, e A. Grubbauer, «Potential for energy efficiency measures and integration of renewable energy in the European food and beverage industry based on the results of implemented projects», *Energy Procedia*, vol. 123, pagg. 148–155, set. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.243.
- [12] CRES e RSE, «EU-MERCI Database D2.2». mag-2017.
- [13] A. Thekdi e S. U. Nimbalkar, «Industrial Waste Heat Recovery - Potential Applications, Available Technologies and Crosscutting R&D Opportunities», ORNL/TM--2014/622, 1185778, gen. 2015.
- [14] «Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry», pag. 112.
- [15] U.S. DOE, «Innovating Clean Energy Technologies in Advanced Manufacturing in Quadrennial Technology Review 2015 - Waste Heat Recovery Systems». U.S. Department of Energy, 2015.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] G. P. Hammond e J. B. Norman, «Heat recovery opportunities in UK industry», *Appl. Energy*, vol. 116, pagg. 387–397, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.11.008.
- [21] C. Durugbo, A. Tiwari, e J. R. Alcock, «Modelling information flow for organisations: A review of approaches and future challenges», *Int. J. Inf. Manag.*, vol. 33, n. 3, pagg. 597–610, giu. 2013, doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2013.01.009.

- [22] J. Zhang, H.-H. Zhang, Y.-L. He, e W.-Q. Tao, «A comprehensive review on advances and applications of industrial heat pumps based on the practices in China», *Appl. Energy*, vol. 178, pagg. 800–825, set. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.06.049.
- [23] B. Sanner, C. Karytsas, D. Mendrinou, e L. Rybach, «Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe», *Geothermics*, vol. 32, n. 4–6, pagg. 579–588, ago. 2003, doi: 10.1016/S0375-6505(03)00060-9.
- [24] B. Stuij, «Heat pumping technologies, applications and markets», *Energy Sustain. Dev.*, vol. 2, n. 3, pagg. 27–40, set. 1995, doi: 10.1016/S0973-0826(08)60133-7.
- [25] M. S. Wolf, «Industrial heat pumps in Germany: Potentials, technological development and market barriers», pag. 9.
- [26] A. Abuheiba, I. Mahderekal, A. Momen, e E. Vineyard, «Challenges and opportunities of Gas Engine Heat Pumps – Two Case Studies», pag. 6, 2017.
- [27] A. A. Kiss e C. A. Infante Ferreira, *Heat Pumps in Chemical Process Industry*, 0 ed. Boca Raton : Taylor & Francis, a CRC title, part of the Taylor & CRC Press, 2016.
- [28] W. Wu, B. Wang, W. Shi, e X. Li, «An overview of ammonia-based absorption chillers and heat pumps», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pagg. 681–707, mar. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.12.021.
- [29] C. W. Chan, J. Ling-Chin, e A. P. Roskilly, «Reprint of “A review of chemical heat pumps, thermodynamic cycles and thermal energy storage technologies for low grade heat utilisation”», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 53, n. 2, pagg. 160–176, mag. 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.02.030.
- [30] H. Demir, M. Mobedi, e S. Ülkü, «A review on adsorption heat pump: Problems and solutions», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, n. 9, pagg. 2381–2403, dic. 2008, doi: 10.1016/j.rser.2007.06.005.
- [31] Z. Yang, Y. Zhuo, L. Ercang, e Z. Yuan, «Travelling-wave thermoacoustic high-temperature heat pump for industrial waste heat recovery», *Energy*, vol. 77, pagg. 397–402, dic. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.09.023.
- [32] B. F. Tchanche, Gr. Lambrinos, A. Frangoudakis, e G. Papadakis, «Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles – A review of various applications», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, n. 8, pagg. 3963–3979, ott. 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.07.024.
- [33] M. Imran, B. S. Park, H. J. Kim, D. H. Lee, M. Usman, e M. Heo, «Thermo-economic optimization of Regenerative Organic Rankine Cycle for waste heat recovery applications», *Energy Convers. Manag.*, vol. 87, pagg. 107–118, nov. 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.06.091.
- [34] A. Desideri, S. Gusev, M. van den Broek, V. Lemort, e S. Quoilin, «Experimental comparison of organic fluids for low temperature ORC (organic Rankine cycle) systems for waste heat recovery applications», *Energy*, vol. 97, pagg. 460–469, feb. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2015.12.012.
- [35] G. V. P. Varma e T. Srinivas, «Power generation from low temperature heat recovery», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 75, pagg. 402–414, ago. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.005.
- [36] S. Garimella, «Low-grade waste heat recovery for simultaneous chilled and hot water generation», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 42, pagg. 191–198, set. 2012, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.07.051.
- [37] M. Langan e K. O’Toole, «A new technology for cost effective low grade waste heat recovery», *Energy Procedia*, vol. 123, pagg. 188–195, set. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.261.
- [38] X. Ma *et al.*, «Application of absorption heat transformer to recover waste heat from a synthetic rubber plant», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, n. 7, pagg. 797–806, mag. 2003, doi: 10.1016/S1359-4311(03)00011-5.
- [39] W. Kazuki, U. Kenji, O. Seiichi, M. Noriyuki, M. Jun, e U. Shuichi, «Development of heat recovery centrifugal heat pump», presentato al 11th IEA Heat Pump Conference, Montréal (Québec) Canada, 2014.
- [40] 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.
- [41] 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.

- [42] K. Taheri, R. Gadow, e A. Killinger, «Exergy Analysis as a Developed Concept of Energy Efficiency Optimized Processes: The Case of Thermal Spray Processes», *Procedia CIRP*, vol. 17, pagg. 511–516, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.01.060.
- [43] A. Luo, H. Fang, J. Xia, B. Lin, e Y. jiang, «Mapping potentials of low-grade industrial waste heat in Northern China», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 125, pagg. 335–348, ott. 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.06.018.
- [44] K. Soundararajan, H. K. Ho, e B. Su, «Sankey diagram framework for energy and exergy flows», *Appl. Energy*, vol. 136, pagg. 1035–1042, dic. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.08.070.
- [45] S. Quoilin, M. V. D. Broek, S. Declaye, P. Dewallef, e V. Lemort, «Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, pagg. 168–186, giu. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.01.028.
- [46] Z. Kang, J. Zhu, X. Lu, T. Li, e X. Wu, «Parametric optimization and performance analysis of zeotropic mixtures for an organic Rankine cycle driven by low-medium temperature geothermal fluids», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 89, pagg. 323–331, ott. 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.06.024.
- [47] L. Zhao e J. Bao, «Thermodynamic analysis of organic Rankine cycle using zeotropic mixtures», *Appl. Energy*, vol. 130, pagg. 748–756, ott. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.03.067.
- [48] Washington State University Cooperative Extension Energy Program, «Energy Audit Workbook». 2003.
- [49] Carbon Trust, «Heat recovery checklist and briefing note». .

## 6 Abbreviazioni ed acronimi

CHP - Combined Heat and Power

COP - Coefficient Of Performance

CRHP - Compression-Resorption Heat Pump

ECM - Energy Conservation Measure

EE - Energia Elettrica

EIEEP - European Industrial Energy Efficiency good Practices platform

EINSTEIN - Expert-system for an INtelligent Supply of Thermal Energy in INdustry and other large-scale application

ESCo – Energy Service Company

EU-MERCI - EU coordinated MEthods and procedures based on Real Cases for the effective implementation of policies and measures supporting energy efficiency in the Industry

F&B – Food and Beverage

GWP - Global Warming Potential

HVAC – Heating Ventilation and Air Conditioning

IEE - Intelligent Energy Europe

MVR - Mechanical Vapor recompression

O&M – Operation and Maintenance

ODP - Ozone Depletion Potential

ORC - Organic Rankine Cycle

PBP – PayBack Period

PER - Primary Energy Ratio

SRC – Supercritical Rankine Cycle

TES - Thermal energy storage

TVR - Thermal Vapor Recompression

UTA - Unità di Trattamento Aria

## 7 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.

## 8 Appendice A

In questa appendice viene riportata la Check List di interventi di efficientamento preliminari al recupero termico presentata nel paragrafo 3.4.

La check-list sviluppata conta 75 osservazioni suddivise in sette macroaree:

- A. Caldaie e distribuzione di vapore (da 1 a 17);
- B. Centrale frigorifera (da 18 a 28);
- C. HVAC – Controllo, ventilazione, riscaldamento e raffrescamento (da 29 a 56);
- D. Acqua calda sanitaria (da 57 a 65);
- E. Edificio (da 66 a 68);
- F. Potenza (da 69 a 73);
- G. Management (da 74 a 75).

Numero identificativo	Categoria	Osservazioni		Il problema è presente?		Consigliato		
				SI	NO	SI	NO	N/A
1	Caldaie e distribuzione di vapore	Osservazioni	l'efficienza di combustione della caldaia/e non è verificata su base programmata	[ ]	[ ]			
		O&M	Preparare il programma di test e il registro dei risultati del test			[ ]	[ ]	[ ]
			Effettuare test di efficienza della combustione			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	Valutare l'introduzione di un sistema di monitoraggio per il controllo real time dell'efficienza di combustione			[ ]	[ ]	[ ]
2	Caldaie e distribuzione di vapore	Osservazioni	Le caldaie non sono mantenute su base programmata	[ ]	[ ]			
		O&M	Eeguire la manutenzione secondo le specifiche indicate dal produttore			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	-			[ ]	[ ]	[ ]
3	Caldaie e distribuzione di vapore	Osservazioni	Più caldaie o riscaldatori si accendono contemporaneamente	[ ]	[ ]			
		O&M	Regolare i controlli in modo che la caldaia n. 2 non si accenda fino a quando la caldaia n. 1 non sarà più in grado di soddisfare la domanda per evitare funzionamento a basso carico			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	Installare controlli automatici di gestione			[ ]	[ ]	[ ]
4	Caldaie e distribuzione di vapore	Osservazioni	La temperatura di combustione appare eccessivamente alta	[ ]	[ ]			
		O&M	Accertarsi che nel locale caldaie sia disponibile una quantità adeguata di aria per la combustione			[ ]	[ ]	[ ]

			Esaminare e pulire i filtri di aspirazione dell'aria			[ ]	[ ]	[ ]
			Eeguire regolarmente l'analisi dei fumi per garantire un corretto rapporto aria / carburante			[ ]	[ ]	[ ]
			Verificare che le sfere e gli ugelli siano dimensionati correttamente. Verificare inoltre che le pressioni del carburante non siano troppo elevate			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	Acquista il kit per l'analisi dei fumi se sono previsti test frequenti			[ ]	[ ]	[ ]
5	Caldaie e distribuzione di vapore	Osservazioni	Le torce pilota sono accese quando non necessario (es. stagione di raffreddamento)	[ ]	[ ]			
		O&M	Spegnere le torce pilota quando non necessario. (Inserire le date di spegnimento e accensione nel diario di bordo e pubblicare un avviso nel locale caldaia / forno.)			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	Sostituire le unità usurate con nuovi modelli di accensione elettronica per evitare inutili consumi di carburante			[ ]	[ ]	[ ]
6	Caldaie e distribuzione di vapore	Osservazioni	I radiatori a vapore o altre apparecchiature a vapore non si riscaldano o funzionano in modo irregolare	[ ]	[ ]			
		O&M	Controllare la temperatura del tubo sul lato a valle delle trappole di vapore. Se è eccessivamente caldo, la trappola probabilmente non sta funzionando correttamente (potrebbe passare anche vapore oltre alla condensa). Ciò può essere causato da sporcizia nella trappola, valvole malfunzionanti, eccessiva pressione del vapore o parti usurate della trappola (in particolare valvole e sedi). Se il tubo è freddo, la trappola non funziona correttamente e deve essere sostituita o riparata. Avviare un programma di manutenzione della trappola di vapore			[ ]	[ ]	[ ]
			Pulire o sostituire le valvole di controllo termostatico sui radiatori			[ ]	[ ]	[ ]
			Controllare la valvola di sfogo dell'aria. Se non funziona correttamente, sostituire			[ ]	[ ]	[ ]
			Se la trappola termostatica non funziona correttamente, pulire o sostituire l'elemento a soffietto			[ ]	[ ]	[ ]

			Le sacche d'acqua potrebbero ostruire il flusso di vapore. Correggere re-pitching o reindirizzare i tubi			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		ECM	-			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Caldaie e distribuzione di vapore	Osservazioni	L'isolamento delle tubazioni del vapore, della condensa e dell'acqua di riscaldamento è in stato di degrado o mancante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
		O&M	Ispezionare i tubi per l'isolamento rotto o mancante. Riparare o sostituire secondo necessità			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		ECM	Installare un ulteriore isolamento del tubo in conformità con le specifiche di progettazione e i codici di risparmio energetico			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Caldaie e distribuzione di vapore	Osservazioni	Il funzionamento del bruciatore è accompagnato da fumo eccessivo e fuliggine	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
		O&M	Ispezionare gli ugelli del bruciatore per usura, sporco e angoli di spruzzo errati. Pulire e regolare se necessario			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Verificare che l'olio scorra liberamente e che la pressione dell'olio sia corretta			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Eeguire l'analisi dei gas di combustione per impostare il corretto rapporto aria / carburante			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Se si brucia olio pesante, controllare la temperatura dell'olio			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			In caso di bruciatori a nebulizzazione di vapore, controllare la pressione differenziale olio-vapore			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		ECM	Acquista il kit per l'analisi dei fumi se sono previsti test frequenti			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Acquista nuovi ugelli o punte per bruciatori			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Caldaie e distribuzione di vapore	Osservazioni	Fuliggine e odori vengono rilevati in aree in cui non sono previsti	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
		O&M	Lo scambiatore di calore potrebbe essersi bruciato. Sostituire			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Il camino potrebbe essere inadeguato. Pulire e correggere se necessario			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Eeguire l'analisi dei gas di scarico per ottenere la corretta proporzione aria-carburante			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Controllare il funzionamento del controller del tiraggio			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Controllare le impostazioni della caldaia per le perdite			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

		ECM	Acquista il kit per l'analisi dei fumi se sono previsti test frequenti			[ ]	[ ]	[ ]
10	Caldaie e distribuzione di vapore	Osservazioni	L'efficienza non risulta accettabile per il tipo di caldaia e di combustibile utilizzato	[ ]	[ ]			
		O&M	Rimuovere depositi di calcare, accumulo di sedimenti e composti della caldaia sulle superfici laterali dell'acqua. Esaminare e trattare la parte posteriore della caldaia (l'area più suscettibile alla formazione di calcare)			[ ]	[ ]	[ ]
			Rimuovere la fuliggine dai tubi			[ ]	[ ]	[ ]
			Controllare eventuali elettrovalvole difettose. Riparare o sostituire se necessario			[ ]	[ ]	[ ]
			Ispezionare tutti gli isolamenti della caldaia, i refrattari, i mattoni e la carcassa della caldaia per individuare punti caldi e perdite d'aria. Riparare e sigillare se necessario			[ ]	[ ]	[ ]
			Verificare che i bruciatori lavorino nella zona di combustione di massima efficienza			[ ]	[ ]	[ ]
			Identificare le perdite di calore della caldaia			[ ]	[ ]	[ ]
			Verificare la qualità del combustibile			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	Sostituire le unità inefficienti con unità di tipo modulare più efficienti			[ ]	[ ]	[ ]
			Se applicabile, installare dispositivi di tipo a deflettore nei tubi per migliorare l'efficienza			[ ]	[ ]	[ ]
11	Caldaie e distribuzione di vapore	Osservazioni	L'aria è eccessivamente umida	[ ]	[ ]			
		O&M	Interrompere o ridurre l'umidificazione ove possibile			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	-			[ ]	[ ]	[ ]
12	Caldaie e distribuzione di vapore	Osservazioni	Cicli del bruciatore	[ ]	[ ]			
		O&M	I finecorsa start-stop potrebbero essere impostati in maniera eccessivamente ravvicinata. Ripristinare come richiesto			[ ]	[ ]	[ ]
			Il termostato potrebbe essere difettoso. Sostituire se necessario			[ ]	[ ]	[ ]
ECM	Impiegare uno specialista di controllo per regolare il controllo			[ ]	[ ]	[ ]		
13	Caldaie e distribuzione di vapore	Osservazioni	L'aria di combustione verso la caldaia non è preriscaldata	[ ]	[ ]			
		O&M	-			[ ]	[ ]	[ ]

		ECM	Utilizzare il calore dei fumi per preriscaldare l'aria di combustione mediante un dispositivo di recupero del calore			[ ]	[ ]	[ ]
			Considerare l'utilizzo di un economizzatore per utilizzare il calore dei gas di scarico per il preriscaldamento dell'acqua di alimentazione			[ ]	[ ]	[ ]
			Prendere in considerazione il recupero di calore dallo scarico continuo			[ ]	[ ]	[ ]
14	Caldaie e distribuzione di vapore	Osservazioni	I fumi di combustione non vengono regolarmente monitorati	[ ]	[ ]			
		O&M	Controllare nei fumi di combustione la presenza di combustibile, monossido di carbonio e contenuto di ossigeno			[ ]	[ ]	[ ]
			Monitorare il livello di NOx			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	Introdurre un programma per il controllo test sui fumi di combustione			[ ]	[ ]	[ ]
15	Caldaie e distribuzione di vapore	Osservazioni	Le condense vengono del tutto recuperate e vengono scaricate nelle fognature	[ ]	[ ]			
		O&M	-			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	Valutare l'installazione di un sistema di recupero di condense per riportare la condensa in ingresso alle caldaie. La condensa può anche essere utilizzata per riscaldare l'acqua sanitaria o preriscaldare l'aria di combustione della caldaia prima del suo ritorno al sistema dell'acqua di alimentazione della caldaia			[ ]	[ ]	[ ]
16	Caldaie e distribuzione di vapore	Osservazioni	Gli scaricatori di condensa non sono controllati periodicamente	[ ]	[ ]			
		O&M	Verificare l'utilizzo di un corretto tipo di scaricatori di condensa per le varie applicazioni			[ ]	[ ]	[ ]
			Introdurre un adeguato programma di manutenzione per ispezionare, riparare e se necessario sostituire gli scaricatori di condensa			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	-			[ ]	[ ]	[ ]
17	Caldaie e distribuzione di vapore	Osservazioni	Spurgo	[ ]	[ ]			
		O&M	Correggere se necessario la velocità di spurgo al livello raccomandato dagli specialisti del trattamento acque			[ ]	[ ]	[ ]
			Controllare il contenuto di solidi disciolti (DS) nell'acqua della caldaia			[ ]	[ ]	[ ]

		ECM	Valutare la possibilità di un recupero di calore dall'acqua di spurgo della caldaia			[ ]	[ ]	[ ]
18	Centrale frigorifera	Osservazioni	I condensatori e le torri di raffreddamento non vengono mantenuti su base programmata	[ ]	[ ]			
		O&M	Preparare il programma di manutenzione. Eseguire la manutenzione secondo i consigli del produttore			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	-			[ ]	[ ]	[ ]
19	Centrale frigorifera	Osservazioni	Il funzionamento della pompa di circolazione è controllato manualmente	[ ]	[ ]			
		O&M	Sviluppare un programma operativo di controllo			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	-			[ ]	[ ]	[ ]
20	Centrale frigorifera	Osservazioni	I compressori multipli per la produzione di acqua refrigerata d'aria si avviano contemporaneamente	[ ]	[ ]			
		O&M	Regola i controlli sui compressori di fase			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	Se non esistono sistemi di controllo automatico, acquistare e installare. Ciò consentirà al compressore n. 2 di intervenire quando il compressore n. 1 non sarà più in grado di soddisfare il carico richiesto			[ ]	[ ]	[ ]
21	Centrale frigorifera	Osservazioni	Le temperature di evaporazione e condensazione del refrigeratore non sono ottimizzate	[ ]	[ ]			
		O&M	Modificare la temperatura dell'evaporatore del refrigeratore seguendo le raccomandazioni del produttore					
			Modificare la temperatura di condensazione del refrigeratore seguendo le raccomandazioni del produttore			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	-			[ ]	[ ]	[ ]
22	Centrale frigorifera	Osservazioni	Il refrigeratore funziona durante la stagione fredda per fornire aria condizionata	[ ]	[ ]			
		O&M	-			[ ]	[ ]	[ ]



		O&M	La carica del refrigerante è bassa o il sistema perde refrigerante. Trova e ripara la perdita e ricarica il sistema.			[ ]	[ ]	[ ]
			Riparare il circuito di controllo elettrico, se necessario			[ ]	[ ]	[ ]
			Ripristinare le impostazioni del differenziale di controllo alta / bassa pressione, se necessario			[ ]	[ ]	[ ]
			La serpentina di evaporazione può essere ghiacciata o sporca. Scongela e pulire			[ ]	[ ]	[ ]
			L'elettrovalvola della linea del liquido potrebbe perdere. Riparare o sostituire			[ ]	[ ]	[ ]
			Se viene rilevato ghiaccio sul filtro della linea del liquido, è intasato. Pulire il filtro			[ ]	[ ]	[ ]
			Pulire la batteria del condensatore			[ ]	[ ]	[ ]
			Se il condensatore è una torre di raffreddamento, accertarsi che gli ugelli di spruzzo siano collegati. Assicurarsi che il flusso d'acqua non sia ostruito. Pulire le torri da foglie e detriti			[ ]	[ ]	[ ]
			Rimuovere i depositi di calcare dai gusci / tubi sui condensatori d'acqua			[ ]	[ ]	[ ]
			Riparare le valvole di aspirazione nel compressore, se necessario			[ ]	[ ]	[ ]
			ECM	-			[ ]	[ ]
28	HVAC	Osservazioni	I termostati sulle unità di riscaldamento / raffreddamento sono vulnerabili alla regolazione degli occupanti	[ ]	[ ]			
		O&M	Ripristinare i termostati per correggere le impostazioni			[ ]	[ ]	[ ]
			Installare o sostituire le viti di bloccaggio per evitare manomissioni			[ ]	[ ]	[ ]
			Installare i coperchi di chiusura a prova di manomissione sui termostati			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	Installare termostati elettrici a stato solido preimpostati (se i controlli esistenti sono elettrici)			[ ]	[ ]	[ ]
	Riposizionare i termostati			[ ]	[ ]	[ ]		
29	HVAC	Osservazioni	Le temperature dello spazio sono superiori o inferiori alle impostazioni del termostato	[ ]	[ ]			
		O&M	Ricalibrare il termostato			[ ]	[ ]	[ ]
			Controllare umidità, olio e sporco da linee pneumatiche (per sistemi pneumatici); verificare che i contatti siano puliti se il sistema di controllo è elettrico			[ ]	[ ]	[ ]

			Ricalibrare i controller			[ ]	[ ]	[ ]
			Accertarsi che le valvole di controllo e gli ammortizzatori siano modulati correttamente			[ ]	[ ]	[ ]
			Assicurarsi che il dispositivo generatore di calore stia producendo calore e che la distribuzione del calore nello spazio non sia ostruita			[ ]	[ ]	[ ]
			Assicurarsi che il volume della presa d'aria non sia eccessivo			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	Per sistemi di controllo elettrici, installare termostati a stato solido preimpostati che non richiedono calibrazione			[ ]	[ ]	[ ]
30	HVAC	Osservazioni	Le impostazioni del termostato non sono state regolate per il cambiamento delle stagioni	[ ]	[ ]			
		O&M	Assicurarsi che i termostati siano regolati alle corrette temperature nella stagione di riscaldamento e nella stagione di raffreddamento			[ ]	[ ]	[ ]
			Modificare la posizione dei termostati da aree soggette a forti sbalzi di temperatura, come ad esempio vicino alla finestra o sopra un'unità di riscaldamento o raffreddamento			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	Sostituire il termostato esistente con un termostato che ha impostazioni separate per il raffreddamento e il riscaldamento o utilizzare un termostato per controllare il riscaldamento e un termostato per controllare il raffreddamento			[ ]	[ ]	[ ]
31	HVAC	Osservazioni	I dispositivi di controllo non vengono ispezionati su base regolare	[ ]	[ ]			
		O&M	Controllare regolarmente tutti i timer e le altre apparecchiature di controllo per il corretto funzionamento, controllare impostazioni dell'ora (giorno/notte) e la corretta programmazione dei set point on-off. Proteggere da regolazioni non autorizzate			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	Utilizzare un sistema automatizzato			[ ]	[ ]	[ ]
32	HVAC	Osservazioni	Le temperature dell'edificio non vengono regolate per periodi non occupati	[ ]	[ ]			

		O&M	Ridurre le impostazioni del termostato soprattutto di notte, nei fine settimana e nei giorni festivi, ma mantenere la ventilazione			[ ]	[ ]	[ ]
			Se possibile, spegni le unità di aria condizionata di notte, nei fine settimana e nei giorni festivi			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	Installa controlli automatici come timer o sistemi di gestione automatizzata			[ ]	[ ]	[ ]
33	HVAC	Osservazioni	Le aree non occupate o poco utilizzate vengono riscaldate o raffreddate inutilmente	[ ]	[ ]			
		O&M	Ridurre le impostazioni del termostato nelle aree non occupate			[ ]	[ ]	[ ]
			Laddove possibile, disattivare i sistemi di riscaldamento			[ ]	[ ]	[ ]
			Utilizzare riscaldatori / dispositivi di raffreddamento spot in ampi spazi con bassa occupazione			[ ]	[ ]	[ ]
			Aumentare l'impostazione del termostato estivo, in aree non occupate, se possibile			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	Installare i controlli di sistema per ridurre il riscaldamento / raffreddamento degli spazi non occupati			[ ]	[ ]	[ ]
34	HVAC	Osservazioni	Le apparecchiature di riscaldamento / raffreddamento vengono avviate prima dell'arrivo degli occupanti e / o sono in funzione durante l'ultima ora di occupazione	[ ]	[ ]			
		O&M	Sperimentare i tempi di avviamento e la durata dell'operazione per determinare livelli di comfort soddisfacenti per gli occupanti. Ridurre o disattivare il riscaldamento e il raffreddamento durante l'ultima ora di occupazione			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	Installa un timer o un sistema automatizzato di gestione dell'energia che riduca il riscaldamento e / o il raffreddamento. Mantenere i tassi di ventilazione			[ ]	[ ]	[ ]
35	HVAC	Osservazioni	Il flusso d'aria nello spazio sembra insolitamente basso o è incoerente da uno spazio all'altro	[ ]	[ ]			

		O&M	Utilizzare le aperture di accesso alle condotte per verificare la presenza di eventuali ostruzioni quali isolamento sospeso (in condotti rivestiti), palette e accessori di rotazione rotti, volume chiuso da serrande tagliafuoco. Regolare, riparare o sostituire se necessario			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Ispezionare tutte le prese d'aria e gli ingressi dell'aria (diffusori, registri e griglie). Devono essere mantenuti puliti e privi di sporco e ostruzioni. Pulire e rimuovere gli ostacoli se necessario			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Pulire o sostituire i filtri sporchi o inefficaci su base regolare			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Segnalare agli occupanti di non posizionare oggetti dove ostruiscono il flusso d'aria			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		ECM	-			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
36	HVAC	Osservazioni	I grandi spazi non occupati o a bassa occupazione sono mantenuti in condizioni di comfort	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
		O&M	Prendi in considerazione la possibilità di raggruppare le attività in aree più piccole che possono essere condizionate separatamente dal resto dell'edificio			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		ECM	-			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
37	HVAC	Osservazioni	Le apparecchiature di riscaldamento / raffreddamento operano in hall, corridoi, vestiboli e / o altre aree pubbliche	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
		O&M	Abbassare i set point di riscaldamento nelle aree sopra se possibile. Mantenere la ventilazione			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		ECM	Regolare e bilanciare correttamente i sistemi e i controlli aria / acqua			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
38	HVAC	Osservazioni	Una quantità eccessiva di aria esterna viene utilizzata per ventilare l'edificio	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
		O&M	Ridurre la quantità di aria esterna al minimo consentito dai codici regolando le serrande dell'aria esterna durante le ore di occupazione			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Riparare eventuali dispositivi di ventilazione difettosi			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		ECM	Sostituisci gli ammortizzatori vecchio stile con i nuovi modelli a lama contrapposta di alta qualità con migliori valori di chiusura.			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

			Riparare gli smorzatori guasti o che presentano perdite			[ ]	[ ]	[ ]
39	HVAC	Osservazioni	Le serrande della presa d'aria esterna si aprono quando l'edificio non è occupato	[ ]	[ ]			
		O&M	Chiudere le serrande dell'aria esterna quando l'edificio non è occupato. Accertarsi che gli ammortizzatori abbiano le guarnizioni appropriate e regolarli per garantire una chiusura completa			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	Installare i controlli che chiuderanno automaticamente gli ammortizzatori durante i periodi non occupati			[ ]	[ ]	[ ]
40	HVAC	Osservazioni	Gli ammortizzatori di ritorno, aria esterna e di scarico non eseguono il sequenziamento corretto	[ ]	[ ]			
		O&M	Regola il collegamento della serranda			[ ]	[ ]	[ ]
			Assicurarsi che i motori degli ammortizzatori funzionino correttamente			[ ]	[ ]	[ ]
			Regolare nuovamente gli indicatori di posizione per indicare con precisione le posizioni della serranda			[ ]	[ ]	[ ]
			Ripristinare il collegamento, riparare o sostituire gli ammortizzatori se le lame non si chiudono ermeticamente			[ ]	[ ]	[ ]
			Chiudere tutte le serrande della presa d'aria esterna quando l'apparecchiatura è spenta e quando l'edificio non è occupato			[ ]	[ ]	[ ]
ECM	Sostituisci gli ammortizzatori vecchio stile con i nuovi modelli a lama contrapposta di alta qualità con migliori valori di chiusura			[ ]	[ ]	[ ]		
41	HVAC	Osservazioni	I sistemi di ventilazione non sono utilizzati per la capacità di raffreddamento naturale	[ ]	[ ]			
		O&M	Quando possibile, utilizzare l'aria esterna per il raffreddamento anziché utilizzare la refrigerazione			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	Installare un ciclo economizzatore con controllo entalpico per ottimizzare l'uso dell'aria esterna per il raffreddamento			[ ]	[ ]	[ ]
42	HVAC	Osservazioni	Il funzionamento del sistema di scarico non è programmato	[ ]	[ ]			
		O&M	Interrompere l'uso di ventole di scarico non necessarie			[ ]	[ ]	[ ]

			Ricollegare i ventilatori di scarico affinché funzionino solo quando le luci sono accese			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Stabilire i programmi in modo che le ventole di scarico funzionino solo quando necessario			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Raggruppare il fumo e altre aree con requisiti di scarico simili in modo che possano essere serviti da un sistema di scarico, ridurre la ventilazione nelle restanti aree non contaminate			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		ECM	Installare timer o altri controlli per spegnere il sistema di scarico quando non necessario (quando consentito dalle normative)			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Installare un reostato in serie con ventola di scarico per modulare la velocità della ventola in modo che non venga espulsa non più della quantità necessaria di aria			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Installare sensori per odori chimici o elettronici o solventi per ridurre la necessità di utilizzare aria esterna per la ventilazione			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Installare gli ammortizzatori a gravità o controllati su tutti i condotti di scarico per chiudere i condotti quando la ventola non è in funzione			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
43	HVAC	Osservazioni	I filtri dell'aria e le serpentine di riscaldamento / raffreddamento non ricevono manutenzione programmata	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
		O&M	Sviluppare il programma di manutenzione			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Installare i manometri di riduzione della pressione del filtro			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		ECM	-			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
44	HVAC	Osservazioni	L'isolamento del condotto o del tubo è danneggiato o mancante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
		O&M	Riparare, sostituire se necessario e proteggere da danni futuri			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		ECM	-			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
45	HVAC	Osservazioni	Le cinghie di trasmissione della ventola si flettono eccessivamente (assicurarsi che il circuito del motore della ventola sia bloccato prima del test)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
		O&M	regolare la tensione della cinghia della ventola			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		ECM	-			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
46	HVAC	Osservazioni	Si notano perdite d'aria da condotti	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			

		O&M	Riparazione perdite			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	-			[ ]	[ ]	[ ]
47	HVAC	Osservazioni	Le prese d'aria sono sporche o ostruite	[ ]	[ ]			
		O&M	Ripulire le prese d'aria			[ ]	[ ]	[ ]
			Rimuovere gli ostacoli			[ ]	[ ]	[ ]
			Rimuovere i coperchi di accesso e ispezionare le palette di rotazione, le serrande tagliafuoco e i separatori			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	-			[ ]	[ ]	[ ]
48	HVAC	Osservazioni	Radiatori, convettori, battiscopa e riscaldatori a tubi alettati non forniscono calore sufficiente	[ ]	[ ]			
		O&M	La temperatura della caldaia potrebbe essere bassa. Correggere se necessario			[ ]	[ ]	[ ]
			Spurgare l'aria dalle unità			[ ]	[ ]	[ ]
			Stabilire un programma di pulizia sistematico			[ ]	[ ]	[ ]
			Rimuovere gli elementi che ostruiscono le griglie di scarico			[ ]	[ ]	[ ]
			Scaricare l'acqua dalle linee pneumatiche, se necessario. (Le linee pneumatiche possono essere congelate.) Verificare la presenza di perdite d'aria			[ ]	[ ]	[ ]
			Riparare le valvole difettose			[ ]	[ ]	[ ]
			Riparare o sostituire i termostati difettosi			[ ]	[ ]	[ ]
			La pompa dell'acqua calda o la pompa booster potrebbero non funzionare. Riparare o sostituire se necessario			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	-			[ ]	[ ]	[ ]
49	HVAC	Osservazioni	L'edificio utilizza un sistema a doppio condotto o multizona	[ ]	[ ]			
		O&M	-			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	Converti i sistemi a doppio condotto o multizona in volume d'aria variabile, se l'edificio ha una stagione di riscaldamento separata			[ ]	[ ]	[ ]
			Installa i controlli per ripristinare automaticamente le temperature del piatto caldo e freddo			[ ]	[ ]	[ ]
50	HVAC	Osservazioni	Il carico dell'aria condizionata non è soddisfatto nei giorni estremamente caldi	[ ]	[ ]			
			Pulire il condensatore su sistemi raffreddati ad aria			[ ]	[ ]	[ ]
			Pulire il condensatore dall'accumulo di calcare per sistemi raffreddati ad acqua			[ ]	[ ]	[ ]

		ECM	Prendere in considerazione l'installazione di un serbatoio sotterraneo isolato che consenta il funzionamento notturno del refrigeratore quando la domanda elettrica è bassa. Questo serbatoio sarebbe una fonte di approvvigionamento di acqua refrigerata per il funzionamento diurno. Il refrigeratore non verrebbe utilizzato durante il giorno				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
51	HVAC	Osservazioni	l'aria in volume e/o temperatura inadeguata viene scaricata attraverso le griglie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
		O&M	Sbrinare la serpentina dell'evaporatore se ghiacciata. Determinare la causa e correggere				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Pulire la serpentina, le alette e i tubi dell'evaporatore				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Pulire o sostituire i filtri dell'aria				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			La serranda tagliafuoco potrebbe essere chiusa. Aprire e sostituire il collegamento fusibile, se necessario				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			La serranda di bilanciamento potrebbe essere chiusa. Aprire per correggere la posizione				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Pulire la batteria del condensatore e / o gli ugelli della torre dell'acqua				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ECM	Installare gli interruttori di rilevamento della pressione differenziale su allarme quando il flusso d'aria scende in modo significativo				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
52	HVAC	Osservazioni	I condensatori o le batterie di refrigerazione sono sporchi, intasati e / o non funzionano in modo efficiente	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
		O&M	Determinare se sono state identificate le normali temperature e pressioni di funzionamento e se tutti gli indicatori sono controllati frequentemente per garantire il rispetto delle condizioni di progettazione				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			L'aumento della pressione del sistema può essere dovuto a condensatori sporchi che riducono l'efficienza del sistema. Le alte temperature di mandata sono spesso causate da valvole del compressore difettose o rotte. Riparare o regolare come richiesto				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

			Ispezionare la linea del liquido in uscita dal filtro. Se sembra più freddo della linea del liquido che entra nel filtro, è intasato. È gravemente ostruito se all'uscita del filtro è visibile brina e condensa. Pulire.				[ ]	[ ]	[ ]
			Pulire le bobine e / o altri elementi secondo necessità e secondo una pianificazione. Includere bobine di deumidificazione				[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	-				[ ]	[ ]	[ ]
53	HVAC	Osservazioni	Tubazioni dell'acqua refrigerata, valvole e raccordi perdono	[ ]	[ ]				
		O&M	Riparare le perdite del giunto o delle tubazioni				[ ]	[ ]	[ ]
			Riparare o sostituire le valvole				[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	-				[ ]	[ ]	[ ]
54	HVAC	Osservazioni	Sono evidenti perdite di vapore, acqua calda o refrigerata	[ ]	[ ]				
		O&M	Riparare le perdite				[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	-				[ ]	[ ]	[ ]
55	HVAC	Osservazioni	Le valvole del vapore, dell'acqua calda o refrigerata non si chiudono ermeticamente	[ ]	[ ]				
		O&M	Riparare o sostituire le valvole				[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	-				[ ]	[ ]	[ ]
56	HVAC	Osservazioni	L'aria condizionata o l'acqua riscaldata vengono scartate	[ ]	[ ]				
		O&M	-				[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	È importante che ci sia consapevolezza sul recupero di calore. È necessario analizzare le caratteristiche energetiche del sito per valutare la soluzione ideale per il recupero e riutilizzo degli sprechi				[ ]	[ ]	[ ]
57	Acqua Calda Sanitaria	Osservazioni	La temperatura dell'acqua calda è eccessiva	[ ]	[ ]				
		O&M	Regola la temperatura dell'acqua. Consultare i codici e le normative appropriati per le temperature dell'acqua consentite a fini sanitari e medici				[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	-				[ ]	[ ]	[ ]
58	Acqua Calda Sanitaria	Osservazioni	L'isolamento del sistema è danneggiato o mancante	[ ]	[ ]				
		O&M	Riparare, sostituire. Proteggere se necessario per prevenire il ripetersi di danni				[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	-				[ ]	[ ]	[ ]
59	Acqua Calda Sanitaria	Osservazioni	Le temperature dell'acqua non vengono ridotte durante i periodi non occupati	[ ]	[ ]				

		O&M	Pianifica riduzione della temperatura dell'acqua nei periodi non occupati			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	Installare un dispositivo di controllo automatico adeguato			[ ]	[ ]	[ ]
60	Acqua Calda Sanitaria	Osservazioni	Le perdite d'acqua sono evidenti	[ ]	[ ]			
		O&M	Riparare perdite e rubinetti difettosi			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	-			[ ]	[ ]	[ ]
61	Acqua Calda Sanitaria	Osservazioni	Lo scambiatore di calore per la produzione di acqua calda sanitaria non è controllato su base programmata	[ ]	[ ]			
		O&M	Pianificare la manutenzione seguendo le raccomandazioni del produttore			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	-			[ ]	[ ]	[ ]
62	Acqua Calda Sanitaria	Osservazioni	Le pompe di ricircolo dell'acqua calda funzionano continuamente	[ ]	[ ]			
		O&M	Elaborare un programma operativo adatto all'occupazione			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	-			[ ]	[ ]	[ ]
63	Acqua Calda Sanitaria	Osservazioni	Gocciolamenti o perdite sono evidenti nei sistemi di acqua calda	[ ]	[ ]			
		O&M	Riparare tutte le perdite, comprese quelle dei rubinetti e delle pompe			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	-			[ ]	[ ]	[ ]
64	Acqua Calda Sanitaria	Osservazioni	Lo scaldabagno elettrico (se presente) non ha limiti di tempo sul ciclo di riscaldamento	[ ]	[ ]			
		O&M	Utilizzare cicli ridotti sullo scaldabagno quando non è necessario per periodi prolungati. (Nota: la disattivazione completa potrebbe causare perdite.)			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	Limitare il ciclo di lavoro con timer o altri dispositivi di controllo per evitare di aggiungere il carico di riscaldamento dell'acqua all'edificio durante i periodi di picco della domanda elettrica (potrebbe essere necessaria una capacità aggiuntiva di accumulo di acqua calda)			[ ]	[ ]	[ ]
65	Acqua Calda Sanitaria	Osservazioni	I dispositivi di stoccaggio dell'acqua riscaldata non sono stati utilizzati ove possibile	[ ]	[ ]			
		O&M	-			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	Installare le valvole miscelatrici					

			Sostituire i rubinetti standard con valvole limitatrici di flusso a chiusura automatica. (Nota: acqua altamente mineralizzata o acqua contenente sedimenti possono causare blocchi.)					
			Installare uno scaldacqua solare per aiutare a soddisfare la domanda di acqua calda dell'edificio. Ciò ridurrà in modo significativo il consumo di combustibili energetici tradizionali nelle strutture che sono grandi utilizzatori di acqua calda.			[ ]	[ ]	[ ]
66	Edificio	Osservazione	L'allineamento e il funzionamento improprio di finestre e porte consentono un'eccessiva infiltrazione	[ ]	[ ]			
		O&M	Riallineare o riagganciare le finestre o le porte che non si chiudono correttamente			[ ]	[ ]	[ ]
			Accertarsi che i meccanismi di chiusura automatica delle porte funzionino correttamente			[ ]	[ ]	[ ]
			Sostituire o riparare le guarnizioni di porte basculanti			[ ]	[ ]	[ ]
		ECM	Ridimensiona le porte esterne (rendendole più piccole per ridurre le infiltrazioni eccessive)			[ ]	[ ]	[ ]
			Aggiungi recinti separati espandibili, ove possibile.			[ ]	[ ]	[ ]
			Installare porte a chiusura e apertura automatica in spazi non condizionati			[ ]	[ ]	[ ]
			Installare un interruttore sulle porte basculanti che impedisce l'attivazione delle unità di riscaldamento e raffreddamento quando le porte sono aperte.			[ ]	[ ]	[ ]
			Installare le porte al vestibolo degli ingressi principali			[ ]	[ ]	[ ]
		67	Edificio	Osservazioni	Isolamento e coibentazione intorno a finestre, porte, condotti, tubazioni, giunti esterni o altre aree di infiltrazione in cui sono usurate, rotte o mancanti	[ ]	[ ]	
O&M	Sostituire isolamenti e coibentazioni usurati e / o rotti					[ ]	[ ]	[ ]
	Sostituisci le finestre rotte o logorate					[ ]	[ ]	[ ]



