

Ricerca di Sistema elettrico



Sviluppo di strumenti per la valorizzazione del calore di scarto
e la gestione ottimale dei flussi termici negli stabilimenti
industriali (LA2.3)

R. Carapellucci, M. Di Bartolomeo R. Cipollone, D. Di Battista, F. Fatigati



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DELL'AQUILA



DIIE
Dipartimento di Ingegneria
Industriale e dell'Informazione
e di Economia

Sviluppo di strumenti per la valorizzazione del calore di scarto e la gestione ottimale dei flussi termici negli stabilimenti industriali

TITOLO (LA2.3 *Sviluppo di strumenti per la valorizzazione del calore di scarto e la gestione ottimale dei flussi termici negli stabilimenti industriali*)

AUTORI R. Carapellucci, M. Di Bartolomeo, R. Cipollone, D. Di Battista, F. Fatigati – Università dell'Aquila, Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica -ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione*

Progetto: Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali

Linea di attività: LA2.3

Responsabile del Progetto: Miriam, Benedetti, ENEA

Responsabile del Work Package: Miriam, Benedetti, ENEA

Responsabile Linea di Attività: UNIVAQ_DIIIE1

Mese inizio previsto: 13

Mese inizio effettivo: 13

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: Si ringrazia per la collaborazione alle attività svolte

Indice

1	Risultati attesi	5
2	Risultati ottenuti.....	6
3	Prodotti attesi	9
4	Prodotti sviluppati	10
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	11
6	Sintesi delle attività svolte	12
7	Dettaglio delle attività svolte.....	13
7.1	Popolamento di un database.....	13
7.2	Sviluppo di una metodologia per sistemi energetici con variabilità nell'utilizzo dell'energia termica	14
7.3	Analisi di casi studio	16
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	42
9	Pubblicazioni scientifiche	43
10	Eventi di disseminazione	44

Indice delle figure

Figura 1. Distribuzione dimensionale in termini di occupazione nei settori industriali. Errore. Il segnalibro non è definito.	
Figura 2. Diagramma orario del carico termico per diversi giorni della settimana e dimensione aziendale per codice NAICS=312120 (birrerie).....	34
Figura 3. Curva di durata dei carichi termici al variare della dimensione aziendale per codice NAICS=312120 (birrerie). [<i>Tale curva individua il numero di giorni dell'anno in cui uno specifico carico termico è stato uguagliato o superato (entrambe le grandezze sono espresse in termini percentuali)</i>]	34
Figura 4. Diagramma di flusso della metodologia sviluppata	35
Figura 5. Matrice di contemporaneità dei fluidi di processo	36
Figura 6. Matrice del potenziale recupero diretto (kWh/turno) tra i fluidi di processo	37
Figura 7: Output modello TAM, curve cumulative fluidi caldi e freddi. [<i>L'intervallo X di sovrapposizione delle curve rappresenta l'energia termica scambiabile tra i fluidi di processo in virtù dei livelli di temperatura assunti. L'intervallo a sinistra sono le utenze esterne per il raffreddamento. L'intervallo a destra di quello di sovrapposizione rappresenta le utenze esterne per il riscaldamento.</i>].....	38
Figura 8. Modello TSM, curve cumulative globali per ogni intervallo temporale. [<i>La distanza del punto più alto dall'asse verticale rappresenta l'energia termica richiesta alle utenze calde esterne. La distanza nel punto più basso rappresenta l'energia termica per le utenze fredde esterne. L'inversione di pendenza avviene per un valore di energia termica pari a 0, che identifica la mancanza di scambio termico alla relativa temperatura e la presenza del pinch point.</i>]	39
Figura 9. Dimensionamento rete nell'intervallo temporale 11 (caso birrificio).....	40
Figura 10. utilities calde/fredde e recupero diretto in ogni intervallo temporale in kWh/turno e ripartizione percentuale.....	40
Figura 11. Correlazioni utilizzate per la valutazione dei costi degli scambiatori di calore	41

Indice delle tabelle

Tabella 1. Numero di aziende per dimensione occupazionale nei settori industriali	17
Tabella 2. Numero di aziende per dimensione occupazionale nel settore alimentare	18
Tabella 3. Numero di aziende per dimensione occupazionale nel settore chimico.....	19
Tabella 4. Numero di aziende per dimensione occupazionale nel settore tessile.....	19
Tabella 5. Numero di aziende per dimensione occupazionale nel settore produzione carta...	20
Tabella 6. Numero di aziende per dimensione occupazionale nel settore trattamento metalli	20
Tabella 7. Aziende con profili di carico nei settori industriali per dimensione occupazionale..	21
Tabella 8. Aziende con profili di carico nei settori industriali con dati riferiti a GHGRP	22

Tabella 9. Consumi annui di energia termica in MWh per dimensione occupazionale nel settore alimentare	23
Tabella 10. Livelli di temperatura e distribuzione dei consumi in termini percentuali	24
Tabella 11. Dettaglio dei fluidi di processo del caso studio	24
Tabella 12. Input dati modello SW. Le celle colorate rappresentano i dati di input del modello	25
Tabella 13. Definizione intervalli temporali	26
Tabella 14. Risultati del modello Time Slice Model. <i>[Nella colonna sinistra sono presenti i valori di temperatura aggiustati tenendo conto del DT minimo pari a 12 °C. Sulla riga in alto sono specificati i tempi relativi di ciascun intervallo. I valori su ogni colonna rappresentano i kWh richiesti per ciascun livello di temperatura. In arancione l'energia termica richiesta alle hot utilities. In blu scuro le cold utilities. In rosso la localizzazione del pinch point.]</i>	26
Tabella 15. Progetto reti in tutti gli intervalli temporali individuati nel caso studio.....	28
Tabella 16. Risultati di sintesi del caso studio. <i>[Utilities calde (hu) e fredde (cu) per ogni intervallo temporale e recupero diretto (hx) in termini di potenza termica ed energia termica valutata considerando la durata dell'intervallo temporale specifico.]</i>	31
Tabella 17. Confronto dei risultati con i dati di letteratura. <i>[I dati sono stati valutati considerando 4 turni al giorno per 300 giorni l'anno e un rendimento dei sistemi di generazione dell'energia termica pari all'85% come dichiarato in Eiholzer et al. (2017). Il recupero gas fa riferimento alla sola energia recuperata dai fumi rappresentati dai fluidi 17 e 18.]</i>	31
Tabella 18. Correlazioni utilizzate per la valutazione del costo delle utilities calde e fredde differenziate nel caso di utilizzo di acqua di raffreddamento o refrigerante. <i>[Il costo del combustibile è stato fissato a 0.5\$/Smc corrispondenti a 12.5\$/GJ. Il valore del CEPCI nel 2024 ha raggiunto il valore di 800.]</i>	32
Tabella 19. Risultati del recupero energetico nell'intervallo 11. <i>[Si è assunto il gas naturale come combustibile utilizzato nelle utenze esterne calde.]</i>	32

1 Risultati attesi

I risultati previsti dalla LA come da capitolato sono:

- a) Sviluppo di una metodologia per la valorizzazione del calore di scarto e la gestione ottimale dei flussi termici negli stabilimenti industriali basata sull'analisi della variabilità temporale delle loro caratteristiche (livelli di potenza e temperatura).
- b) Popolamento di un database con informazioni su sorgenti e pozzi di energia termica in tipici processi industriali.
- c) Definizione di criteri generali per la generazione di profili tempo-dipendenti di richieste/disponibilità di energia termica.
- d) Caratterizzazione di tecnologie in grado di fornire/utilizzare calore a livelli di temperatura medio-bassi. Analisi di casi studio e identificazione della soluzione ottimale per il recupero del calore a bassa temperatura.
- e) Modularità e flessibilità della metodologia sviluppata in modo che la sua applicazione possa fornire utili indicazioni sia per il progetto e l'ottimizzazione di sistemi di recupero del calore ex-novo, sia per la valutazione e il riarrangiamento di sistemi di recupero del calore esistenti.

2 Risultati ottenuti

Con riferimento ai punti elenco del precedente paragrafo (*Risultati attesi come da capitolato*), è di seguito riportata una breve descrizione di come è stato raggiunto ciascun risultato:

- a) *Sviluppo di una metodologia per la valorizzazione del calore di scarto e la gestione ottimale dei flussi termici negli stabilimenti industriali.*

L'attività di ricerca qui condotta, in continuità con quanto sviluppato nel primo triennio del progetto (PTR 19-21), ha l'obiettivo di potenziare la metodologia per l'applicazione della pinch analysis, a suo tempo sviluppata in ambiente Excel-VBA, per l'analisi e l'ottimizzazione della rete di scambiatori di calore. La presente linea di attività ha consentito il potenziamento del modulo in argomento, facendo in modo che lo stesso sia applicabile per l'indagine di processi produttivi non solo in condizioni fissate (rappresentative ad esempio di condizioni medie nel tempo), ma anche tenendo conto delle possibili variazioni della disponibilità temporale delle correnti calde e fredde coinvolte nel processo di integrazione termica.

Questo è il caso ad esempio dei processi cosiddetti batch. In questa tipologia di processi produttivi, il prodotto finale è il frutto di lavorazioni successive le quali richiedono specifici tempi e fluidi di processo i quali non risultano disponibili simultaneamente. Tali lavorazioni possono essere svolte in serie o in parallelo mettendo potenzialmente a disposizione un insieme di fluidi caldi e freddi dai quali è possibile recuperare energia termica se opportunamente accoppiati. Le potenzialità di recupero sono state valutate implementando due modelli distinti che nel loro acronimo inglese sono denominati TAM (Time Average Model) e TSM (Time Slide model). L'applicazione di questi modelli consente la valutazione del recupero indiretto (TAM) e diretto (TSM) ovvero della quantità di calore trasferibile da un intervallo temporale ad un altro e quella scambiabile all'interno del medesimo intervallo individuato attraverso i tempi delle lavorazioni. Gli output dei modelli sono rappresentati dalle curve cumulative complessive e quelle legate al singolo intervallo da dove si evidenziano le potenze termiche scambiate con le utilities, il recupero interno e le temperature al pinch point.

- b) *Popolamento di un database con informazioni su sorgenti e pozzi di energia termica in tipici processi industriali.*

Tale popolamento è stato effettuato ricorrendo a dati contenuti in diverse sezioni del catalogo denominato "**NREL Data Catalog**", reso disponibile in base a specifici studi condotti e coordinati dal National Renewable Energy Laboratory (NREL). Dalla sezione *United States County-Level Industrial Energy Use* del database, sono desunte stime dell'energia termica utilizzata nei settori industriali di interesse (S1 alimentare, S2 chimico, S3 tessile, S4 produzione carta, S5 trattamento metalli), disaggregate per tipologia azienda (codice NAICS) e classe dimensionale (numero occupati). Dalla sezione *Manufacturing Thermal Energy Use in 2014* del database NREL, sono desunte stime dell'energia termica utilizzata ai differenti livelli di temperatura e dell'andamento del carico termico nel tempo. In relazione a quest'ultimo aspetto, è stato possibile individuare il profilo di carico termico giornaliero, tipicamente di forma trapezoidale e

distinto per tre tipologie di giorni tipo (Weekday, Saturday, Sunday), per le diverse tipologie d'azienda (codice NAICS) e classi dimensionali (numero occupati).

c) *Definizione di criteri generali per la generazione di profili tempo-dipendenti di richieste/disponibilità di energia termica.*

In relazione all'andamento del carico termico nel tempo, i dati acquisiti in fase di popolamento del database hanno consentito di avere a disposizione andamenti caratteristici del carico termico in giorni tipo (Weekday, Saturday, Sunday), in funzione della tipologia di azienda e classe dimensionale. È stato così possibile definire una procedura in grado di ricostruire le curve di durata del carico termico nell'anno, per tener conto della variabilità nella richiesta dell'energia termica. La caratterizzazione dei profili di carico è stata condotta, assumendo un tipico andamento trapezoidale nell'arco del giorno tipo, attraverso la definizione di un numero limitato di parametri (carico minimo, carico massimo, ora inizio e numero ore carico massimo, numero ore per rampa salita e discesa carico). Tali parametri sono indipendenti per le tre tipologie di giorno tipo (Weekday, Saturday, Sunday), in quanto i giorni del fine settimana tendono ad avere un coefficiente di utilizzo relativamente più contenuto soprattutto per le minori classi dimensionali. I parametri così individuati possono essere desunti in un caso specifico in modo che assicurino un dato coefficiente di utilizzazione nell'anno.

d) *Caratterizzazione di tecnologie in grado di fornire/utilizzare calore a livelli di temperatura medio-bassi. Analisi di casi studio e identificazione della soluzione ottimale per il recupero del calore a bassa temperatura.*

Lo sviluppo dei modelli TAM e TSM consente la determinazione del recupero energetico in ciascun intervallo temporale filtrando, per ognuno di questi, i fluidi caldi e freddi contemporanei. A valle di questa operazione è possibile procedere alla progettazione della rete in condizioni di massimo recupero energetico in accordo con i principi della pinch technology, andando a minimizzare lo scambio di calore con le utilities esterne. La progettazione della rete permette di indagare in maniera dettagliata l'entità del recupero quantificando il numero di scambiatori e le potenze scambiate con ognuno di essi su ciascun intervallo. Correlazioni di costo ottenute attraverso un'analisi della letteratura consentono la valutazione dei costi degli scambiatori fissata una tipologia e i coefficienti di scambio termico di progetto per ogni fluido. Allo stesso tempo il costo delle utilities viene stimato a partire dal valore corrente del CEPCI e dal costo del combustibile una volta fissata la tipologia. Il modello è stato così applicato e validato su un caso studio individuato in letteratura legato alla produzione della birra e caratterizzato da 20 differenti fluidi di processo in 15 distinti intervalli temporali. La progettazione della rete, fornendo dettagli sui livelli termici necessari alle utilities calde e fredde, consente inoltre di valutare le potenzialità di tecnologie di recupero del calore a bassa temperatura quali pompe di calore e impianti ORC qualora i valori di potenza ne giustificano l'impiego.

e) *Modularità e flessibilità della metodologia sviluppata in modo che la sua applicazione possa fornire utili indicazioni sia per il progetto e l'ottimizzazione di sistemi di recupero del calore*

ex-novo, sia per la valutazione e il riarrangiamento di sistemi di recupero del calore esistenti.

La metodologia implementata all'interno della piattaforma software è del tutto generale e può essere applicata a qualsiasi processo in cui siano presenti fluidi caldi e freddi che intervengono in qualsiasi fase produttiva a partire dagli input richiesti. Questi consistono nelle temperature ingresso/uscita di progetto, le capacità termiche associate ad ogni flusso, e gli intervalli temporali nei quali i fluidi sono richiesti qualora si tratti di un processo batch. L'applicazione dei modelli TAM e TSM consente di valutare le potenzialità di recupero diretto e indiretto attraverso scambiatori di calore interni o accumuli termici. Il dimensionamento e la rappresentazione delle reti in condizioni di massimo recupero energetico consentono inoltre di individuare i livelli termici in cui devono operare le utilities esterne e conseguentemente i vettori e le tecnologie da utilizzare. Attraverso il confronto della configurazione ottimale ottenuta con quella della rete esistente, si può infine valutare se l'incremento dei costi di capitale associato all'introduzione di ulteriori scambiatori sia giustificato dal risparmio energetico conseguibile.

3 Prodotti attesi

I prodotti attesi per la LA come da capitolato sono:

- a) Rapporto tecnico descrittivo delle attività svolte.
- b) Modulo in ambiente Excel/VBA in grado di valutare l'entità del recupero di energia termica realizzabile all'interno del processo tecnologico, anche attraverso la generazione di profili tempo-dipendenti significativi a partire da un limitato numero di informazioni che caratterizzano il processo tecnologico sul piano energetico.

4 Prodotti sviluppati

Con riferimento ai punti elenco del precedente paragrafo (*Prodotti attesi come da capitolato*), è di seguito riportata una breve descrizione di ciascun prodotto sviluppato:

a) **Rapporto tecnico descrittivo delle attività svolte.**

Tale prodotto è rappresentato dalla presente rapporto tecnico che descrive le attività svolte nel progetto riguardanti il popolamento del database, la messa a punto della metodologia per l'indagine di sistemi energetici con variabilità nell'utilizzo dell'energia termica e l'analisi di specifici casi studio. Il dettaglio delle attività svolte è riportato al paragrafo 7.

b) **Modulo in ambiente Excel/VBA.**

Il software sviluppato è stato realizzato su piattaforma Excel, adottando una struttura modulare. La cartella di lavoro è composta da diversi fogli, ciascuno dei quali dedicato a specifiche funzionalità. Foglio "Input": consente l'inserimento dei dati relativi ai fluidi di processo, l'identificazione della contemporaneità e la determinazione delle massime energie scambiabili tra i fluidi.

- Foglio "TAM": attraverso un algoritmo di minimizzazione, permette di impostare la differenza di temperatura minima al pinch point. Viene così stimato il massimo recupero energetico possibile e gli apporti energetici minimi richiesti dalle utenze esterne (calde e fredde).
- Foglio "GCC": include il modello TSM per la valutazione delle curve cumulative globali su ciascun intervallo. L'attivazione di una macro consente la visualizzazione delle curve, rendendo evidenti i pinch point su ogni intervallo e le utenze esterne necessarie. Il confronto tra i pinch point di intervalli successivi permette inoltre di valutare le opportunità di trasferimento di energia termica tra intervalli.
- Foglio "Input_MER": offre la possibilità di selezionare un intervallo specifico del processo per visualizzare i fluidi presenti. Da questo foglio si può attivare la macro "Progettazione rete Batch", che genera la progettazione della rete su ogni intervallo.

L'output principale è contenuto nel foglio "MER1", dove è riportata una tabella con i dettagli degli scambiatori, comprensivi di fluidi coinvolti, capacità termiche, temperature di ingresso/uscita e potenze termiche scambiate. In alternativa, è possibile effettuare la progettazione della rete su un singolo intervallo e visualizzarne la rappresentazione. Infine, il modello consente di stimare il costo degli scambiatori necessari e delle utilities richieste per soddisfare i fabbisogni esterni di energia termica.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non si riscontrano scostamenti su attività e risultati.

6 Sintesi delle attività svolte

Le attività svolte hanno riguardato: **a) Popolamento database**, con informazioni per le aziende dei settori industriali di interesse in termini di consumi di energia termica ai diversi livelli di temperatura e andamento del carico termico, per tipologia azienda e classe dimensionale; **b) Sviluppo metodologia**, per la valutazione delle potenzialità di recupero da processi batch e continui e la progettazione di reti di scambiatori di calore in condizioni di massimo recupero energetico e stima dei costi operativi e capitali legati all'installazione di nuovi scambiatori di calore; **c) Analisi casi studio**: applicazione del modello su un caso studio di letteratura relativo ad un processo di produzione della birra, caratterizzato da molteplici lavorazioni successive nelle quali intervengono fluidi di lavoro differenti. I risultati ottenuti dal modello sono stati validati su quelli riportati nell'ambito della pubblicazione scientifica.

7 Dettaglio delle attività svolte

In linea con quanto previsto dal capitolato, la descrizione delle attività svolte è organizzata in tre paragrafi che illustrano quanto sviluppato per il popolamento del database, la messa a punto della metodologia per l'indagine di sistemi energetici con variabilità nell'utilizzo dell'energia termica e l'analisi di specifici casi studio. La descrizione delle attività è accompagnata dall'utilizzo di numerose Tabelle e Figure che, per mantenere un'adeguata continuità di esposizione, sono posizionate a valle dei tre paragrafi in argomento.

7.1 Popolamento di un database

L'ulteriore popolamento del database messo a punto e sviluppato da ENEA nel primo anno di ricerca è stato effettuato ricorrendo a indagini realizzate in Paesi extra-europei sulle richieste di energia termica in diversi processi industriali. Di particolare utilità risultano i dati contenuti in diverse sezioni del catalogo denominato "**NREL Data Catalog**", reso disponibile in base a specifici studi condotti e coordinati dal National Renewable Energy Laboratory (NREL).

United States County-Level Industrial Energy Use. In questa sezione del database NREL, sono riportate le stime dell'energia utilizzata (con riferimento al 2014) nell'industria manifatturiera disaggregata per contea, tipologia azienda (codice NAICS, North American Industrial Classification System) e tipo di combustibile. L'approccio di stima è descritto in dettaglio nella cartella "Industry-Energy-Tool (IET)"¹. Sono altresì disponibili informazioni sui livelli di temperatura dell'energia termica richiesta per i processi della specifica tipologia di azienda (codice NAICS), come pure l'energia termica richiesta nell'anno per ciascun livello di temperatura e per classe dimensionale dell'azienda. La classe dimensionale è individuata sulla base del numero di dipendenti (fino a 50, 100, 250, 500, 1000 e oltre 1000 dipendenti); in altre situazioni, in assenza di specifiche informazioni sulla classe dimensionale, le stime dei consumi energetici a livello di struttura sono effettuate per i grandi utilizzatori di energia attraverso l'impiego dei dati sulle emissioni del Greenhouse Gas Reporting Program (ghgrp) dell'EPA.

L'analisi dei numerosi dati a disposizione ha consentito di estrarre informazioni per le aziende dei settori industriali di interesse: settore alimentare (S1), chimico (S2), tessile (S3), produzione carta (S4) e trattamento metalli (S5). In Tabella 1 è riportato il numero di aziende considerate nei diversi settori industriali per classe dimensionale. Il numero complessivo di aziende è superiore a 45000, con un contributo prossimo al 75% di quelle dei settori alimentare e di trattamento dei metalli. In termini di distribuzione dimensionale, come evidenziato in Figura 1, mediamente circa il 75% delle aziende sono piccole (fino a 50 dipendenti, n1-49), con una maggiore incidenza nel settore tessile (82%) e ben più contenuta nel settore produzione carta (54%). Il dettaglio del numero di aziende per tipologia (sulla base del codice NAICS) e classe dimensionale (sulla base del numero di occupati) è riportato nelle Tabelle 2-6 per i settori industriali di interesse: come evidenziato nelle singole tabelle, gli specifici codici NAICS considerati sono 49 nel settore alimentare, 17 nel settore chimico, 12 nel settore tessile, 7 nel settore produzione carta e 32 nel settore trattamento metalli.

Manufacturing Thermal Energy Use in 2014. In questa sezione del database NREL, sono riportate le stime dell'energia termica utilizzata e dell'andamento del carico termico nel tempo.

¹ <https://github.com/NREL/Industry-Energy-Tool>

Il primo set di dati stima l'uso di energia per uso finale, temperatura, contea e classe dimensionale in termini di occupazione degli impianti per tutte le industrie manifatturiere statunitensi nel 2014. La metodologia di stima si basa su studi precedenti effettuati sull'uso di energia industriale: *"United States County-Level Industrial Energy Use"*, disponibile al link <https://dx.doi.org/10.7799/1481899>; *"Industrial Process Heat Demand Characterization"*, <https://dx.doi.org/10.7799/1461488>.

Il secondo set di dati stima il carico termico orario (come frazione dell'energia annuale utilizzata per il calore) utilizzando le osservazioni orarie del carico termico delle caldaie industriali e della cogenerazione di energia elettrica e termica provenienti dai dati del programma *"Power plant emissions, compliance, and allowance data"* dell'EPA², le ore di funzionamento settimanali nel 2014 provenienti dall'indagine trimestrale del Census sull'utilizzo della capacità degli impianti³ e le ore di produzione annuali riportate dalle valutazioni condotte da Industrial Assessment Centers⁴. In Tabella 7 il simbolo "X" contraddistingue le aziende, per tipologia NAICS e classe dimensionale, per le quali sono disponibili informazioni sull'energia termica utilizzata nell'anno ai diversi livelli di temperatura e sull'andamento del carico termico. In relazione a quest'ultimo aspetto, sono disponibili andamenti caratteristici del carico termico in giorni tipo (Weekday, Saturday, Sunday), in funzione della tipologia NAICS e classe dimensionale. Informazioni analoghe sono riportate in Tabella 8, per quelle aziende per le quali i dati sono stati desunti nel database NREL non in base alla classe dimensionale ma attraverso l'impiego dei dati sulle emissioni del Greenhouse Gas Reporting Program (ghgrp). In Tabella 9, a titolo esemplificativo, sono riportati i valori di energia termica annua richiesta (in MWh) per tipologia NAICS e classe dimensionale di aziende del settore alimentare. In Tabella 10, sono riportati i livelli di temperatura ai quali è richiesta l'energia termica, con la ripartizione percentuale. In relazione al diagramma orario di utilizzo, in Figura 2 sono riportati i diagrammi di utilizzo per giorno tipo e classe dimensionale nel caso di tipologia NAICS 312120 (birrerie): il diverso utilizzo del fine settimana nelle attività produttive, al crescere della classe dimensionale dell'azienda fa passare il coefficiente di utilizzazione annuale dal 56.3% (n1-49) al 78.7% (n250-499). Per tener conto della variabilità nella richiesta dell'energia termica nel tempo, è così opportuno riferirsi alla curva di durata dei carichi termici: ciascun punto su questa curva individua il numero di giorni dell'anno in cui uno specifico carico termico è stato uguagliato o superato. Per il caso in esame (NAICS=312120), la Figura 3 mostra l'andamento della curva di durata al variare della classe dimensionale esprimendo entrambe grandezze in termini percentuali.

7.2 Sviluppo di una metodologia per sistemi energetici con variabilità nell'utilizzo dell'energia termica

Le attività svolte hanno riguardato lo sviluppo di modelli avanzati per l'analisi di sistemi energetici caratterizzati da un'elevata variabilità nell'utilizzo dell'energia termica. Il lavoro è stato articolato distinguendo due tipologie di processi: i processi batch e i processi continui.

Il software, sviluppato su piattaforma Excel-VBA, gestisce entrambe le tipologie di processi con l'obiettivo di stimare il potenziale recupero energetico a partire dai dati di input relativi alle caratteristiche dei fluidi di processo quali temperature, tempi, capacità termiche e coefficienti di scambio termico. Sebbene questi siano dipendenti dalla tipologia di fluido, di scambiatore e di flusso, è possibile stimare in via preliminare dei valori di riferimento che siano da target per un successivo dimensionamento considerando lo stato del fluido in oggetto (gassoso, liquido,

² <https://campd.epa.gov/>

³ <https://www.census.gov/programs-surveys/qpc/data.html>

⁴ <https://iac.university/>

bifase). La piattaforma consente la gestione di un massimo di 40 fluidi di processo in 40 intervalli temporali distinti, eseguendo una serie di subroutine sequenziali per quantificare il potenziale recupero di calore.

I dati di input vengono inseriti in celle dedicate all'interno del foglio "Input". Oltre alla fase di inserimento dati, all'interno del foglio sono state implementate relazioni in grado di definire delle matrici di contemporaneità. Queste sono matrici quadrate simmetriche di dimensione pari al numero di fluidi di processo. In prima istanza il software valuta una **matrice di contemporaneità dei flussi** sulla base degli intervalli temporali nei quali sono attivi (Figura 5). Noti gli intervalli temporali, la tipologia, le temperature e il ΔT minimo del processo questo approccio consente la valutazione dell'energia termica scambiabile in modo diretto (Figura 6). Questo primo step consente di individuare preliminarmente i flussi termici di maggiore interesse e verificare se sussistano le condizioni per un recupero energetico interno che non richieda una modifica significativa della rete esistente.

A valle di questa prima analisi si procede alla valutazione del **Time Average Model (TAM)**. Nel TAM si differenziano i fluidi di processo in caldi e freddi. Per ciascun fluido si valuta l'energia termica da scambiare in funzione degli intervalli temporali, dei livelli di temperatura e delle capacità termiche. Le temperature ingresso-uscita di ciascun gruppo determinano degli intervalli termici all'interno dei quali viene scambiata energia. Si valuta dunque il calore scambiato in ciascun intervallo e si rappresentano le curve cumulative dei fluidi caldi e freddi. Il massimo recupero energetico e i minimi apporti termici esterni delle utilities calde e fredde vengono valutati imponendo un valore del ΔT minimo al pinch point. Il valore di recupero calcolato rappresenta il recupero diretto e indiretto attraverso sistemi di accumulo in grado di trasferire calore tra i diversi intervalli.

In aggiunta al modello TAM è stato implementato il TSM (**Time Slice Model**). Nel TSM si considerano tempi caratteristici per ciascun fluido di processo. Noti i tempi si individuano gli intervalli temporali, i quali dipendono sia dai tempi caratteristici del fluido sia dal tipo di processo. Per ogni intervallo si procede alla valutazione delle curve cumulative globali da cui si ricava la posizione del pinch point, il massimo recupero interno diretto, e le potenze termiche da scambiare con le hot/cold utilities. Il modello procede alla progettazione della rete di scambiatori secondo i principi della Pinch Technology per garantire il massimo recupero energetico. Una subroutine secondaria è stata sviluppata per la rappresentazione della rete così progettata.

Un'analisi di letteratura ha consentito di implementare **correlazioni di costo**⁵ per scambiatori di calore, funzioni dell'area di scambio termico valutata a partire dai valori di temperatura e dai coefficienti di scambio termico. Tre diverse tipologie di scambiatori sono considerate: tubi e mantello, piastre e raffreddatori ad aria.

Lo scambio termico esterno prevede inoltre l'utilizzo di vettori termici cui corrisponde un costo. Quest'ultimo è stato valutato implementando delle correlazioni⁶ che tengano conto dell'inflazione e del costo dell'energia attraverso due parametri: il CEPCI (Chemical Engineering Plant Cost Index) e il costo del combustibile. Altre costanti intervengono nelle correlazioni dipendenti dalla tipologia di utility. In relazione al modello sviluppato è stato considerata una correlazione per il costo delle utilities "calde" comune per olio, acqua calda e sali fusi e due

⁵ <https://doi.org/10.3390/en14092665>

⁶ Gael D. Ulrich and Palligarnai T. Vasudevan – "How to estimate Utility costs"

correlazioni distinte per le utilities “fredde”, una nel caso di utilizzo di refrigeranti e una per l’acqua di raffreddamento.

7.3 Analisi di casi studio

Le potenzialità del modello sviluppato sono evidenziate attraverso l’analisi di un caso studio individuato in letteratura relativo ad un processo di produzione della birra⁷. Quest’ultimo risulta caratterizzato da molteplici fluidi di processo che intervengono in fasi di produzione che si susseguono in serie e in parallelo. L’analisi del caso ha consentito di distinguere 18 fluidi che intervengono in tempi diversi generando 12 distinti intervalli temporali entro i quali esistono potenzialità di recupero.

I dati di input sono stati individuati ed inseriti come mostrato in Tabella 12, dividendo alcune correnti in maniera fittizia al fine di separare il calore latente e il calore sensibile.

Dalla determinazione delle matrici di contemporaneità risulta un’energia termica recuperabile all’interno di un turno di lavoro pari a 620 kWh. Il recupero maggiore, pari a 147.7 kWh, è rappresentato dallo scambio termico possibile tra il raffreddamento del mosto e il riscaldamento dell’acqua di processo necessaria al lavaggio (fluidi 4 e 14) nell’intervallo temporale 4.

Il massimo recupero ottenibile, valutato con il Time Average Model, ammonta a 2073 kWh, superiore rispetto al valore citato in precedenza che è rappresentativo soltanto del recupero diretto. In queste condizioni sono necessari 723 kWh e 2073 kWh per raffreddamento e riscaldamento esterni, rispettivamente. I risultati del TAM si possono osservare in Figura 7, dove l’intervallo di sovrapposizione delle curve dei fluidi caldi e freddi rappresenta il recupero potenziale (diretto e indiretto).

Per l’analisi del recupero diretto è necessario applicare il modello TSM, andando a calcolare le curve composite globali per ciascun intervallo temporale. Queste sono rappresentate in Figura 8. Osservando l’andamento riportato per l’intervallo 4, è possibile valutare una richiesta di raffreddamento esterno superiore a 1200 kWh e una temperatura al pinch di circa 90 °C, molto superiore al pinch point dell’intervallo successivo (Tabella 14). Questa differenza può giustificare l’utilizzo di sistemi di accumulo termico al fine di utilizzare questa richiesta energetica per il riscaldamento dei fluidi di processo nell’intervallo 5. Maggiori margini di efficientamento attraverso recupero diretto sono invece presenti nell’intervallo 11 come testimoniato dalla bassa pendenza della curva. Il progetto della rete per questo intervallo è rappresentato in Figura 9. Il dimensionamento delle reti complessivo è invece riportato in Tabella 15. Il confronto tra i risultati del modello e quelli disponibili dal caso di letteratura riportato in Tabella 17, mostra variazioni trascurabili. I risultati di sintesi, relativi alle utenze esterne ed al recupero diretto in ogni intervallo sono riassunti in

Tabella 16 e rappresentati in Figura 10. Le maggiori potenzialità di recupero si riscontrano nell’intervallo 11, con corrispondente rete rappresentata in Figura 9.

Sulla base dei risultati ottenuti e del dimensionamento della rete si è proceduto ad una valutazione economica preliminare utilizzando le correlazioni di costo rappresentate in Figura 11 per il costo degli scambiatori e le correlazioni riportate in Tabella 18 per il costo delle utilities. I risultati in Tabella 19 evidenziano come l’inserimento di scambiatori per il recupero diretto

⁷ Eiholzer et al – “Integration of a solar thermal system in a medium-sized brewery using pinch analysis: Methodology and case study”, Applied Thermal Engineering 2017.

consenta di ridurre i costi operativi dell'8% con tempo di ritorno dell'investimento inferiore a 3 anni e un risparmio di CO₂ del 24%.

Tabella 1. Numero di aziende per dimensione occupazionale nei settori industriali

	n1_49	n50_99	n100_249	n250_499	n500_999	n1000	TOTALE
S1: SETTORE ALIMENTARE	12369	1686	1603	738	319	100	16815
S2: SETTORE CHIMICO	3592	631	473	132	67	18	4913
S3: SETTORE TESSILE	3399	355	292	99	22	6	4173
S4: SETTORE PRODUZIONE CARTA	1410	505	560	99	18	2	2594
S5: SETTORE TRATTAMENTO METALLI	13401	2508	1712	407	115	12	18155
	34171	5685	4640	1475	541	138	46650

Tabella 2. Numero di aziende per dimensione occupazionale nel settore alimentare

S1: SETTORE ALIMENTARE (totale=16815)

NAICS	DENOMINAZIONE NAICS	n1_49	n50_99	n100_249	n250_499	n500_999	n1000
311111	Produzione di alimenti per cani e gatti	171	33	44	17		
311119	Produzione di altri alimenti per animali	814	70	19	1	2	
311211	Macinazione di farina	204	41	20	1		1
311212	Macinazione del riso	42	11	8	1	1	
311213	Produzione di malto	25	3	2			
311221	Macinazione del mais umido	38	6	1			
311224	Lavorazione della soia e di altri semi oleosi	85	17	4	1		
311225	Raffinazione e miscelazione di oli e grassi	70	17	20	5		
311230	Produzione di cereali per la prima colazione	34	7	15	8	2	
311313	Produzione di zucchero di barbabietola	7	5				
311314	Produzione di zucchero di canna	30	9	7	2	2	
311340	Produzione di dolciumi non a base di cioccolato	270	23	28	15	7	
311351	Produzione di cioccolato e dolciumi da semi di	114	12	9	7	1	
311352	Produzione di dolciumi da cioccolato acquistato	513	41	25	10	11	4
311411	Produzione di frutta, succhi e verdure congelati	74	26	37	18	6	
311412	Produzione di alimenti speciali surgelati	197	44	60	24	16	11
311421	Inscatolamento di frutta e verdura	333	67	71	30	4	
311422	Inscatolamento di specialità	76	6	10	6	3	
311423	Produzione di alimenti secchi e disidratati	104	29	19	9	3	
311511	Produzione di latte fluido	162	60	122	47	5	2
311512	Produzione di burro di panetteria	24	7	5	1		
311513	Produzione di formaggio	232	58	60	33	7	
311514	Produzione di prodotti lattiero-caseari secchi, condensati ed evaporati	95	40	27	11		
311520	Produzione di gelati e dessert congelati	208	24	24	11	7	1
311611	Macellazione di animali (escluso il pollame)	948	43	41	23	22	15
311612	Lavorazione di carne da carcasse	632	94	84	73	34	5
311613	Lavorazione di carne e sottoprodotti di carne	135	37	6			
311615	Lavorazione del pollame	162	26	38	59	82	47
311710	Preparazione e confezionamento di prodotti ittici	213	43	43	16	5	
311811	Panifici al dettaglio	1136	60	16	3		
311812	Panifici commerciali	621	140	158	67	18	2
311813	Produzione di torte, crostate e altri dolci congelati	98	24	46	18	3	1
311821	Produzione di biscotti e cracker	179	24	26	23	17	1
311824	Produzione di pasta secca, pasta e miscele di farina a partire da farina acquistata	204	31	47	13	3	
311830	Produzione di tortilla	148	22	22	9	6	
311911	Produzione di noci tostate e burro di arachidi	118	30	26	15	2	1
311919	Produzione di altri snack	168	35	29	26	11	1
311920	Produzione di caffè e tè	266	27	23	8	2	2
311930	Produzione di sciroppi e concentrati aromatizzanti	84	13	14	7		
311941	Produzione di maionese, condimenti e altre salse preparate	196	30	29	8	2	
311942	Produzione di spezie ed estratti	188	35	31	8	2	
311991	Produzione di alimenti pronti deperibili	253	58	54	29	10	3
311999	Produzione di tutti gli altri alimenti vari	309	50	36	14	5	1
312111	Produzione di bevande analcoliche	149	67	111	40	9	
312112	Produzione di acqua in bottiglia	184	31	28	2		
312113	Produzione di ghiaccio	349	4				
312120	Birrerie	619	57	32	4	6	1
312130	Cantine	802	38	16	8	3	1
312140	Distillerie	286	11	10	7		
		12369	1686	1603	738	319	100

Tabella 3. Numero di aziende per dimensione occupazionale nel settore chimico

S2: SETTORE CHIMICO (totale=4913)

NAICS	DENOMINAZIONE NAICS	n1_49	n50_99	n100_249	n250_499	n500_999	n1000
324191	Produzione di olio lubrificante e grasso di petrolio	157	34	22	3	1	
325130	Produzione di coloranti e pigmenti sintetici	87	16	16	3		
325314	Produzione di fertilizzanti (solo miscelazione)	318	21	4	1		
325320	Produzione di pesticidi e altri prodotti chimici per l'agricoltura	119	26	14	4	1	
325411	Produzione di medicinali e prodotti botanici	192	45	41	8	8	3
325413	Produzione di sostanze diagnostiche in vitro	98	27	15	13	9	5
325414	Produzione di prodotti biologici (eccetto quelli diagnostici)	142	26	25	18	15	4
325510	Produzione di vernici e rivestimenti	416	73	59	8	5	
325520	Produzione di adesivi	231	61	38	8	1	
325611	Produzione di saponi e altri detergenti	309	39	35	11	6	1
325612	Produzione di lucidi e altri prodotti per l'igiene	244	31	30	7	2	
325613	Produzione di agenti attivi di superficie	84	19	11		1	
325620	Produzione di preparati per toilette	276	53	50	25	12	4
325910	Produzione di inchiostri da stampa	174	27	15	3	1	1
325920	Produzione di esplosivi	47	6	14	5	1	
325991	Produzione di esplosivi	226	53	34	6	1	
325998	Tutti gli altri produttori di prodotti e preparati	472	74	50	9	3	
		3592	631	473	132	67	18

Tabella 4. Numero di aziende per dimensione occupazionale nel settore tessile

S3: SETTORE TESSILE (totale=4173)

NAICS	DENOMINAZIONE NAICS	n1_49	n50_99	n100_249	n250_499	n500_999	n1000
313110	Fabbriche di fibre, filati e fili	147	37	39	21	5	
313210	Industrie di tessuti a trama larga	155	23	32	12	3	1
313220	Fabbriche di tessuti stretti e ricamo a macchina	123	17	13	2		
313230	Industrie di tessuti non tessuti	124	29	31	7	3	1
313240	Industrie di tessuti a maglia	83	17	13	5	1	
313310	Mulini per il finissaggio di tessuti e stoffe	359	35	22	7	2	
313320	Industrie per il rivestimento dei tessuti	97	28	15	3		
314110	Tappezzieri e Tappeti	95	13	15	14	6	3
314120	Industrie di tende e di lino	576	46	36	11		
314910	Industrie di borse e tele tessili	630	36	28	3		
314994	Produttori di corde, cordami, spaghi, corde per pneumatici e tessuti per pneumatici	95	13	8	4		
314999	Tutte le altre fabbriche di prodotti tessili vari	915	61	40	10	2	1
		3399	355	292	99	22	6

Tabella 5. Numero di aziende per dimensione occupazionale nel settore produzione carta

S4: SETTORE PRODUZIONE CARTA (totale=2594)

NAICS	DENOMINAZIONE NAICS	n1_49	n50_99	n100_249	n250_499	n500_999	n1000
322211	Produzione di scatole in fibra solida e ondulata	361	166	218	14	1	
322212	Produzione di scatole di cartone pieghevoli	155	90	97	27		
322219	Produzione di altri contenitori di cartone	167	53	30	11	4	1
322220	Produzione di sacchetti di carta e di carta patinata e trattata	279	92	108	21	6	
322230	Fabbricazione di prodotti di cancelleria	177	45	52	10		
322291	Produzione di prodotti di carta sanitaria	56	21	23	11	6	1
322299	Tutti gli altri prodotti cartotecnici trasformati	215	38	32	5	1	
		1410	505	560	99	18	2

Tabella 6. Numero di aziende per dimensione occupazionale nel settore trattamento metalli

S5: SETTORE TRATTAMENTO METALLI (totale=18155)

NAICS	DENOMINAZIONE NAICS	n1_49	n50_99	n100_249	n250_499	n500_999	n1000
331210	Produzione di tubi di ferro e acciaio da acciaio	95	34	42	14	5	1
331221	Produzione di forme di acciaio laminato	95	21	17	4		
331222	Trafilatura di fili d'acciaio	129	38	28	10	1	
331313	Raffinazione dell'allumina e produzione di alluminio primario	45	7	3	1	1	
332215	Produzione di pentole, utensili, posate e posateria in metallo (eccetto quelli preziosi)	145	6	13	4	1	
332216	Produzione di lame da sega e utensili manuali	405	53	38	10	6	
332311	Produzione di edifici e componenti prefabbricati in	395	56	52	11	2	
332312	Produzione di metalli strutturali fabbricati	1010	199	128	31	6	2
332313	Fabbricazione di piastre di metallo	579	105	49	9	1	
332321	Produzione di finestre e porte in metallo	372	81	69	23	10	2
332322	Produzione di lamiera	1002	214	129	17	4	1
332323	Fabbricazione di opere in metallo ornamentali e architettoniche	762	66	36	3	3	
332410	Produzione di caldaie e scambiatori di calore	128	37	43	14	4	1
332420	Fabbricazione di serbatoi in metallo (calibro	362	86	76	21	1	
332431	Produzione di lattine in metallo	53	28	68	7		
332439	Produzione di altri contenitori metallici	188	31	19	5	3	
332510	Produzione di ferramenta	277	46	42	13	7	
332613	Produzione di molle	161	45	32	6	1	
332618	Produzione di altri prodotti in filo metallico	397	60	30	10	1	
332710	Officine meccaniche	2073	380	174	27	3	
332721	Produzione di prodotti torniti di precisione	819	186	111	26	4	
332722	Produzione di bulloni, dadi, viti, rivetti e rondelle	267	56	59	12	4	1
332811	Trattamento termico dei metalli	302	47	20	3	1	
332812	Rivestimento dei metalli, incisione (eccetto gioielleria e argenteria) e servizi affini ai produttori	754	138	57	8	1	
332813	Elettrodeposizione, placcatura, lucidatura, anodizzazione e colorazione	563	108	46	7	2	
332911	Produzione di valvole industriali	200	48	64	31	6	1
332912	Produzione di valvole e tubi flessibili per l'energia	146	38	43	20	11	3
332913	Produzione di accessori e finiture per impianti	72	12	15	5	3	
332919	Produzione di altre valvole e accessori per tubi in	115	27	29	8	3	
332991	Produzione di cuscinetti a sfera e a rulli	68	24	34	21	11	
332996	Produzione di tubi e accessori per tubi fabbricati	352	70	45	10	6	
332999	Tutte le altre attività di produzione di prodotti	1070	161	101	16	3	
		13401	2508	1712	407	115	12

Tabella 7. Aziende con profili di carico nei settori industriali per dimensione occupazionale

NAICS	DENOMINAZIONE NAICS	#	n1_49	n50_99	n100_249	n250_499	n500_999	n1000
311411	Produzione di frutta, succhi e verdure congelati	S1	X	X	X	X	X	X
311213	Produzione di malto	S1	X	X	X			
311230	Produzione di cereali per la prima colazione	S1	X	X				
311313	Produzione di zucchero di barbabietola	S1	X	X	X	X	X	
311352	Produzione di dolci da cioccolato acquistato	S1	X	X	X	X	X	
311412	Produzione di alimenti speciali surgelati	S1	X	X	X	X	X	
311421	Inscatolamento di frutta e verdura	S1	X	X	X	X	X	
311422	Inscatolamento di specialità	S1	X	X	X	X	X	
311423	Produzione di alimenti secchi e disidratati	S1	X	X	X	X	X	X
311511	Produzione di latte fluido	S1	X	X	X	X		
311512	Produzione di burro di panetteria	S1	X	X	X	X	X	
311513	Produzione di formaggio	S1	X	X	X	X		
311514	Produzione di prodotti lattiero-caseari secchi, condensati ed evaporati	S1	X	X	X	X	X	X
311520	Produzione di gelati e dessert congelati	S1	X	X	X	X	X	X
311611	Macellazione di animali (escluso il pollame)	S1	X	X	X	X	X	X
311612	Lavorazione di carne da carcasse	S1	X	X	X			
311613	Lavorazione di carne e sottoprodotti di carne	S1	X	X	X	X	X	X
311999	Produzione di tutti gli altri alimenti vari	S1	X	X	X	X	X	
312111	Produzione di bevande analcoliche	S1	X	X	X	X		
312112	Produzione di acqua in bottiglia	S1	X	X				
312113	Produzione di ghiaccio	S1	X	X	X	X	X	X
312120	Birrerie	S1	X	X	X	X	X	X
312130	Cantine	S1	X	X	X	X		
312140	Distillerie	S1	X	X	X	X	X	
313110	Fabbriche di fibre, filati e fili	S3	X	X	X	X	X	X
313210	Industrie di tessuti a trama larga	S3	X	X	X	X		
313220	Fabbriche di tessuti stretti e ricamo a macchina Schiffli	S3	X	X	X	X	X	X
313230	Industrie di tessuti non tessuti	S3	X	X	X	X	X	
313240	Industrie di tessuti a maglia	S3	X	X	X	X	X	
313310	Mulini per il finissaggio di tessuti e stoffe	S3	X	X	X	X		
313320	Industrie per il rivestimento dei tessuti	S3	X	X	X	X	X	X
314110	Tappezzerie e Tappeti	S3	X	X	X	X		
314120	Industrie di tende e di lino	S3	X	X	X	X		
314910	Industrie di borse e tele tessili	S3	X	X	X	X		
325998	Tutti gli altri produttori di prodotti e preparati chimici vari	S2	X	X	X	X	X	X
331210	Produzione di tubi di ferro e acciaio da acciaio acquistato	S5	X	X	X	X		
331221	Produzione di forme di acciaio laminato	S5	X	X	X	X	X	
331313	Raffinazione dell'allumina e produzione di alluminio primario	S5	X	X	X	X	X	
332215	Produzione di pentole, utensili, posate e posateria in metallo (eccetto quelli preziosi)	S5	X	X	X	X	X	
332216	Produzione di lame da sega e utensili manuali	S5	X	X	X	X	X	
332311	Produzione di edifici e componenti prefabbricati in metallo	S5	X	X	X	X	X	X
332312	Produzione di metalli strutturali fabbricati	S5	X	X	X	X	X	
332313	Fabbricazione di piastre di metallo	S5	X	X	X	X	X	X
332321	Produzione di finestre e porte in metallo	S5	X	X	X	X	X	X

Segue Tabella 7

NAICS	DENOMINAZIONE NAICS	#	n1_49	n50_99	n100_249	n250_499	n500_999	n1000
332322	Produzione di lamiere	S5	X	X	X	X	X	
332323	Fabbricazione di opere in metallo ornamentali e architettoniche	S5	X	X	X	X	X	X
332410	Produzione di caldaie e scambiatori di calore	S5	X	X	X	X	X	
332420	Fabbricazione di serbatoi in metallo (calibro pesante)	S5	X	X	X	X		
332431	Produzione di lattine in metallo	S5	X	X	X	X	X	
332439	Produzione di altri contenitori metallici	S5	X	X	X	X	X	
332510	Produzione di ferramenta	S5	X	X	X	X	X	
332613	Produzione di molle	S5	X	X	X	X	X	
332618	Produzione di altri prodotti in filo metallico	S5	X	X	X	X	X	
332710	Officine meccaniche	S5	X	X	X	X	X	
332721	Produzione di prodotti torniti di precisione	S5	X	X	X	X	X	X
332722	Produzione di bulloni, dadi, viti, rivetti e rondelle	S5	X	X	X	X	X	
332811	Trattamento termico dei metalli	S5	X	X	X	X	X	
332812	Rivestimento dei metalli, incisione (eccetto gioielleria e argenteria) e servizi affini ai produttori	S5	X	X	X	X	X	
332813	Elettrodeposizione, placcatura, lucidatura, anodizzazione e colorazione	S5	X	X	X	X	X	X
332911	Produzione di valvole industriali	S5	X	X	X	X	X	X
332912	Produzione di valvole e tubi flessibili per l'energia fluida	S5	X	X	X	X	X	
332913	Produzione di accessori e finiture per impianti idraulici	S5	X	X	X	X	X	
			62	62	60	58	47	19

Tabella 8. Aziende con profili di carico nei settori industriali con dati riferiti a GHGRP

NAICS	DENOMINAZIONE NAICS	#	ghgrp	NAICS	DENOMINAZIONE NAICS	#	ghgrp
311111	Produzione di alimenti per cani e gatti	S1	X	322219	Produzione di altri contenitori di cartone	S4	X
311119	Produzione di altri alimenti per animali	S1	X	322220	Produzione di sacchetti di carta e di carta patinata e trattata	S4	X
311221	Macinazione del mais umido	S1	X	322291	Produzione di prodotti di carta sanitaria	S4	X
311224	Lavorazione della soia e di altri semi oleosi	S1	X	322299	Tutti gli altri prodotti cartotecnici trasformati	S4	X
311225	Raffinazione e miscelazione di oli e grassi	S1	X	324191	Produzione di olio lubrificante e grasso di petrolio	S2	X
311314	Produzione di zucchero di canna	S1	X	325130	Produzione di coloranti e pigmenti sintetici	S2	X
311615	Lavorazione del pollame	S1	X	325320	Produzione di pesticidi e altri prodotti chimici per l'agricoltura	S2	X
311710	Preparazione e confezionamento di prodotti ittici	S1	X	325411	Produzione di medicinali e prodotti botanici	S2	X
311821	Produzione di biscotti e cracker	S1	X	325414	Produzione di prodotti biologici (eccetto quelli diagnostici)	S2	X
311911	Produzione di noci tostate e burro di arachidi	S1	X	325510	Produzione di vernici e rivestimenti	S2	X
311919	Produzione di altri snack	S1	X	325611	Produzione di saponi e altri detergenti	S2	X
311920	Produzione di caffè e tè	S1	X	325612	Produzione di lucidi e altri prodotti per l'igiene	S2	X
311941	Produzione di maionese, condimenti e altre salse preparate	S1	X	325613	Produzione di agenti attivi di superficie	S2	X
311942	Produzione di spezie ed estratti	S1	X	325920	Produzione di esplosivi	S2	X
311991	Produzione di alimenti pronti deperibili	S1	X	331222	Trafilatura di fili d'acciaio	S5	X
314994	Produttori di corde, cordami, spaghi, corde per pneumatici e tessuti per pneumatici	S3	X	332919	Produzione di altre valvole e accessori per tubi in metallo	S5	X
				32			

Tabella 9. Consumi annui di energia termica in MWh per dimensione occupazionale nel settore alimentare

NAICS	n1_49	n50_99	n100_249	n250_499	n500_999	n1000
312112	113.5	1872.6	5612.9	11657.1		
312113	120.3	1436.7				
311352	155.6	1268.9	2096	7060.5	36484.3	192668.4
311611	444.7	4198.7	6174.7	8591.8	13337.2	33486.7
311999	135.9	1745.7	2362.1	5947.7	26383.8	185782
312111	121.9	2455.8	6071.2	24445.1	64095.9	
312120	181.8	1940	3515.9	13725.7	27819.5	272730.9
312130	262.4	3732.1	8349.3	25139.4	33981.8	337839.4
312140	130.5	2593.7	6070.3	27171.2		
311613	622.6	5593.2	8059.7			
311612	763.6	6899.7	12681.4	16484.4	21468.7	39886.1
311512	844.4	3752.8	3709.9	9142.3		
311520	1029.3	2844.8	3278.5	11841.7	64983.1	954312.9
311421	1674.1	5878.4	9054.3	26130.8	48996	
311422	1136.2	4587.6	8811.3	15553.3	44980.3	
311513	1137.1	4724.8	4541.3	15595.6	73659.5	
311313	35574.9	194431.5				
311412	1350.1	5955.8	9098.3	22754.6	50236.9	360452.7
311411	1594.1	5654.2	10539.8	38097.5	81580.2	
311511	773.2	3016.2	4288.8	12104.5	67322.8	174429.2
311423	1708	6162.8	11234	43914.3	61929.4	
311514	898	3149.1	3755.7	11902.4		
311230	2167.7	9587.2	21554.3	124164.5	515853.7	
311213	3374.7	14037.1	18488.3			

Tabella 10. Livelli di temperatura e distribuzione dei consumi in termini percentuali

NAICS	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	NAICS	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
312112	72.7	87.7	96.7						312112	25%	50%	25%					
312113	72.7	87.7	96.7						312113	25%	50%	25%					
311352	67.3	77.6	84.9						311352	25%	50%	25%					
311611	24	27	93						311611	10%	27%	63%					
311999	72.5	87.9	96.8						311999	25%	50%	25%					
312111	72.7	87.7	96.7						312111	25%	50%	25%					
312120	52	63	100						312120	23%	65%	12%					
312130	72.7	87.7	96.7						312130	25%	50%	25%					
312140	72.7	87.7	96.7						312140	25%	50%	25%					
311613	42.6	59.6	76.3						311613	25%	50%	25%					
311612	42.6	59.6	76.3						311612	25%	50%	25%					
311512	79.6	86.4	93.3						311512	25%	50%	25%					
311520	79.9	86.6	93.3						311520	25%	50%	25%					
311421	38.1	49	71	85	92	92.3	100	112.3	311421	17%	8%	20%	3%	8%	11%	17%	15%
311422	66.2	84.1	95.3						311422	25%	50%	25%					
311513	79.6	86.4	93.3						311513	25%	50%	25%					
311313	66	71	82	89	93				311313	1%	7%	16%	13%	63%			
311412	66.4	84.2	95.5						311412	25%	50%	25%					
311411	66.4	84.2	95.5						311411	25%	50%	25%					
311511	73	100							311511	53%	47%						
311423	66.2	84.1	95.3						311423	25%	50%	25%					
311514	73	100							311514	53%	47%						
311230	72.8	88.5	100.9						311230	25%	50%	25%					
311213	72.8	88.5	100.9						311213	25%	50%	25%					

Tabella 11. Dettaglio dei fluidi di processo del caso studio

Corrente	Tin [°C]	Tout [°C]	Fase	# corrente	Tipo	Portata (kg/s)	cp (kJ/kgK)	Pth [kW]	tstart [h]	tstop [h]
Acqua	8	80	riscaldamento acqua processo (ammontamento mosto)	1	Fredda	8.77	4.198	2651	0	0.58
Mosto	65	101	preiscaldo mosto	2	Fredda	2.72	3.758	368	2.58	4.58
Mosto	101	101	cottura mosto	3	Fredda	0.19	-	438	4.58	5.75
Mosto	97	20	raffreddamento mosto	4	Calda	3.41	3.755	-986	0.5	1.92
Mosto	20	9	fermentazione	5	Calda	1.4	3.896	-60	0	6
Birra	9	1	raffreddamento post fermentazione	6	Calda	2.59	3.909	-81	0	0.25
Birra	9	1	raffreddamento post fermentazione	7	Calda	2.59	3.909	-81	3.25	6
Birra	1	0	raffreddamento post fermentazione	8	Calda	5.12	3.906	-20	0	6

Acqua	8	80	riscaldamento acqua di processo (CIP)	9	Fredda	1.47	4.204	445	2.58	2.83
Acqua	8	80	riscaldamento acqua di processo (CIP)	10	Fredda	1.47	4.204	445	0	0.25
Acqua	8	80	riscaldamento acqua di processo (CIP)	11	Fredda	1.47	4.204	445	1.92	2.17
Acqua	8	80	riscaldamento acqua di processo (CIP)	12	Fredda	1.47	4.204	445	0.25	0.5
Acqua	8	80	riscaldamento acqua di processo (CIP)	13	Fredda	1.47	4.204	445	3	3.25
Acqua	8	80	riscaldamento acqua di processo (Lavaggio fusti)	14	Fredda	0.34	4.248	104	0	6
Acqua	8	160	Generazione vapore (6 bar)	15	Fredda	0.01	-	27	0	6
Gas esausti	170	120	Raffreddamento gas esausti dal generatore di vapore	16	Calda	0.45	1.067	-24	2.58	4.58
Gas esausti	170	120	Raffreddamento gas esausti dal generatore di vapore	17	Calda	0.52	1.077	-28	4.58	5.75
Vapore di bollitura mosto	101	30	Condensazione vapore bollitura mosto	18	Calda	0.19	-	-506	4.58	5.75

Tabella 12. Input dati modello SW. Le celle colorate rappresentano i dati di input del modello

fluido	Tin	Tout	Tipo	MCp	ti	tf	Pth	En	Tin_s	Tout_s	h
-	°C	°C	-	kW/K	h	h	kW	kWh	°C	°C	W/m2K
1	8.0	80.0	COLD	36.8	0.0	0.58	2651.0	1538	14.0	86.0	500
2	65.0	101.0	COLD	10.2	2.6	4.58	368.0	736	71.0	107.0	500
3	101.0	101.1	COLD	4380.0	4.6	5.75	438.0	512	107.0	107.1	500
4	97.0	20.0	HOT	12.8	0.5	1.92	986.0	1400	91.0	14.0	500
5	20.0	9.0	HOT	5.5	0.0	6.00	60.0	360	14.0	3.0	500
6	9.0	1.0	HOT	10.1	0.0	0.25	81.0	20	3.0	-5.0	500
7	9.0	1.0	HOT	10.1	3.3	6.00	81.0	223	3.0	-5.0	500
8	1.0	0.0	HOT	20.0	0.0	6.00	20.0	120	-5.0	-6.0	500
9	8.0	80.0	COLD	6.2	2.6	2.83	445.0	111	14.0	86.0	500
10	8.0	80.0	COLD	6.2	0.0	0.25	445.0	111	14.0	86.0	500
11	8.0	80.0	COLD	6.2	1.9	2.17	445.0	111	14.0	86.0	500
12	8.0	80.0	COLD	6.2	0.3	0.50	445.0	111	14.0	86.0	500
13	8.0	80.0	COLD	6.2	3.0	3.25	445.0	111	14.0	86.0	500
14	8.0	80.0	COLD	1.4	0.0	6.00	104.0	624	14.0	86.0	500
15	8.0	160.0	COLD	0.0	0.0	6.00	6.4	38	14.0	166.0	500
16	160.0	160.0	COLD	2060.0	0.0	6.00	20.6	124	166.0	166.0	1000
17	170.0	120.0	HOT	0.5	2.6	4.58	24.0	48	164.0	114.0	100
18	170.0	120.0	HOT	0.6	4.6	5.75	28.0	33	164.0	114.0	100
19	101.1	101.0	HOT	4495.0	4.6	5.75	449.5	526	95.1	95.0	1000
20	101.00	30.00	HOT	0.8	4.6	5.75	56.5	66.1	95.0	24.0	500

Tabella 13. Definizione intervalli temporali

Nint	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
tin-tifin [h]	0 - 0.25	0.25 - 0.5	0.5 - 0.58	0.58 - 1.92	1.92 - 2.17	2.17 - 2.58	2.58 - 2.83	2.83 - 3	3 - 3.25	3.25 - 4.58	4.58 - 5.75	5.75 - 6

Tabella 14. Risultati del modello Time Slice Model. [Nella colonna sinistra sono presenti i valori di temperatura aggiustati tenendo conto del DT minimo pari a 12 °C. Sulla riga in alto sono specificati i tempi relativi di ciascun intervallo. I valori su ogni colonna rappresentano i kWh richiesti per ciascun livello di temperatura. In arancione l'energia termica richiesta alle hot utilities. In blu scuro le cold utilities. In rosso la localizzazione del pinch point.]

Nint	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
[°C] \ tin-tifin	0 - 0.25	0.25 - 0.5	0.5 - 0.58	0.58 - 1.92	1.92 - 2.17	2.17 - 2.58	2.58 - 2.83	2.83 - 3	3 - 3.25	3.25 - 4.58	4.58 - 5.75	5.75 - 6
166.0	806.7	806.7	143.7	31.8	144.0	53.7	230.0	80.7	230.0	631.8	507.3	32.7
166.0	801.6	801.6	142.0	4.2	138.8	45.3	224.8	77.2	224.8	604.4	483.2	27.6
164.0	801.6	801.6	142.0	4.1	138.8	45.2	224.8	77.2	224.8	604.2	483.1	27.6
114.0	801.1	801.1	141.9	1.3	138.3	44.4	230.3	81.0	230.3	633.4	513.4	27.1
107.1	801.0	801.0	141.8	0.9	138.2	44.2	230.2	80.9	230.2	633.0	513.1	27.0
107.0	801.0	801.0	141.8	0.9	138.2	44.2	230.2	80.9	230.2	633.0	0.6	27.0
95.1	800.9	800.9	141.8	0.2	138.1	44.0	199.7	60.1	199.7	470.5	0.0	26.9
95.0	800.9	800.9	141.8	0.2	138.1	44.0	199.4	60.0	199.4	469.1	525.9	26.9
91.0	800.8	800.8	141.8	0.0	138.1	44.0	189.2	53.0	189.2	414.5	529.4	26.8
86.0	800.8	800.8	146.9	85.5	138.0	43.9	176.3	44.3	176.3	346.3	533.8	26.8
71.0	633.9	633.9	116.3	313.0	109.3	34.7	109.3	14.4	109.3	112.7	521.7	21.2
24.0	111.2	111.2	20.4	1025.9	19.2	6.1	19.2	2.5	19.2	19.8	483.7	3.7
14.0	0.0	0.0	0.0	1177.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	466.3	0.0
14.0	0.0	0.0	0.0	1177.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	466.3	0.0
3.0	15.0	15.0	4.8	1257.9	15.0	24.6	15.0	10.2	15.0	79.8	536.5	15.0
-5.0	35.3	15.0	4.8	1257.9	15.0	24.6	15.0	10.2	15.0	187.5	631.3	35.3
-6.0	40.3	20.0	6.4	1284.7	20.0	32.8	20.0	13.6	20.0	214.1	654.7	40.3

Tabella 15. Progetto reti in tutti gli intervalli temporali individuati nel caso studio

87	Pth	COLD	HOT	COLD	HOT	Cth _{cold}	Cth _{hot}	Tin cold	Tout cold	Tin _{hot}	Tout _{hot}	int	tin	tout	En
cu-01	60.0	cu	5	A	B		5.45			20.0	9.0	1	0.00	0.25	15.0
cu-02	20.0	cu	8	A	A		20.00			1.0	0.0	1	0.00	0.25	5.0
cu-03	81.0	cu	6	A	A		10.13			9.0	1.0	1	0.00	0.25	20.3
hu-01	2651.0	1	hu	C	D	36.82		8.0	80.0			1	0.00	0.25	662.8
hu-02	445.0	10	hu	C	D	6.18		8.0	80.0			1	0.00	0.25	111.3
hu-03	104.0	14	hu	C	D	1.44		8.0	80.0			1	0.00	0.25	26.0
hu-04	6.4	15	hu	C	D	0.04		8.0	160.0			1	0.00	0.25	1.6
hu-05	20.6	16	hu	D	D	2060		160.0	160.0			1	0.00	0.25	5.2
cu-04	60.0	cu	5	A	B		5.45			20.0	9.0	2	0.25	0.50	15.0
cu-05	20.0	cu	8	A	A		20.00			1.0	0.0	2	0.25	0.50	5.0
hu-06	2651.0	1	hu	C	D	36.82		8.0	80.0			2	0.25	0.50	662.8
hu-07	445.0	12	hu	C	D	6.18		8.0	80.0			2	0.25	0.50	111.3
hu-08	104.0	14	hu	C	D	1.44		8.0	80.0			2	0.25	0.50	26.0
hu-09	6.4	15	hu	C	D	0.04		8.0	160.0			2	0.25	0.50	1.6
hu-10	20.6	16	hu	D	D	2060		160.0	160.0			2	0.25	0.50	5.2
cu-06	60.0	cu	5	A	B		5.45			20.0	9.0	3	0.50	0.58	4.8
cu-07	20.0	cu	8	A	A		20.00			1.0	0.0	3	0.50	0.58	1.6
hx-01	986.0	1	4	C	C	13.69	12.81	8.0	80.0	97.0	20.0	3	0.50	0.58	78.9
hu-11	104.0	14	hu	C	D	1.44		8.0	80.0			3	0.50	0.58	8.3
hu-12	6.4	15	hu	C	D	0.04		8.0	160.0			3	0.50	0.58	0.5
hu-13	20.6	16	hu	D	D	2060		160.0	160.0			3	0.50	0.58	1.6
hu-14	1665.0	1	hu	D	D	36.82		34.8	80.0			3	0.50	0.58	133.2
hx-02	104.0	14	4	A	B	1.44	12.81	80.0	80.0	97.0	97.0	4	0.58	1.92	139.4
cu-08	20.0	cu	8	A	A		20.00			1.0	0.0	4	0.58	1.92	26.8
cu-09	882.0	cu	4	A	A		12.81			88.9	20.0	4	0.58	1.92	1181.9
cu-10	60.0	cu	5	A	A		5.45			20.0	9.0	4	0.58	1.92	80.4
hu-15	3.2	15	hu	C	D	0.04		85.0	160.0			4	0.58	1.92	4.2
hu-16	20.6	16	hu	D	D	2060.0		160.0	160.0			4	0.58	1.92	27.6
cu-11	60.0	cu	5	A	B		5.45			20.0	9.0	5	1.92	2.17	15.0
cu-12	20.0	cu	8	A	A		20.00			1.0	0.0	5	1.92	2.17	5.0

hu-17	445.0	11	hu	C	D	6.18		8.0	80.0			5	1.92	2.17	111.3
hu-18	104.0	14	hu	C	D	1.44		8.0	80.0			5	1.92	2.17	26.0
hu-19	6.4	15	hu	C	D	0.04		8.0	160.0			5	1.92	2.17	1.6
hu-20	20.6	16	hu	D	D	2060.0		160.0	160.0			5	1.92	2.17	5.2
cu-13	60.0	cu	5	A	B		5.45			20.0	9.0	6	2.17	2.58	24.6
cu-14	20.0	cu	8	A	A		20.00			1.0	0.0	6	2.17	2.58	8.2
hu-21	104.0	14	hu	C	D	1.44		8.0	80.0			6	2.17	2.58	42.6
hu-22	6.4	15	hu	C	D	0.04		8.0	160.0			6	2.17	2.58	2.6
hu-23	20.6	16	hu	D	D	2060.0		160.0	160.0			6	2.17	2.58	8.4
cu-15	60.0	cu	5	A	B		5.45			20.0	9.0	7	2.58	2.83	15.0
cu-16	20.0	cu	8	A	A		20.00			1.0	0.0	7	2.58	2.83	5.0
hx-03	24.0	9	17	C	D	6.18	0.48	8.0	11.9	170.0	120.0	7	2.58	2.83	6.0
hu-24	104.0	14	hu	C	D	1.44		8.0	80.0			7	2.58	2.83	26.0
hu-25	6.4	15	hu	C	D	0.04		8.0	160.0			7	2.58	2.83	1.6
hu-26	20.6	16	hu	D	D	2060.0		160.0	160.0			7	2.58	2.83	5.2
hu-27	368.0	2	hu	D	D	10.22		65.0	101.0			7	2.58	2.83	92.0
hu-28	421.0	9	hu	D	D	6.18		11.9	80.0			7	2.58	2.83	105.3
cu-17	60.0	cu	5	A	B		5.45			20.0	9.0	8	2.83	3.00	10.2
cu-18	20.0	cu	8	A	A		20.00			1.0	0.0	8	2.83	3.00	3.4
hx-04	24.0	14	17	C	D	1.44	0.48	8.0	24.6	170.0	120.0	8	2.83	3.00	4.1
hu-29	6.4	15	hu	C	D	0.04		8.0	160.0			8	2.83	3.00	1.1
hu-30	20.6	16	hu	D	D	2060.0		160.0	160.0			8	2.83	3.00	3.5
hu-31	368.0	2	hu	D	D	10.22		65.0	101.0			8	2.83	3.00	62.6
hu-32	80.0	14	hu	D	D	1.44		24.6	80.0			8	2.83	3.00	13.6
cu-19	60.0	cu	5	A	B		5.45			20.0	9.0	9	3.00	3.25	15.0
cu-20	20.0	cu	8	A	A		20.00			1.0	0.0	9	3.00	3.25	5.0
hx-05	24.0	13	17	C	D	6.18	0.48	8.0	11.9	170.0	120.0	9	3.00	3.25	6.0
hu-33	104.0	14	hu	C	D	1.44		8.0	80.0			9	3.00	3.25	26.0
hu-34	6.4	15	hu	C	D	0.04		8.0	160.0			9	3.00	3.25	1.6
hu-35	20.6	16	hu	D	D	2060.0		160.0	160.0			9	3.00	3.25	5.2

hu-36	368.0	2	hu	D	D	10.22		65.0	101.0			9	3.00	3.25	92.0
hu-37	421.0	13	hu	D	D	6.18		11.9	80.0			9	3.00	3.25	105.3
cu-21	60.0	cu	5	A	B		5.45			20.0	9.0	10	3.25	4.58	79.8
cu-22	20.0	cu	8	A	A		20.00			1.0	0.0	10	3.25	4.58	26.6
cu-23	81.0	cu	7	A	A		10.13			9.0	1.0	10	3.25	4.58	107.7
hx-06	24.0	14	17	C	D	1.44	0.48	8.0	24.6	170.0	120.0	10	3.25	4.58	31.9
hu-38	6.4	15	hu	C	D	0.04		8.0	160.0			10	3.25	4.58	8.5
hu-39	20.6	16	hu	D	D	2060.0		160.0	160.0			10	3.25	4.58	27.4
hu-40	368.0	2	hu	D	D	10.22		65.0	101.0			10	3.25	4.58	489.4
hu-41	80.0	14	hu	D	D	1.44		24.6	80.0			10	3.25	4.58	106.4
hx-07	104.0	14	19	A	B	1.44	4495.00	80.0	80.0	101.1	101.1	11	4.58	5.75	121.7
cu-24	345.5	cu	19	A	A		4495.00			101.1	101.0	11	4.58	5.75	404.2
cu-25	20.0	cu	8	A	A		20.00			1.0	0.0	11	4.58	5.75	23.4
cu-26	81.0	cu	7	A	A		10.13			9.0	1.0	11	4.58	5.75	94.8
cu-27	60.0	cu	5	A	A		5.45			20.0	9.0	11	4.58	5.75	70.2
cu-28	56.5	cu	20	A	A		0.80			101.0	30.0	11	4.58	5.75	66.1
hx-08	0.9	15	18	C	D	0.04	0.56	89.1	109.5	121.5	120.0	11	4.58	5.75	1.0
hx-09	27.1	3	18	D	D	0.56	0.56	101.0	149.5	170.0	121.5	11	4.58	5.75	31.8
hu-42	410.9	3	hu	D	D	4380.00		101.0	101.1			11	4.58	5.75	480.7
hu-43	20.6	16	hu	D	D	2060.0		160.0	160.0			11	4.58	5.75	24.1
hu-44	2.1	15	hu	D	D	0.04		109.5	160.0			11	4.58	5.75	2.5
cu-29	60.0	cu	5	A	B		5.45			20.0	9.0	12	5.75	6.00	15.0
cu-30	20.0	cu	8	A	A		20.00			1.0	0.0	12	5.75	6.00	5.0
cu-31	81.0	cu	7	A	A		10.13			9.0	1.0	12	5.75	6.00	20.3
hu-45	104.0	14	hu	C	D	1.44		8.0	80.0			12	5.75	6.00	26.0
hu-46	6.4	15	hu	C	D	0.04		8.0	160.0			12	5.75	6.00	1.6
hu-47	20.6	16	hu	D	D	2060.0		160.0	160.0			12	5.75	6.00	5.2

Tabella 16. Risultati di sintesi del caso studio. [Utilities calde (hu) e fredde (cu) per ogni intervallo temporale e recupero diretto (hx) in termini di potenza termica ed energia termica valutata considerando la durata dell'intervallo temporale specifico.]

Nint	Potenza termica			Energia termica		
	cu	hu	hx	cu	hu	hx
-	kW	kW	kW	kWh	kWh	kWh
1	161.0	3227.0	0.0	40	807	0
2	80.0	3227.0	0.0	20	807	0
3	80.0	1796.0	986.0	6	144	79
4	962.0	23.8	104.0	1289	32	139
5	80.0	576.0	0.0	20	144	0
6	80.0	131.0	0.0	33	54	0
7	80.0	920.0	24.0	20	230	6
8	80.0	475.0	24.0	14	81	4
9	80.0	920.0	24.0	20	230	6
10	161.0	475.0	24.0	214	632	32
11	563.0	433.6	132.0	659	507	154
12	161.0	131.0	0.0	40	33	0

Tabella 17. Confronto dei risultati con i dati di letteratura. [I dati sono stati valutati considerando 4 turni al giorno per 300 giorni l'anno e un rendimento dei sistemi di generazione dell'energia termica pari all'85% come dichiarato in Eiholzer et al. (2017). Il recupero gas fa riferimento alla sola energia recuperata dai fumi rappresentati dai fluidi 17 e 18.]

	Letteratura	Modello	var
hu TAM [GWh/anno]	2.88	2.90	0.8%
hu TSM [GWh/anno]	5.24	5.22	-0.3%
Recupero gas [GWh/anno]	0.11	0.097	-11.9%

Tabella 18. Correlazioni utilizzate per la valutazione del costo delle utilities calde e fredde differenziate nel caso di utilizzo di acqua di raffreddamento o refrigerante. [Il costo del combustibile è stato fissato a 0.5\$/Smc corrispondenti a 12.5\$/GJ. Il valore del CEPCI nel 2024 ha raggiunto il valore di 800.]

Input costi utilities			
$C_{utility} = a * CEPCI + b * C_{combustibile}$			
	a	b	C
hot	$6.0 \times 10^{-7} \cdot Q_H - 0.9 \cdot T^{0.5}$	$6.0 \times 10^{-8} \cdot T^{0.5}$	\$/kJ
acqua di raffreddamento	$0.00007 + 2.5 \times 10^{-5} \cdot q^{-1}$	0.003	\$/m ³
refrigerante	$0.5 \cdot Q_C^{-0.9} (T^{-3})$	$1.1 \times 10^6 \cdot T^{-5}$	\$/kJ

Tabella 19. Risultati del recupero energetico nell'intervallo 11. [Si è assunto il gas naturale come combustibile utilizzato nelle utenze esterne calde.]

	Caso base	MER design	Δ	Δ %
Potenza recuperata [kW]	-	135	-	
Energia recuperata [kWh/anno]	-	190102		
Phu [kW]	569	434		
Ehu [kWh/anno]	798855	608754		
Costo hot utilities [k\$/anno]	146892	135067	11824	8.0%
Costo HX [k\$]	0	15449	-15449	-
Emissioni di CO₂ [ton]	158	121	38	23.8%
Fattore emissione gas naturale [kg/GJ]	55			

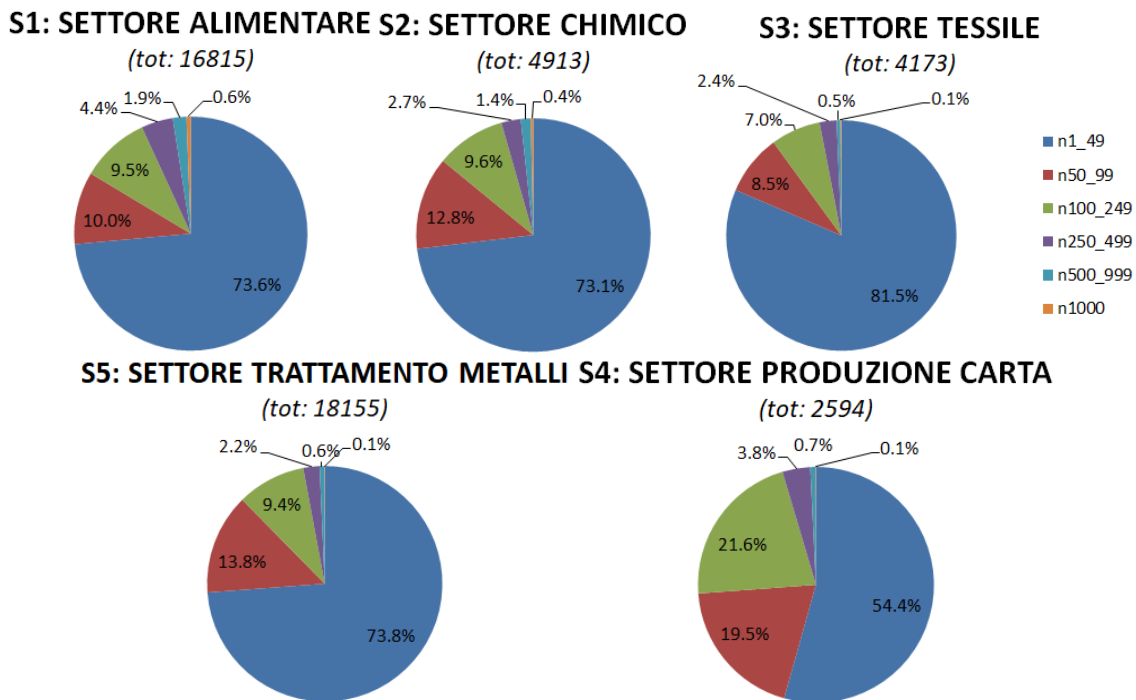


Figura 1. Distribuzione dimensionale in termini di occupazione nei settori industriali.

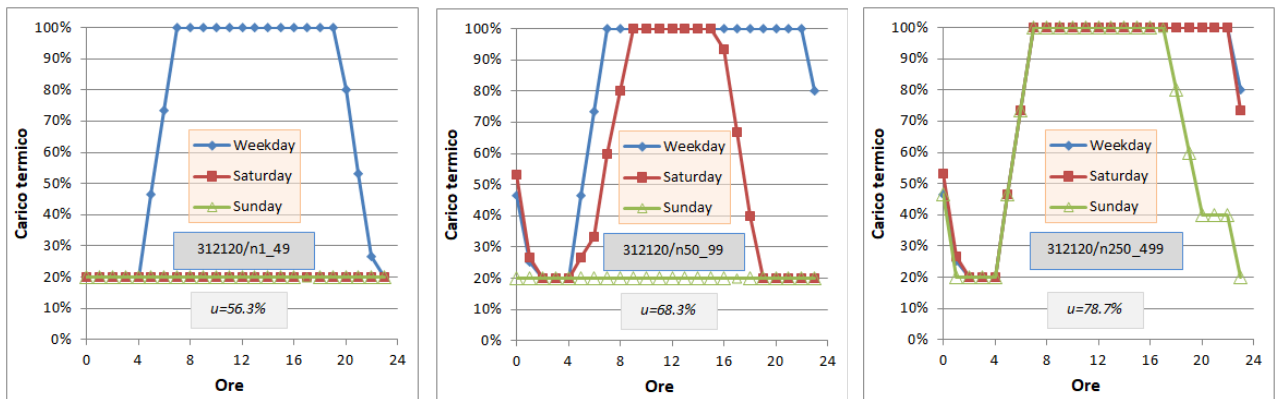


Figura 2. Diagramma orario del carico termico per diversi giorni della settimana e dimensione aziendale per codice NAICS=312120 (birrerie)

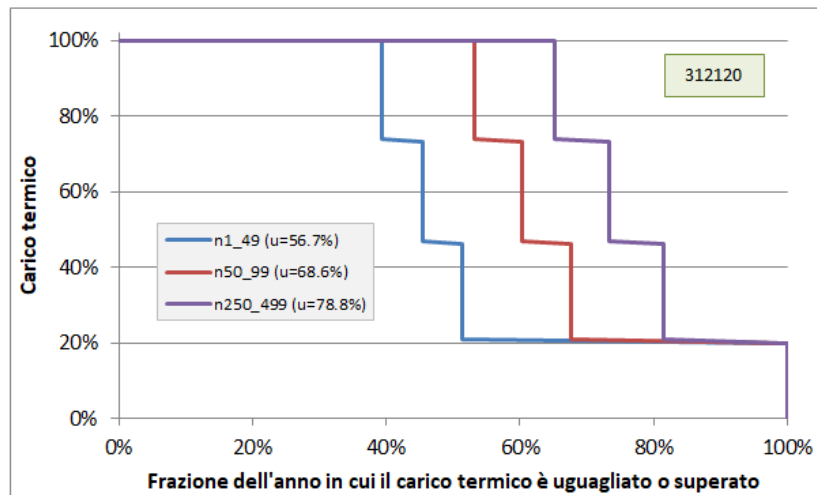


Figura 3. Curva di durata dei carichi termici al variare della dimensione aziendale per codice NAICS=312120 (birrerie).
 [Tale curva individua il numero di giorni dell'anno in cui uno specifico carico termico è stato uguagliato o superato (entrambe le grandezze sono espresse in termini percentuali)]

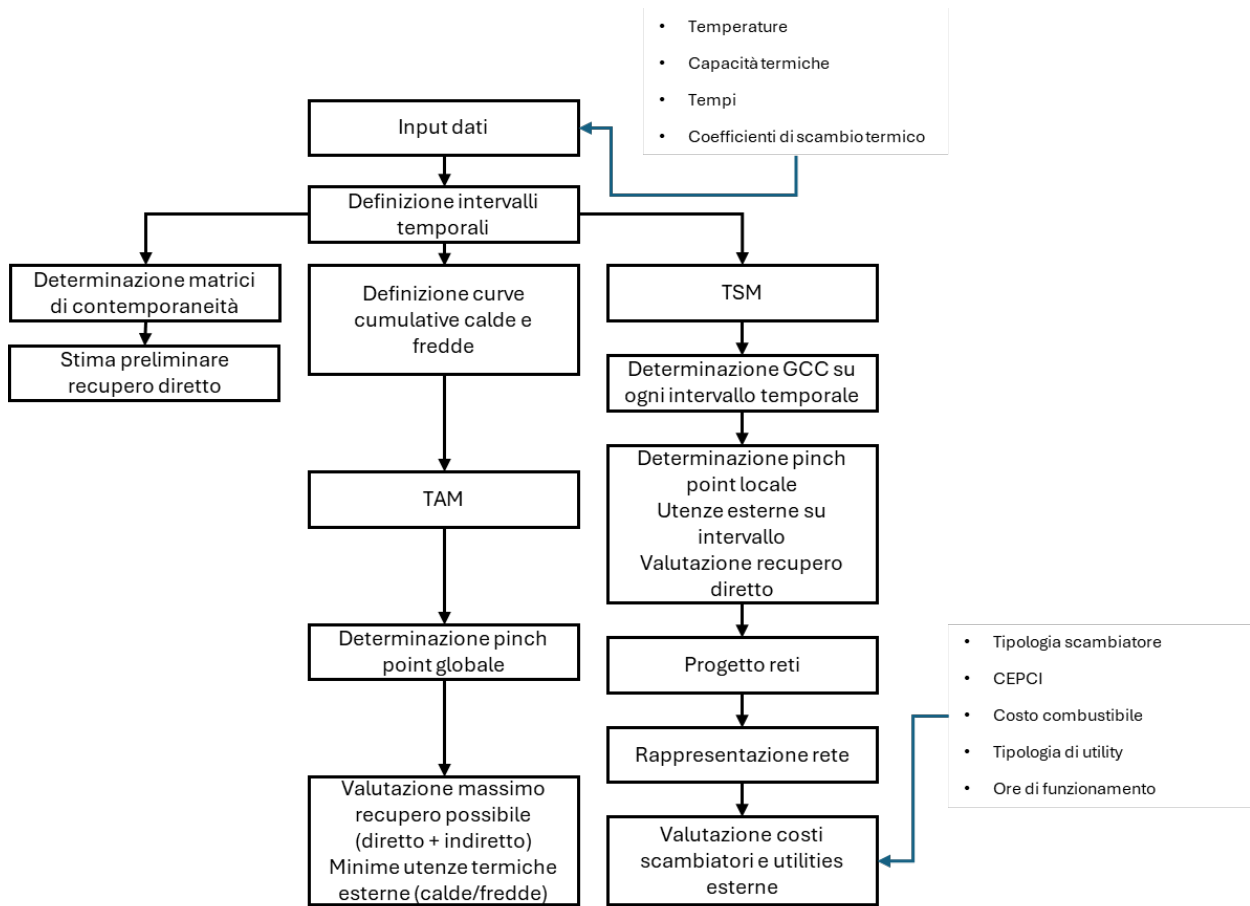


Figura 4. Diagramma di flusso della metodologia sviluppata

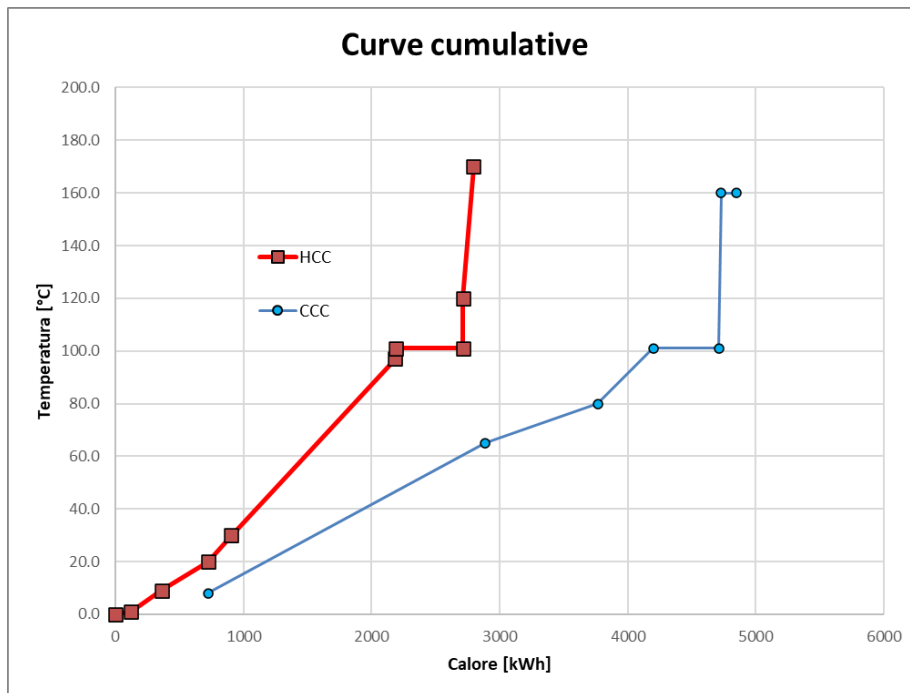
fluido/fluido	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0
2	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
4	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0
7	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
10	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0
11	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0
12	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0

13	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
18	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
19	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
20	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1

Figura 5. Matrice di contemporaneità dei fluidi di processo

fluido/fluido	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	0	0	79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33	0	0
4	79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	148	5	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0
14	0	0	0	148	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48	33	122	66
15	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	7	4	4
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	48	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	6	48	13	0	0	0	0	0
18	0	0	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33	7	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	122	4	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	66	4	0	0	0	0	0

Figura 6. Matrice del potenziale recupero diretto (kWh/turno) tra i fluidi di processo



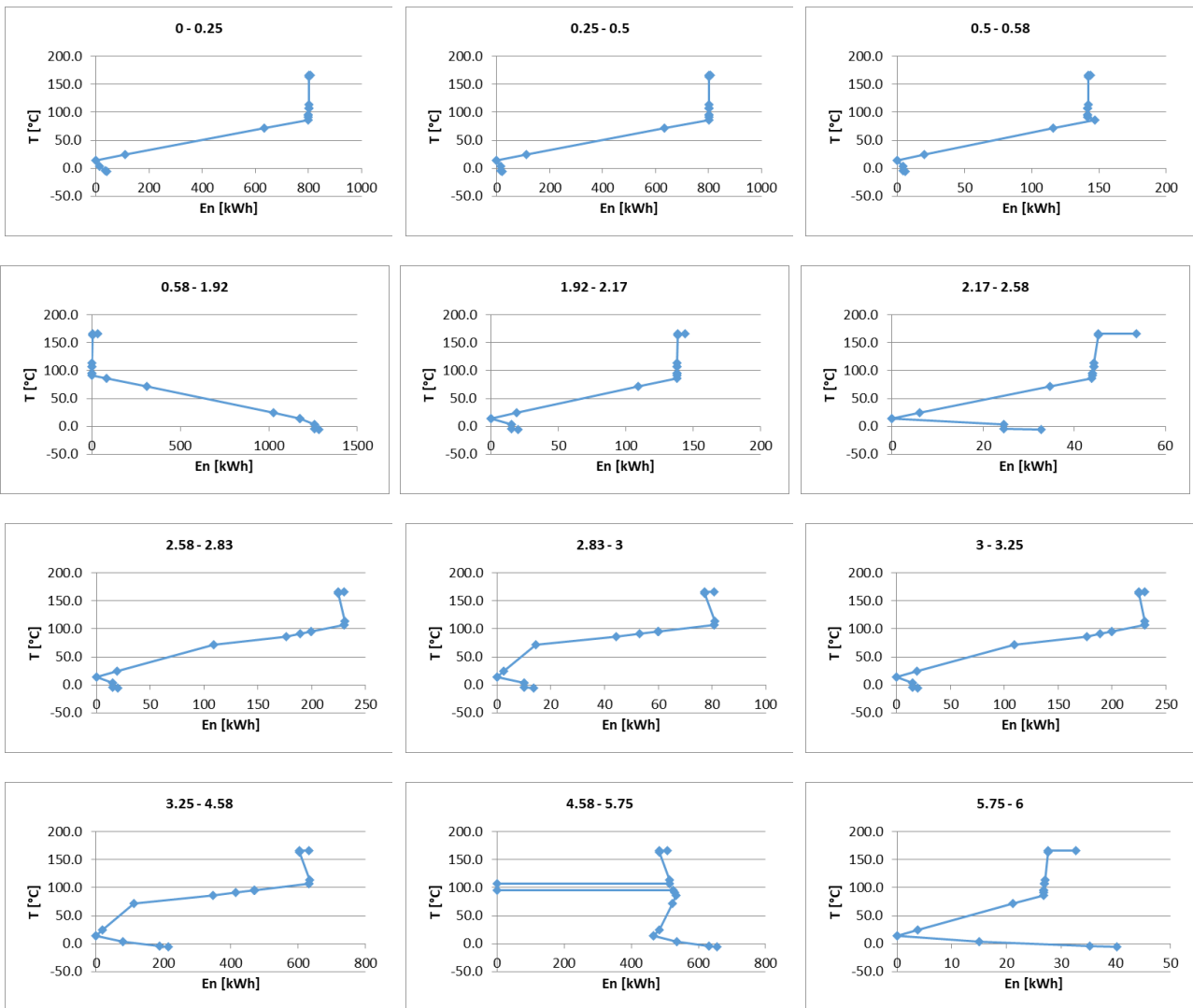


Figura 8. Modello TSM, curve cumulative globali per ogni intervallo temporale. [La distanza del punto più alto dall'asse verticale rappresenta l'energia termica richiesta alle utenze calde esterne. La distanza nel punto più basso rappresenta l'energia termica per le utenze fredde esterne. L'inversione di pendenza avviene per un valore di energia termica pari a 0, che identifica la mancanza di scambio termico alla relativa temperatura e la presenza del pinch point.]

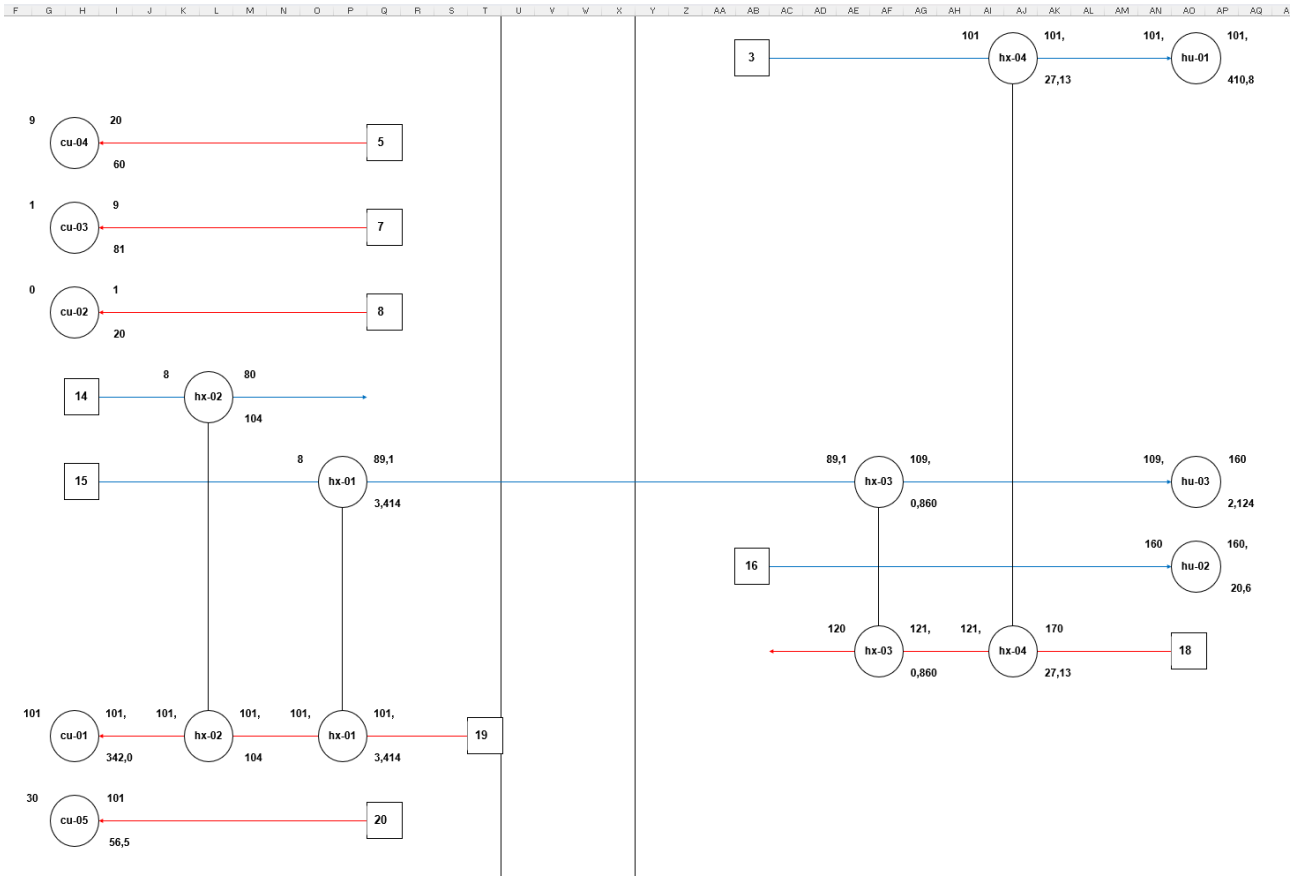


Figura 9. Dimensionamento rete nell'intervallo temporale 11 (caso birrificio)

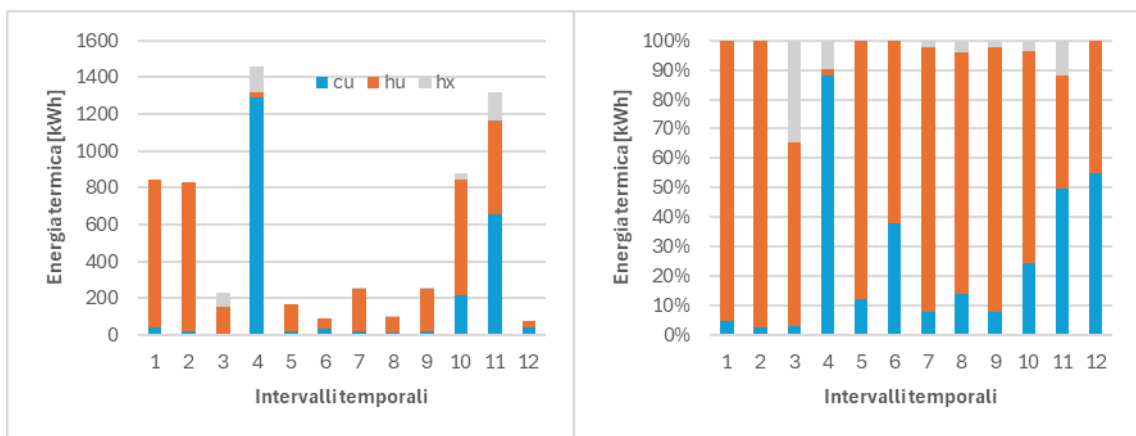


Figura 10. utilities calde/fredde e recupero diretto in ogni intervallo temporale in kWh/turno e ripartizione percentuale

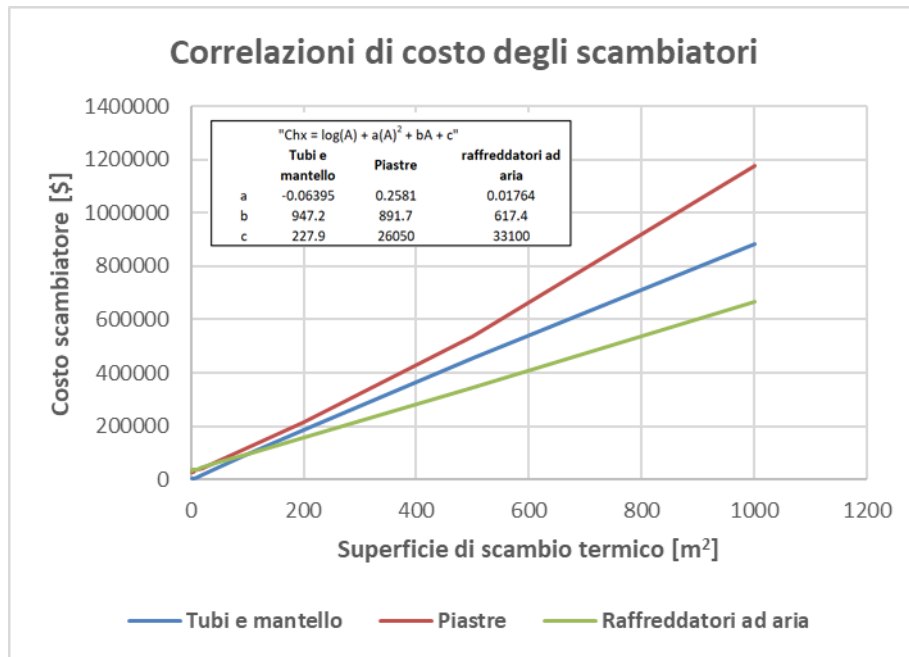


Figura 11. Correlazioni utilizzate per la valutazione dei costi degli scambiatori di calore

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Come da capitolato, non sono state utilizzate consulenze per le attività sopra descritte.

9 Pubblicazioni scientifiche

- ABBATE S., DI BARTOLOMEO M., GIORDANO L., BENEDETTI M., CARAPPELLUCCI R., Optimization of Heat Exchanger Network via Pinch Technology: a Case Study of a Dairy Facility in Italy, Proceedings of the ASME 2023 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE2023, October 29 - November 2, 2023, New Orleans, LA, USA, <https://doi.org/10.1115/IMECE2023-113372>.

10 Eventi di disseminazione

Il gruppo di lavoro UNIVAQ-DIIE è stato impegnato nelle seguenti attività di disseminazione scientifica:

- Preparazione del contributo in atti di convegno: Abbate S., Di Bartolomeo M., Giordano L., Benedetti M., Carapellucci R., Optimization of Heat Exchanger Network via Pinch Technology: a Case Study of a Dairy Facility in Italy, Proceedings of the ASME 2023 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE2023, October 29 - November 2, 2023, New Orleans, LA, USA, <https://doi.org/10.1115/IMECE2023-113372>.