



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



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

Utilizzo esterno di cascami termici industriali a bassa temperatura tramite smart energy systems: analisi e modellazione in ottica «Water-Energy Nexus»

D. Chinese, G. Cortella, A. Meneghetti, B. Motyl, O. Saro



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI UDINE
hic sunt futura

UTILIZZO ESTERNO DI CASCAMI TERMICI INDUSTRIALI A BASSA TEMPERATURA TRAMITE SMART ENERGY SYSTEMS: ANALISI E MODELLAZIONE IN OTTICA «WATER-ENERGY NEXUS»

Chinese D., Cortella G., Meneghetti A., Motyl B., Saro O.
(UNIUD)

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 3.27 – Utilizzo esterno di cascami termici industriali a bassa temperatura tramite smart energy systems: analisi e modellazione in ottica water-energy nexus

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 «Sviluppo e applicazione di modelli per l'analisi di fattibilità dell'utilizzo esterno di cascami termici industriali a bassa temperatura in ottica water-energy nexus»

Responsabile scientifico ENEA: Alessandra Gugliandolo

Responsabile scientifico: prof. ing. Damiana Chinese

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	7
2.1 TIPOLOGIE INDUSTRIALI CANDIDATE A PROGETTI DI SIMBIOSI ENERGETICA TRAMITE TELERISCALDAMENTO: CARATTERIZZAZIONE QUALITATIVA	7
2.2 DESCRIZIONE SCHEMATICA E CARATTERIZZAZIONE DEI PARAMETRI ENERGETICI E TECNICI DI RIFERIMENTO PER LE SITUAZIONI ESISTENTI (“AS IS”) TIPICHE DEL CONTESTO ITALIANO.	20
2.3 DESCRIZIONE SCHEMATICA E CARATTERIZZAZIONE DEI PARAMETRI ENERGETICI E TECNICI DI RIFERIMENTO PER SOLUZIONI “TO BE” PROPOSTE PER LE SITUAZIONI DI RIFERIMENTO.	25
2.4 DESCRIZIONE DEL MODELLO DI DIMENSIONAMENTO IMPLEMENTATO, CON ELEMENTI PER LA PREVISIONE DEI CONSUMI DELLE VARIE RISORSE. 31	
2.4.1 <i>Valutazione delle capacità, dei consumi energetici e di acqua nel caso AS IS</i>	33
2.4.2 <i>Dimensionamento della rete di teleriscaldamento e dei sistemi di integrazione con elementi di valutazione dei consumi per il caso ad alta temperatura</i>	34
2.4.3 <i>Elementi di calcolo e valutazione dei consumi per il caso a bassa temperatura</i>	36
2.5 DESCRIZIONE DEL MODELLO DI VALUTAZIONE AMBIENTALE IMPLEMENTATO, CON PARTICOLARE RIFERIMENTO ALLA VALUTAZIONE DI EMISSIONI SERRA E CONSUMI IDRICI DI TIPO INDIRETTO.	37
3 CONCLUSIONI	42
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	43
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	48
APPENDICE: BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO IMPEGNATO NELLE ATTIVITÀ.....	48
APPENDICE: ATTIVITÀ DI DISSEMINAZIONE SVOLTA NEL 2020.....	49

Sommario

L'utilizzo esterno del calore a bassa temperatura tramite reti di teleriscaldamento è un'opportunità interessante di recupero termico industriale, complementare o alternativa alle possibilità di utilizzo interno nelle aziende. La presenza, all'interno o in prossimità delle zone industriali, di attività produttive, commerciali o del terziario, aventi esigenze di riscaldamento e condizionamento ambientale o di calore di processo, porta i decision makers aziendali a interrogarsi sulla fattibilità della distribuzione dei propri cascami termici alle potenziali utenze.

Il lavoro presentato in questo report contiene i risultati della prima annualità di una collaborazione di ricerca di durata biennale, volta a sviluppare degli strumenti utili a dare delle risposte ai decision makers aziendali relativamente alla fattibilità tecnica, alla performance economica e di impatto ambientale di iniziative di simbiosi energetica con realtà contermini da realizzare mediante impianti di teleriscaldamento.

Il report contiene i risultati di una literature review preliminare, e del successivo sviluppo concettuale di modelli di valutazione tecnica e ambientale, focalizzata sul calcolo dei consumi energetici, della carbon footprint e della water footprint. Lo studio si pone, infatti, in un'ottica di analisi del water-energy-carbon nexus, ovvero delle correlazioni tra l'impatto delle soluzioni impiantistiche sui consumi energetici e quindi sulle emissioni serra, da un lato, e sui consumi diretti e indiretti di acqua, dall'altro.

I risultati raggiunti in questa prima fase comprendono la caratterizzazione delle applicazioni, esistenti o proposte in letteratura, di teleriscaldamento in contesti di simbiosi industriale, in termini di settori industriali coinvolti (prevalentemente come sorgenti), di utenze, di livelli di temperatura (di norma quelli tipici dei teleriscaldamenti di terza generazione) e di potenze ed energie erogate. Sulla base di tale caratterizzazione, estesa ad un'analisi dei profili termici di processi industriali utilizzando fonti rinnovabili a bassa temperatura, e di un'indagine tecnico-commerciale sui componenti degli impianti di teleriscaldamento, anche di nuova generazione, in questa ricerca si sono sviluppati e implementati in Excel VBA dei modelli di calcolo dei bilanci energetici e di dimensionamento di massima dei principali componenti di sistemi per il teleriscaldamento point-to-point, finalizzati principalmente al trasferimento del calore recuperato da una singola sorgente a una singola utenza industriale. Si sono definiti e calcolati i coefficienti per la quantificazione dell'impatto di sottosistemi e componenti, le cui combinazioni, identificate nel presente report e simulabili con il modello implementato, consentiranno, nella successiva fase di validazione tramite applicazione a casi di studio, di valutare numerose alternative progettuali, rispecchiando la varietà di situazioni riscontrabili nel contesto industriale italiano. L'applicazione a casi concreti, reali o realistici, prevista per la successiva annualità, sarà indispensabile per raffinare o semplificare alcuni aspetti del modello con l'obiettivo di contemperare gli obiettivi di accuratezza, coerenza e robustezza delle valutazioni con le esigenze di semplicità e usabilità dei moduli sviluppati. Essi potranno così essere integrati all'interno di un più ampio sistema di supporto alle decisioni sui recuperi termici industriali a bassa temperatura.

1 Introduzione

La ricerca sviluppata nell'ambito del presente accordo di collaborazione riguarda l'utilizzo esterno di cascami termici industriali a bassa temperatura tramite smart energy systems, con riferimento alla relativa analisi e modellazione tecnico-economica in ottica water-energy nexus.

La presenza, all'interno o in prossimità delle zone industriali, di attività produttive, commerciali o del terziario, aventi esigenze di riscaldamento e condizionamento ambientale o di calore di processo, porta i decision makers aziendali a considerare l'opportunità di distribuire i propri scarti termici a bassa temperatura a tali tipologie di utenze. Tale opportunità si può inquadrare nel più ampio concetto di simbiosi industriale, definito da Chertow [1] come l'inclusione di industrie tradizionalmente separate in un approccio collettivo per il raggiungimento di vantaggi competitivi attraverso lo scambio fisico di materiali, energia, acqua e sottoprodotti. I pilastri della simbiosi industriale sono la collaborazione e le possibilità di ottenere sinergie sfruttando la prossimità geografica.

Secondo Butturi et al. [2], che hanno recentemente realizzato una revisione delle simbiosi energetiche tra parchi industriali e zone urbane, un sistema energetico a bassa impronta carbonica include tecnologie energeticamente efficienti, massimizza l'integrazione di fonti energetiche rinnovabili locali e consente lo scambio termico tra le aziende, ovvero – nei contesti urbani – tra aziende e utenze civili. Invero, lo scambio termico è la forma di simbiosi energetica prevalente in tali contesti, mentre in [2] inizia a essere proposta anche la pianificazione condivisa dell'approvvigionamento di energia elettrica da fonti rinnovabili.

In letteratura, numerosi modelli di ottimizzazione sono stati proposti per supportare la progettazione della condivisione energetica in contesti di simbiosi industriale: si vedano ad esempio i lavori di Chinese e Meneghetti [3], Meneghetti e Nardin [4], Wang et al.[5] e la revisione della letteratura realizzata da Boix et al. [6].

Metodi e modelli di ottimizzazione consentono di affrontare la complessità dei sistemi che coinvolgono più di due industrie, dando il miglior supporto progettuale alla progettazione delle reti e all'individuazione di quali aziende in quali momenti possono agire come fornitori o ottenere energia in qualità di utenti. Tuttavia, tali sistemi richiedono già un'idea progettuale abbastanza sviluppata e, per l'utente, la disponibilità e la conoscenza di software di ottimizzazione commerciali.

Oggetto del presente accordo di collaborazione sono lo sviluppo, la verifica e la validazione di strumenti di calcolo e simulazione più semplici rispetto ai modelli di ottimizzazione proposti in letteratura, utili a supportare le prime valutazioni preliminari di imprenditori, consorzi industriali ed energy manager che si confrontano con opportunità di condivisione dell'energia termica tra aziende diverse, con particolare riferimento al caso di due sole entità in relazione, ovvero un'azienda fornitrice e un'azienda utente.

Le valutazioni da considerare nel progetto riguardano aspetti di analisi tecnica, economica e ambientale.

Come osservato in [2], i modelli a supporto della simbiosi energetica mirano principalmente a minimizzare i costi e le emissioni – tipicamente di gas serra – legate agli scambi energetici. Spesso viene presa in considerazione l'efficienza energetica, raramente altri indicatori ambientali.

Tuttavia, negli ultimi anni la letteratura ha posto l'attenzione sul concetto di water-energy nexus, ovvero sul legame tra i consumi e i processi di approvvigionamento energetico, da un lato, e i consumi e i processi di approvvigionamento idrico, dall'altro. Come sottolineato in [7], il tema del water-energy nexus ha assunto grande rilievo anche in Europa a partire dalla conferenza di Bonn del 2011 [8]. Rispetto ad altri contesti, in Europa l'attenzione si è concentrata molto sull'ambito agricolo (concetto di water-energy-food nexus), meno sul contesto industriale, sebbene in questo settore i consumi siano rilevanti e ci si attendano i maggiori incrementi in futuro, in particolare a causa del consumo di acqua come mezzo di raffreddamento [8]. Ci si attende che i recuperi termici in ambito industriale riducano i fabbisogni di raffreddamento e, di conseguenza, i consumi idrici. Tuttavia, lavori precedenti di alcuni componenti del gruppo di lavoro [9] hanno mostrato, per alcuni casi di studio specifici, come l'entità dei benefici attesi vari in funzione delle tecnologie di raffreddamento utilizzate nell'azienda dove sono presenti i flussi termici in eccesso, delle tecnologie di conversione energetica e delle modalità di sfruttamento del calore recuperato selezionate, nonché del mix medio energetico nazionale.

Sulla base di queste osservazioni, nel presente studio ci si è prefissi realizzare un modello di valutazione ambientale dedicato al teleriscaldamento in ambito industriale contenente indicatori ambientali relativi alla carbon footprint e alla water footprint delle diverse configurazioni, oltre che al consumo operativo di energia primaria, in modo da offrire agli utenti esperti gli elementi per un’analisi di fattibilità più completa in ottica water-energy nexus. I modelli prodotti in questa ricerca contribuiranno a migliorare e concretizzare per i decisori aziendali la consapevolezza di questo aspetto della resource efficiency. In quest’ottica, le attività oggetto della collaborazione nel suo intero arco temporale sono le seguenti:

Annualità 2020:

1. Caratterizzazione termica qualitativa di sorgenti e utenze tipo ai fini dello sviluppo di simbiosi industriali e identificazione di un idoneo insieme di processi tipo oggetto di studio.
2. Definizione di alternative tecnologiche per la configurazione del sistema di distribuzione dell’energia nei processi tipo (scenari AS IS e TO BE).
3. Predisposizione di un modello di calcolo per il dimensionamento semplificato delle alternative tecnologiche definite.
4. Predisposizione di un modello per il calcolo di indicatori di prestazione ambientale, con riferimento alle emissioni di gas serra e all’impatto sul consumo idrico (blue water footprint) sia diretto, sia indiretto, ovvero associato all’energia consumata.

Annualità 2021:

5. Predisposizione di un modello per il calcolo di indicatori di prestazione economica, mutuando e adattando metodologie definite da ENEA per la valutazione dei risparmi di energia primaria, il costo di investimento e gli indici di redditività del medesimo alle specificità degli interventi di simbiosi industriale.
6. Modellazione dei profili di domanda termica di utenze tipo, anche sulla base di sopralluoghi e dell’eventuale recepimento di elaborazioni su diagnosi energetiche di aziende energivore prodotte da ENEA.
7. Implementazione e verifica dei modelli tramite applicazione a casi di studio realistici ed esecuzione di analisi di sensitività e di scenario.
8. Validazione dei modelli mediante sviluppo di un caso di studio.

Il presente report fa riferimento alle attività 1-4, che, come evidenziato in Figura 1, afferiscono alla attività LA 3.27 sviluppata fino al 31 dicembre 2020. In particolare, l’attività 1 è stata sviluppata con il supporto di un’indagine di letteratura, a partire dalla quale si sono caratterizzate le alternative tecnologiche per cui si sono elaborati i modelli di calcolo di cui ai punti 3. e 4. del precedente elenco (KPI “Water-energy nexus”). L’annualità 2021 vedrà lo sviluppo della LA 3.28, con particolare riguardo alla definizione e calcolo dei KPI economici (attività 5) e all’applicazione del modello ad aziende e utenze di riferimento.

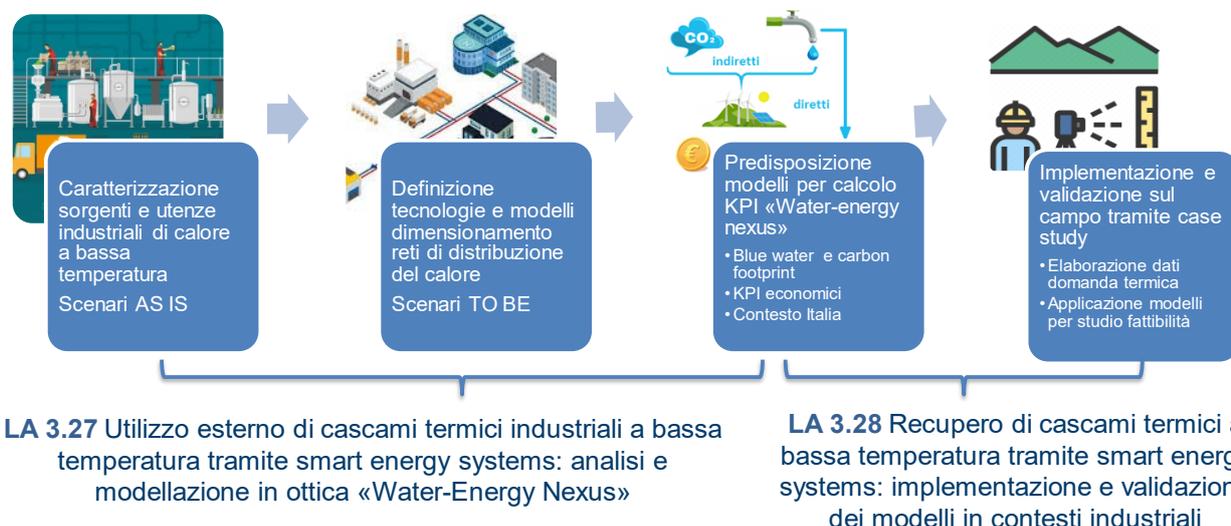


Figura 1. Attività oggetto dell’accordo di collaborazione 2020-2021

Con riferimento ai risultati attesi del progetto, nel presente report vengono pertanto presentati:

1. Una sintesi delle evidenze di letteratura sulle tipologie industriali più frequentemente coinvolte in progetti di simbiosi energetica, da cui si evincono i criteri per l'individuazione delle tipologie industriali di riferimento al fine dello sfruttamento simbiotico di cascami termici a bassa temperatura. Indicazioni per l'individuazione di profili termici di riferimento e la relativa caratterizzazione termica qualitativa, come fornitori e potenziali utenti nel successivo sviluppo di modelli di calcolo, sono state tratte anche da una più estesa indagine sullo sfruttamento di energia rinnovabile a bassa temperatura in ambito industriale.
2. Una descrizione schematica e caratterizzazione dei parametri energetici e tecnici di riferimento per sottosistemi e configurazioni rappresentative delle situazioni esistenti ("AS IS") nell'approvvigionamento energetico nel contesto italiano per le tipologie industriali considerate;
3. Una descrizione schematica e caratterizzazione dei parametri energetici e tecnici di riferimento per sottosistemi e configurazioni di recupero energetico esterno corrispondenti alle soluzioni "TO BE" proposte per le situazioni di riferimento;
4. La descrizione del modello di dimensionamento implementato, con elementi per la previsione dei consumi delle varie risorse, nonché dei criteri e delle modalità con cui esso può essere utilizzato per un'analisi parametrica;
5. La descrizione del modello di analisi ambientale in ottica water-energy nexus implementato, dei procedimenti di valutazione dei consumi ed emissioni, con particolare riferimento a quelli indiretti.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 *Tipologie industriali candidate a progetti di simbiosi energetica tramite teleriscaldamento: caratterizzazione qualitativa*

Per capire quali siano le tipologie industriali più frequentemente coinvolte in processi di recupero esterno e quali siano le loro caratteristiche, si è anzitutto realizzata una scoping review della letteratura relativa a progetti di recupero esterno del calore. Come suggerito da [10], la metodologia utilizzata per la scoping literature review ha previsto l'impegno incrociato di due revisori e ha richiesto come prima attività la definizione preliminare del protocollo di revisione. Esso comprende la definizione delle basi di dati utilizzate, i criteri di inclusione e le fasi di selezione ed esame della letteratura, come sintetizzate in figura 2. Una prima definizione dei criteri prevedeva l'utilizzo del database Scopus e delle parole chiave ((INDUSTRIAL WASTE HEAT) OR (INDUSTRIAL SYMBIOSIS)) AND (DISTRICT HEATING). Il lavoro di revisione è stato iniziato già a partire da gennaio 2020 e ulteriormente aggiornato ed ampliato con il contributo di più componenti del gruppo di lavoro lungo tutta l'annualità. A dicembre 2020, la revisione effettuata aveva portato a individuare 144 lavori, di cui 99 su riviste internazionali accessibili. Di questi sono stati esaminati gli abstract, concludendo che circa il 25% degli articoli faceva riferimento alla progettazione di componenti per il teleriscaldamento, e circa il 20% dei lavori presentava modelli per l'analisi tecnico-economica e termodinamica dei sistemi integrati, ad esempio dal punto di vista exergetico o exergoeconomico, senza però presentare casi studio effettivi, indagini per specifici settori o valori numerici tratti da casi reali. Dal momento che l'obiettivo dell'indagine era l'identificazione qualitativa le tipologie di sorgenti e le classi di utenze che, per comportamento energetico, possono essere più interessanti per l'avvio di simbiosi industriali e *smart energy systems*, si è ristretto l'orizzonte a 16 articoli, integrandoli con ulteriori lavori ritrovati a partire da questi, che facessero riferimento a applicazioni reali. Si sono così analizzati nel dettaglio 22 lavori, che fanno riferimento al concetto di simbiosi industriale o di recupero termico industriale associato a teleriscaldamento. Il numero

è abbastanza in linea con il numero di studi su simbiosi energetica urbana-industriale e industriale con modalità tradizionali di scambio energetico individuato nella recente revisione di [2], ma la sovrapposizione dei casi è solo parziale dato il differente focus di ricerca (il lavoro di [2] è focalizzato principalmente sull'uso di energie rinnovabili e include anche impianti comuni di valorizzazione di fanghi e rifiuti industriali in genere tra le modalità tradizionali di scambio energetico).

Come evidenziato in figura 3, gli studi esaminati nella presente revisione sono per il 77% studi di fattibilità relativi alla realizzazione di nuovi impianti completi o di nuovi recuperi termici esterni tramite connessione di nuove industrie a impianti di teleriscaldamento urbano esistenti. Solo cinque studi valutano simbiosi industriali con teleriscaldamento già esistenti, per un'analisi comparativa retrospettiva [11][12] o per proporre modifiche ed ampliamenti [13][14][15]. Tuttavia, i due studi [11] e [12] che effettuano un'analisi comparativa esaminano abbastanza dettagliatamente un vasto numero di casi (rispettivamente 53 impianti in Austria in [11] e 107 impianti in Svezia in [12]). Nel complesso quindi, la revisione ha consentito di reperire informazioni relative a 205 impianti con recupero termico esterno, di cui 36 coinvolti in progetti di possibile realizzazione futura ([3],[4],[16]-[30]). In generale, come evidenziato in figura 4, a parte le centrali termoelettriche, le industrie maggiormente coinvolte in recuperi esterni tramite teleriscaldamento appartengono al settore metallurgico (ad esempio [16]-[18], [25][27], nonché vari impianti esistenti descritti in [11]-[13]) al settore della carta e cellulosa (prevalentemente presente in impianti storici [11][12], ma considerata anche in [19]), e al settore chimico e petrolchimico (preponderante nel grande parco eco-industriale di Ulsun (Corea) descritto, tra l'altro, in [14], ma considerato ad esempio anche da [20] e [24]). Oltre che per la numerosità, questi settori si caratterizzano, in molti casi, per l'elevata potenzialità ed estensione degli impianti realizzati. Secondo [12] gli impianti di grande potenzialità (energia annua distribuita > di 300 TJ secondo [12]) sono contraddistinti da un alto grado di stabilità delle cooperazioni e minimi rischi di fallimento dei progetti e abbandono della simbiosi.

Più critica appare la performance economica dei piccoli impianti, di taglia inferiore ai 55 TJ di energia annua resa secondo [12], associabile a recuperi termici di potenze massime inferiori ai 7 MW circa, che peraltro sono i più frequenti sia negli studi teorici (si vedano ad es.[4],[19], [21], [22]) sia nelle realizzazioni descritte in Austria [11]. In base alla presente revisione, le dimensioni di impianto appaiono nel complesso polarizzate tra grandissimi e piccoli impianti, mentre risultano relativamente poco presenti recuperi termici di media taglia, con l'eccezione interessante, ma particolare, dei data center [26]. Sebbene in letteratura vengano talvolta proposti nuovi impianti di grande taglia in settori diversi dall'industria di processo (ad esempio laboratori di ricerca [23] e [27]), i piccoli impianti sono sicuramente i più promettenti per nuove realizzazioni, consentendo il recupero energetico in settori come l'alimentare, i materiali da costruzione, il legno arredo, il tessile e, in una certa misura, il trattamento dei rifiuti per piccoli bacini territoriali. Una maggior diffusione di soluzioni simbiotiche a questo livello permetterebbe di introdurre ulteriori elementi di efficientamento in settori diversi dalla grande industria di processo, che dal punto di vista della simbiosi industriale appare un settore maturo, caratterizzato da alte barriere all'uscita (e dunque buona stabilità) ma anche all'ingresso.

Dal punto di vista delle caratteristiche delle utenze, un aspetto fondamentale che emerge dall'analisi è che la maggior parte dei recuperi termici esterni avviene a favore di reti di teleriscaldamento esistenti, configurandosi dunque come simbiosi industriale-urbana: in Austria [11], ad esempio, è questo il caso di 50 simbiosi su 53. Tale evidenza trova conferma sia nella revisione presente, sia in [2], sia nella revisione di letteratura presentata in [21]. Le simbiosi energetiche strettamente industriali esistenti in letteratura sono dunque poche (in [11] vengono identificate tre simbiosi strettamente industriali su 53 casi esaminati, in [14] solo uno scenario sui quattro esaminati esclude il coinvolgimento di utenze civili, e prevede l'uso di reti di distribuzione di vapore surriscaldato), e caratterizzate o da grandi dimensioni [14] o da alte temperature [11]. Di fatto, più che condividere del calore recuperato da processi industriali vengono condivisi direttamente gli impianti di combustione e i relativi prodotti.

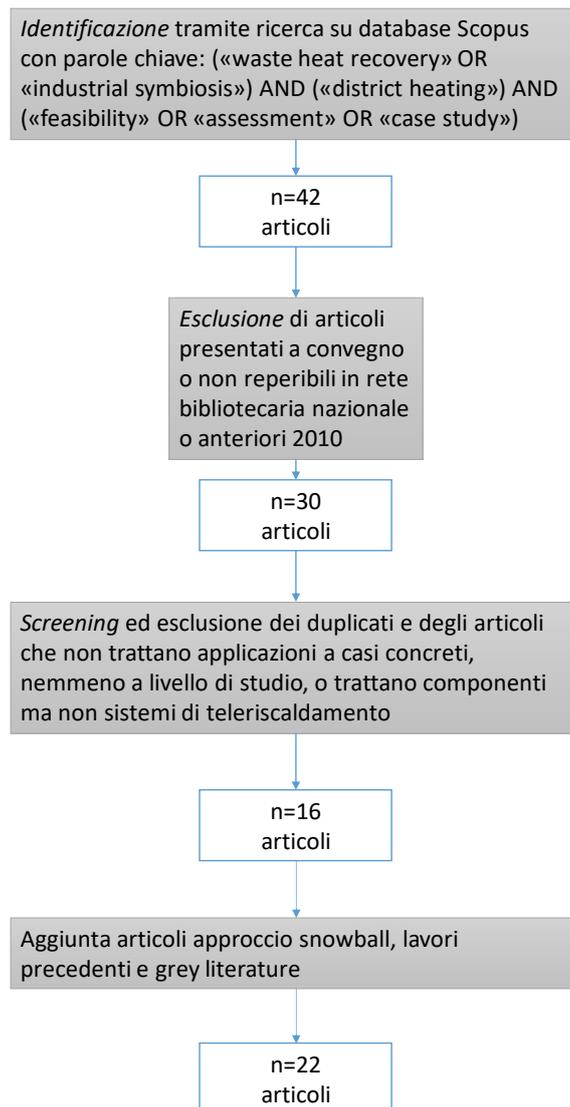
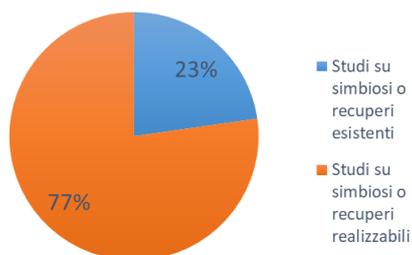


Figura 2. Diagramma di flusso della literature review

Ripartizione degli studi per impianti analizzati



Ripartizione degli impianti analizzati negli studi

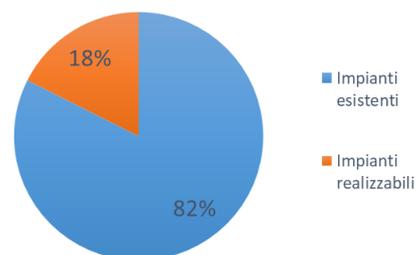


Figura 3. Ripartizione degli articoli esaminati e degli impianti oggetto di tali studi

Ripartizione per settore industriale degli impianti da cui viene recuperato calore per uso esterno

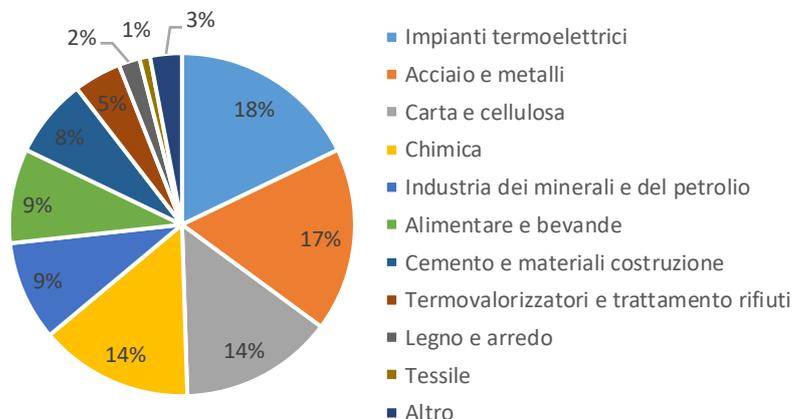


Figura 4. Ripartizione degli impianti sorgente descritti in letteratura, per settore industriale

Sia dal punto di vista dei fornitori che degli utenti, la temperatura a cui sono disponibili i fluidi è, in effetti, un elemento caratterizzante per la configurazione della simbiosi: l'esame della letteratura effettuato ha mostrato i recuperi strettamente industriali avvengano tipicamente con scambio di vapore [11][14] ed anche le simbiosi di tipo industriale/urbano coinvolgono reti ad acqua calda surriscaldata [17] o ad acqua calda, con temperature tipicamente comprese tra i 75 °C e i 90 °C in mandata e tra i 50 °C e i 65 °C in ritorno. Quattro studi fanno esplicito riferimento a reti di distribuzione a temperature basse (50°C in mandata e 35°C in ritorno in [23], 55°C in mandata e 35°C in ritorno in [30]) o medio basse (70°C in mandata e 45°C in ritorno in [16] e in alcuni casi descritti in [11]). È interessante notare che lo studio più recente [23] integra nei sistemi delle pompe di calore per poter raggiungere le temperature richieste da utenze diverse, mentre molti studi per simbiosi a bassa temperatura precedenti [28-30] puntavano principalmente a individuare degli utilizzatori con temperature compatibili, che tipicamente appartengono al settore agroindustriale (si veda la Tabella 1).

Tabella 1. Identificazione di possibili utilizzi simbiotici del calore a bassa temperatura [26]

<i>Livelli di temperatura (°C)</i>	<i>Processi di produzione alimenti e mangimi</i>
40 – 60	<i>Essiccazione a bassa temperatura</i>
32 – 40	<i>Fermentazione di microbi (lieviti, batteri, microalghe)</i>
22 – 32	<i>Pescicoltura d'acqua calda (tilapia, gamberetti, persico, rombo chiodato)</i>
18 – 22	<i>Serre di coltivazione (pomodori, cetrioli)</i>
10 – 18	<i>Pescicoltura d'acqua fredda (salmone, pesce bianco, storione, gamberi di fiume)</i>

La figura 5 schematizza i principali criteri quali-quantitativi in base a cui si possono classificare le esperienze esistenti e i casi studio prospettici di recuperi termici esterni industriali associati a progetti simbiotici o di teleriscaldamento civile individuati in questa revisione, in modo da guidare lo sviluppo del modello a favore delle tipologie di maggiore interesse.

Il diagramma risulta dall'aggregazione qualitativa delle informazioni sulle potenze installate (eventualmente desunte dalle energie annue cedute, assumendo un funzionamento annuo di 7000 h ove non diversamente

indicato nell'articolo) e le distanze tra aziende fornitrici e utenze. L'andamento della zona di probabile non economicità è dedotto dai risultati presentati in [21] per casi ideali, e andrà verificato nel corso del progetto. La figura 5 riporta anche il giudizio qualitativo sul rischio di continuità dei progetti nel tempo, in base alle evidenze descritte in [12]. Un criterio fondamentale per la progettazione è la temperatura a cui è disponibile la sorgente, e dunque i tipi e i livelli termici dei fluidi termovettori che è consigliabile utilizzare.

La tipologia di rete di teleriscaldamento più comune risulta quella ad acqua calda, che risulta spesso abbinata anche a industrie fornitrici in cui il calore è disponibile a temperature molto elevate (siderurgia, vetro etc.). Come evidenziato, la quasi totalità degli studi prevede la fornitura di calore a utenze civili tramite reti esistenti o nuove di teleriscaldamento e le simbiosi industriali sono prevalentemente concentrate nei quadranti evidenziati in verde e in azzurro nello schema, tipico della grande industria di processo. In questo ambito, gli investimenti sono decisamente importanti, dell'ordine di diverse decine di milioni di Euro [20][30][51], ma caratterizzati da tempi di payback interessanti, inferiori ai 10 anni [51]. Una volta superate, le barriere all'ingresso costituite dagli elevati investimenti si traducono in accordi duraturi nel tempo [12]. Intermedia è la situazione delle industrie chimiche, vetrarie e della carta, la cui stabilità è funzione del settore industriale di riferimento, più che delle caratteristiche tecnologiche della partnership. Interessante ma critica appare l'area segnalata in rosso, caratterizzata da utenze di piccola taglia (in grado di rendere disponibili da 0,5 MW a 6 MW termici circa, spesso a temperature medio basse). La criticità emerge dai dati storici [12] in relazione alla stabilità di questo tipo di forniture, che vanno pertanto attentamente valutate sotto il profilo della redditività, potenzialmente comunque soddisfacente se le distanze con potenziali utenti di taglia adeguata sono brevi (inferiori a 5 km). I settori che si inseriscono tipicamente in questo quadrante sono quelli dell'industria alimentare (caseario, birrerie), del legno, tessile e dei data center, e alla piccola taglia si associano spesso anche temperature dei flussi disponibili basse o molto basse, fino a 40°C [11].

Un ulteriore criterio per focalizzare l'indagine è il numero di aziende coinvolte, potenzialmente elevato per i settori in area rossa sia in base agli esiti delle survey qui analizzate, sia considerando il quadro italiano (in base a dati ISTAT [90] le medie aziende del settore food and beverage, tessili e del legno nel 2018 erano in totale circa 1500, contro 377 medie aziende chimiche, 222 tra cartarie e cartotecniche, 339 metallurgiche). L'area appare critica sotto il profilo della stabilità delle simbiosi avviate e della relativa redditività, per questo è particolarmente importante impostare un modello che supporti una valutazione accurata dei costi e benefici del recupero esterno proprio per impianti di taglia medio piccola, quantificando anche l'impatto tecnico, energetico-e ambientale.

Le aziende identificate potranno essere considerate sia come potenziali fornitrici di calore sia come potenziali utenti. Prendendo in esame le potenziali fornitrici, se le temperature disponibili per il recupero termico sono superiori a quelle delle potenziali utenze si potrà far riferimento a reti di teleriscaldamento tradizionali: è il caso, ad esempio, del servizio a clienti a bassa temperatura (tabella 1 e zona gialla in figura 5, con riferimenti ai lavori [28] e [30]). Viceversa, quando le temperature dei fluidi disponibili siano particolarmente basse (<70°C) e, in particolare, inferiori a quelle delle utenze, si possono prevedere configurazioni coerenti con il concetto di teleriscaldamento di quarta generazione, richiamato in [20] e [30] secondo la definizione data in [31]. Gli elementi fondanti di questa evoluzione del teleriscaldamento tradizionale sono stati sintetizzati, sulla base di un esame della letteratura tecnica, nella seguente sezione 2.3.

Sulla base di queste considerazioni e della letteratura esaminata, riscontrando che, in particolare, sia l'industria alimentare che quella chimica, compaiono sia come potenziali fornitrici che come potenziali utenze di sistemi di simbiosi energetica, risulta necessario sviluppare un modello abbastanza flessibile perché le aziende delle tipologie evidenziate nell'area rossa dello schema possano comunque essere analizzate anche come potenziali beneficiari di flussi termici di scarto da parte di industrie appartenenti alle zone verde e azzurra di figura 5, valutando la convenienza di destinare a tali simbiosi anche solo una parte dei flussi energetici normalmente dissipati dalle grandi aziende di processo.

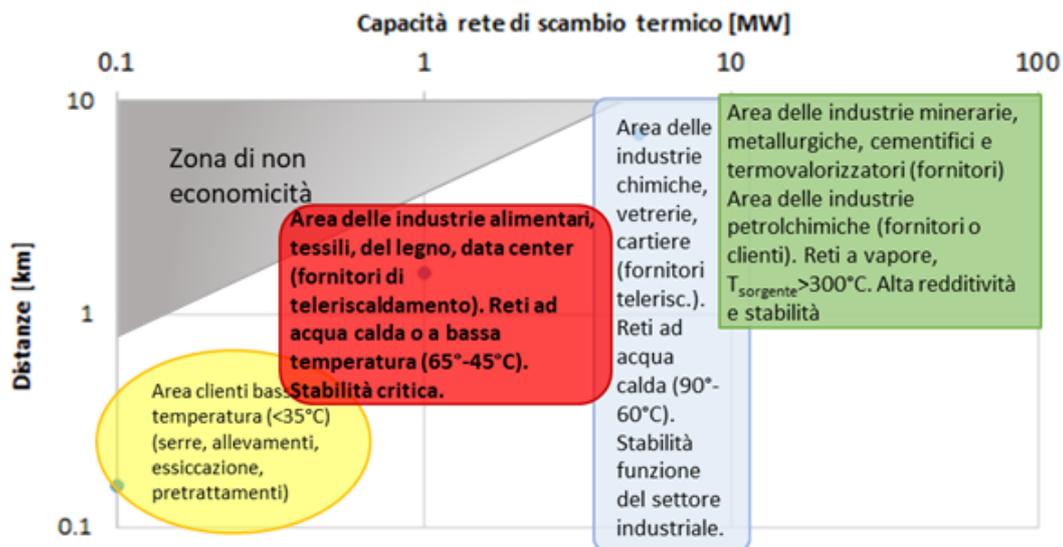


Figura 5 Diagramma quali-quantitativo delle caratteristiche delle industrie coinvolte in progetti di scambio termico esterno (simbiosi industriali con teleriscaldamento), con evidenza dell'area di lavoro per il proseguimento dello studio (area rossa)

Specificata attenzione andrà posta all'esame di due criteri che nei lavori esaminati vengono riconosciuti come determinanti per la fattibilità dei progetti, particolarmente se di piccola taglia, ovvero:

- La distanza tra sorgenti e potenziali utenti, evidenziata in [2][10][13][20][21][30][51];
- La continuità dello scambio termico, evidenziata in [2], [10] come dimensione critica, in quanto incide sulla saturazione degli impianti e, conseguentemente, sui tempi di recupero. Nella maggior parte delle reti di teleriscaldamento, sono previsti dei sistemi di accumulo termico, particolarmente in presenza di fonti rinnovabili o intermittenti [39], ovvero nei sistemi di teleriscaldamento di quarta generazione [31]. Consentendo un maggiore sfruttamento delle fonti rinnovabili, gli accumuli termici apportano benefici, consentendo, in presenza di un ottimale dimensionamento, risparmi nei costi annui di sistema dell'ordine del 5% [53][54], ma incrementano la complessità progettuale e realizzativa in quanto i volumi richiesti possono raggiungere diverse decine di m³ anche solo per accumuli di breve periodo. Pertanto, sebbene il loro costo specifico sia in effetti modesto, dell'ordine dei 500 €/m³ [53], è importante dimensionarli opportunamente.

Infine, sulla base degli studi esaminati, per la successiva modellizzazione si ritiene utile far riferimento agli elementi individuati in [2] come fondamentali costituenti dei modelli di simbiosi energetica industriale, ovvero:

- Un approccio multiobiettivo, che tenga conto di impatti energetici, ambientali ed economici per evidenziare eventuali conflitti e trade-off tra i medesimi;
- La presenza di tecnologie di accumulo per far fronte a domande energetiche variabili ed anche, si aggiunga, alla variabilità nell'offerta;
- Una modello di sistema delle relazioni tra i componenti (nel caso dei modelli di ottimizzazione si parla di sovrastruttura, che comprende tutte le tecnologie che possono essere combinate dall'ottimizzatore per individuare le soluzioni ottimali; in un approccio simulativo, le configurazioni selezionabili andranno preventivamente identificate tramite la combinazione e l'interdipendenza tra i loro componenti);
- Una descrizione dei componenti sufficientemente generica, con lo scopo di renderla compatibile con strumenti di calcolo semplici, ma abbastanza accurata nel dettaglio temporale per consentire la modellizzazione del sistema e una valutazione precisa degli aspetti economici critici per il sistema.

Relativamente al dettaglio temporale, un aspetto critico, rispetto agli obiettivi iniziali del lavoro è che la revisione della letteratura effettuata ha consentito di individuare le tipologie industriali che, per comportamento energetico, possono essere più interessanti per l'avvio di simbiosi industriali in termini di

classi di potenza o energia somministrata, settori produttivi di appartenenza e tipologie di fluidi utilizzati, ma non di ottenere informazioni più dettagliate sui profili temporali di disponibilità dei flussi termici. Infatti, nella maggior parte degli studi revisionati nell'ambito del presente accordo, i dati temporali riportati relativi al profilo di carico termico nel tempo sono stimati su scala annuale ([13]-16],[19], [24]), mensile [25][29], o si basano sull'assunzione che i flussi termici disponibili siano continui e costanti [20][21] e che la domanda delle utenze sia continua e molto maggiore dei flussi ceduti [20]. Il dato di input nonché la modalità di rappresentazione tipica per il dimensionamento di sistemi di teleriscaldamento è la curva di durata[52]. Nelle curve di durata, o curve di carico termico, l'intervallo temporale studiato è suddiviso in periodi, aventi più un significato funzionale (stato del sistema) che cronologico, tanto che le curve sono costruite secondo l'ordine decrescente dei carichi, indipendentemente dal momento in cui essi si verificano. Le curve vengono tipicamente discretizzate per renderle trattabili dal punto di vista computazionale nei modelli di simulazione o ottimizzazione. Un esempio di curva discretizzata è riprodotto in Figura 6.

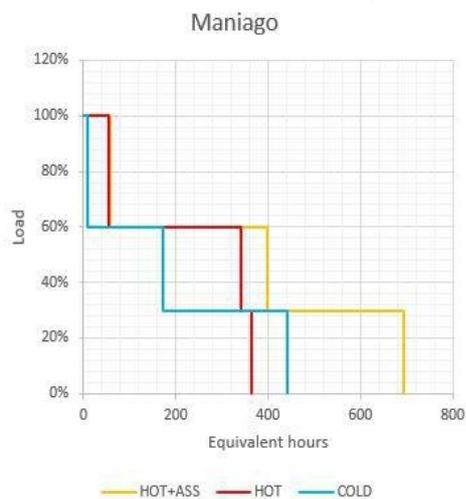


Figura 6 Curve di durata discretizzate dei carichi termici di riscaldamento e raffrescamento per alcuni edifici [32]

Il livello di dettaglio delle curve di durata è sufficiente per valutare le modalità di copertura dei carichi e il rapporto tra energie erogate, da cui dipendono costi e risparmi di esercizio, e potenze installate, da cui dipendono i costi di impianto. È quindi adatto per delle valutazioni economiche di massima, oltre che energetiche e ambientali. Tra le pubblicazioni esaminate, profili di flussi termico in forma di curva di durata sono presentati in [3] (centrale condivisa tra industrie del mobile e utenze civili), [18] (acciaieria a servizio di rete di teleriscaldamento urbana), [23] (laboratorio di ricerca verso teleriscaldamento urbano). Questo livello di dettaglio, già raramente disponibile nella letteratura sul teleriscaldamento in contesti simbiotici, non appare compatibile con la necessità di dimensionare dei sistemi di accumulo di breve periodo. Più adeguato sarà un modello sviluppato sulla base di profili di carico giornalieri, da applicare a giornate tipo, con riferimento a consumi e disponibilità orarie, come è il caso di [22] (termovalorizzazione, smart energy system), [26] (data center su teleriscaldamento urbano). Tali studi, purtroppo, non presentano i dati relativi ai profili di carico utilizzati [22] o presentano solo i profili di domanda, ottenuti per l'ambito civile sulla base di simulazioni [26]. Volendo limitare la complessità, la scelta di far riferimento a giornate tipo può limitare la possibilità di modellizzazione su base stagionale: tuttavia, anche in vista di obiettivi di economicità, si considera che il modello sia destinato prioritariamente alla condivisione di energia termica processo, con flussi che si mantengono quasi costanti durante l'anno.

Sulla base di questi risultati, con l'obiettivo, definito in fase di progetto, di individuare profili ipotetici di disponibilità del calore di scarto a bassa temperatura, e corrispondenti configurazioni di sottosistemi utili allo scambio, trasporto, accumulo e sfruttamento del calore da parte dell'utenza remota, si è integrata questa prima analisi della letteratura, pertinente al teleriscaldamento, con ulteriori ricerche relative a differenti tecnologie per la decarbonizzazione della produzione di energia termica in ambito industriale, quali l'energia

solare, l'energia geotermica, la cogenerazione e gli smart energy systems, partendo dal presupposto che in tali ambiti la conoscenza dei profili anche giornalieri di utilizzo del calore sia fondamentale per lo studio della fattibilità, e sia dunque probabile che i relativi dati vengano resi disponibili nei lavori pubblicati.

In particolare sono state effettuate ricerche sul database Scopus con i gruppi di parole chiave riportati nella tabella 2, che sintetizza contestualmente anche il numero di articoli reperiti. Per questi è stato svolto un esame di massima degli abstract, delle tabelle e delle illustrazioni, identificando i lavori in cui compaiono profili di carico, con particolare riguardo a quelli che, anche estendendosi su un orizzonte temporale più lungo, evidenziano l'andamento della domanda nell'arco della giornata.

Tabella 2: Revisione della letteratura per l'individuazione di profili termici di riferimento

TECNOLOGIA DI RIFERIMENTO	GRUPPI DI PAROLE CHIAVE	ARTICOLI REPERITI	ARTICOLI ESAMINATI	PROFILI DI CARICO IDENTIFICATI	DI CUI GIORNALIERI
Energia solare termica	"Solar heating" AND ("Heat* demand" OR "Heat* load" OR "Duration curve") AND ("Industry" OR "Process Heat")	30	14	5 ([55][56][57][58][59])	2 [58] [59]
Energia geotermica a bassa temperatura	("Geothermal heat*" OR "geotherm* energy") AND ("Heat* demand" OR "Heat* load" OR "Duration curve") AND ("Industry" OR "Process heat*")	19	8	1 [60]	1 [60]
Cogenerazione in ambito industriale	("CHP" OR "Cogenerat*") AND ("Heat* load" OR "Duration curve") AND ("Industry" OR "Process heat*")	63	28	4 di cui uno [64] non industriale [61][62][63][64]	0
Smart energy systems	("Smart energy system" OR "Smart thermal grid") AND ("Heat* demand" OR "Heat* load" OR "Duration curve")	9	7	[18][65] [66][67][68][69]	2

Per quanto riguarda l'energia solare, l'analisi della letteratura conferma che la scelta di esaminare anche questa tecnologia è coerente con gli obiettivi della revisione. Come evidenziato nella revisione [70], relativa ai sistemi di accumulo termico per sfruttamento dell'energia solare a medie temperature, i processi industriali di interesse per l'applicazione diretta del solare termico sono evidentemente quelli a temperatura medio bassa (<200°C), abbastanza in linea con le opportunità di recupero termico industriale a bassa temperatura abbinabili a teleriscaldamenti tradizionali o di quarta generazione. In particolare, in [70] si sottolinea che il 30% circa dei fabbisogni termici dell'industria sono a $T < 150^\circ\text{C}$, e sono destinate ai seguenti processi e attività:

- Cottura
- Pastorizzazione
- Sterilizzazione
- Pulizia, lavaggio
- Essiccazione
- Decapaggio
- Produzione di vapore

E' evidente che la maggior parte di tali attività ricadono negli ambiti dell'industria alimentare: infatti, i cinque articoli ([55]-[59]) citati in tabella che riportano dei casi studio di integrazione di energia solare dotati di profili di carico, ancorché su scala media mensile o annuale e senza riferimenti a un funzionamento orario o giornaliero, sono riferiti a industrie che producono rispettivamente farina di pesce [55], pesce in scatola [59], birra [57] e a industrie lattiero-casearie ([56][58]). Di questi casi, due [58][59] riportano profili di domanda dettagliati a livello orario, qui riportati nelle figure 7-9.

L'azienda descritta in [58] opera nel settore lattiero-caseario, e produce bevande a base di latte mescolate e aromatizzata con frutta, come banana, pesche e fragole. Come evidenziato in Figura 7, il processo prevede quindi sia dei trattamenti per la conservazione del latte (refrigerazione e pastorizzazione), sia dei processi di lavaggio ed essiccazione della frutta, che avvengono tutti a temperature inferiori a 90°C . In tutti i casi i processi vengono alimentati da acqua calda, anche per quanto riguarda la refrigerazione, fornita per la maggior parte da un chiller ad assorbimento alimentato ad acqua a 80°C . La figura 8 descrive quindi l'andamento giornaliero dei fabbisogni attraverso il diagramma orario della portata richiesta di acqua calda richiesta per il chiller (processo 1, temperatura di mandata 80°C , ritorno 70°C), per il lavaggio della frutta (processo 2, temperatura di mandata 75°C , ritorno 70°C), per la pastorizzazione (processo 3, temperatura di mandata 90°C , ritorno 80°C) e infine per l'essiccazione della frutta (processo 4, temperatura di mandata 60°C , ritorno 55°C). L'impianto è attivo per 6 giorni a settimana.

Il profilo di domanda riportato in figura 9 mostra invece il diagramma orario dei principali flussi termici di processo dell'azienda descritta in [59], sita in Spagna. Lo stabilimento tratta ogni giorno 50 t di pesce fresco, ricavandone 48,5 t di pesce in scatola (figura 10). Il calore di processo è ottenuto con caldaie a gas naturale, che operano ogni giorno dalle 7 alle 19 producendo vapore primario (a 200°C) per la sterilizzazione; l'acqua calda secondaria è usata per la pre-cottura del pesce e il lavaggio delle lattine. Tolte le perdite, la chiusura del circuito vapore richiede la dissipazione di circa il 10% dell'energia termica utile giornalmente prodotta.

La ricerca nell'ambito delle applicazioni della geotermia al riscaldamento in contesti industriali ha consentito di identificare un solo profilo giornaliero di riferimento, con consumi simulati ora per ora, relativo al riscaldamento di serre in un distretto di orticoltura e floricoltura nella zona di Lecce [60], come riportato in figura 11.

Sebbene ci si attendesse che studi relativi a cogenerazioni in ambito industriale presentassero in maniera dettagliata l'andamento temporale dei carichi, per l'evidente necessità di valutare la contemporaneità tra carichi termici e carichi elettrici ai fini del dimensionamento degli impianti, la ricerca effettuata non ha portato al reperimento di alcun profilo con grado di dettaglio orario, sebbene in tale classe si sia esaminato il maggior numero di lavori. Solo in quattro pubblicazioni ([61]-[64]) delle 28 esaminate si sono reperiti dei profili di carico, tuttavia solo su scala mensile o aggregati in curve di durata. Tra queste, [61] comprende i profili di carico di un macello e di una bioraffineria per la produzione di metanolo, [62] e [63] presentano profili orari di impianti di teleriscaldamento municipale, in cui in un caso [62] viene integrato un impianto di

essiccazione di biomasse, nell'altro [63] viene evidenziato il ruolo di più industrie come utenze. Nel caso [64] i processi non sono in realtà industriali, si tratta di un supermercato di cui vengono presentati i profili di consumo mensili.

Si è ritenuto infine di estendere la stessa ricerca agli smart energy systems, già considerati in un precedente lavoro di membri del presente gruppo di lavoro [18], e definiti secondo Lund [71] come un approccio in cui smart grids, reti termiche intelligenti e reti del gas intelligenti, in grado cioè di integrare con un controllo ottimizzato le azioni di tutti i fruitori, utenti o generatori di energia, vengono gestite in maniera coordinata per massimizzare il contributo delle energie rinnovabili al soddisfacimento dei fabbisogni energetici.

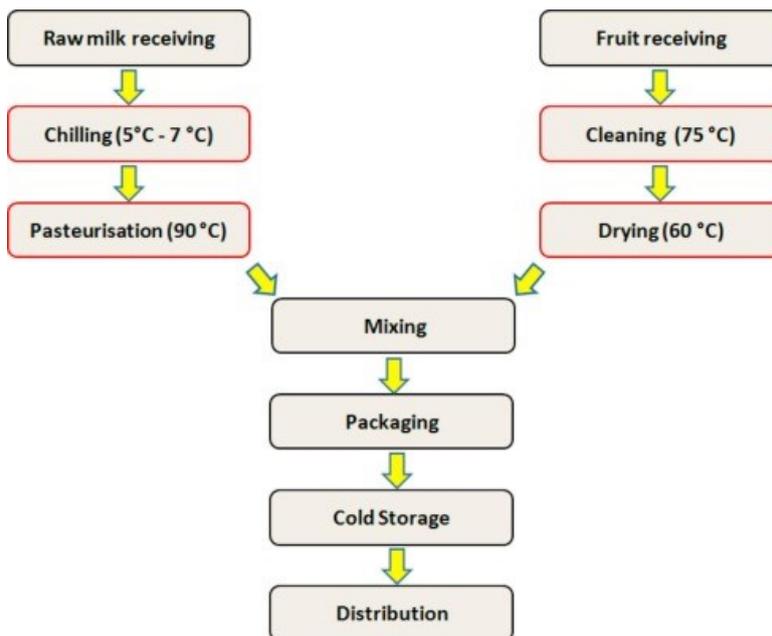


Figura 7 Processo di industria lattiera in cui integrare solare termico [58]

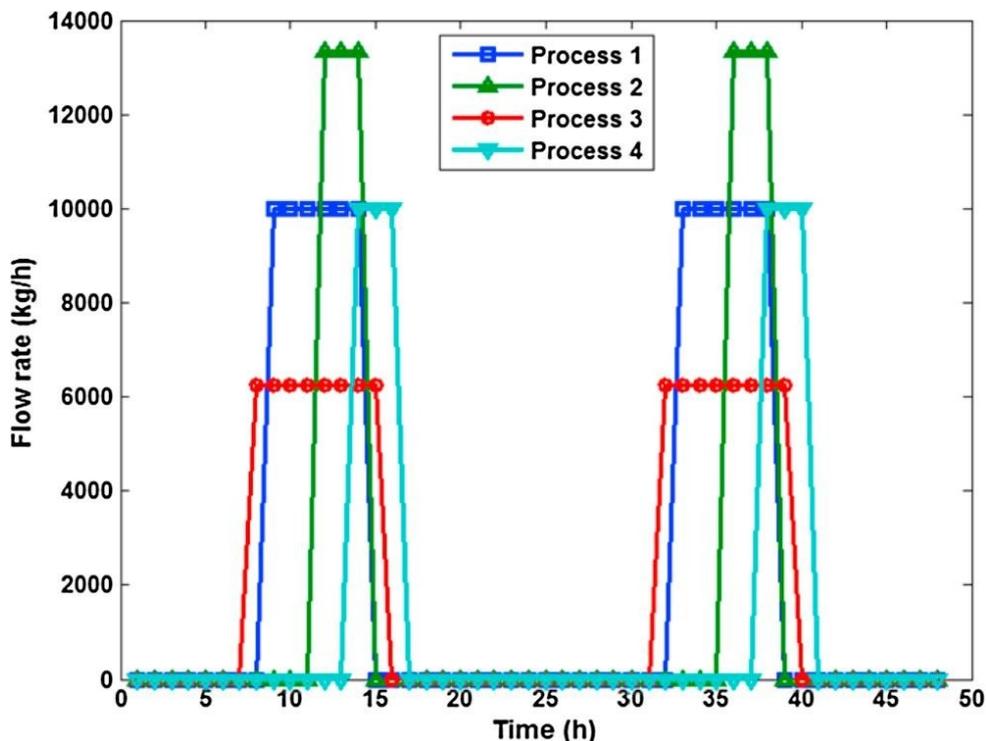


Figura 8 Diagramma periodico del ciclo di funzionamento giornaliero industria lattiera situata in Marocco [58]

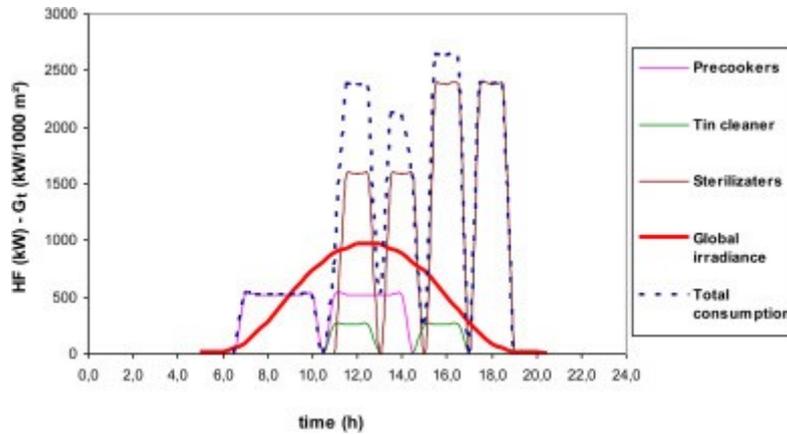


Figura 9 Diagramma periodico dei fattori di carico termico in una fabbrica di conserve di pesce situata in Spagna [59]

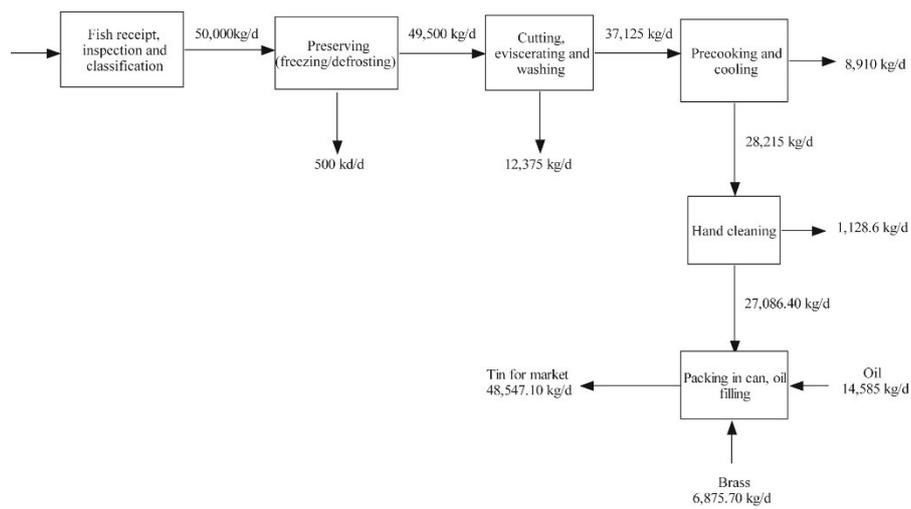


Figura 10 Bilancio di massa delle lavorazioni di conserve di pesce nello stabilimento [59]

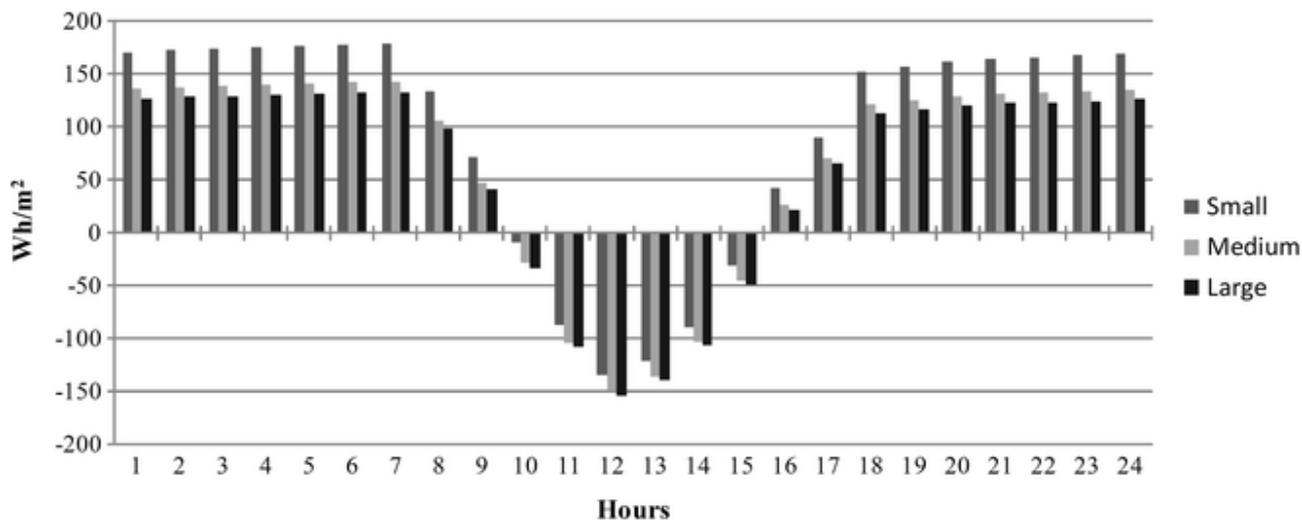


Figura 11 Diagramma periodico del fabbisogno termico orario di una serra nel sud Italia [60]

Non a caso, Lund è stato anche il primo autore a definire il concetto di teleriscaldamento di quarta generazione [31], che oltre che per le basse temperature si caratterizza per una gestione intelligente e integrata di diverse fonti di energia, inclusi i recuperi termici industriali. In effetti, il numero totale di articoli reperito è ristretto (si è dovuta omettere la restrizione all’ambito industriale o di processo per reperire nove lavori), ma è significativo che ben sette su nove presentino andamenti del profilo temporale delle utenze o dei fornitori di energia almeno su scala mensile [18][65]-[69], sebbene in alcuni casi [68][69] limitato all’energia elettrica. La conoscenza dei profili termici nel tempo risulta dunque chiaramente determinante per impostare la gestione intelligente di sistemi integrati di nuova generazione. In [65] è pubblicato un profilo che mostra un andamento con articolazione oraria, su periodo settimanale, in cui è riconoscibile il profilo di carico termico di utenze industriali (in giallo in figura 12), tuttavia aggregate e non meglio specificate per tipologia. Anche in ambito industriale si evidenziano delle intermittenze e dei carichi di punta. Su base giornaliera, questi sono meno marcati che per altre tipologie di utenze (si confrontino ad esempio gli uffici, linea rossa, o gli hotel, linea azzurra, in figura 12), su base settimanale invece è caratteristica l’interruzione dei carichi nel weekend.

Concludendo, si è appurato dall’analisi preliminare delle letterature sulla simbiosi industriale che raramente sono disponibili profili temporali di disponibilità del calore di scarto, ma solo indicazioni di massima delle potenze installate, delle energie erogabili e dei livelli di temperatura dei fluidi. Tali evidenze sono state comunque utili alla definizione dell’area di lavoro (zone rossa e gialla in figura 5, relative all’industria alimentare, da intendersi sia come potenziale fornitore di calore a temperatura medio bassa, sia come potenziale utente, e alle serre e allevamenti ittici, come potenziali utenti a bassa temperatura). La successiva espansione dell’indagine tecnologica in contesti affini (integrazione di calore di processo da energia solare, geotermica, cogenerazione e profili di carico in smart energy systems) ha confermato l’utilità di conoscere gli andamenti del carico termico nel tempo, almeno con riferimento a giornate tipo, particolarmente nell’ottica di progettare sistemi di condivisione dell’energia di nuova generazione (smart energy systems, smart thermal grids, teleriscaldamento di quarta generazione).

La seconda fase dell’indagine di letteratura ha consentito di integrare in parte le informazioni non reperite con l’indagine generale sulla simbiosi industriale. In particolare, i profili di carico orario ottenuti per alcune industrie alimentari (figure 7-10), per le serre (figura 11) e per alcune tipologie di edifici, tra cui alcuni generici edifici industriali (figura 12, possono essere considerati sicuramente dei profili di domanda di riferimento, descrittivi di possibili utenti di simbiosi energetiche industriali a bassa temperatura.

Relativamente alle industrie alimentari, i profili ottenuti si possono considerare di riferimento anche come potenziali fornitori, visti i livelli di temperatura dei fluidi elaborati, che potrebbero alimentare reti di teleriscaldamento di quarta e anche di terza generazione, e l’intermittenza dei processi. Se da un lato questa costituisce un fattore problematico, per il basso grado di saturazione e continuità di utilizzo di eventuali impianti alternativi, dall’altro costituisce un’opportunità: se processi industriali intermittenti sono alimentati

da una fonte rinnovabile di diversa periodicità (ad es. solare termico) o da una sistema che incrementa la propria efficienza a fronte di maggior continuità (cogenerazione o trigenerazione) sicuramente vi saranno possibilità di condivisione con altre utenze del calore non utilizzato nei periodi di minima domanda da parte del processo considerato.

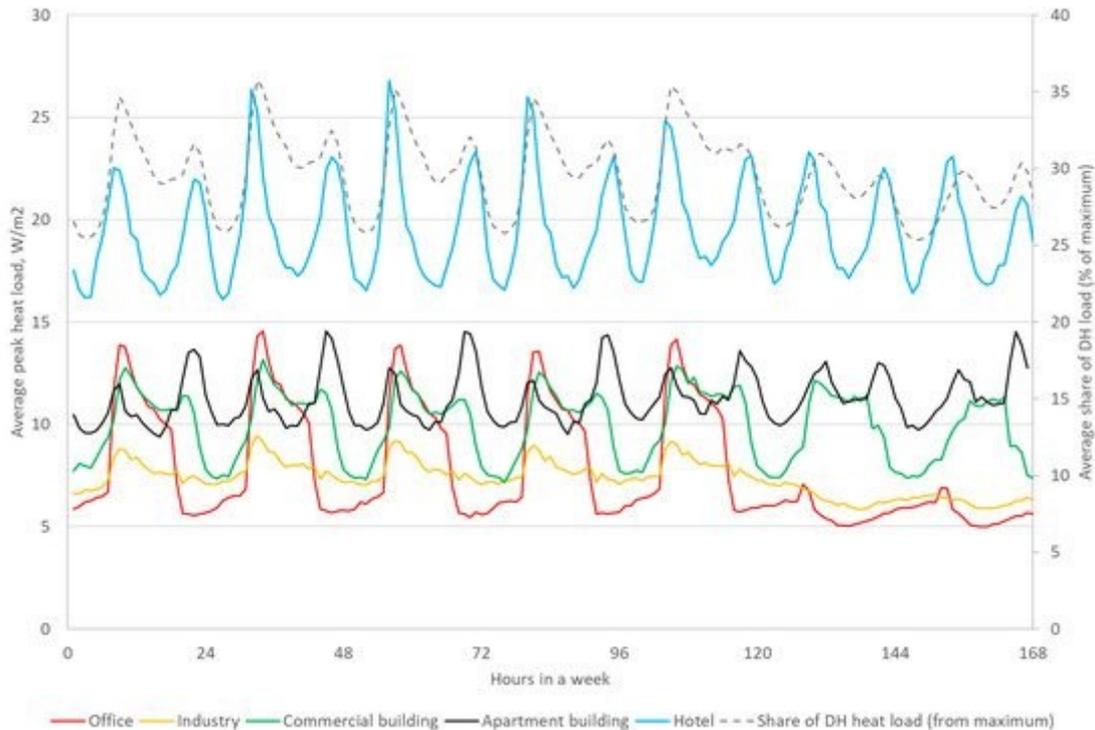


Figura 12 Diagramma orario settimanale dei carichi termici di riscaldamento di edifici di vario tipo (inclusi edifici industriali) connessi al teleriscaldamento in Finlandia [65]

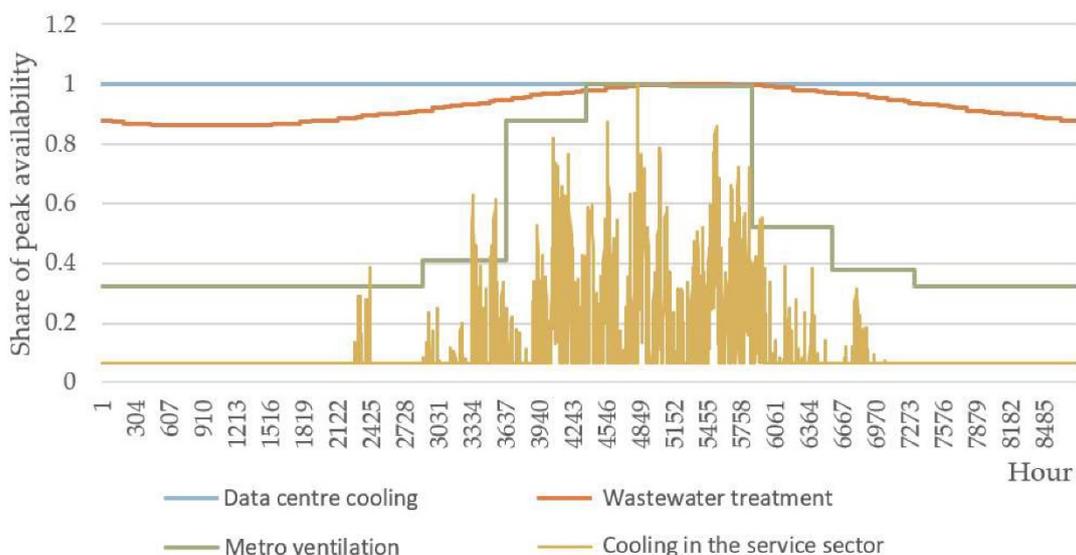


Figura 13 Diagramma annuale con articolazione su base oraria delle disponibilità di flussi termici da fonti non convenzionali integrabili in smart thermal grids [66]

I profili di carico termico ottenuti dall'analisi della letteratura, pur solo in parte pertinenti al contesto italiano, sono dunque un riferimento per la caratterizzazione temporale della disponibilità di calore in condivisione nell'industria alimentare. Sicuramente, la carenza di dati di letteratura sui profili di disponibilità temporale del calore di scarto nell'industria alimentare andrà integrata nella seconda annualità con lo sviluppo di casi di studio, anche grazie alla collaborazione con gli altri partner di progetto.

Nel complesso, gli indicatori e i profili così ottenuti sono già una base di partenza per la definizione di configurazioni di sottosistemi utili allo scambio, trasporto, accumulo e sfruttamento del calore da parte dell'utenza remota, come descritto nella sezione 2.3. Essi infatti confermano la necessità di impostare il modello tenendo in considerazione l'andamento orario dei profili di carico di utenze candidate a fornire o ricevere calore, di inserire, tra le unità funzionali dei sistemi "TO BE" di teleriscaldamento, dei sistemi di integrazione o accumulo termico per far fronte a intermittenze, picchi o mismatch tra domanda e offerta. Inoltre, l'indagine preliminare ha orientato a sviluppare un modello mirato in particolare a taglie di impianto approssimativamente comprese tra i 500 kW e i 10 MW termici. In base alle evidenze di letteratura, si ritiene ragionevole valutare, in questo range di taglie, il trasporto di calore con reti tradizionali ad acqua calda o con reti di quarta generazione entro un raggio di trasporto indicativamente inferiore ai 5 km. Tali valori verranno comunque rivalutati e confermati dopo la predisposizione del modulo relativo all'analisi economica e la generale applicazione del modello a casi studio realistici, previste nella seconda annualità.

2.2 Descrizione schematica e caratterizzazione dei parametri energetici e tecnici di riferimento per le situazioni esistenti ("AS IS") tipiche del contesto italiano.

Per valutare, con un confronto orientato al water-energy-carbon nexus, possibili interventi di simbiosi industriale tra aziende di medie dimensioni vanno esaminati e modellizzati anzitutto i sistemi esistenti ("AS IS") sia presso i siti candidati ad essere utenti di eventuali reti di teleriscaldamento, sia presso le potenziali sorgenti. Presso il candidato fornitore si prendono in esame esclusivamente i flussi di calore in surplus e si valutano le modalità esistenti di dissipazione. Parimenti, presso il candidato utente si prendono in esame le più probabili modalità di soddisfacimento attuale dei fabbisogni di calore.

Si è reso dunque necessario individuare, mediante analisi commerciale e di letteratura, i componenti attuali degli impianti di generazione termica in ambito industriale.

Una base di partenza per la definizione delle configurazioni attuali e delle configurazioni "TO BE" sono le ricerche precedenti di alcuni componenti del gruppo di lavoro, e in particolare quelle confluite nella pubblicazione [21], in cui veniva presentato un primo modello per la valutazione degli usi esterni di recuperi termici industriali a bassa temperatura sotto il profilo del water-energy-carbon nexus.

Tale lavoro presentava, tuttavia, limitazioni e differenze importanti rispetto agli obiettivi del presente studio, sia dal punto di vista dei contenuti che dell'implementazione. Per quanto riguarda principalmente l'implementazione, gli sviluppi specifici del presente studio sono discussi all'inizio della sezione 2.4.

Per quanto riguarda i contenuti, lo studio [21] prevedeva che il recupero termico industriale avvenisse da una fonte di acqua calda (da circuiti di raffreddamento) costantemente disponibile e fosse rivolto esclusivamente ad utenze civili di riferimento, di tipo residenziale o commerciale, alimentate da caldaie. In conseguenza degli obiettivi e della caratterizzazione dei profili delle utenze industriali propri del presente studio, sintetizzati nelle precedenti sezioni, relativamente allo scenario "AS IS" si è qui reso necessario caratterizzare più approfonditamente le modalità attuali di produzione del calore nell'industria, onde consentire il successivo calcolo di consumi ed emissioni evitati (raffronto scenari AS IS – TO BE).

Si è pertanto proceduto anzitutto a un esame della letteratura scientifica, di risultati di progetti e indagini, nonché manuali tecnici, al fine di individuare i componenti degli impianti con particolare riferimento alle parole chiave "INDUSTRIAL BOILERS" e "PROCESS HEATING". Visto il campo di applicazione individuato, l'attenzione è stata focalizzata sulla generazione di acqua calda. Individuati i componenti, si è quindi proceduto all'analisi commerciale dei cataloghi e della documentazione relativi ai prodotti di fornitori attivi sul mercato italiano. La tabella 3 sintetizza le principali fonti consultate per la caratterizzazione tecnica ed energetica sia dei componenti in uso nelle aziende (AS IS), sia dei componenti dei sistemi di teleriscaldamento con cui realizzare interventi di simbiosi energetica (TO BE).

Tabella 3: Componenti e sistemi per la generazione, scambio e trasporto di calore: tecnologie e fonti commerciali consultate.

FUNZIONE	OPZIONI TECNOLOGICHE CONSIDERATE	FONTI	RIFERIMENTI DEI COSTRUTTORI ESAMINATI NELL'ANALISI COMMERCIALE	SCENARIO
Produzione di acqua calda per processi industriali o per riscaldamento industriale	Caldaia a gas naturale a tubi di fumo	[20] [33] [34] [72] [73] [74] [75] [76] [77]	FERROLI https://www.ferroli.com/ VISSMANN https://www.viessmann.it/ BABCOCK WANSON http://www.babcock-wanson.com	AS IS come sistema esistente, TO BE come sistema di integrazione
	Pompa di calore aria acqua	[37] [38] [78]	TEON http://www.teon.it AERMEC https://global.aerme.com/it/products/ VISSMANN https://www.viessmann.it/	AS IS come sistema esistente
	Pompa di calore acqua <u>acqua</u>	[31] [41] [84] [85] [86]	AERMEC https://global.aerme.com/it/products/ TURBODEN https://www.turboden.com/ GEA http://www.gea.com	TO BE se $T_{u,sc} < T_{ut}$
	Scambiatore a piastre (sottostazione <u>telerisc.</u>)	[81] [82] [83] [84]	DANFOSS https://www.danfoss.com/it-it/ TECHNO-SYSTEM https://www.techno-system.it/	TO BE
Dissipazione di calore	Dry cooler	[21] [36] [79] [80]	REFRION http://www.refrion.com THERMOKEY http://www.thermokey.it	AS IS e TO BE
	Torri evaporative	[21] [36] [79]	EVAPCO http://www.evapco.eu MITA https://www.mitacoolingtechnologies.com/ YWCT https://ywct.com/	AS IS e TO BE
	Scambio termico diretto con acqua marina	[21] [36] [79] [80]	TERMOMECCANICA https://www.tmp.termomeccanica.com/	AS IS e TO BE
Trasferimento di calore	Tubazioni in acciaio <u>preisolato</u>	[21] [81]-[88]	LOGSTOR https://www.logstor.com/it ECOLINE https://www.ecoline.it/it/prodotti/	TO BE
	Pompe centrifughe con inverter	[21] [36] [87]	GRUNDFOS https://product-selection.grundfos.com/ DAB https://www.dabpumps.com/	TO BE
	Sistemi di accumulo termico	[31] [85] [86] [88] [40]	LODDO https://www.tmlgroup.it/ ARBO https://www.arbo.it	TO BE

Queste due fasi di indagine hanno permesso di caratterizzare i componenti dal punto di vista tecnologico, con particolare riferimento alla raccolta di dati sui rendimenti o parametri di efficienza energetica, e all’inventario dei materiali di cui essi sono costituiti, come riportato in Tabella 4. La caratterizzazione energetica di componenti e sottosistemi comprende inoltre definizione dei modelli fisici di funzionamento e dei relativi di bilancio energetico. Anch’essa è stata svolta sulla base delle fonti citate in Tabella 3, e viene descritta nella sezione 2.4 con riferimento alla relativa implementazione nel modello di calcolo.

Per la situazione “AS IS” le evidenze più significati su fonti e tecnologie per la produzione di calore di processo sono sintetizzate da [72] e [73]. Il primo studio [72], commissionato dalla Commissione Europea nel 2014 e pubblicato nel 2016, ha lo scopo di mappare lo sviluppo futuro (2020-2030) dei combustibili per riscaldamento e raffrescamento nella UE. Relativamente al settore industriale, lo studio riconosce un fabbisogno termico complessivo di processo di circa 2000 TWh nei 31 paesi dello spazio europeo (anno di riferimento 2012). I forni ad alta temperatura coprirebbero il 37% circa del fabbisogno (nei settori siderurgico, del vetro e del cemento). Un fabbisogno totale di circa 1000 TWh a temperatura più bassa è essenzialmente attribuito a generazione di vapore, considerando secondaria la produzione di acqua calda: si assume che circa i 2/3 della domanda siano soddisfatti da impianti di cogenerazione. Tuttavia, per i cogeneratori si fa riferimento a un unico database, che non distingue tra cogeneratori industriali e a servizio di teleriscaldamento, mentre per la descrizione dei generatori di vapore viene evidenziato lo scarso successo di un tentativo di survey tra le industrie europee utilizzatrici e il ricorso a uno studio preparatorio alla normativa [74]. Più pertinenti all’oggetto del nostro studio sono i risultati discussi nella ricerca dello Oxford Institute on Energy Studies [73], in cui si riconosce il problema dell’assenza di un breakdown specifico dei consumi di calore nella maggior parte dei database statistici a livello europeo. L’input di combustibile per riscaldamento e raffrescamento è parte degli usi energetici totali per settore e non può essere ricavato dai bilanci energetici esistenti. Inoltre, le caldaie industriali sono molto meno standardizzate che quelle residenziali, venendo spesso realizzate su misura per specifici processi, e dunque le efficienze possono essere molto variabili. Con questi limiti, in [73] viene presentata una ripartizione della domanda termica industriale per fonte energetica, qui riportata in figura 14. Si nota che il gas naturale è la fonte principale di alimentazione dei sistemi di riscaldamento ambientali in ambito industriale e del calore di processo a temperature comprese tra 100 e 200 °C, di interesse per il presente studio.

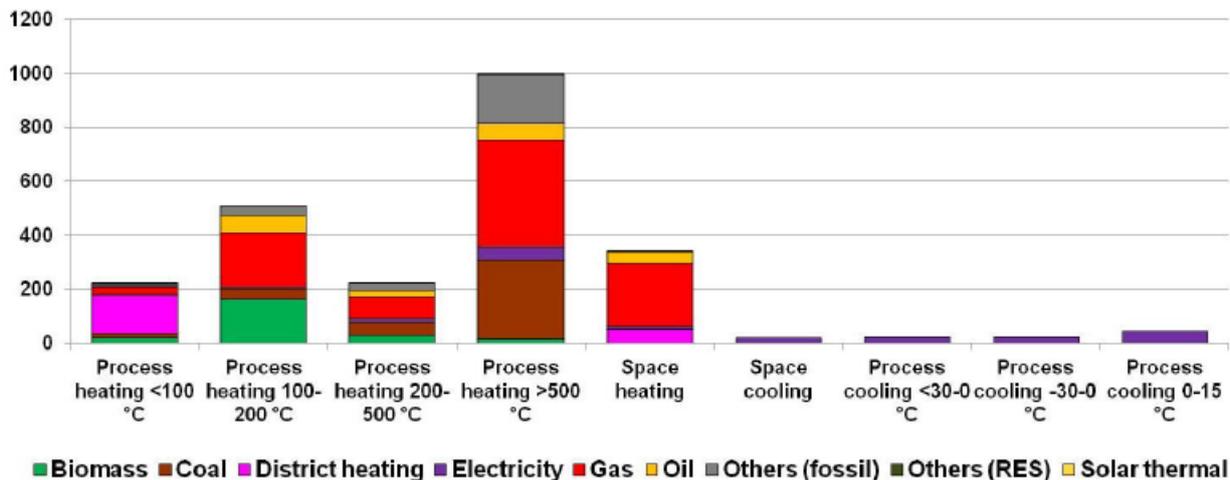


Figura 14 Fonti energetiche che soddisfano la domanda di calore nelle industrie europee, per applicazione, in TWh [73]

E’ interessante notare che, a livello europeo, il teleriscaldamento è invece la prima fonte energetica per il soddisfacimento di fabbisogni di calore di processo a temperatura <100°C. Ciò non vale, tuttavia, per il contesto italiano, in cui lo stesso studio [73] evidenzia la limitata penetrazione del teleriscaldamento, con una capacità installata pari a circa 10 GWth (per confronto, la capacità installata in Italia è circa la metà di quella installata in Francia e circa un quinto di quella installata in Germania). Anche ulteriori evidenze di letteratura [33] e la base di conoscenze creata dai partner di questo progetto corso della prima annualità, in particolare

da parte del gruppo di lavoro di ENEA [75], confermano dunque che il gas naturale è la fonte principale per il riscaldamento ambientale e il calore di processo a bassa temperatura nell'industria italiana.

Dal punto di vista della fornitura del calore ai siti industriali nel caso "AS IS", ai fini dello sviluppo del presente modello si è perciò previsto che essa avvenga tramite caldaie a gas naturale, che potranno soddisfare esigenze di riscaldamento ambientale o di processo per temperature dei fluidi fino a 90°C.

Considerato che la larga penetrazione del gas naturale può essere attribuita in larga parte al suo costo inferiore rispetto agli altri combustibili, si ritiene che sviluppare le analisi comparative rispetto al solo gas naturale non sia eccessivamente limitante, bensì renda le valutazioni generali ottenute con i modelli qui sviluppati più conservative dal punto di vista economico rispetto all'introduzione di nuove soluzioni, il che è particolarmente importante per proporre soluzioni economicamente robuste per gli impianti della scala considerata in questo studio.

Schematicamente, la configurazione "AS IS" comprende i componenti rappresentati in figura 15.

I componenti evidenziati dai rettangoli sono tra loro alternativi, e potranno essere combinati nelle varie configurazioni nel modello di calcolo predisposto

Sulla base dei manuali tecnici [76][77] e dell'analisi commerciale si evidenzia che le caldaie orizzontali a basamento a tubi di fumo, in particolare a tre giri di fumo, sono la tipologia costruttiva più utilizzata per la produzione di acqua calda e di vapore nell'industria. Sono commercialmente disponibili taglie fino a 15 MW per rendimenti nominali fino al 92%; in considerazione dell'eterogeneità delle installazioni e dell'intermittenza di funzionamento si considera un'efficienza media dell'85% (Tabella 4).

Le caratteristiche delle caldaie industriali sono molto simili a quelle delle caldaie inserite come caldaie di punta o di backup in sistemi di teleriscaldamento [34]. I riferimenti tecnici e di letteratura per le caldaie rimangono dunque gli stessi per i casi AS IS e TO BE, specie considerando la probabilità di utilizzo di caldaie esistenti come sistemi di integrazione in contesti di simbiosi industriale.

Per confrontare le soluzioni proposte anche con impianti diversi e in prospettiva dal migliore impatto ambientale non si sono incluse nel modello le opportunità di cogenerazione, considerando che un'eventuale azienda utente, già dotata di impianto di cogenerazione con cui soddisfi sia i propri fabbisogni termici che elettrici, sia difficilmente da prendere in considerazione come potenziale utente in una simbiosi industriale a bassa temperatura. Ciò non di meno, il modello potrà essere adattato alla valutazione di tale specifica situazione se richiesto nei casi studio che emergeranno nella seconda annualità.

Si sono invece considerate, come possibili soluzioni ad alta efficienza esistenti o proponibili a aziende utenti indipendenti, anche delle pompe di calore aria/acqua. Tale soluzione è infatti sempre più spesso proposta per il riscaldamento di processo [73][78] ed è eventualmente realizzabile anche in modalità dual source, combinando cioè pompe di calore ad aria e a suolo (GSHP) [37][38]. In base alle evidenze dell'analisi commerciale si è deciso di considerare solo l'utilizzo di pompe di calore ad aria e di limitare tale possibilità a processi che richiedono acqua calda a temperature minori o uguali a 55°C. Il COP di 2.74 assunto per queste condizioni di riferimento (temperatura aria in ingresso pari a 10°C) è tratto dal catalogo AERMEC [38], mentre le informazioni sull'inventario sono realizzate per analogia sulla base delle informazioni tratte da [37].

Più in generale, gli inventari raccolti derivano da cataloghi, dal database ecoinvent [50] o da letteratura come indicato in Tabella 4, e corrispondono a componenti di riferimento di capacità assegnata. Essi formano la base per un calcolo parametrico degli impatti, come dettagliato più sotto in sezione 2.5. Sicuramente il riferimento a un singolo inventario e la parametrizzazione conseguente limitano l'accuratezza delle valutazioni, specie in considerazione delle piccole taglie di impianto per le quali è stato possibile trovare dei riferimenti in letteratura. Tuttavia, considerato che in precedenti lavori [21] è emerso come il contributo della costruzione dei componenti agli impatti sul ciclo di vita sia contenuto, almeno per quanto riguarda gli indicatori di carbon footprint e water footprint oggetto anche del presente studio, si ritiene che l'errore sia nel complesso accettabile per la strutturazione del modello. L'applicazione a casi studio, prevista nella seconda annualità, e l'acquisizione di informazioni dai fornitori di tecnologie, che sta venendo completata nell'ambito delle attività di progetto sviluppate dagli altri partner, potranno consentire di valutare l'errore ed eventualmente ricalibrare il modello nella sua versione finale.

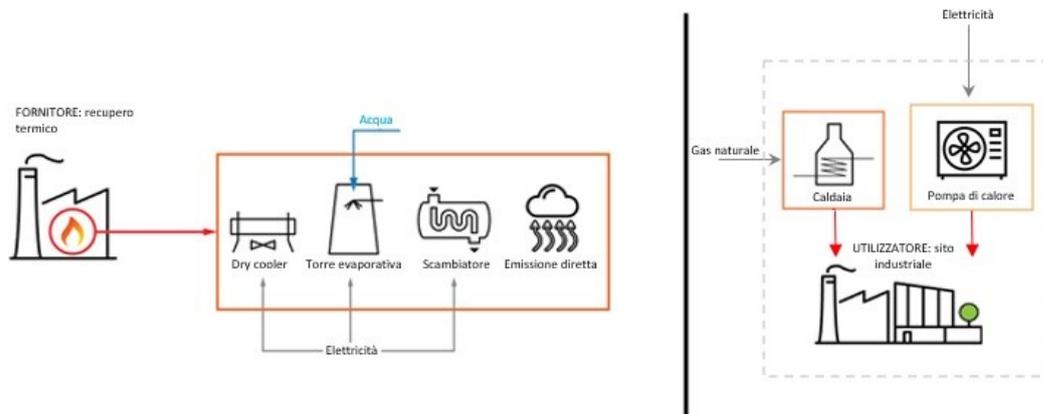


Figura 15 Rappresentazione schematica configurazioni “AS IS”

Particolare importanza, soprattutto ai fini della valutazione della water footprint, riveste la caratterizzazione delle modalità esistenti di dissipazione del calore in eccesso presso il candidato fornitore, spesso trascurate nelle valutazioni di efficienza energetica degli impianti in ambito scientifico. Un primo lavoro di caratterizzazione delle alternative di dissipazione risale al 1996 [79] e descrive i sistemi utilizzabili per la dissipazione di un carico termico di 300 MW in una raffineria. Significativamente, il lavoro, di taglio molto tecnico-applicativo, è stato citato in letteratura quasi esclusivamente negli ultimi dieci anni, con l’emergere dell’interesse per l’efficientamento idrico in ambito industriale e di un’ottica water-energy nexus. Le principali soluzioni individuate in [79] comprendono:

- Lo scambio diretto con acqua (marina, di laghi o fiumi) è possibile solo quando l’impianto si trova in prossimità di flussi d’acqua da cui sia possibile attingere e reimmettere stabilmente portate importanti; è tipico infatti dei grandi impianti (termoelettrici, ciclo siderurgico integrale). Il fabbisogno energetico prevalente è quello per le pompe di circolazione.
- Le torri di raffreddamento, che espongono l’acqua da raffreddare all’aria ambiente. Il raffrescamento sfrutta il calore latente di evaporazione dell’acqua e comporta dunque un consumo della stessa; la parte rimanente viene inviata agli scambiatori per completare i raffreddamenti richiesti. Vi è comunque una componente di consumo elettrico necessaria alla circolazione dei fluidi termovettori.
- Il raffrescamento ad aria forzata tramite dry cooler. Sono i dispositivi più comunemente impiegati in piccoli impianti e comprendono ventilatori utili ad aumentare lo scambio termico dei fluidi con l’aria in batterie alettate disposte a V. Comportano quindi un consumo di energia elettrica rilevante, mentre non comportano consumi di acqua (sono perciò detti a secco, dry).

Come evidenziato in Figura 15, rispetto ai lavori [21] e [79] viene qui considerato anche il caso di emissione diretta in atmosfera: ciò corrisponde all’esame di un recupero termico non da un circuito idrico di raffreddamento ma piuttosto attraverso l’ulteriore raffreddamento di flussi (ad esempio fumi caldi) che normalmente verrebbero dispersi a una temperatura assegnata senza necessità di dissipazione. In tal caso si assume non vi siano fabbisogni o componenti da imputare al caso base (AS IS).

I casi di circuiti chiusi con dry cooler o aperti con torri evaporative sono già stati esaminati e modellati in [21]. Per tali tecnologie in questa sede si adottano le formule elaborate in [21], integrandole con le informazioni tratte dalla presente analisi commerciale e di letteratura. Si ottengono così i coefficienti medi riportati in Tabella 4. La stima ottenuta dai dati di catalogo per le cooling towers è inferiore alla potenza installata nel caso descritto in [79] di circa il 30%, mentre la stima ottenuta per i dry coolers è allineata al valore previsto da [79]. Tali valori potranno essere ulteriormente validati con l’analisi di casi di studio nella seconda annualità.

Per la stima della potenza elettrica assorbita in funzione della potenza termica dissipata in caso di scambio diretto in circuito aperto, in questo studio è stato possibile utilizzare i dati tecnici relativi alle pompe di circolazione installate in un impianto esistente. In particolare, si sono utilizzati i dati di progetto relativi al

revamping del circuito di raffreddamento di una centrale termoelettrica in cui il condensatore è raffreddato ad acqua di mare [93]. Note le caratteristiche delle pompe e dell'impianto, dedotte da dati sperimentali circa la loro modalità operativa attuale a carico pieno e parziali, si sono interpolati i valori corrispondenti a diversi punti di funzionamento, ottenendo una stima pari a $0,004 \text{ kW}_{el}/\text{kW}_{th}$ per il rapporto tra P_{el} assorbita per kW di potenza Q_{diss} dissipata con tale modalità (Tabella 4). Rispetto alle altre modalità di dissipazione, tali coefficienti risultano molto ridotti, va però notato che tale modalità è usualmente tipica di impianti aventi potenze termiche da dissipare dell'ordine delle decine di MW. Confrontando i valori riportati in [79], il consumo stimato per un raffreddamento per scambio diretto con circuito aperto è pari a circa il 50% del rapporto presentato in [79]. Una validazione di questi valori sarà possibile nella seconda annualità, qualora si presentino casi studio con raffreddamento diretto in circuito aperto.

Tabella 4: Caratteristiche tecniche ed energetiche dei componenti degli impianti AS IS e TO BE: inventari dei materiali ed efficienze o COP

Componenti situazione AS IS	Materiali	Masse [kg]	Potenzialità impianto di riferimento Cp	Rendimento, COP o consumo specifico	Riferimenti
Caldaia industriale a gas naturale a tubi di fumo	Acciaio	1.45E+01	25 kWth	92% nominale 85% medio stagionale	[21] [33][73]
	Alluminio	1.26E+01			
	Ottone	3.18E+00			
	Acciaio al cromo	2.40E+01			
Dry Cooler	Acciaio	8.60E+01	24 kWth	0.03 kWel/kWth	[21][34]
	Alluminio	5.80E+01			
	Rame	3.50E+01			
Torre evaporativa	Acciaio zincato	1.97E+01	48 kWth	0.013 kWel/kWth	[34]
	Fibra di vetro	1.94E+01			
	Polypropylene	1.15E+01			
	PVC	2.40E+00			
Scambiatore di calore a piastre	Acciaio zincato	2.27E+01	25 kWth	99%	[21][36]
	Acciaio	2.70E+00			
	Rame	2.16E+01			
	Schiuma poliuretanic	2.7E+00			
Pompe di circolazione per teleriscaldamento o per scambio termico diretto	Acciaio	1.51E+01	18.5 kWel	Rendimento medio pompe 70% Consumo per scambio termico diretto 0.004 kWel/kWth	[21][36]
	Ghisa	1.36E+01			
Pompa di calore aria acqua	Acciaio	1.29E+02	10 kWth	COP 2.74 per temperatura aria in ingresso di 10 °C e temperatura del fluido in uscita di 55°C	[37][38]
	Alluminio	4.72E+01			
	Rame	3.92E+01			
	Refrigerante	6.4E+00			
	Olio lubrificante	1.6E+00			
Pompa di calore acqua acqua per teleriscaldamento o	Acciaio	5.85E+03	800 kWth	COP 5.42 per temperatura acqua in ingresso di 40°C, in uscita di 35°C e per un salto termico di 30°C sul fluido riscaldato	[41][91]
	Rame	1.05E+03			
	Refrigerante (NH3)	6.5E+01			
	Olio lubrificante	1.5E+02			

2.3 Descrizione schematica e caratterizzazione dei parametri energetici e tecnici di riferimento per soluzioni "TO BE" proposte per le situazioni di riferimento.

La realizzazione di sistemi di teleriscaldamento prevede l'installazione di tubature isolate interrate di mandata e ritorno, con utilizzo di acqua come fluido termovettore, associati ai relativi sistemi di pompaggio. La tecnologia esiste da più di cento anni [31] ed ha subito un'evoluzione che si può ritenere articolata secondo

le categorie o generazioni riportate in tabella 5. La struttura degli impianti tradizionali è dunque ampiamente nota e descritta nella manualistica internazionale: si è fatto riferimento a diversi manuali in lingua tedesca [81] e inglese ([82]-[85]), avendo riscontrato la carenza, nell'ambito nazionale, di una manualistica tecnica di riferimento altrettanto ampia e aggiornata.

Come evidenziato in tabella 5, gli impianti di teleriscaldamento hanno subito nel tempo un'evoluzione che ha portato in generale verso una riduzione delle temperature e delle pressioni dei fluidi termovettori utilizzati, principalmente grazie alla corrispondente riduzione delle temperature richieste dagli edifici connessi, fino a giungere negli anni più recenti al concetto di sistemi di teleriscaldamento quarta generazione, già messo in evidenza nella precedente scoping literature review. Anche per questi sistemi, pur proposti formalmente solo dal 2014 [31], esistono già in ambito internazionale delle linee guida [84][85], che identificano nelle fonti rinnovabili a bassa temperatura (in particolare l'energia solare) e nei recuperi termici industriali le principali sorgenti e caratterizzano le principali componenti. Nella letteratura scientifica (database Scopus) si sono individuati circa cinquanta articoli, prevalentemente di provenienza danese e pubblicati tra il 2019 e il 2020, che trattano vari aspetti relativi al "4th generation district heating", in termini di prospettive, integrazione di fonti rinnovabili, predizione e gestione dei carichi degli edifici da connettere, visti prevalentemente come edifici civili a basso consumo energetico (NZEB).

Con l'obiettivo di esaminare primariamente sinergie industriali e di caratterizzare i componenti, dopo un primo esame di questa recente produzione scientifica e della citata manualistica, si è deciso di procedere con approccio snowball per specifici componenti a partire dalle informazioni e dai riferimenti bibliografici reperiti nei manuali e nelle linee guida e negli articoli già esaminati nella scoping literature review, inclusi i lavori precedenti di alcuni componenti del gruppo di lavoro [18][21]. Per questi ultimi si sono esaminati anche gli articoli in cui questi venivano citati. Si sono inoltre esaminati siti e cataloghi dei principali costruttori, secondo quanto indicato in tabella 3 con riferimento allo scenario TO BE.

In base all'analisi effettuata, i componenti principali di un impianto di teleriscaldamento sono:

- La centrale di produzione dell'energia: in un contesto di terza generazione, essa è tipicamente unica, formata da caldaie (tipicamente a biomassa) o da cogeneratori (a biomasse o gas naturale): centrali multiple vengono eventualmente integrate soltanto in reti molto grandi [83]. Nel caso di sistemi di quarta generazione, le centrali possono essere distribuite lungo il percorso e basate su fonti a bassa temperatura (recupero termico, energia solare). In centrali basate su recuperi termici, il componente principale della centrale sarà uno scambiatore di calore, tipicamente a piastre [85], che potrà essere supportato da caldaie di backup o integrazione;
- Le tubazioni di mandata e ritorno: di norma vengono realizzate in acciaio nei diametri maggiori (superiori a DN 25), in PVC o HDPE per le derivazioni. Le tubazioni sono preisolate con uno strato di schiuma poliuretanicca di adeguato spessore (nelle realizzazioni più diffuse si hanno ad esempio diametri esterni di 225 mm per DN 100 [86]), rivestito di uno strato protettivo in HDPE. La posa prevede lo scavo in trincea su riempimento di ghiaia e sabbia, come mostrato in figura 16. Come si vede dalla figura 16 sono possibili anche realizzazioni con tubi gemelli annegati in un unico isolante. Tale configurazione ha costi leggermente inferiori, ma è più adatta a tubazioni di piccolo diametro (< DN 50). I layout di reti reali di teleriscaldamento includono topologie radiali e magliate per una migliore affidabilità; ai fini della valutazione di massima qui realizzata, si prevedono collegamenti di estremità, da fornitore a cliente, sotto il manto stradale. L'inventario dei materiali, realizzato in tabella 6 per valutare le footprint associate alle tubazioni, è ottenuto dall'analisi combinata dei cataloghi commerciali citati in tabella 3 e di altri precedenti lavori di LCA dedicati alle reti di teleriscaldamento ([21][36][87]). Esso fa riferimento alla configurazione a sinistra in figura 16, quindi all'uso di due tubi separati, e comprende la valutazione dei materiali di costruzione e di materiali ed energia necessari alla posa in opera. Completano la caratterizzazione energetica gli aspetti legati alle perdite termiche attraverso le tubazioni, discussi nella seguente sezione 2.4.

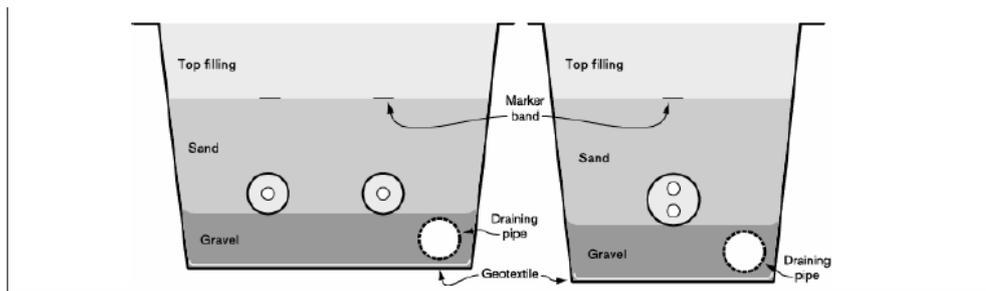


Figura 8 Schema di posa di tubazioni di teleriscaldamento [87]

- Il sistema di pompaggio associato alle tubazioni prevede l'uso pompe centrifughe, che nelle realizzazioni più recenti sono associate ad inverter, consentendo una regolazione non dissipativa con rendimenti costanti e consumi specifici decrescenti al decrescere della portata [88]. Le modalità di regolazione sono varie, essendo possibile una combinazione di regolazione in temperatura (per riduzione della temperatura di mandata o aumento della temperatura di ritorno) e in portata [85]. Nel primo caso i dispendi energetici per il pompaggio sono maggiori, in quanto le portate di fluido alimentate restano costanti. Per minimizzare i consumi si farà qui riferimento a una regolazione in portata, con velocità preimpostate a 2 m/s: nella maggior parte dei sistemi, le velocità consigliate sono comprese tra 1 e 2 m/s [85]. I modelli di valutazione delle perdite di carico e stima del fabbisogno energetico per il pompaggio elaborati in questo studio sono presentati nella sezione 2.4;

Tabella 5: Caratteristiche degli impianti di teleriscaldamento per generazione (da [31])

	Prima generazione	Seconda generazione	Terza generazione	Quarta generazione
Periodo storico	1880 – 1930	1930 – 1980	1980 – 2020	2020 – 2050
Fluido termovettore	Vapore	Acqua calda pressurizzata	Acqua calda pressurizzata	Acqua calda pressurizzata
Temperature	< 200°C	> 100°C	< 100°C	30°C – 70°C
Sistema di circolazione	Pressione del vapore	Pompe centralizzate	Pompe centralizzate	Pompe centralizzate e non
Tipologia di edifici	Appartamenti ed edifici pubblici cittadini	Appartamenti ed edifici pubblici 200 – 300 kWh/m ²	Appartamenti ed edifici pubblici e alcune case singole 100 – 200 kWh/m ²	Nuovi edifici < 25 kWh/m ² Edifici esistenti 50 – 150 kWh/m ²
Sistemi di monitoraggio	Misuratori di condensa	Misuratori di portata, poi sostituiti con misuratori di calore. Letture annuali o mensili.	Misuratori di calore e talvolta misuratori di portata al fine di compensare le elevate temperature di ritorno. Letture wireless.	Analoghi alla precedente ma con letture continue per una messa in servizio continuativa del sistema teleriscaldamento
Tubazioni	In acciaio. Isolamento in situ	In acciaio. Isolamento in situ	In acciaio Presisolate	In acciaio Presisolate e flessibili
Acqua calda sanitaria	Serbatoi d'acqua calda riscaldati direttamente con vapore o da un circuito secondario.	Serbatoio scaldato a 60°C. Circolazione a 55°C se necessario.	Scambiatore di calore che scalda l'acqua fino a 50°C. Circolazione a 55°C se necessario.	Scambiatori ad alta efficienza che scaldano fino a 40°C – 50°C.
Radiatori	Ad alta temperatura (> 90°C) ad acqua o vapore.	Ad alta temperatura (90°C) utilizzando l'acqua del sistema direttamente o meno.	A media temperatura (70°C) utilizzando l'acqua del sistema direttamente o meno. Riscaldamento a pavimento.	Riscaldamento a pavimento. Radiatori a bassa temperatura.

- Sottostazioni presso le utenze: nella maggior parte dei casi si privilegiano realizzazioni indirette, con la rete di teleriscaldamento connessa ma separata dal circuito utente mediante uno scambiatore, tipicamente piastre, attrezzato con valvole e contatori [85]. In effetti, negli ultimi due anni in letteratura si fa riferimento anche a reti di quinta generazione, indicando sistemi in cui le temperature di mandata sono inferiori a 25°C, i fabbisogni soddisfatti sono sia di riscaldamento che di raffrescamento grazie a un ampio impiego di pompe di calore e, infine, non solo i punti di generazione sono distribuiti, ma le utenze connesse sono “prosumers”, quindi a volte fornitori, a

volte consumatori [89]. Per semplicità e coerenza con gli obiettivi di studio preliminare in questa ricerca, si prevede tuttavia di considerare solo reti a un unico verso, dalla sorgente all'utente. Inoltre, in vista delle esigenze e disponibilità industriali più frequenti evidenziate dalla precedente indagine di letteratura, si considereranno i sia impianti ad acqua calda o acqua calda pressurizzata, ma con temperature inferiori a 100 °C, sia acqua calda con temperature di mandata tra i 40°C e i 70°C, mentre non si prenderanno in considerazione temperature inferiori, per cui le soluzioni tecnologiche previste possono essere significativamente diverse (ad esempio con uso di tubazioni in plastica anche per potenze termiche elevate [84]).

Tabella 6: Inventario dei principali materiali per realizzazione impianto teleriscaldamento (adattato da [21][87])

Tubazioni TLR				Scavo TLR			
Diametro	Acciaio	PU	HDPE	Sabbia	Legante	Calcestruzzo	Diesel
mm	kg/m	kg/m	kg/m	kg/m	kg/m	kg/m	kg/m
25	1.9	0.46	0.79	194.88	26.88	43.2	0.47
40	2.8	0.67	0.98	225.68	29.12	46.8	0.52
50	3.92	0.83	1.11	250.25	30.8	49.5	0.56
80	6.46	1.24	1.43	312.48	34.72	55.8	0.66
100	9.39	1.92	1.92	392	39.2	63	0.78
125	11.54	2.21	2.29	446.25	42	67.5	0.86
150	15.48	2.4	2.7	504	44.8	72	0.94
200	22.74	3.62	3.88	670.53	52.08	83.7	1.16
250	31.56	6.11	5.78	924	61.6	99	1.49
300	41.98	6.93	7.04	1092	67.2	108	1.7

- Sistemi di accumulo termico. Tali sistemi sono presenti anche in reti tradizionali, ma diventano fondamentali in reti a bassa temperatura, per l'integrazione di fonti energetiche intermittenti anche stagionali, in tal caso spesso basati su sistemi a cambiamento di fase che sfruttano il calore latente o su reazioni chimiche reversibili [39]. Diverse sono le possibilità di installazione, presso la centrale o presso le utenze [53] In questo studio, si fa riferimento al collegamento di soli due impianti di taglia medio piccola. Si è ritenuto ragionevole limitare l'indagine all'uso di accumuli di calore sensibile ad acqua calda. Questi possono essere realizzati in acciaio, plastica rinforzata con fibre di vetro o, per gli impianti associati a grandi teleriscaldamenti, con accumuli che arrivano a diverse centinaia di m³, anche come vasche in cemento armato [81][85], e opportunamente coibentati. In base alle indicazioni commerciali e di letteratura ([39][53][85]) per il presente studio si è selezionato come riferimento un termoaccumulatore in acciaio al carbonio, coibentato in poliuretano flessibile con rivestimento in PVC e ricoperto da uno strato protettivo di vernice antiruggine. Ai fini della quantificazione delle footprint, si è creato un inventario (Tabella 7) dei materiali in base a cataloghi commerciali [40], con riferimento a un sistema di 132 m³, progettato per l'abbinamento a impianti di riscaldamento industriali, a biomassa e di teleriscaldamento.
- Pompe di calore. Le pompe di calore sono una tecnologia efficiente, basata su cicli termodinamici di refrigerazione, che raggiunge alte efficienze. Raramente presenti negli impianti di terza generazione, anche negli impianti di quarta generazione, le pompe di calore sono usate non come fonte energetica principale, ma per ottimizzare e migliorare la continuità e l'utilizzo di altre fonti energetiche, in particolare quando le fonti sono a temperatura troppo bassa per l'uso diretto. La recente revisione di [41] è specificamente dedicata alle applicazioni di pompe di calore compatibili con il teleriscaldamento e alle modalità e vincoli per l'integrazione con altre fonti rinnovabili.

Tabella 7: Inventario del sistema di accumulo di riferimento elaborato

Materiali	Massa - kg	Capacità (m ³)
Acciaio inossidabile	2.38E+04	1,32E+02
PVC	2.43E+03	
Schiuma poliuretanic	6.08E+02	
Vernice	2.45E+02	

Sayegh et al.[41] presentano i campi operativi delle principali tipologie di pompe di calore in funzione delle temperature operative dell'acqua in uscita. Essi osservano inoltre che le pompe di calore non coprono l'intero campo delle temperature dei sistemi di teleriscaldamento; pompe di calore industriali speciali di grande scala consentono di portare l'acqua a temperature compatibili con il teleriscaldamento di terza generazione, in particolare nel caso di pompe acqua-acqua alimentate anche a temperature relativamente basse (20-30 °C), purché stabili, come nel caso di recuperi termici industriali o di impianti geotermici profondi. Pompe acqua-acqua o pompe geotermiche superficiali consentono solo di raggiungere temperature dell'ordine dei 50-55°C. In [41] viene anche esaminato il posizionamento delle pompe di calore lungo le reti. Esso dipende dalla disponibilità e dalla tipologia delle fonti di calore disponibili lungo la rete.

Si distingue tra:

- Pompe di calore centrali: hanno di solito grande potenzialità e sono parte integrante dell'impianto di generazione dell'energia;
- Pompe di calore locali: hanno potenzialità medio/basse e sono installate vicino a fonti di calore localizzate;
- Pompe di calore individuali o distribuite. Esse hanno di norma bassa potenzialità e sono installate direttamente presso le utenze mediante connessione diretta alla rete di teleriscaldamento, sostituendo di fatto lo scambiatore all'utenza.

Per semplicità e in relazione alle potenzialità relativamente piccole che si prevede di modellizzare in questo studio, si è scelto di impostare i modelli di calcolo in base a quest'ultima configurazione, rappresentata in figura 8, e di riservare l'utilizzo delle pompe di calore alla sostituzione di scambiatori presso le utenze in reti di quarta generazione, quando le temperature richieste dall'utenza superino stabilmente quelle del recupero termico dalle sorgenti industriali.

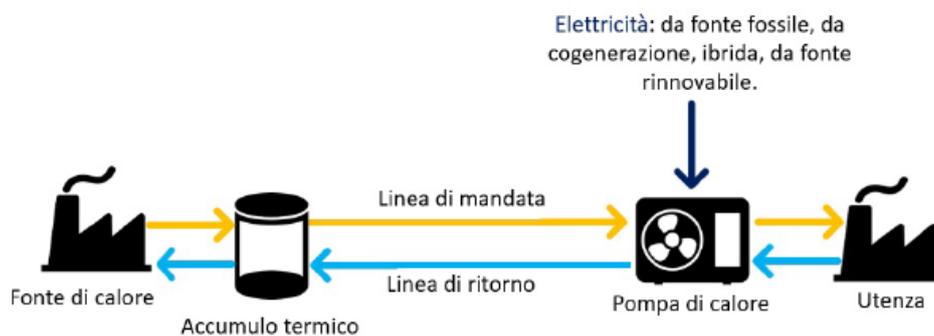


Figura 17 Rappresentazione schematica collocazione pompe di calore in configurazioni "TO BE".

In base all'analisi commerciale (tabella 3) si è individuata in [42] una serie di pompe di calore che meglio si adatta queste esigenze. Si tratta di pompe di calore con compressore a vite che utilizzano ammoniaca standard come fluido frigorifero. Tali pompe sono in grado di trasferire il calore a un fluido termovettore in un range di temperatura compreso tra i 55°C e gli 80°C a partire da sorgenti comprese tra i 10°C e i 50 °C. I coefficienti di prestazione sono elevati: per una tipologia di grande taglia (745 kW di potenza termica resa)

con temperature del fluido freddo in ingresso e in uscita pari a 40°C e 35°C, rispettivamente, e un salto termico lato utenza pari a 40°C con temperatura in uscita pari a 70°C viene dichiarato un COP pari a 5,36 [42]. Per l’inventario relativo a tali sistemi si fa riferimento alla tabella 4, in cui i valori di inventario sono scalati da [91], scegliendo come refrigerante l’ammoniaca. La valutazione è indubbiamente approssimativa, accettabile nell’ipotesi di un ridotto impatto dei materiali rispetto all’impatto dell’operatività delle pompe di calore. L’ipotesi è finora valida per tutti i componenti diversi dalle tubazioni di teleriscaldamento su grande distanza; ci si riserva, tuttavia, di validare l’ipotesi nella fase applicativa ed eventualmente migliorare il modello in relazione ai risultati dell’applicazione pratica a casi di studio. La configurazione complessiva dello scenario “TO BE”, comprensiva di eventuali varianti, risulta quindi quella rappresentata in Figura 18.

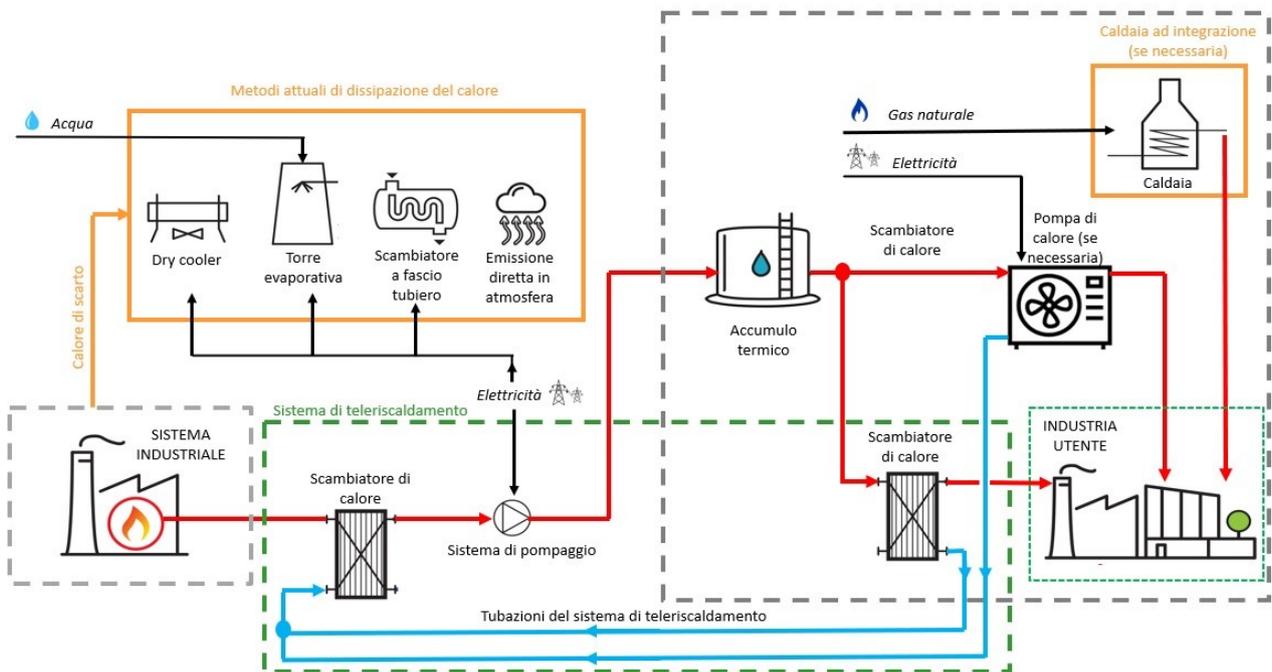


Figura 18 Rappresentazione schematica della configurazione complessiva del sistema, comprensiva di varianti di dissipazione del calore nel sistema industriale e di scambio termico presso le utenze nel sistema “TO BE”.

Gli elementi fondamentali del sistema con recupero termico esterno e teleriscaldamento comprendono:

- Uno scambiatore di calore presso il sito industriale;
- Le tubazioni di mandata e ritorno;
- Il sistema di pompaggio associato alle tubazioni;
- Un termoaccumulatore, posto in prossimità dell’utenza, che potrà essere alternativo o complementare a una caldaia di integrazione. Questa si considera collocata presso l’utente finale, nell’ipotesi di utilizzare per backup o integrazione i sistemi di generazione del calore già presenti presso l’utenza;
- Una sottostazione della rete di teleriscaldamento presso l’utilizzatore finale, costituita da scambiatore di calore (se il teleriscaldamento è a temperatura medio alta o comunque superiore a quella richiesta dall’utenza) o pompa di calore (se il teleriscaldamento è a temperatura bassa o comunque inferiore a quella richiesta dall’utenza).

Del sistema fanno inoltre parte in ogni caso i sottosistemi di dissipazione del calore già in uso presso la sorgente industriale, che si considerano alternativi tra loro e che si assume continuino ad essere attivi per dissipare tutto il calore non assorbito dalla rete di teleriscaldamento.

Il modello di dimensionamento e il modello di valutazione energetico-ambientale degli impianti dovranno quindi implementare una varietà di combinazioni tecnologiche, in funzione del flusso termico disponibile alla sorgente, delle temperature disponibili e richieste, della possibilità di utilizzo di caldaie esistenti o di

installazione di accumuli, nonché dei sistemi di dissipazione del calore installati presso la sorgente per i flussi termici di cui si ipotizza il recupero con uso esterno.

2.4 *Descrizione del modello di dimensionamento implementato, con elementi per la previsione dei consumi delle varie risorse.*

Per garantire accessibilità e semplicità d'uso e uniformità con gli altri strumenti di analisi realizzati dalle altre unità di ricerca coinvolte, si è deciso di realizzare un modello da implementare attraverso una cartella Excel e un programma VBA associato, in modo che fosse facilmente e liberamente utilizzabile. Rispetto ai precedenti lavori dei componenti del gruppo di lavoro, che prevedevano l'utilizzo di Matlab come strumento simulativo [18] [21] o di software di ottimizzazione commerciali [3][28], ciò ha richiesto non solo una traduzione in un linguaggio diverso, ma una concettualizzazione volta a individuare le combinazioni analizzabili per bilanciare semplicità d'uso e completezza degli scenari esaminati.

Il modello di dimensionamento ed il modello di valutazione ambientale ad esso collegato fanno riferimento alle combinazioni di moduli e tecnologie sintetizzate in Tabella 8. Come si vede, si simulano separatamente configurazioni tradizionali, attuali (ovvero AS IS) e con simbiosi e teleriscaldamento, potenziali (ovvero TO BE). Come si vede nei casi TO BE si distingue tra configurazioni per "alta temperatura" (quando la temperatura di mandata dalla sorgente T_m è superiore alla temperatura richiesta all'utenza T_u) e "bassa temperatura" ($T_u > T_m$). Rispetto ai modelli di simulazione precedenti [21], in questo progetto si è introdotta la modellizzazione delle pompe di calore e dei sistemi di accumulo termico, oltre che degli scambiatori ad acqua marina e dello scarico diretto in atmosfera come modalità di dissipazione esistenti o residuali. Nel complesso, con il modello sviluppato possono essere simulate trentadue configurazioni possibili, derivanti dalla combinazione di:

- Tecnologie utilizzate per la dissipazione del calore: dry cooler, torri evaporative, scambiatori ad acqua marina, scarico in atmosfera.
- Tecnologie di generazione del calore applicate dall'utenza nel sistema tradizionale, ovvero AS IS, non connesso a teleriscaldamento: caldaie a gas naturale o pompe di calore aria/acqua se l'utenza richiede temperature $\leq 55^\circ\text{C}$
- Tecnologie di integrazione del calore all'utenza nelle configurazioni di teleriscaldamento (TLR), che possono prevedere solo caldaie di integrazione (quando non vi sia spazio per realizzare accumuli e siano disponibili caldaie esistenti), solo termoaccumuli (quando la disponibilità energetica giornaliera dell'azienda sorgente è superiore al fabbisogno dell'utenza ma i profili temporali di sorgente e utenza sono diversi) o l'uso combinato di accumuli e caldaie di integrazione. Nel caso a bassa temperatura viene sempre previsto che il dimensionamento consideri la possibilità di uso di una caldaia di integrazione affinché possa essere comunque identificata una soluzione fattibile quando la differenza tra T_u e T_m sia troppo elevata per supplire con le sole pompe di calore.
- La simbologia utilizzata nelle celle di tabella 8 è rappresentativa delle assunzioni che sottendono la simulazione di ciascuna configurazione, ovvero se in ciascun caso l'uso di una determinata tecnologia o fonte energetica sia previsto (✓), escluso (✗) o scelto dal simulatore in funzione dei criteri di dimensionamento e del bilancio energetico effettivo della relazione di scambio tra aziende simulata(✓/✗). Per quanto riguarda i sistemi di dissipazione del calore, si nota che nei sistemi tradizionali (AS IS) è prevista (✓) una "dissipazione totale", ovvero si valuta che il flusso termico associato all'azienda sorgente sia tutto calore in surplus, che va dissipato completamente con il sistema selezionato. Nelle configurazioni TO BE la dissipazione totale è esclusa; viene invece valutato esattamente il calore residuo non trasferito alla rete e vengono valutate energie e consumi associati alla relativa dissipazione.

Tabella 8: Combinazioni di tecnologie e stati di funzionamento costituenti il modello delle configurazioni AS IS e TO BE implementato

		Modalità di fornitura del calore attuali o potenziali									
		Sistemi tradizionali		Ad alta temperatura, $T_u < T_m$				Bassa temperatura, $T_u > T_m$			
		Caldaia a gas naturale	Pompa di calore aria/acqua con convettori indipendenti	TLR con caldaia di integrazione	TLR con accumulo termico e caldaia di integrazione	TLR con accumulo termico (volume scelto dall'utente) e caldaia di integrazione	TLR con caldaia di integrazione e pompa di calore acqua/acqua	TLR con caldaia di integrazione, accumulo e pompa di calore acqua/acqua			
Attuali modalità di dissipazione del calore	Dry cooler	Uso combustibile	✓	✓	✓	✓/✗	✓/✗	✓/✗	✓/✗	✓/✗	✓/✗
		Uso elettricità	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Dissipazione totale	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
		TLR	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Torre evaporativa	Uso combustibile	✓	✓	✓	✓/✗	✓/✗	✓/✗	✓/✗	✓/✗	✓/✗	
	Uso elettricità	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Dissipazione totale	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
	TLR	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Scambiatore a fascio tubiero ad acqua di mare	Uso combustibile	✓	✓	✓	✓/✗	✓/✗	✓/✗	✓/✗	✓/✗	✓/✗	
	Uso elettricità	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Dissipazione totale	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
	TLR	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Scarico diretto in atmosfera	Uso combustibile	✓	✓	✓	✓/✗	✓/✗	✓/✗	✓/✗	✓/✗	✓/✗	
	Uso elettricità	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Dissipazione totale	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
	TLR	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

Il foglio di input, rappresentato in figura 19, contiene le principali variabili modificabili dall'utente illustrati. Le celle che risultano modificabili dall'utente sono caratterizzate esclusivamente dal colore verde. Le variabili sono quindi:

- o i dati tecnici relativi al sistema di teleriscaldamento; rispettando alcuni vincoli segnalati con messaggi di warning, l'utente può modificare:
 - T_m : la temperatura di mandata dell'acqua [° C];
 - T_r : la temperatura di ritorno [° C]
 - L_{rete} : la distanza tra l'azienda che fornisce il calore di recupero e l'azienda utente [m];
- o i dati relativi alla disponibilità di calore a recupero e la domanda di calore presso l'utenza, l'utente può inserire:
 - Q_d : la potenza disponibile al recupero per ogni ora compresa tra le 00.00 e le 23.00 [kWh/h];
 - Q_u : la potenza richiesta dall'utenza per ogni ora compresa tra le 00.00 e le 23.00 [kWh/h];

In base a questi dati vengono direttamente calcolate in questo foglio alcune semplici elaborazioni preliminari dei dati di input:

- $Q_{u,max}$: il valore massimo di potenza termica richiesto dall'utenza. Esso è calcolato come il massimo valore tra quelli inseriti dall'utente nella colonna "Domanda utenza" indicata in verde nella schermata al flusso termico medio richiesto ora per ora presso l'utenza [kW]. Qualora la temperatura di mandata sia inferiore a quella dell'utenza, e si renda quindi necessaria l'installazione di una pompa di calore, la domanda termica viene ricalcolata, tenendo conto del bilancio energetico della pompa stessa, come descritto nella sezione 2.4.3, ed il valore massimo $Q_{u,max}$ viene calcolato con riferimento alla colonna "Domanda con PdC";
- Q_w : il valore massimo della potenza a recupero, necessario al dimensionamento dell'impianto di dissipazione, calcolato come il massimo valore tra quelli inseriti dall'utente nella colonna "Disponibilità Calore a Recupero";

Potenza termica a Recupero e Domanda di Calore all'utenza			
Nome	Sim.	Valore	Unità
MAX Potenza termica (UTENZA)	Q _{max}	301	kW,
MAX Potenza a recupero	Q _r	529	kW,
Ore di funzionamento sito Ind.le	hh	28	h/y

Teleriscaldamento - Dati Tecnici			
Nome	Simbolo	Valore	Unità
Calore specifico	c _p	4,187	kJ/kgK
Temperatura acqua calda disponibile per recupero	Tmf	55	°C
Tritorno acqua post recupero	Ttrf	35	°C
Temperatura del suolo	Tt	15	°C o K
Salto termico teleriscaldamento	Δt	10	°C o K
Tritorno fluido freddo cliente	Tmc	40	°C
Tmandata fluido cliente	Trc	65	°C o K
Densità acqua	ρ	1000	kg/m ³
Velocità acqua	V ₁₀₀	2	kg/m ³
Distanza tra Azienda 1 e Azienda 2	L _{max}	5200	m

Dimensionamento di massima della tubazione della rete TLR		
Diametro teorico	Φ _{teo}	0,068 m
	Φ _{acc}	68,00 mm

Configurazione selezionata			
Solo caldaia, nessun sistema di accumulo	B ONLY		
Solo accumulo, nessuna caldaia di integrazione	T ONLY		
Sistema di accumulo di volume assegnato più caldaia di integrazione	BT ONLY		
Volume predefinito di accumulo		5	m ³

Tipologia sistema attuale di dissipazione del calore			

Profilo giornaliero domanda di calore dell'utenza		
Ora	kW	
	Domanda Utenza	Domanda con PdC
0	185	151
1	185	151
2	185	151
3	185	151
4	185	151
5	185	151
6	306	251
7	306	251
8	306	251
9	367	301
10	367	301
11	367	301
12	246	202
13	367	301
14	367	301
15	367	301
16	185	151
17	185	151
18	185	151
19	185	151
20	185	151
21	185	151
22	185	151
23	185	151
Domanda di calore totale utenza kWh		5953

Profilo giornaliero calore disponibile per recupero		
Ora	kW	
	Disponibilità oraria	Calore
0	500	
1	399	
2	329	
3	419	
4	287	
5	346	
6	294	
7	279	
8	301	
9	265	
10	257	
11	397	
12	500	
13	399	
14	529	
15	419	
16	287	
17	346	
18	294	
19	279	
20	301	
21	265	
22	257	
23	397	
Totale disponibile kWh		8368

Domanda di Calore - UTENZA		
Ora	kW	
	Disponibilità oraria	Q _{totale}
100	151	
101	151	
102	151	
103	151	
104	151	
105	151	
106	251	
107	251	
108	251	
109	301	
110	301	
111	301	
112	202	
113	301	
114	301	
115	301	
116	151	
117	151	
118	151	
119	151	
120	151	
121	151	
122	151	
123	151	
utenza con PdC kWh		4875

Figura 19 Foglio di input dei dati di calcolo e output del dimensionamento delle tubazioni.

Modificando tali valori, in particolare distanze e profili di domanda e offerta termica, sarà possibile svolgere analisi parametriche. Ripetendo le simulazioni, anche con utilizzo di funzioni nativamente presenti in Excel (funzione Ricerca obiettivo) e imponendo l'uguaglianza dei costi sul ciclo di vita o di altri parametri di performance economica da definire nella seconda annualità, sarà possibile determinare, ad esempio, la massima distanza per cui risulta conveniente la connessione tra due aziende con profili di domanda assegnati, oppure il minimo numero di giorni anno di funzionamento dell'utenza affinché la cessione di calore risulti conveniente. Introducendo un coefficiente moltiplicativo dei carichi disponibili o dei fabbisogni potrà anche essere valutata automaticamente la scalabilità degli interventi: tale attività, da completare anch'essa contestualmente al perfezionamento della sezione di analisi economica durante la seconda annualità, potrà essere utile quando gli elementi di recupero o utilizzo termico da valutare per l'inclusione nel sistema di teleriscaldamento siano modulari. E' questo, ad esempio, il caso delle serre, tipicamente realizzate e riscaldate per moduli [60].

Nel modello di calcolo, vengono anzitutto valutati i consumi di energia e di acqua nel caso base secondo quanto descritto in sezione 2.4.1.

Il foglio riporta inoltre i principali parametri fisici necessari al dimensionamento delle tubazioni, quali velocità del fluido, densità ρ e calore specifico c_p dell'acqua, e presenta il risultato del dimensionamento delle tubazioni, implementato come descritto nella sezione 2.4.3. Le macro implementate dimensionano inoltre i componenti principali (accumuli, caldaie, pompe) secondo le procedure descritte in sezione 2.4.3 (reti ad alta temperatura) e 2.4.4 (reti a bassa temperatura) fornendo risultati utili al calcolo degli indicatori di energia primaria, carbon footprint e water footprint, con i procedimenti discussi nella successiva sezione 2.5.

2.4.1 Valutazione delle capacità, dei consumi energetici e di acqua nel caso AS IS

Nel caso base, i consumi sono funzione della potenza termica utile richiesta dall'utenza. Essendo la domanda espressa in intervalli discreti sulle 24 ore, l'energia annua richiesta E_u è espressa dall'equazione 1, dove N_h il numero di ore di funzionamento annue nell' h -esima fascia oraria.

$$E_u = \sum_{h=1}^{24} Q_{u,h} N_h \quad (1)$$

Se la domanda è soddisfatta da caldaie a gas naturale, l'energia chimica del combustibile E_{fuel} viene determinata dividendo E_u per il rendimento medio stagionale delle stesse (Tabella 4). Per valutare, invece, l'energia elettrica assorbita nel caso in cui il caso AS IS preveda una pompa di calore ad aria, si è fatto

riferimento agli standard europei EN14511 e UNI/TS 11300-4, valutando a partire da dati forniti da costruttori [38] (Tabella 9) il rendimento di secondo principio come da equazione 2.

$$\eta_{II} = \frac{COP}{COP_{th}} \quad (2)$$

Con foglio di calcolo separato, che nelle applicazioni andrà adattato ai dati climatici locali, si valuta il COP per carichi parziali COP_{CR} secondo l'equazione 3, in cui C_c è un coefficiente di correzione pari a 0,9 e COP_x è il coefficiente di prestazione ricalcolato per diversi valori t_x di temperatura dell'aria esterna.

$$COP_{CR} = COP_x \cdot \frac{CR}{1 - C_c + CR \cdot C_c} \quad (3)$$

Avendo suddiviso il periodo di riferimento in n intervalli in cui la temperatura dell'aria esterna rientra nel range i -esimo, si calcola la potenza P_{PdC} elettrica assorbita dalla pompa di calore dividendo la potenza termica resa per il corrispondente COP_{CR} ; si può così procedere a stimare l'energia elettrica assorbita ogni anno dalla pompa di calore aria acqua nello scenario AS IS con l'equazione 4.

$$E_{e_PdCair} = \sum_{i=1}^n P_{PdC,i} N_{hm,i} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_{u,h}}{COP_{CR,i}} N_{hm,i} \quad (4)$$

Tabella 9: Parametri tecnici delle pompe di calore aria/acqua [38]

TA b.s. [C]	0	5	7	10	15	20	25	30	35	40
Ph [kW]	287,3	349,2	388,7	417,1	462,0	501,3	532,6	553,3	560,6	552,2
Pe [kW]	146,7	149,3	150,7	152,1	153,1	152,6	151,1	149	146,6	144,3
COP [-]	1,96	2,34	2,58	2,74	3,02	3,28	3,52	3,71	3,82	3,83
COP _{th}	5,97	6,56	6,83	7,29	8,20	9,37	10,93	13,13	16,41	21,88
η_{II} [-]	0,328	0,356	0,376	0,368	0,350	0,322	0,282	0,233	0,174	0,150

Relativamente alle energie elettriche assorbite e ai consumi d'acqua associati alla dissipazione del calore presso l'industria potenziale sorgente in assenza di teleriscaldamento, si assume che questi siano nulli solo nel caso di rilascio diretto in atmosfera. Negli altri casi si applicano i valori definiti in tabella 4.

2.4.2 Dimensionamento della rete di teleriscaldamento e dei sistemi di integrazione con elementi di valutazione dei consumi per il caso ad alta temperatura

Il diametro teorico delle tubazioni Φ_{calc} è calcolato conservativamente in funzione della maggiore tra la potenza termica massima recuperabile Q_w e la potenza termica massima richiesta dall'utenza $Q_{u,max}$: vale quindi l'equazione 5 se $Q_w > Q_{u,max}$, la 6 in caso opposto.

$$\Phi_{calc} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_w}{\pi \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot v_{H_2O}}} \quad (5)$$

$$\Phi_{calc} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{u,max}}{\pi \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot v_{H_2O}}} \quad (6)$$

A partire dal diametro teorico Φ_{calc} si determina, quindi, il diametro commerciale Φ_d , approssimando di norma per difetto. Ricalcolata la velocità effettiva dell'acqua corrispondente al diametro commerciale e verificato che essa rientri nei valori consigliati, si calcola quindi il numero di Reynolds Re . In funzione di Re si determinano le perdite di carico lungo le tubazioni di teleriscaldamento, determinando il fattore d'attrito f secondo l'equazione 7, per $Re < 10^5$, secondo l'equazione 8 per Re superiori e applicando tale fattore all'equazione di Darcy Weisbach (9).

$$f = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}} \quad (7)$$

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (8)$$

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{v_{H_2O,real}^2 \cdot f \cdot 2 \cdot L_{rete}}{\Phi_{design}} \cdot \frac{1}{g} \quad (9)$$

A partire dalle perdite di carico lungo la tubazione, con un sovradimensionamento cautelativo del 20% per tener conto di perdite concentrate e assumendo una prevalenza richiesta allo scambiatore di 15 m_{H2O} [21] si stimano la prevalenza della pompa, espressa dall'equazione (10), la potenza assorbita (11) e l'energia assorbita dal sistema di teleriscaldamento per il pompaggio (12):

$$H_{t,h} = 1,2 \cdot \Delta p_{real,h} + 15 \quad (10)$$

$$P_{e_{DH,h}} = \frac{\rho g \cdot Q_{d,real,h} H_{t,h}}{\eta_p} \quad (11)$$

$$E_{e_{DH}} = \sum_h P_{e_{DH,h}} N_h \quad (12)$$

Usando l'equazione 13 si calcola quindi il coefficiente Θ di perdita termica lungo la tubazione, espresso in W/m °C come:

$$\Theta = U[(T_m + T_r) - 2T_t] \quad (13)$$

Dove T_t è la temperatura media del terreno e U è stimato in base all'equazione 14:

$$U = 0,1304 \cdot \log \Phi_{design} - 0,273 \quad (14)$$

In questo modo è possibile determinare la potenza dispersa lungo la tubazione secondo l'equazione 15.

$$Q_{diss,tub} = \frac{\Theta \cdot L_{rete}}{1000} \quad (15)$$

L'effettiva potenza termica $Q_{f,h}$ resa all'utenza ora per ora si ottiene sottraendo la potenza dispersa dalla potenza immessa in rete, tenendo inoltre in considerazione il rendimento degli scambiatori.

Noto il valore $Q_{f,h}$, in caso si valuti di integrare il calore solo con caldaie di integrazione, in assenza di accumuli, è sufficiente calcolare la differenza con la potenza richiesta $Q_{u,h}$ ora per ora secondo l'equazione 16.

$$Q_{caldaia,h} = Q_{u,h} - Q_{f,h} \quad (16)$$

Il valore massimo di tale differenza al variare di h fornisce la potenzialità da associare alla caldaia di integrazione. Se risulta negativo o nullo non vi è, ovviamente, necessità di integrazione e l'offerta è sempre superiore alla domanda, anche tenendo conto delle perdite attraverso le tubazioni. Viceversa, non essendo

installati sistemi di accumulo, quando il valore di $Q_{caldaia,h}$ valutato con (16) risulta negativo, ovvero quando la domanda è inferiore all'offerta di calore, $Q_{caldaia,h}$ ha il significato di flusso termico non assorbito presso la sorgente da cui è disponibile il recupero termico, e sarà necessario ricorrere ai sistemi di dissipazione installati per smaltire il flusso termico calcolato mediante l'equazione 17.

$$Q_{diss,h} = Q_{d,h} - Q_{d,real,h} - Q_{caldaia,h} \quad (17)$$

Per il dimensionamento di un sistema che combini caldaie di integrazione e sistemi di accumulo, si valuta anzitutto la relazione tra energia totale offerta dalla sorgente ed energia totale richiesta dalla potenziale utenza. Qualora l'offerta totale sia superiore alla domanda, l'accumulo viene dimensionato in modo da integrare l'offerta nei pochi periodi in cui essa risulti inferiore alla domanda, secondo l'equazione 18:

$$Cp_{accumulo} = \sum_{h \in [1,24], h: (Q_{u,h} - Q_{f,h}) > 0} \frac{(Q_{u,h} - Q_{f,h}) N_h 3600}{\rho \cdot c_p \Delta t} \quad (18)$$

Se l'offerta è inferiore alla domanda, si rende necessaria una caldaia di integrazione. Per tutti gli scenari, si assume che l'integrazione sia effettuata con un'unica caldaia a gas naturale, quale che sia la situazione AS IS di partenza. Si assume che tutti i surplus di energia disponibili in qualsiasi fascia oraria vengano accumulati secondo l'equazione 19:

$$Cp_{accumulo} = \sum_{h \in [1,24], h: (Q_{f,h} - Q_{u,h}) > 0} \frac{(Q_{f,h} - Q_{u,h}) N_h 3600}{\rho \cdot c_p \Delta t} \quad (19)$$

Per dimensionare la caldaia si definisce una variabile ausiliaria binaria aux_h , pari a 1 in tutte le ore in cui la caldaia è potenzialmente attiva perché la domanda è superiore all'offerta. L'energia totale da somministrare mediante la caldaia di integrazione sarà pari al surplus totale di potenza richiesta dall'utenza, diminuito dell'energia che può essere liberata dall'accumulo (equazione 20):

$$E_{caldaia,acc} = \sum_{h \in [1,24], h: (Q_{u,h} - Q_{f,h}) > 0} (Q_{u,h} - Q_{f,h}) - \sum_{h \in [1,24], h: (Q_{f,h} - Q_{u,h}) > 0} (Q_{f,h} - Q_{u,h}) \quad (20)$$

La caldaia viene dimensionata secondo l'equazione 21 sulla potenza media, in modo che nelle ore in cui è attiva, conteggiate tramite la variabile ausiliaria, essa sia in grado di erogare tutta l'energia valutata in 20:

$$Cp_{caldaia} = \frac{E_{caldaia,acc}}{\sum_{h=1}^{24} aux_h} \quad (21)$$

Come negli scenari AS IS, il consumo di combustibile da parte della caldaia di integrazione $E_{fuel,caldaia,acc}$ negli scenari TO BE è valutato in termini di energia chimica dividendo $E_{caldaia,acc}$ per il rendimento medio stagionale riportato in Tabella 4. Rispetto al caso base tale assunzione è conservativa, dal momento che, operando in combinazione con un sistema di accumulo, la caldaia tenderà a lavorare, pur con intermittenza, a condizioni più stabilmente vicine alla media per cui è dimensionata, e dunque con migliori rendimenti.

2.4.3 Elementi di calcolo e valutazione dei consumi per il caso a bassa temperatura.

Per il dimensionamento delle pompe di calore nel caso di reti a bassa temperatura si è implementato nel foglio di calcolo il modello proposto da [42], che fa riferimento al COP di Lorenz [43] calcolato in funzione di temperature medie logaritmiche T_{ml} secondo l'equazione 22, in cui $T_{ml,h}$ è la temperatura media logaritmica tra ingresso e uscita del fluido caldo e $T_{ml,l}$ è la temperatura media logaritmica tra ingresso e uscita del fluido freddo.

$$COP_{Lor} = \frac{T_{ml,h}}{T_{ml,h} - T_{ml,l}} \quad (22)$$

$$\eta_{Lor} = \frac{COP_{real}}{COP_{Lor}} \quad (23)$$

Assumendo, secondo le indicazioni del modello [42], un ΔT_{pp} di 5 K e un rendimento di Lorenz η_{Lor} pari a 0,45, si ottengono stime dei COP abbastanza in linea con i dati dei costruttori, con un errore percentuale medio dell'ordine del 10%, come evidenziato in tabella 10. Eventuali calibrazioni del modello saranno possibili nella seconda annualità, come effetto dell'accumulo di ulteriori dati acquisiti per lo sviluppo dei casi studio nonché dai partner di progetto nell'ambito delle rispettive analisi commerciali.

Tabella 10: Valutazione degli errori delle stime dei COP ottenute con il modello fisico rispetto ai dati ottenuti dall'analisi commerciale

Tmf °C	Trf °C	Tmc °C	Trc °C	COP stima	COP catalogo	Errore %
40	35	70	80	5,49	5,75	4,54%
40	35	40	70	3,35	3,85	13,11%
					RMSPE	9,81%

Stimati i COP reali in funzione delle temperature dei fluidi in ingresso e in uscita, il bilancio energetico delle pompe di calore consente quindi di determinare l'energia elettrica assorbita secondo l'equazione 24. Il bilancio di primo principio viene inoltre utilizzato per valutare, con l'equazione 25, come l'energia integrata dalla pompa di calore incide sulla richiesta effettiva di calore alla sorgente rispetto al flusso $Q_{u,h}$ teoricamente richiesto al tempo h.

$$E_{e,PdCacqua,h} = \sum_h P_{e,PdC,h} \cdot N_h = \frac{\sum_h Q_{u,h} \cdot N_h}{COP_{real}} \quad (24)$$

$$Q_{in,PdCacqua,h} = Q_{u,h} - P_{e,PdC,h} \quad (25)$$

Tale valore $Q_{in,PdCacqua,h}$ viene, a ritroso, confrontato con il surplus di calore della sorgente, determinando per differenza i flussi termici residui che si dovrà continuare a dissipare con i sistemi esistenti nell'azienda fornitrice.

2.5 Descrizione del modello di valutazione ambientale implementato, con particolare riferimento alla valutazione di emissioni serra e consumi idrici di tipo indiretto.

Il modello di valutazione ambientale comprende la valutazione della carbon footprint e della water footprint. Nel loro insieme, e unitamente ai consumi energetici valutati con il modello di dimensionamento tecnico di cui al punto 2.4, le due footprint selezionate consentono di valutare i legami e i trade-off tra consumi d'acqua ed energia, anche per lo stretto legame tra carbon footprint e consumi di combustibili fossili. Per un'ulteriore validazione, nel modello è comunque previsto anche il calcolo del consumo di energia primaria, sempre a partire dai consumi energetici precedentemente valutati nei modelli per gli scenari "AS IS" e "TO BE".

L'indicatore di consumo di energia primaria PEC è calcolato secondo l'equazione 26 con esclusivo riferimento ai consumi di energia elettrica e combustibili fossili legati all'attività operativa dei sistemi, ed è riferito all'orizzonte temporale di un anno allo scopo di presentare agli energy manager, cui si rivolge prioritariamente il programma sviluppato, un riferimento coerente con la quotidiana pratica professionale. In tal senso, i valori dei fattori di conversione in energia primaria dell'energia elettrica $C_{PEC,el}$ e del combustibile (gas naturale) $C_{PEC,fuel}$ sono mutuati dalla Circolare MISE del 18 dicembre 2014, e sono rispettivamente pari a 0,187 tep/MWh_{el} e a 0,89 · 10⁻³ tep/Nm³ (Tabella 11).

$$PEC = C_{PEC,el}(E_{e,PdCaria} + E_{e,DH} + E_{e,PdCacqua} + E_{e,diss}) + C_{PEC,fuel}E_{fuel} \quad (26)$$

Per quanto riguarda, invece, una più ampia valutazione ambientale, gli indicatori scelti sono valutati con riferimento al ciclo di vita.

Secondo la norma ISO 14067:2018, la carbon footprint è definita come “Sum of GHG emissions and GHG removals in a product system expressed as CO2 equivalents and based on a life cycle assessment using the single impact category of climate change”, ovvero la somma delle emissioni e delle rimozioni di gas serra in un sistema di prodotti, espressa in equivalenti (chilogrammi o tonnellate) di CO2, basata su una valutazione del ciclo di vita che utilizza il cambiamento climatico come unica categoria d'impatto. Le emissioni o rimozioni di gas serra sono definite rispettivamente come il rilascio o il ritiro degli stessi dall'atmosfera. Sempre da norma ISO 14067:2018, il product system viene definito come la raccolta di processi unitari con flussi elementari e flussi di prodotto, che eseguono una o più funzioni definite e che modellano il ciclo di vita di un prodotto. Fondamentale è dunque l’approccio orientato al ciclo di vita, come definito dallo standard, che tuttavia lascia libertà sulle modalità di definizione dei confini del sistema. Ai fini della presente analisi, i confini del sistema sono quelli definiti in Figura 15, Figura 18 e tabella 8.

La figura 20 mostra un esempio di output di calcolo della carbon footprint e della water footprint per alcune configurazioni base e con teleriscaldamento nel caso ad alta temperatura.

In particolare, all’interno dei system boundaries vengono valutati, relativamente alla fase di funzionamento (operation) dei sistemi:

- Le emissioni dirette di carbonio equivalente associate alla combustione di gas naturale in tutti gli scenari che comprendano l’uso di caldaie;
- Le emissioni indirette associate all’utilizzo di energia elettrica in tutti i macchinari e sottosistemi;

Per quanto riguarda la costruzione (manufacturing) di macchinari e impianti:

- Le emissioni indirette associate ai materiali necessari alla costruzione dei macchinari, compresi i refrigeranti contenuti nelle pompe di calore.

Per il limitato impatto atteso [21], non viene effettuata un’analisi completa delle operazioni di costruzione, con la sola eccezione della posa delle tubazioni del teleriscaldamento relativamente alle fasi di scavo, posa degli impianti e ripristino.

CARBON		Manufacturing							Operation						
CO2 kg/life		HR device	Boiler gas	Pipes DH	Pump DH	HE DH	Boiler INT	Water Tank	HR device	Boiler gas	Pipes DH	Pump DH	HE DH	Boiler INT	Water Tank
BASE	DC	356.000	324.561	0	0	0	0	0	9.021.486	196.240.243	0	0	0	0	0
DHT	DC	0	0	1.177.442	2.740	167.815	0	745.601	0	0	0	8.948.585	0	0	0
DHB	DC	325.780	0	1.177.442	2.740	167.815	324.561	0	4.167.440	0	0	8.948.585	0	94.907.818	0
DHBT	DC	162.890	0	1.177.442	2.740	167.815	162.281	473.117	2.159.056	0	0	8.948.585	0	47.453.909	0
BASE	CT	44.720	324.561	0	0	0	0	0	425.794	196.240.243	0	0	0	0	0
DHT	CT	0	0	1.177.442	2.740	167.815	0	745.601	0	0	0	8.948.585	0	0	0
DHB	CT	40.924	0	1.177.442	2.740	167.815	324.561	0	196.559	0	0	8.948.585	0	94.907.818	0
DHBT	CT	20.462	0	1.177.442	2.740	167.815	162.281	473.117	98.279	0	0	8.948.585	0	47.453.909	0

WATER		Manufacturing							Operation						
H2O m3/life		HR device	Boiler gas	Pipes DH	Pump DH	HE DH	Boiler INT	Water Tank	HR device	Boiler gas	Pipes DH	Pump DH	HE DH	Boiler INT	Water Tank
BASE	DC	2.912	2.408	0	0	0	0	0	136.120	8.542	0	0	0	0	0
DHT	DC	0	0	5.345	12	513	0	1.800	0	0	0	135.020	0	0	0
DHB	DC	2.665	0	5.345	12	513	2.408	0	62.880	0	0	135.020	0	4.131	0
DHBT	DC	1.332	0	5.345	12	513	1.204	1.149	32.577	0	0	135.020	0	2.065	0
BASE	CT	461	2.408	0	0	0	0	0	2.213.945	8.542	0	0	0	0	0
DHT	CT	0	0	5.345	12	513	0	1.800	0	0	0	135.020	0	0	0
DHB	CT	422	0	5.345	12	513	2.408	0	1.022.019	0	0	135.020	0	4.131	0
DHBT	CT	211	0	5.345	12	513	1.204	1.149	511.009	0	0	135.020	0	2.065	0

Figura 20 Esempio di foglio di output relativo alla carbon footprint e alla water footprint per configurazioni base e con teleriscaldamento ad alta temperatura

$$CO_{2f} = CO_{2d} + CO_{2op} + CO_{2c} = (cCO_{2fuel} \cdot E_{fuel} + cCO_{2el} \cdot E_{el}) \cdot N_1 + (cCO_{2c,tub} \cdot C_{Ptub} \cdot L_{tub} + \sum_{attr} cCO_{2c, attr} \cdot C_{Pattr})$$

La carbon footprint viene valutata con riferimento al GWP100 [43] secondo l'equazione 27, in cui le emissioni dirette di $CO2_d$ sono associate con l'esercizio dell'impianto (esclusivamente boiler), mentre le emissioni indirette $CO2_{op}$ sono legate al consumo di energia elettrica (pompaggio, dissipatori). $CO2_c$ sono i contributi derivanti dalla realizzazione dei componenti come scambiatori, pompe etc. e della realizzazione della rete di teleriscaldamento (pedice *tub*).

(27)

La definizione di water footprint non è altrettanto standardizzata rispetto a quella di carbon footprint. Nell'ambito dei più diffusi approcci e database dedicati al life cycle assessment, diversi metodi e indicatori vengono proposti per valutare lo sfruttamento della risorsa acqua.

Il metodo AWARE [45], ad esempio, valuta il potenziale di privazione dell'acqua, sia per gli esseri umani che per gli ecosistemi, partendo dal presupposto che più acqua si utilizza in una specifica area, più è probabile che un altro utente ne sia privato. Il potenziale misurato è quindi un characterization factor (o water scarcity factor), normalizzato rispetto alla disponibilità locale di acqua rispetto al valore mondiale medio. Di fatto, l'acqua non viene vista come una risorsa globale ma locale.

Similmente in [46] vengono valutati degli indici di stress idrico sui bacini idrografici: in tal caso sono rilevanti per l'analisi le quantità nette prelevate di acqua (anche se successivamente restituite, come nel caso degli scambiatori a mare), per tutti i campi di applicazione (dall'acqua potabile, all'irrigazione, ai processi industriali) eccettuate soltanto le centrali idroelettriche.

Come evidenziato in [47], fino al 2010 circa la maggior parte degli studi LCA non considerava l'uso dell'acqua, e i database riportavano inventari dell'uso di acqua determinando l'input totale di acqua ricavato da sorgenti naturali o sistemi tecnici (es. acquedotti), trascurando generalmente gli output del sistema oggetto di studio, e non fornendo quindi informazioni utili a valutare quanta acqua fosse poi effettivamente consumata, ovvero non più disponibile.

In questo lavoro si fa riferimento all'approccio introdotto nel 2011 da [48], secondo il quale, come evidenziato in Figura 21, si distingue tra green water footprint, blue water footprint e grey water footprint.

- La "green water" è principalmente coinvolta nell'agricoltura: la green water footprint è definita come le precipitazioni sul suolo che non defluiscono in bacini o ricaricano le falde acquifere, ma vengono immagazzinate nel suolo o temporaneamente nella vegetazione e sulla superficie, ritornando al ciclo idrico atmosferico solo per evapotraspirazione;
- Il concetto di "grey water" attiene principalmente alle acque reflue e all'inquinamento delle risorse idriche. La grey water footprint è il volume di acqua pulita richiesto per diluire il carico di inquinanti di un flusso reimpresso in ambiente fino a concentrazioni compatibili con lo stato originale dell'acqua, ovvero con standard condivisi di qualità dell'acqua in natura.
- La "blue water footprint" è un indicatore dell'uso "consumistico" dell'acqua superficiale o di falda. Si intende per usi consumistici dell'acqua quelli che implicano i seguenti quattro casi:
 - o L'acqua evapora;
 - o L'acqua è incorporata nei prodotti;
 - o L'acqua è trasferita a una diversa area di prelievo (ad esempio da un fiume al mare);
 - o L'acqua non è restituita immediatamente ma è, ad esempio, prelevata in estate e restituita in inverno.

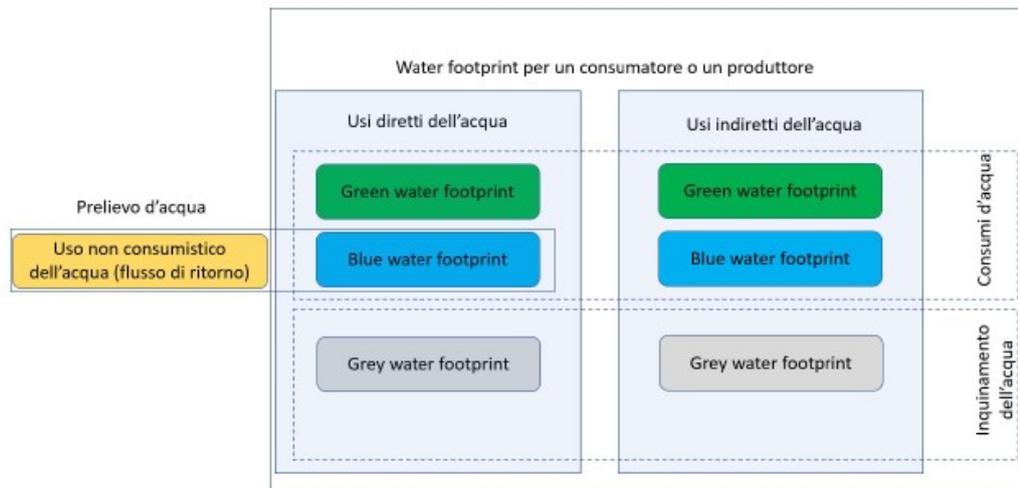


Figura 21 Rappresentazione schematica delle componenti della water footprint, con particolare riferimento alla blue water footprint

La metodologia proposta in [48] implica che siano valutati sia i consumi diretti che i consumi indiretti d’acqua, che spesso hanno maggiore impatto sulla footprint totale di un prodotto e vanno valutati a livello di supply chain, pur con l’usuale libertà e buon senso da applicare nella definizione dei confini del sistema a seconda dello scopo dell’analisi. La valutazione della footprint secondo [48] è una valutazione quantitativa dei consumi, con specifico riferimento alle condizioni operative ma valida in senso globale su tutto il pianeta, e non implica il calcolo di indicatori di midpoint o endpoint [47] associati all’impatto sulla scarsità d’acqua in aree specifiche. L’attenzione nel presente studio viene focalizzata sulla blue water footprint, che in linea con [48] nei processi produttivi va stimata come somma di acqua evaporata, acqua incorporata nel prodotto e acqua trattenuta rispetto all’orizzonte temporale di analisi. I system boundaries vengono scelti in coerenza con l’analisi della carbon footprint; la water footprint è quindi calcolata secondo l’equazione 28 come somma di acqua evaporata, consumo indiretto di acqua associato al consumo dei combustibili e di energia elettrica e consumo indiretto di acqua incorporata o consumata per la realizzazione (materiali) dei componenti.

$$\begin{aligned}
 W_f = & W_d + W_{op} + W_c = k \cdot W_{ev} \cdot N_l + (cw_{el} \cdot E_{el} + cw_{fuel} \cdot E_{fuel}) \cdot N_l \\
 & + cw_{m,tub} \cdot (Cp_{tub}) \cdot L_{tub} + \sum_{attr} cw_{m,attr} \cdot Cp_{attr}
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

$$W_{ev} = \frac{Q_{diss}}{\rho \cdot LVH} \cdot \Delta t$$

L’acqua evaporata costituisce sostanzialmente l’unico consumo diretto. Come in [9] essa è calcolata in funzione del volume d’acqua W_{ev} (equazione 29, dove LVH è il calore latente di vaporizzazione dell’acqua, pari a 2200 kJ/kg) evaporato per effettuare il raffreddamento evaporativo nelle torri. Il coefficiente k tiene conto dei consumi per trascinamento e reintegro dell’acqua nel circuito per il mantenimento di condizioni chimiche (concentrazioni saline) compatibili con l’operatività dei sistemi ed è assunto pari a 2 [9].

(29)

Come notato da Hoekstra et al. [48], i dati di consumo d’acqua disponibili negli inventari e banche dati non sono numerosi né sempre coerenti, proprio per la varietà di indicatori e approcci storicamente usati. Per valutare i consumi indiretti legati al consumo di energia elettrica in Italia si è fatto riferimento ai valori pubblicati in [9], ottenuti come valori attesi di simulazioni Monte Carlo basate sul fitting di numerosi dati di

letteratura sul consumo di blue water associato alla generazione di energia elettrica da varie fonti. Essi sono stati aggiornati con riferimento al mix elettrico nazionale 2019 come da elaborazioni ISPRA dei dati Terna [92]. Per il gas naturale e i materiali costituenti i componenti, i dati relativi alle emissioni di carbonio equivalente e consumo specifico d'acqua sono elaborati da [9],[21][37][49][50]. La tabella 11 riporta i fattori utilizzati per le fonti energetiche, mentre le tabelle 12 e 13 riportano, rispettivamente, i fattori calcolati nel presente studio per i componenti di impianto e per le reti di teleriscaldamento (questi ultimi ricavati in base all'inventario di tabella 6).

Tabella 11: Fattori di consumo ed emissione per la valutazione del consumo di energia primaria e dei contributi indiretti delle fonti energetiche [9][92]

	Fattore di conversione in energia primaria (cPEC)	Fattore di emissione di GHG (cCO₂)	Fattore di consumo di acqua (cw)
Fonte	tep/kWh or tep/Nm ³	kgCO _{2eq} /kWh	m ³ /kWh
Elettricità	1,87E-04	0,33	0,00684
Gas naturale	8,90E-04	0,27	1,19E-05

Tabella 12: Fattori di consumo di acqua dolce ed emissione di CO_{2eq} per la valutazione dei contributi indiretti dei componenti d'impianto [21][49][50]

<i>Elementi d'impianto</i>	<i>Carbon footprint</i>	<i>Water footprint</i>
	<i>cCO_{2c,attr}</i> <i>kgCO₂/kW</i> <i>kgCO₂/m³</i>	<i>cw_{m,attr}</i> <i>m³H₂O/kW</i> <i>m³H₂O/m³</i>
<i>Pompa</i>	26,01	0,05
<i>Scambiatore di calore</i>	21,94	0,07
<i>Caldaia</i>	28,26	0,21
<i>Torre evaporativa</i>	5,59	0,06
<i>Dry cooler</i>	44,50	0,36
<i>Pompa di calore (R410A)</i>	107,92	1,05
<i>Pompa di calore (NH₃)</i>	100,39	0,92
<i>Termoaccumulatore</i>	474	1,17

*L'impatto dei termoaccumulatori è riferito al m³ di capacità. L'impatto delle caldaie e delle pompe di calore è riferito al kW di potenza termica (di riscaldamento) resa.

Tabella 13: Fattori di consumo ed emissione per la valutazione dei contributi indiretti del teleriscaldamento in funzione del diametro delle tubazioni [21][49][50]

<i>Diametro</i>	<i>Carbon footprint</i> ($cCO_{2m,tub}$)	<i>Water footprint</i> ($CW_{m,tub}$)
<i>mm</i>	<i>kgCO_{2eq}/m</i>	<i>m³H₂O/m</i>
25	71,48	59,01
32	80,33	63,95
40	80,51	63,95
50	87,91	67,66
65	95,19	71,38
80	105,62	76,34
100	127,96	86,27
125	142,23	92,47
150	158,34	98,69
200	202,12	114,88
250	267,01	136,14
300	309,52	148,67

3 Conclusioni

In questo studio si è sviluppato e implementato in Excel VBA un modello concettuale e matematico per il dimensionamento di massima e la valutazione dell’impatto ambientale di sistemi di simbiosi energetica industriale basati sul teleriscaldamento.

Lo sviluppo si è basato su un’indagine della letteratura relativa a progetti e casi studio di simbiosi industriale e recupero energetico in genere in contesti di teleriscaldamento, nonché sullo stato dell’arte di tali impianti individuato dalla letteratura tecnica, scientifica e nelle informazioni commerciali.

La revisione iniziale della letteratura ha rivelato che le simbiosi industriali energetiche in senso stretto non sono numerose, mentre più frequenti sono le simbiosi industriali-urbane, specie ove vi siano sistemi di teleriscaldamento preesistenti. Le tipologie industriali più comunemente coinvolte in progetti stabili e di successo strettamente industriali appartengono alla grande industria energetica, metallurgica e di processo, mentre impianti più piccoli (fino a 7 MW di potenza termica recuperabile circa) sono spesso connessi a reti urbane. Peraltro, in ottica di recupero termico esterno, sia la piccola taglia che le basse temperature del calore di recupero sono da un lato una criticità storica, dall’altro una potenzialità emergente di efficientamento nel contesto del teleriscaldamento di quarta generazione, in cui trovano significativa applicazione le pompe di calore. Quanto trovato è stato supportato anche dalle indicazioni emerse anche da una ulteriore revisione della letteratura, svolta a integrazione della precedente per caratterizzare, anche attraverso l’esame di altre modalità di decarbonizzazione quali l’impiego dell’energia solare o geotermica, i profili di carico termico di potenziali utilizzatori/fornitori di reti energetiche; si sono così delineati i criteri di sviluppo di un modello in grado di valutare l’impatto ambientale, in un’ottica di energy-carbon-water nexus, di interventi di simbiosi energetica tramite teleriscaldamento in ambito industriale. Il principale criterio di sviluppo del modello è stato quello di dare supporto alle decisioni più critiche e relative a situazioni più comuni e potenzialmente più replicabili nel contesto industriale italiano, in cui, al contrario di molti paesi dell’Unione Europea, l’applicazione del teleriscaldamento per soddisfare i fabbisogni di calore di processo a bassa temperatura è scarsamente diffusa.

Il modello sviluppato è stato perciò orientato ai piccoli e medi impianti e, potenzialmente, anche al recupero da fluidi a temperature basse (45 - 75 °C), segmento in cui ricadono diversi esempi di recupero per

teleriscaldamento in cui è coinvolta, tra le altre, l'industria alimentare e delle bevande, che secondo la revisione della letteratura dimostra delle significative potenzialità. Tale contesto è quello dei cosiddetti sistemi di teleriscaldamento di quarta generazione, in cui hanno un ruolo importante, oltre ai recuperi industriali, anche le fonti rinnovabili (solare, geotermia), sistemi di accumulo e l'integrazione di pompe di calore acqua-acqua di grande scala.

Per consentire un equo confronto di tecnologie tradizionali e innovative si sono definite, da un lato, delle configurazioni AS IS, in cui sono assenti interventi di simbiosi energetica, con l'utilizzo di caldaie a gas naturale (soluzione tradizionale) o di pompe di calore aria-acqua (soluzione emergente per le basse temperature); dall'altro lato, si sono individuate soluzioni TO BE, basate sul teleriscaldamento, distinguendo tra configurazioni a temperatura alta o tradizionale (temperature in mandata tra i 75°C e i 90°C, in ritorno tra i 55°C e i 65°C) e a bassa temperatura. In quest'ultimo caso si è valutata l'introduzione di pompe di calore acqua/acqua quando sia necessario e possibile sfruttare i fluidi caldi a bassa temperatura disponibili dalla sorgente per soddisfare un fabbisogno termico a maggior temperatura presso l'utenza.

Sulla base di un'indagine sulla letteratura tecnica, scientifica e commerciale, compreso l'esame di cataloghi e lo scambio di comunicazioni personali con i fornitori, i componenti delle soluzioni "AS IS", ovvero caldaie a gas naturale, pompe di calore aria acqua e sistemi di dissipazione del calore in eccesso, e i componenti delle soluzioni "TO BE", ovvero, oltre ai precedenti, tubazioni per il teleriscaldamento, scambiatori, sistemi di pompaggio, pompe di calore acqua acqua e termoaccumulatori, sono stati caratterizzati dal punto di vista dell'efficienza energetica, dell'impiego di materiali e delle equazioni descrittive del comportamento energetico. È stato così sviluppato e implementato in Excel VBA un modello semplificato per il dimensionamento di reti di teleriscaldamento, complete di sistemi di integrazione e accumulo del calore, per collegare un'industria "sorgente" a un'industria "utente".

Ciò ha consentito di sviluppare un modello per la valutazione di impatto ambientale in ottica water-energy-nexus, con il calcolo della carbon footprint, in linea con le norme ISO 14067:2018, e della water footprint, in particolare della blue water footprint, secondo l'approccio illustrato in questo studio. A tal fine, particolare attenzione è stata posta alla modellizzazione dei sistemi di dissipazione del calore non recuperato, sia in soluzioni esistenti che future. Gli indicatori calcolati per i componenti e sottosistemi di impianto sono la base per la valutazione di un ampio numero di combinazioni, identificate in questo studio e simulabili con il modello di calcolo implementato.

L'applicazione del modello a casi di studio reali o realistici, prevista nella successiva annualità del progetto, consentirà di validare i modelli sviluppati, che verranno completati con un modello di analisi economica.

Va notato che l'analisi di letteratura ha evidenziato la creazione di nuovi impianti che utilizzino calore a bassa temperatura, quali ad esempio serre, acquacultura, essiccazioni e fermentazioni, quale significativa opportunità per lo sfruttamento esterno del calore in eccesso da processi industriali. Si ritiene che l'attività di sviluppo di casi di studio nella fase successiva della collaborazione di ricerca possa essere anche orientata a questa tipologia di utenze, per la creazione di simbiosi energetiche nella filiera agro-industriale.

4 Riferimenti bibliografici

1. Chertow MR. *INDUSTRIAL SYMBIOSIS: Literature and Taxonomy.*; 2000. www.annualreviews.org.
2. Butturi MA, Lolli F, Sellitto MA, Balugani E, Gamberini R, Rimini B. Renewable energy in eco-industrial parks and urban-industrial symbiosis: A literature review and a conceptual synthesis. *Appl Energy*. 2019;255:113825. doi:10.1016/j.apenergy.2019.113825
3. Chinese D, Meneghetti A. Optimisation models for decision support in the development of biomass-based industrial district-heating networks in Italy. *Appl Energy*. 2005;82(3). doi:10.1016/j.apenergy.2004.10.010
4. Meneghetti A, Nardin G. Enabling industrial symbiosis by a facilities management optimization approach. *J Clean Prod*. 2012;35:263-273. doi:10.1016/j.jclepro.2012.06.002
5. Wang J, Wang Z, Zhou D, Sun K. Key issues and novel optimization approaches of industrial waste

- heat recovery in district heating systems. *Energy*. 2019;188:116005. doi:10.1016/j.energy.2019.116005
6. Boix M, Montastruc L, Azzaro-Pantel C, Domenech S. Optimization methods applied to the design of eco-industrial parks: A literature review. *J Clean Prod*. 2015;87(1):303-317. doi:10.1016/j.jclepro.2014.09.032
 7. Varbanov PS. Energy and water interactions: Implications for industry. *Curr Opin Chem Eng*. 2014;5:15-21. doi:10.1016/j.coche.2014.03.005
 8. WWAP. *The United Nations World Water Development Report 2015*. (Program UNWWA, ed.). Paris: UNESCO; 2015.
 9. Chinese D, Santin M, Saro O. Water-energy and GHG nexus assessment of alternative heat recovery options in industry: A case study on electric steelmaking in Europe. *Energy*. 2017. doi:10.1016/j.energy.2017.09.043
 10. Peters M., Godfrey C.M., Khalil H., McInerney P., Parker D., Baldini Soares C., Guidance for conducting systematic scoping literature reviews, *Int J Evid Based Healthc* 2015; 13:141–146.
 11. Moser S, Lassacher S. External use of industrial waste heat - An analysis of existing implementations in Austria. *J Clean Prod*. 2020;264:121531. doi:10.1016/j.jclepro.2020.121531
 12. Lygnerud K, Werner S. Risk assessment of industrial excess heat recovery in district heating systems. *Energy*. 2018;151:430-441. doi:10.1016/j.energy.2018.03.047
 13. Luo A, Fang H, Xia J, Lin B. Mapping potentials of low-grade industrial waste heat in Northern China. *Resour Conserv Recycl*. 2017;125(July):335-348. doi:10.1016/j.resconrec.2017.06.018
 14. Kim H, Dong L, Earvin A, Choi S, Fujii M, Fujita T. Co-benefit potential of industrial and urban symbiosis using waste heat from industrial park in Ulsan , Korea. *Resour Conserv Recycl*. 2018;135(January 2017):225-234. doi:10.1016/j.resconrec.2017.09.027
 15. Sacchi R, Ramsheva YK. The effect of price regulation on the performances of industrial symbiosis : a case study on district heating. *J Sustain Energy Plan Manag*. 2017;14:39-56.
 16. Xu L, Torrens JI, Guo F, Yang X, Hensen JLM. Application of large underground seasonal thermal energy storage in district heating system : A model-based energy performance assessment of a pilot system in Chifeng , China. *Appl Therm Eng*. 2018;137(November 2017):319-328. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.03.047
 17. Moser S, Mayrhofer J, Schmidt RR, Tichler R. Socioeconomic cost-benefit-analysis of seasonal heat storages in district heating systems with industrial waste heat integration. *Energy*. 2018;160:868-874. doi:10.1016/j.energy.2018.07.057
 18. Simeoni P, Ciotti G, Cottés M, Meneghetti A. Integrating industrial waste heat recovery into sustainable smart energy systems. *Energy*. 2019;175:941-951. doi:10.1016/j.energy.2019.03.104
 19. Dénarié A, Muscherà M, Calderoni M, Motta M. Industrial excess heat recovery in district heating: Data assessment methodology and application to a real case study in Milano, Italy. *Energy*. 2019;166:170-182. doi:10.1016/j.energy.2018.09.153
 20. Eriksson L, Morandin M, Harvey S. A feasibility study of improved heat recovery and excess heat export at a Swedish chemical complex site. 2018;(June 2017):1580-1593. doi:10.1002/er.3950
 21. Santin M, Chinese D, De Angelis A, Biberacher M. Feasibility limits of using low-grade industrial waste heat in symbiotic district heating and cooling networks. *Clean Technol Environ Policy*. 2020;22(6):1339-1357. doi:10.1007/s10098-020-01875-2
 22. Dominkovic DF, Bacekovic B, Sveinbjornsson D, Pedersen AS, Krajacic G. On the way towards smart energy supply in cities : The impact of interconnecting geographically distributed district heating grids on the energy system. 2017;137. doi:10.1016/j.energy.2017.02.162
 23. Fitó J, Ramousse J, Hodencq S, Wurtz F. Energy, exergy, economic and exergoeconomic (4E) multicriteria analysis of an industrial waste heat valorization system through district heating. *Sustain Energy Technol Assessments*. 2020;42:100894. doi:10.1016/j.seta.2020.100894
 24. Sandvall A, Ahlgren EO, Ekvall T. System profitability of excess heat utilisation : A case-based modelling analysis. *Energy*. 2016;97:424-434. doi:10.1016/j.energy.2015.12.037
 25. Maier S. Smart energy systems for smart city districts : case study Reininghaus District. *Energy Sustain*

- Soc. 2016;6(23). doi:10.1186/s13705-016-0085-9
26. Wahlroos M, Persinnen M, Manner J, Syri S. Utilizing data center waste heat in district heating e Impacts on energy efficiency and prospects for low-temperature district heating networks. 2020;140(2017):1228-1238. doi:10.1016/j.energy.2017.08.078
 27. Parker T, Kiessling A. Low-grade heat recycling for system synergies between waste heat and food production, a case study at the European Spallation Source. *Energy Sci Eng.* 2016;4(2):153-165. doi:10.1002/ese3.113
 28. Chinese D, Meneghetti A, Nardin G. Waste-to-energy based greenhouse heating: Exploring viability conditions through optimisation models. *Renew Energy.* 2005;30(10). doi:10.1016/j.renene.2004.11.008
 29. Andrews R, Pearce JM. Environmental and economic assessment of a greenhouse waste heat exchange. *J Clean Prod.* 2011;19(13):1446-1454. doi:10.1016/j.jclepro.2011.04.016
 30. Togawa T, Fujita T, Dong L, Fujii M, Ooba M. Feasibility assessment of the use of power plant-sourced waste heat for plant factory heating considering spatial configuration. *J Clean Prod.* 2014;81:60-69. doi:10.1016/j.jclepro.2014.06.010
 31. Lund H, Werner S, Wiltshire R, et al. 4th Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy.* 2014;68:1-11. doi:10.1016/j.energy.2014.02.089
 32. Santin M. A Water-Energy-CO2 Nexus Perspective on Industrial Heat Recovery Projects. 2019. <http://hdl.handle.net/11390/1147722>.
 33. Gaeta M, Rao M, Seri G, Varriale R, Truglia F, Filiberti S. Rilevazione sui consumi finali di prodotti energetici delle imprese. :2016. <https://www.enea.it/it/seguici/pubblicazioni/edizioni-enea/2016/consumi-finali-prodotti-energetici-imprese>.
 34. Lazzarin R, Noro M. Local or district heating by natural gas : Which is better from energetic , environmental and economic point of views ? *Appl Therm Eng.* 2006;26:244-250. doi:10.1016/j.applthermaleng.2005.05.007
 35. Beccali M, Cellura M, Ardente F, et al. IEA Task 38 Solar Air-Conditioning and Refrigeration “ Life Cycle Assessment of Solar Cooling Systems ” A technical report of subtask D Subtask Activity D3. 2010;(December). https://iris.unipa.it/retrieve/handle/10447/64309/42644/IEA-Task38-Report_D3_final%281%29.pdf.
 36. Oliver-sola J, Gabarrell X, Rieradevall J. Environmental impacts of the infrastructure for district heating in urban neighbourhoods. *Energy Policy.* 2009;37:4711-4719. doi:10.1016/j.enpol.2009.06.025
 37. Marinelli S, Angela M, Lolli F, Rimini B, Gamberini R. Data on the environmental performance analysis of a dual-source heat pump system. *Data Br.* 2020;31:105919. doi:10.1016/j.dib.2020.105919
 38. AERMEC S.p.A. Catalogo AERMEC, 2020.
 39. Guelpa E, Verda V. Thermal energy storage in district heating and cooling systems : A review. *Appl Energy.* 2019;252(March):113474. doi:10.1016/j.apenergy.2019.113474
 40. tml - Industrie Loddo 2020. Catalogo generale. 2020.
 41. Sayegh MA, Jadwiszczak P, Axcell BP, Niemierka E, Bryś K, Jouhara H. Heat pump placement, connection and operational modes in European district heating. *Energy Build.* 2018;166:122-144. doi:10.1016/j.enbuild.2018.02.006
 42. GEA Group A. GEA RedAstrum Catalogue, GEA Group Aktiengesellschaft. 2020.
 43. Reinholdt L, Al. E. Heat pump COP, part 1: Generalized method for screening of system integration potentials. *Refrig Sci Technol.* 2018;2018-June:1207-1213. doi:10.18462/iir.gl.2018.1380
 44. Stocker T., Qin D, Plattner G-K, et al. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge university press; 2013. doi:doi:10.1017/CBO9781107415324.
 45. Boulay AM, Bare J, Benini L, et al. The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *Int J Life Cycle Assess.* 2018;23(2):368-378. doi:10.1007/s11367-017-1333-8

46. Frischknecht R, Steiner R, Arthur B, Norbert E, Gabi H. Swiss Ecological Scarcity Method : The New Version 2006. *Cycle*. 2006;(January):4. <http://www.esu-services.ch/download/Frischknecht-2006-EcologicalScarcity-Paper.pdf>.
47. Kounina A, Margni M, Bayart JB, et al. Review of methods addressing freshwater use in life cycle inventory and impact assessment. *Int J Life Cycle Assess*. 2013;18(3):707-721. doi:10.1007/s11367-012-0519-3
48. Hoekstra AY, Chapagain AK, Aldaya MM, Mekonnen MM. The Water Footprint Assessment Manual. 2011. <http://www.hydrology.nl/images/docs/dutch/key/TheWaterFootprintAssessmentManual.pdf%0Ahttp://www.waterfootprint.org/downloads/TheWaterFootprintAssessmentManual.pdf>.
49. IINAS - GEMIS. GEMIS - Global Emission Model for integrated systems. 2020.
50. Wernet G, Bauer C, Steubing B, Reinhard J, Moreno-ruiz E, Weidema B. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. 2016;3:1218-1230. doi:10.1007/s11367-016-
51. Dou Y., Ohnishi S., Fujii M., Togawa T., Fujita T., Tanikawa H., Dong L., Feasibility of developing heat exchange network between incineration facilities and industries in cities: Case of Tokyo Metropolitan Area, *J Clean Prod*, Volume 170, 2018, Pages 548-558
52. Sandberg J, Larsson M, Wang C, Dahl J, Lundgren J (2012) A new optimal solution space based method for increased resolution in energy system optimisation. *Appl Energy* 92:583-592.
53. Jebamalai JM, Marlein K, Laverge J. Influence of centralized and distributed thermal energy storage on district heating network design. *Energy*. 2020;202:117689. doi:10.1016/j.energy.2020.117689
54. Li H, Hou J, Hong T, Ding Y, Nord N. Energy, economic, and environmental analysis of integration of thermal energy storage into district heating systems using waste heat from data centres. *Energy*. 2021;219:119582
55. Oosthuizen D, Goosen NJ, Hess S. Solar thermal process heat in fishmeal production: Prospects for two South African fishmeal factories. *J Clean Prod*. 2020;253:119818.
56. Abikoye B, Čuček L, Isafiade AJ, Kravanja Z. Integrated design for direct and indirect solar thermal utilization in low temperature industrial operations. *Energy*. 2019;182:381-396.
57. Eiholzer T, Olsen D, Hoffmann S, Sturm B, Wellig B. Integration of a solar thermal system in a medium-sized brewery using pinch analysis: Methodology and case study. *Appl Therm Eng*. 2017;113:1558-1568.
58. Allouhi A, Agrouaz Y, Benzakour Amine M, et al. Design optimization of a multi-temperature solar thermal heating system for an industrial process. *Appl Energy*. 2017;206:382-392. doi:10.1016/j.apenergy.2017.08.196
59. Quijera JA, Alriols MG, Labidi J. Integration of a solar thermal system in canned fish factory. *Appl Therm Eng*. 2014;70(2):1062-1072.
60. D'Arpa S, Colangelo G, Starace G, et al. Heating requirements in greenhouse farming in southern Italy: evaluation of ground-source heat pump utilization compared to traditional heating systems. *Energy Effic*. 2016;9(5):1065-1085.
61. Lythcke-Jørgensen C, Clausen LR, Algren L, et al. Optimization of a flexible multi-generation system based on wood chip gasification and methanol production. *Appl Energy*. 2017;192:337-359.
62. Kohl T, Laukkanen TP, Järvinen MP. Integration of biomass fast pyrolysis and precedent feedstock steam drying with a municipal combined heat and power plant. *Biomass and Bioenergy*. 2014;71:413-430.
63. Difs K, Danestig M, Trygg L. Increased use of district heating in industrial processes - Impacts on heat load duration. *Appl Energy*. 2009;86(11):2327-2334.
64. Sugiarta N, Tassou SA, Chaer I, Marriott D. Trigeneration in food retail: An energetic, economic and environmental evaluation for a supermarket application. *Appl Therm Eng*. 2008;29:2624-2632.
65. Kontu K, Vimpari J, Penttinen P, Junnila S. City scale demand side management in three different-sized district heating systems. *Energies*. 2018;11(12).
66. Nielsen S, Hansen K, Lund R, Moreno D. Unconventional Excess Heat Sources for District Heating in a National Energy System Context. *Energies*. 2020; 13(19):5068.

67. Lumbreras M, Garay R. Energy & economic assessment of façade-integrated solar thermal systems combined with ultra-low temperature district-heating. *Renew Energy*. 2020;159:1000-1014
68. Sanjari MJ, Karami H. Analytical approach to online optimal control strategy of energy storage devices in energy system. *J Energy Storage*. 2020;29:101328.
69. Marszal-Pomianowska A, Widén J, Le Dréau J, Heiselberg P, Bak-Jensen B, de Cerio Mendaza ID. Operation of power distribution networks with new and flexible loads: A case of existing residential low voltage network. *Energy*. 2020;202:117715.
70. Crespo A, Barreneche C, Ibarra M, Platzer W. Latent thermal energy storage for solar process heat applications at medium-high temperatures – A review. *Sol Energy*. 2019;192:3-34.
71. Lund H., Renewable Energy Systems: A Smart Energy Systems Approach to the Choice and Modeling of 100% Renewable Solutions, *Elsevier*, Oxford, 2014
72. European Commission, Directorate for Energy, Mapping and analyses of the current and future (2020 - 2030) heating/cooling fuel deployment (fossil/renewables), Contract N°ENER/C2/2014-641, Final report of WP 2, April 2016, https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/documents/mapping-hc-final_report-wp2.pdf
73. Gentili et al., (2014) <https://www.eco-steamboilers.eu/eco-steamboilers-wAssets/docs/20141217-Steam-Boilers-Ecodesign-Final-Report.pdf>, last access December 2020
74. Honoré A., Decarbonisation of heat in Europe: implications for natural gas demand, OIES Paper NG.130, Oxford Institute for Energy Studies, 2018, <https://doi.org/10.26889/9781784671105>
75. Benedetti M., Bertini I., Giordano L., Lapenna P.E., Creazione di una base di conoscenze relativa alla generazione, distribuzione e utilizzo del calore a bassa temperatura negli stabilimenti industriali, Progetto: 1.6 “Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali”, Work package: WP3 “Sviluppo di tecniche e soluzioni impiantistiche per l’efficientamento di processi industriali ad alta e bassa temperatura”, Dicembre 2019
76. Keith Mobley R., Plant Engineer’s Handbook, Butterworth Heinemann, Woburth MA, 2001
77. Pierini F., Impianti termici, Hoepli, Milano, 2020
78. Watanabe C., Uchiyama Y, Hirano S., Hikawa T., Pioneering Industrial heat pump technology in Japan, Proceedings of the 11th IEA Heat Pump Conference 2014, May 12-16 2014, Montréal (Québec) Canada
79. Bloemkolk J.W., Van Der Schaaf R.J., "Design alternatives for the use of cooling water in the process industry: Minimization of the environmental impact from cooling systems", 1996, " *J Clean Prod.*, 4(1), 21-27
80. European Community, Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on the application of Best Available Techniques to Industrial Cooling Systems, December 2001.
81. Winkens H.P. “Heizkraftwirtschaft und Fernwärmeversorgung: Ein Kompendium“, VWEW Verlag, Frankfurt, 2001
82. Fredriksen S., Werner S., „District heating and cooling“, Studentlitteratur AB, Lund, 2013
83. Wiltshire R., “Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems”, Woodhead Series in Energy N., 87, Elsevier, Cambridge, 2016
84. Rutz D., Doczekal C., Zweiler R., Hofmeister M., Linn Laurberg Jensen, Small Modular Renewable Heating and Cooling Grids: a Handbook, WIP Renewable Energies, Munich, 2017
85. Olsen P.K, Christiansen C.H., Hofmeister M., Svendsen S., Thorsen J., Guidelines for Low Temperature District Heating, EUDP 2010-II: Full-Scale Demonstration of Low-Temperature District Heating in Existing Buildings, Danskjernvarme, 2014
86. Lund R., Mohammadi S., Choice of insulation standard for pipe networks in 4th generation district heating systems, *Applied Thermal Engineering*, 98, 2016, 256-264
87. Fröling, M., Svanström, M. Life Cycle Assessment of the District Heat Distribution System - Part 2: Network Construction (11 pp). *Int J Life Cycle Assessment* 10, 425–435 (2005).
88. Sarbu, I.; Valea, E.S. Energy Savings Potential for Pumping Water in District Heating Stations. *Sustainability* 2015, 7, 5705-5719.
89. Buffa S., Cozzini M., D’Antoni M., Baratieri M., Fedrizzi R., 5th generation district heating and cooling

- systems: A review of existing cases in Europe, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104,2019, 504-522
90. ISTAT, Censimento permanente delle Imprese, Imprese attive per forma giuridica e settori economici ATECO 3 cifre, http://dati.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DICA_ASIAUE1P, 2018
91. Caduff, M., Huijbregts, M.A., Koehler, A., Althaus, H.-J. and Hellweg, S. (2014), Scaling Relationships in Life Cycle Assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 18: 393-406.
92. ISPRA, Fattori di emissione atmosferica di gas a effetto serra nel settore elettrico nazionale e nei principali Paesi Europei. Edizione 2020. n. 317/2020.
93. Madinelli F., Progetto nuovo ciclo combinato della Centrale a2a di Monfalcone: confronto prestazioni di alcune soluzioni impiantistiche, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica, DPIA, Università di Udine, 2019

5 Abbreviazioni ed acronimi

AS IS	Configurazioni esistenti (senza recupero del calore per uso esterno)
TO BE	Configurazioni future (con teleriscaldamento in simbiosi industriale)
COP	Coefficiente di prestazione
CO_2f	Carbon footprint
C_p	Potenzialità di macchine e impianti, in kW ove non diversamente indicato
cCO_2	Fattore di emissione di CO ₂ equivalenti
c_w	Fattore di consumo di acqua
DC	Dry cooler
E	Energia, in kWh ove non diversamente indicato
TE	Torre evaporativa
TLR	Teleriscaldamento
T_m	Temperatura di mandata in rete di teleriscaldamento
T_u	Temperatura richiesta all'utenza
T_r	Temperatura di ritorno in rete di teleriscaldamento
AS IS	Configurazioni esistenti (senza recupero del calore per uso esterno)
TO BE	Configurazioni future (con teleriscaldamento in simbiosi industriale)
W_f	Water footprint

Appendice: breve curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nelle attività.

Il gruppo di ricerca impegnato nel progetto è composto da personale scientifico del Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura dell'Università degli studi di Udine. I componenti hanno competenze relative alla modellizzazione di impianti industriali, di impianti termotecnici e di conversione energetica, allo sviluppo di nuovi prodotti e alla valutazione del relativo impatto ambientale.

Il gruppo di ricerca è così composto:

- Damiana Chinese è professore associato di Impianti Industriali Meccanici. La sua attività di ricerca si è particolarmente concentrata sul recupero energetico in ambito industriale, sullo studio della sostenibilità delle catene logistiche, con particolare riguardo alle supply chain delle energie alternative, nonché sull'analisi di impatto ambientale di processi industriali con specifico riferimento al water-energy nexus.
- Giovanni Cortella è professore associato di Fisica tecnica industriale, docente di Impianti per la Refrigerazione. La sua attività di ricerca è particolarmente rivolta all'efficienza energetica di refrigeratori e pompe di calore, in un'ottica sia di unità (ottimizzazione componenti) che di sistema (sinergie di sistema, macchine polivalenti, accumuli di energia).
- Antonella Meneghetti è professore associato di Impianti Industriali Meccanici. I suoi principali filoni di ricerca riguardano la sostenibilità di impianti e processi in ambito produttivo-logistico, con particolare attenzione all'efficienza energetica, al recupero energetico e all'integrazione di fonti rinnovabili, alle soluzioni sistemiche di simbiosi industriale e territoriale.
- Barbara Motyl è ricercatore di Disegno e Metodi dell'Ingegneria industriale. Si occupa di metodi e sostenibilità nell'innovazione di prodotto, di progettazione assistita dal calcolatore, di engineering education per la sostenibilità.
- Onorio Saro, professore associato di Fisica tecnica ambientale, docente di Impianti termotecnici (in servizio a tutto il 2020). La sua esperienza di ricerca abbraccia la simulazione numerica degli Impianti termotecnici e il controllo dei fabbisogni di energia per la climatizzazione dell'ambiente costruito (civile, commerciale e industriale) mediante tecniche numeriche e sperimentali.

Appendice: Attività di disseminazione svolta nel 2020

Le attività e lo sviluppo modellistico avviati nel 2020 non hanno ancora portato a risultati abbastanza completi per realizzare già una compiuta attività di disseminazione. In vista di alcune attività di raccolta dati, che stanno avendo luogo in collaborazione con colleghi di altri atenei e verranno completate a inizio 2021, si è finora potuto predisporre un abstract intitolato "The Role of Fourth Generation District Heating for Industrial Symbiosis: a Water-Energy-GHG Nexus Perspective on a Case Study from the Dairy Industry" che è stato accettato per la presentazione alla 16th SDEWES Conference (<https://www.dubrovnik2021.sdewes.org>), che avrà luogo a Dubrovnik e online a Ottobre 2021. L'articolo è in corso di preparazione e verrà completato nel 2021.