

Ricerca di Sistema elettrico



Analisi di casi di studio inerenti all'applicazione di strumenti di valorizzazione e ottimizzazione dei flussi termici in differenti settori industriali (LA2.2)

Lorena Giordano, Miriam Benedetti

ANALISI DI CASI DI STUDIO INERENTI ALL'APPLICAZIONE DI STRUMENTI DI VALORIZZAZIONE E OTTIMIZZAZIONE DEI FLUSSI TERMICI IN DIFFERENTI SETTORI INDUSTRIALI (LA2.2)

L. Giordano, M. Benedetti (ENEA)

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

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

Obiettivo: *Decarbonizzazione/Digitalizzazione ed evoluzione delle reti*

Progetto: *Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali*

Linea di attività: 2.2

Responsabile del Progetto: Miriam, Benedetti, ENEA

Responsabile del Work Package: Miriam, Benedetti, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Lorena, Giordano, ENEA

Mese inizio previsto: 19

Mese inizio effettivo: 36

Mese fine previsto: 19

Mese fine effettivo: 36

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

Indice

1	Risultati attesi	6
2	Risultati ottenuti.....	7
3	Prodotti attesi	9
4	Prodotti sviluppati	10
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	11
6	Sintesi delle attività svolte	12
7	Dettaglio delle attività svolte.....	13
7.1	Perfezionamento del database per la caratterizzazione dei processi industriali	13
7.2	Analisi delle diagnosi energetiche dei settori industriali di interesse	17
7.3	Definizione di una metodologia per la creazione di profili tempo-dipendenti delle richieste/disponibilità di energia termica.....	21
7.4	Integrazione degli strumenti sviluppati e applicazione a casi di studio	26
7.5	Attività di coordinamento	38
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	39
9	Pubblicazioni scientifiche.....	40
10	Eventi di disseminazione	41

Indice delle figure

Figura 1. Confronto tra il numero di dati di terzo livello al termine della LA 2.1 e della LA 2.2 per i settori industriali oggetto di indagine	14
Figura 2. Confronto tra il numero di dati di terzo livello al termine della LA 2.1 e della LA 2.2 per i sottosettori industriali oggetto di indagine	14
Figura 3. Struttura dei moduli relativi ai singoli casi di studio (dati di 4° livello): matrice per il calcolo dell'RI per i possibili accoppiamenti di correnti definiti imponendo il vincolo che la temperatura della sorgente calda superi quella della sorgente fredda e che la potenza scambiata sia la minima tra quella richiesta (dalla sorgente fredda) e quella resa disponibile (dalla sorgente calda).....	16
Figura 4. Descrizione della struttura del database per la caratterizzazione dei processi industriali sviluppato da ENEA.....	17
Figura 5. Trend annuale della produzione (a) e dei consumi di gas naturale (b) relativi alla produzione di <i>birra</i> (valori medi, massimi e minimi calcolati sull'insieme di diagnosi con dati utili ai fini dell'indagine)	20
Figura 6. Trend annuale della produzione (a) e dei consumi di gas naturale (b) relativi alla produzione di <i>pane e biscotti</i> (valori medi, massimi e minimi calcolati sull'insieme di diagnosi con dati utili ai fini dell'indagine).....	20
Figura 7. Trend annuale della produzione (a) e dei consumi di gas naturale (b) relativi alla produzione di <i>carta</i> (valori medi, massimi e minimi calcolati sull'insieme di diagnosi con dati utili ai fini dell'indagine).....	21
Figura 8. Schema a blocchi rappresentante i principali step della metodologia per la valutazione dei profili tempo-dipendenti dei consumi di energia termica in funzione dei livelli di temperatura delle fasi di processo indagate	22
Figura 9. Modulo <i>Input_mod_gen_curva_durata</i> : area per l'inserimento dei dati di input richiesti dalla metodologia di valutazione dei profili tempo-dipendenti dei consumi di energia termica	23
Figura 10. Modulo <i>Input_mod_gen_curva_durata</i> : zona di interfaccia con i moduli operativi della modello per la creazione di profili tempo-dipendenti delle curve di durata dei consumi di energia termica dei processi industriali.....	23
Figura 11. Descrizione della metodologia di generazione delle curve di durata dei consumi di energia termica nel foglio <i>INFO MOD. CURVE DURATA ENEA</i>	24
Figura 12. Profilo di carico giornaliero associato alle richieste di energia termica per riscaldamento del caso di studio Caso-ALIM_1 (intervallo di temperatura 80-160°C)	24
Figura 13. Profilo di carico annuale dei consumi di energia termica (dettaglio relativo ai primi 5 giorni dell'anno) rimodulato sulla base dei livelli mensili di produzione dell'impianto	25
Figura 14. Curva di durata dei consumi di energia termica per riscaldamento delle correnti fredde	25
Figura 15. Parametri caratteristici della curva di durata dei consumi di energia termica per riscaldamento: in ordine carico massimo, carico di base, carico medio, energia termica complessivamente richiesta, fattore di carico termico, e durata (in ore) a cui corrisponde un carico superiore al valore di soglia (1000 kW).....	25

Figura 16. Profilo di carico giornaliero associato alle richieste di energia termica per raffreddamento del caso di studio Caso-ALIM_1 (intervallo di temperatura 0-120°C).....	26
Figura 17. Curva di durata dei consumi di energia termica per raffreddamento delle correnti calde	26
Figura 18. Parametri caratteristici della curva di durata dei consumi di energia termica per raffreddamento: in ordine carico massimo, carico di base, carico medio, energia termica complessivamente richiesta, fattore di carico termico, e durata (in ore) a cui corrisponde un carico superiore al valore di soglia (600 kW)	26
Figura 19. Struttura del database integrato per l'analisi dei consumi energetici dei settori industriali derivante dall'attività svolta da ENEA e UNIVAQ_DIIIE1 nell'ambito delle LA 2.1-2.3	28
Figura 20. Valori storici del CEPCI e potenziali scenari di crescita: crescita lenta (+0.2%/anno), crescita stazionaria (+1%/anno) e crescita rapida (+4%/anno)	28
Figura 21. Valori storici del costo del gas naturale e potenziali scenari di crescita: Scenario GN-1 (crescita costante +4%/anno), Scenario GN-2 (crescita dell'1.5% fino 2035 e del 5% dal 2035 al 2050) e Scenario GN-3 (crescita dell'4% fino 2035 e del -0.5% dal 2035 al 2050)	29
Figura 22. Schema delle linee di distribuzione dell'energia termica a due livelli di temperatura (135°C e 90°C) alle utenze di processo: 11 linee di essiccamento della pasta, riscaldamento acqua impasti, riscaldamento locali di produzione e ACS	30
Figura 23. Curve cumulative dei fluidi caldi e freddi nella zona di alta temperatura assumendo il recupero di calore dai fumi delle caldaie e del cogeneratore.....	33
Figura 24. Curve cumulative dei fluidi caldi e freddi nella zona di bassa temperatura assumendo il recupero di calore dal secondo stadio dell'intercooler	34
Figura 25. Disegno della rete nella zona di alta temperatura relativa al caso "inverno": il recupero di calore sui fumi delle caldaie e del cogeneratore consentono di ridurre il carico termico sulle correnti 2 (linea produttiva L) ed 8 (linea produttiva B). La struttura della rete nel caso "estate" è la medesima che nel caso "inverno", ad eccezione per la corrente associata al riscaldamento (assente in questo periodo).....	37

Indice delle tabelle

Tabella 1. Struttura dei moduli relativi ai singoli casi di studio (dati di 4° livello): campi di informazione presenti al termine della LA 2.2 e relativa descrizione.....	15
Tabella 2. Numero di diagnosi energetiche totale, analizzate e con dati utili ai fini della LA 2.2 per i sottosettori indagati	18
Tabella 3. Tipologia e livello di dettaglio temporale dei dati desunti dall'analisi delle diagnosi energetiche	18
Tabella 4. Campi di variazione dei livelli di produzione e dei consumi di gas naturale: valori riportati per il sottosettore <i>Produzione birra</i>	19
Tabella 5. Tipologie di prodotti per i quali è stato possibile valutare le tendenze annuali dei livelli di produzione e dei consumi di gas naturale	19
Tabella 6. Modelli di costo per la valutazione delle utilities in funzione del Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI), del costo del combustibile <i>Ccomb</i> impiegato per generare le utilities	

calde o l'energia elettrica per azionare le macchine adibite alla produzione delle utilities fredde, della potenza termica richiesta (Qu) e relativa temperatura (Tu) o della portata di acqua (q). 28

Tabella 7. Caratterizzazione delle correnti fredde di processo e delle correnti calde (fumi di scarico caldaie e cogeneratore) con potenzialità di recupero di calore nella zona di alta temperatura in condizioni nominali31

Tabella 8. Caratterizzazione delle correnti fredde di processo e della corrente calda con potenzialità di recupero di calore (acqua di raffreddamento del secondo stadio dell'intercooler) nella zona di bassa temperatura in condizioni nominali31

Tabella 9. Dati di produzione e consumi di energia termica del processo di produzione di pasta essiccata e temperatura media dell'aria ambiente 32

Tabella 10. Progetto della rete di alta temperatura con recupero di calore dai fumi delle caldaie e dal cogeneratore in condizioni nominali: specifiche e costi degli scambiatori di calore interni ed esterni 32

Tabella 11. Progetto della rete di bassa temperatura con recupero di calore dal secondo stadio dall'intercooler in condizioni nominali: specifiche e costi degli scambiatori di calore interni ed esterni 33

Tabella 12. Confronto tra le reti con e senza recupero di calore in condizioni nominali: superfici e costo di investimento degli scambiatori aggiuntivi, potenza termica e costi annui delle utilities valutati assumendo un costo del gas naturale di 5 \$/GJ ed un periodo operativo dell'impianto di 6865 ore/anno..... 34

Tabella 13. Caratterizzazione delle correnti di processo della zona di alta temperatura nel caso "inverno" e delle correnti calde potenzialmente recuperabili 35

Tabella 14. Caratterizzazione delle correnti di processo a bassa temperatura nel caso "inverno" e della corrente calda potenzialmente recuperabile..... 35

Tabella 15. Caratterizzazione delle correnti di processo della zona di alta temperatura nel caso "estivo" e delle correnti calde potenzialmente recuperabili..... 36

Tabella 16. Caratterizzazione delle correnti di processo a bassa temperatura nel caso "estivo" e della corrente calda potenzialmente recuperabile 36

1 Risultati attesi

Come riportato nel testo del capitolato, i risultati attesi per la LA 2.2 sono i seguenti:

- Perfezionamento del database per la caratterizzazione energetica dei processi industriali.
- Definizione di una metodologia per la valutazione di profili tempo-dipendenti delle richieste e disponibilità di energia termica dei processi produttivi.
- Definizione e implementazione in ambiente Excel di modelli di previsione delle prestazioni energetiche e dei costi di investimento delle tecnologie di produzione e valorizzazione dell'energia termica derivanti da innovazioni e progresso tecnologico.
- Integrazione del database per la caratterizzazione dei processi industriali e del modello per la valutazione di profili tempo-dipendenti delle richieste/disponibilità di energia termica all'interno del modulo per l'applicazione della pinch-analysis, sviluppato da UNIVAQ_DIIIE1 nel corso del precedente triennio.
- Messa a punto e validazione dello strumento risultante da tale integrazione, attraverso l'analisi di casi di studio di letteratura.
- Individuazione di casi di studio relativi a processi produttivi di maggiore complessità, attraverso l'analisi di diagnosi energetiche.
- Analisi dei casi di studio reali e valutazione di possibili soluzioni ottimali per il dimensionamento di reti di scambiatori o il retrofit di reti esistenti, sulla base di criteri di ottimizzazione definiti in base alle peculiarità dei processi oggetto di studio

2 Risultati ottenuti

Di seguito sono descritti i risultati ottenuti seguendo l'ordine del punto elenco di cui al paragrafo precedente ("Risultati attesi"):

- Il database per la caratterizzazione energetica dei processi industriali è stato perfezionato ed ampliato. Rispetto alla versione prodotta al termine della LA 2.1, il numero di record presenti è cresciuto in maniera significativa, grazie ad un incremento di oltre il 30% del numero di dati relativi alle singole fasi dei processi industriali (dati di 3° livello) e all'integrazione di oltre 40 casi di studio per l'applicazione della pinch analysis a processi industriali batch e continui (dati di 4° livello). L'individuazione dei dati aggiuntivi e dei casi di studio hanno anche fornito lo spunto per perfezionare la struttura dei fogli di lavoro del database ed incrementare (ove necessario) il numero di campi di informazione.
- È stata definita una metodologia in grado di individuare dei profili tempo-dipendenti dei fabbisogni di energia termica per riscaldamento e raffrescamento associate ai processi industriali. Tale metodologia ha reso necessaria una preliminare analisi delle diagnosi energetiche dei settori industriali di interesse, al fine di caratterizzare e quantificare in maniera più puntuale i fattori responsabili delle fluttuazioni temporali dei processi industriali. In particolare, la metodologia richiede che l'utente definisca le informazioni necessarie a caratterizzare le richieste energetiche delle singole fasi di processo, in termini di potenze termiche richieste, livelli di temperatura e durata temporale. Tali informazioni possono essere inserite direttamente dall'utente o reperite dall'insieme dei casi di studio contenuti nel database per la caratterizzazione dei processi industriali. Sulla base di tali dati e di ulteriori informazioni utili a definire i periodi operativi dell'impianto nell'arco dell'anno e i fattori di variazione dei consumi energetici (tra cui ad esempio la stagionalità della produzione), il modello consente di valutare il profilo annuale dei consumi di energia termica per riscaldamento e raffrescamento e le corrispondenti curva di durata (relative alle richieste energetiche complessive o suddivise per livelli di temperatura). Il modello è, inoltre, in grado di calcolare un insieme di parametri caratteristici delle curve di durata, tra cui il carico medio, il carico di base, l'energia termica richiesta totale, il fattore di carico (rapporto tra il carico medio e il carico massimo) e l'intervallo di tempo a cui corrisponde un valore del carico superiore ad una certa soglia.
- Sono stati definiti dei modelli di previsione dei costi delle utilities calde e fredde a supporto delle reti di scambiatori di calore in grado di tenere conto del fenomeno dell'inflazione e dell'influenza del costo dei combustibili impiegati per la generazione delle utilities calde (vapore ed acqua calda) e dell'elettricità richiesta dalle macchine operatrici preposte alla produzione delle utilities fredde (acqua fredda e acqua gelida).
- Il modello per la valutazione dei profili tempo-dipendenti è stato integrato nel database di caratterizzazione dei processi industriali. Ciò sia per consentire all'utente la preliminare consultazione del database e la successiva acquisizione di dati relativi alle fasi di processo (dati di 3° e 4° livello), che per agevolare il trasferimento dei dati dal database al modello. Il modulo risultante è stato successivamente integrato con il database sviluppato nella LA 2.3 da UNIVAQ_DIIIE1, che ha basato la caratterizzazione dei processi industriali su dati statunitensi relativi a studi coordinati dal National Renewable Energy Laboratory (NREL). Il database integrato così ottenuto, oltre a poter essere utilizzato in maniera indipendente per la caratterizzazione energetica dei processi industriali di interesse, può fungere da supporto al modulo per l'applicazione della pinch analysis, che è stato sviluppato da UNIVAQ_DIIIE1 nell'ambito del PTR19-21 e ulteriormente potenziato nell'ambito del presente progetto (LA

2.3), al fine di consentire lo studio di processi industriali caratterizzati da variazioni temporali (su scala giornaliera o stagionale) dei flussi di energia coinvolti nel processo di integrazione termica.

- Al fine di testare e perfezionare i prodotti sviluppati da ENEA, il modulo risultante dall'integrazione tra il database per la caratterizzazione dei processi industriali e il modello per la valutazione dei profili tempo-dipendenti è stato applicato ad un caso di studio di letteratura (processo batch di produzione della birra), consentendo così di: caratterizzare i profili di carico termico giornalieri per riscaldamento e raffreddamento nei campi di temperatura operativi delle fasi di processo indagate; valutare in maniera preliminare le opportunità di integrazione termica tra le correnti calde e fredde coinvolte attraverso la valutazione di un indice di recupero (RI); calcolare il profilo annuale dei consumi di energia termica per riscaldamento e raffrescamento e le corrispondenti curve di durata, assumendo delle potenziali fluttuazioni mensili della produzione basate sui dati desunti dall'analisi delle diagnosi energetiche relative al settore della produzione della birra.
- L'analisi delle diagnosi energetiche ha permesso di individuare tre casi di studio di processi industriali reali nel settore alimentare (produzione di prodotti caseari e di pasta essiccata) e nel settore tessile (finissaggio di tessuti) caratterizzati da variazioni temporali a carattere giornaliero e stagionale.
- Al fine di testare l'efficacia degli strumenti sviluppati nell'ambito delle LA 2.1-2.3, è stato esaminato un caso di studio relativo alla produzione di pasta essiccata caratterizzato da variazioni stagionali delle richieste di energia termica associate sia a fluttuazioni dei livelli produttivi, che delle richieste energetiche della fase di essiccamento (conseguenti alle variazioni della temperatura dell'aria ambiente). Tale studio ha richiesto una preliminare analisi della diagnosi energetica del sito produttivo, al fine di raccogliere le informazioni necessarie alla caratterizzazione dei flussi di energia termica coinvolti nel processo produttivo e delle sorgenti di calore di scarto presenti e alla quantificazione delle cause di fluttuazione del processo produttivo stesso. In particolare, il dimensionamento ottimale della rete di scambiatori di calore è stato condotto dapprima in condizioni nominali ed in seguito tenendo conto delle potenze termiche effettivamente richieste dal processo in due periodi caratteristici, ovvero uno corrispondente al periodo invernale ed uno al periodo estivo. Per ciascuno dei casi indagati, è stato realizzato il dimensionamento della rete di scambiatori, e sono stati valutati i benefici (in termini di riduzione delle utilities calde) associate al recupero del calore di scarto operato sui fumi di scarico delle caldaie e del cogeneratore e sull'acqua di raffreddamento del secondo stadio dell'intercooler del cogeneratore.

Il database integrato avrà ricadute positive per gli utenti del sistema elettrico in quanto permetterà alle aziende una più agevole caratterizzazione delle richieste di energia termica per riscaldamento/raffreddamento dei processi industriali e delle loro possibili variazioni temporali (analisi energetica tempo-dipendente). Inoltre, il modello per l'applicazione della pinch-analysis costituirà uno strumento flessibile e liberamente accessibile che permetterà alle aziende di esaminare diverse tipologie di processi produttivi (continui e batch) nell'ottica di ottimizzarne i fabbisogni energetici. Ciò si tradurrà nel medio-lungo termine in una maggiore competitività delle aziende, in un miglioramento dell'impronta ambientale dei prodotti e in una diminuzione della dipendenza da combustibili fossili.

3 Prodotti attesi

I deliverable previsti dal capitolato per la linea di attività LA 2.2 sono così riassunti:

- Rapporto tecnico riguardante l'ideazione di una metodologia per l'implementazione di profili tempo-dipendenti delle richieste/disponibilità di energia termica, la creazione di una versione aggiornata e potenziata del modulo per l'applicazione della pinch analysis e la discussione dei principali risultati derivanti dal suo utilizzo a diversi casi di studio. All'interno del rapporto tecnico di dettaglio sarà contenuto anche un capitolo dedicato alla descrizione delle attività di coordinamento nel WP, in particolar modo con i cobeneficiari coinvolti nel gruppo di LA 2.1-2.3.
- Strumento software integrato sviluppato sulla base del modulo per l'applicazione della pinch-analysis elaborato nel precedente triennio e comprendete il database per la caratterizzazione dei processi industriali (sviluppato da ENEA in collaborazione con UNIVAQ_DIIIE1) e il modulo per la valutazione di profili tempo-dipendenti delle richieste/disponibilità di energia termica (deliverable sviluppato da UNIVAQ_DIIIE1 con il supporto di ENEA).

4 Prodotti sviluppati

I prodotti sviluppati nel corso della LA 2.2 sono i seguenti:

- Rapporto tecnico contenente una descrizione sintetica delle principali attività svolte e dei risultati conseguiti, tra cui: il perfezionamento del database di caratterizzazione dei processi industriali; l'ideazione e l'implementazione di una metodologia per la valutazione di profili tempo-dipendenti delle richieste/disponibilità di energia termica in ambito industriale; l'integrazione degli strumenti sviluppati e la loro applicazione a casi di studio; la descrizione delle attività di coordinamento con il cobeneficiario e l'attività di disseminazione svolta.
- Un database integrato per la caratterizzazione dei processi industriali e la generazione di profili tempo-dipendenti delle richieste di energia termica per riscaldamento/raffreddamento, implementato in ambiente Excel/VBA. Tale strumento software, unitamente al modulo per l'applicazione della pinch-analysis sviluppato da UNIVAQ_DIIIE1 nel PTR 19-21 e perfezionato nell'ambito della LA 2.3 del PTR 22-24, sarà reso accessibile agli utenti attraverso il sito ufficiale ENEA.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Le attività condotte e i risultati conseguiti non presentano scostamenti sostanziali rispetto alle attività previste e ai risultati attesi. Come previsto dal piano di rischio definito nel capitolato, la mancanza di dati relativi ai processi industriali reali è stata sopperita grazie ad un'accurata analisi di letteratura, che ha riguardato articoli scientifici, report tecnici e documenti prodotti da altri enti di ricerca o associazioni industriali; inoltre, l'attenta indagine delle diagnosi energetiche di grandi aziende e aziende energivore consegnati a ENEA in adempimento al D.Lgs. 102/2014, ha permesso di individuare dei casi di studio utili alla validazione ed al perfezionamento degli strumenti sviluppati nell'ambito della LA 2.2.

6 Sintesi delle attività svolte

L'attività svolta ha riguardato il perfezionamento e l'ulteriore popolamento del database per la caratterizzazione dei processi industriali. L'analisi della letteratura ha consentito un arricchimento dei dati inerenti alle richieste di energia termica delle singole fasi di processo (+30%) e l'integrazione di 40 moduli relativi a casi di studio per l'applicazione della pinch analysis. Quindi sono state analizzate le diagnosi energetiche dei settori industriali di interesse, al fine di reperire dati utili a quantificare le cause di fluttuazione temporale dei processi industriali. Sulla base di tali informazioni e di quelle raccolte nel database, è stata ideato ed implementato in ambiente Excel/VBA un modello per la creazione di profili tempo-dipendenti delle richieste di energia termica dei processi industriali. Gli strumenti sviluppati da ENEA e UNIVAQ_DIIIE1 sono stati integrati e quindi applicati a casi di studio di letteratura o reali, al fine di testarne e migliorarne l'efficacia.

7 Dettaglio delle attività svolte

La LA 2.2 costituisce il proseguimento della LA 2.1, nell'ambito della quale era stata definita la struttura preliminare del database per la caratterizzazione energetica dei processi industriali e realizzato il suo iniziale popolamento. Il database prevede la caratterizzazione di cinque settori industriali (alimentare e bevande, carta, tessile, chimico e metalli) sulla base di quattro distinti livelli di approfondimento: il 1° livello riguardante i singoli settori e relativi sottosettori, il 2° livello inerente ai prodotti di uno specifico sottosettore, il 3° livello riguardante le fasi di processo di uno specifico prodotto e il 4° livello relativo a specifici casi di studio di processi industriali con potenzialità per l'applicazione della pinch analysis per la progettazione o retrofit di reti di scambiatori di calore.

7.1 Perfezionamento del database per la caratterizzazione dei processi industriali

Nel corso della LA 2.2 è stato condotto un arricchimento e perfezionamento del database per la caratterizzazione energetica dei processi industriali. Rispetto alla versione risultante al termine della LA 2.1, il numero di record relativi a dati caratterizzanti le richieste energetiche delle singole fasi di processo (3° livello) è cresciuto complessivamente di oltre il 30%, passando da 465 a 610. Come mostrato in dettaglio in Figura 1, tale incremento ha interessato principalmente i settori *alimentare e bevande* (+26%), *tessile* (+36%) e *chimico* (+91%). Per quanto riguarda il primo, il maggior incremento del numero di record si è registrato in quattro sottosettori: *produzione della birra, caseario, lavorazione di frutta e ortaggi e prodotti da forno*. Nel settore *tessile*, il numero di record è cresciuto esclusivamente nel sottosettore inerente al *finissaggio dei tessuti*. Infine, nel settore *chimico*, l'ulteriore popolamento ha interessato tutti i sottosettori esplorati ed in particolare quello relativo alla *fabbricazione di articoli in materie plastiche* (Figura 2).

Nell'ambito della LA 2.2, il numero di casi di studio di processi industriali (continui o batch) con potenzialità per l'applicazione della pinch-analysis (4° livello) è cresciuto in maniera significativa, passando da 3 a 42. La quasi totalità dei casi di studio ricade nel settore *alimentare e bevande* (32), mentre i restanti sono ripartiti pressoché equamente tra i settori *carta* (3), *tessile* (4) e *chimico* (3).

È stata inoltre perfezionata la struttura del database, in termini di numero e tipologia di campi di informazione. Le modifiche più importanti hanno riguardato la struttura dei moduli relativi ai dati di 3° livello (nei quali è stato inserito un campo per specificare se i dati si riferiscono a best available techniques) e quella relativa ai dati di 4° livello. Quest'ultima ha subito una profonda rivisitazione sulla base delle informazioni desunte dagli studi di letteratura e dalle diagnosi energetiche. La Tabella 1 riassume i campi di informazione contenuti nei moduli del database relativi ai casi di studio nella loro versione ultima. Tali moduli realizzano anche la valutazione del recovery index (RI), che fornisce un'indicazione dell'entità di energia termica recuperabile attraverso l'accoppiamento tra una sorgente calda ed una fredda rispetto a quella totale disponibile, fornendo così delle preliminari indicazioni circa gli accoppiamenti più opportuni tra fluidi di processo ai fini della progettazione di reti di scambiatori. In particolare, all'interno di ciascun modulo è presente una matrice (di dimensioni variabili in relazione al numero di correnti calde e fredde), i cui valori rappresentano l'indice di recupero relativo a ciascuno degli accoppiamenti tra correnti calde e fredde possibili, in relazione alle temperature delle correnti stesse e alle potenze termiche in gioco (Figura 3).

Infine, è stato inserito un foglio di lavoro (*INFO_DB_ENEA*) (Figura 4) che descrive la struttura del database, in modo da agevolarne la navigazione e l'acquisizione dei dati da parte dell'utente.

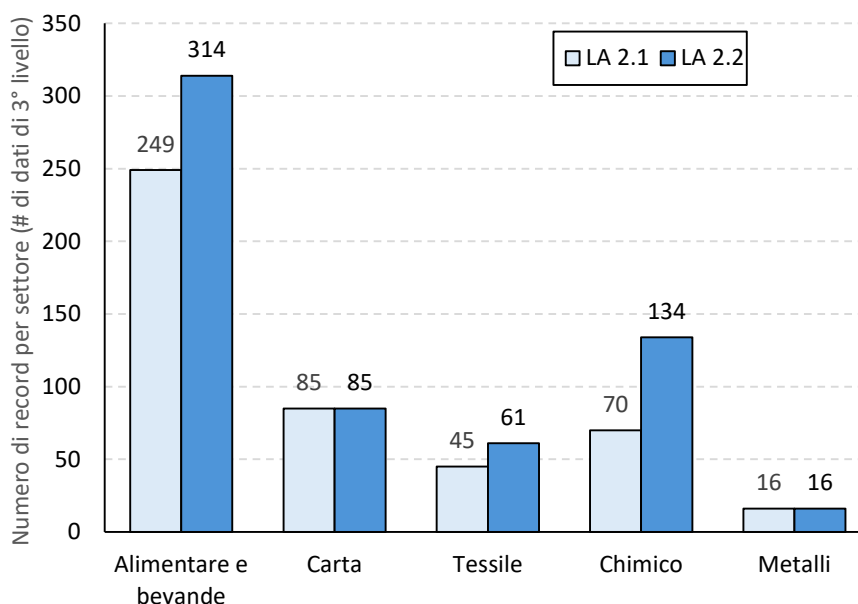


Figura 1. Confronto tra il numero di dati di terzo livello al termine della LA 2.1 e della LA 2.2 per i settori industriali oggetto di indagine

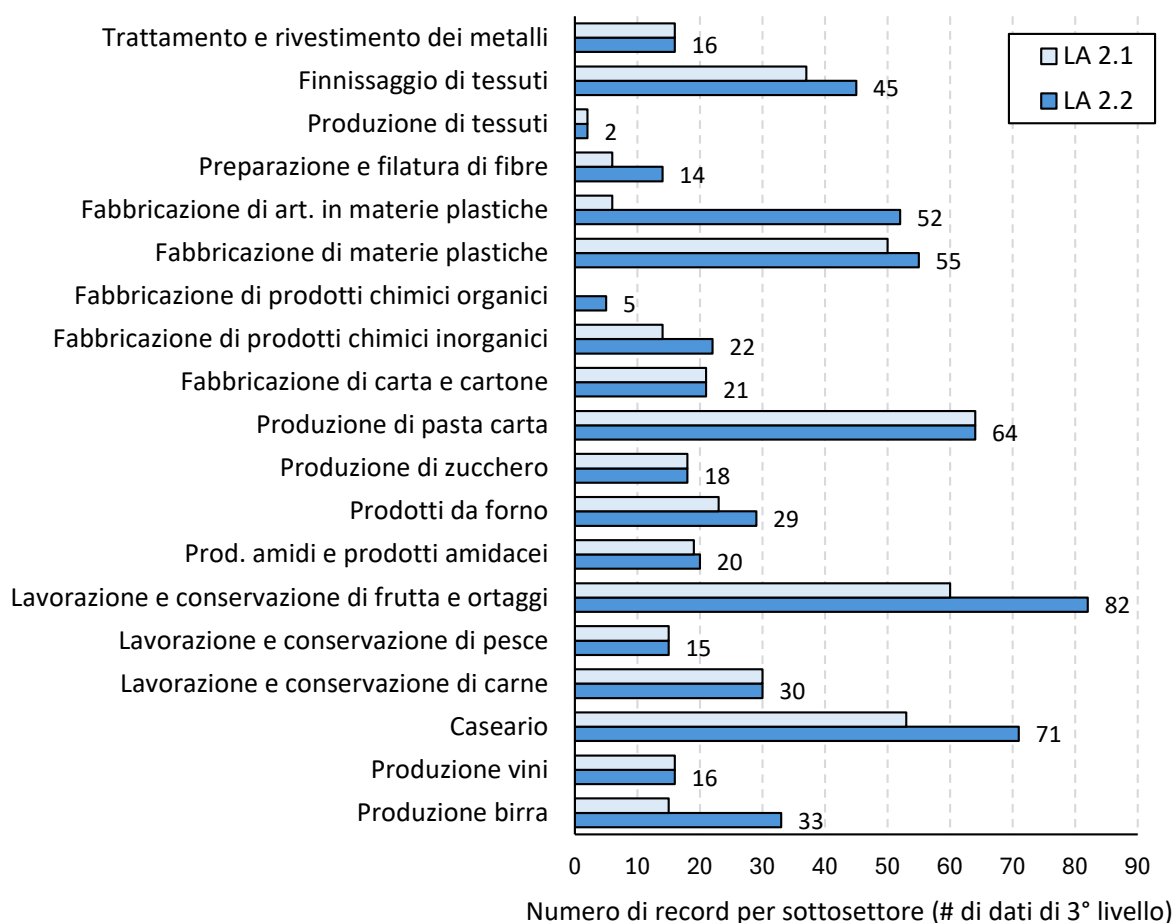


Figura 2. Confronto tra il numero di dati di terzo livello al termine della LA 2.1 e della LA 2.2 per i sottosectori industriali oggetto di indagine

Tabella 1. Struttura dei moduli relativi ai singoli casi di studio (dati di 4° livello): campi di informazione presenti al termine della LA 2.2 e relativa descrizione

Campo	Descrizione
Tipo di prodotto	Prodotto risultante dal processo
Unità funzionale	Unità di misura prescelta per definire la capacità dell'impianto produttivo
Capacità nominale dell'impianto (unità funzionale)	Capacità produttiva dell'impianto su base annuale
Numero di giorni (giorni/anno)	Numero di giorni di funzionamento su base annuale
Numero di batch (batch/giorno)	Numero di batch operati su base giornaliera (solo per processi batch)
Produzione giornaliera (unità/giorno)	Capacità produttiva giornaliera
Produzione per batch (unità/batch)	Capacità produttiva relativa al singolo batch (solo per processi batch)
Corrente	Descrizione della tipologia di corrente (ad es. acqua, aria, ecc.)
Fase di processo	Descrizione della fase di processo
# corrente	Numero di corrente
Tipo di corrente	Tipologia di corrente (calda o fredda)
Portata (kg/s)	Portata della corrente
Calore specifico (kJ/kgK)	Calore specifico della corrente
Portata x Calore specifico (kW/K)	Prodotto tra la portata e il calore specifico della corrente
Capacità termica (kJ/K)	Capacità termica associata alla corrente
Temperatura iniziale (°C)	Temperatura della corrente iniziale
Temperatura finale (°C)	Temperatura della corrente finale
Potenza termica (kW)	Potenza termica richiesta dalla fase di processo
t_start [h]	Istante iniziale della fase di processo
t_stop [h]	Istante finale della fase di processo
Δt (min)	Intervallo della fase di processo espresso in minuti
Energia termica (kWh/year)	Energia termica richiesta su base annuale
Intensità energetica (MJ/unità funzionale)	Energia richiesta dalla fase di processo per unità funzionale
Tipo di processo (batch o continuo)	Descrizione della tipologia di processo in rapporto alla durata
Intervallo di tempo giornaliero (ore/giorno)	Durata della fase di processo su base giornaliera
Numero di giorni in un anno (giorni/anno)	Numero di giorni all'anno in cui viene operata la fase di processo
Intervallo di tempo annuale (ore/anno)	Durata della fase di processo su base annuale

	correnti calde																													
correnti fredde	1	2	3						9	10	11	12	13	14	15															
4																0.552														0.058
5																														
6																														
7																														
8																														
16																	0.013							0.013				0.013	0.013	0.013
17																		0.016											0.016	0.015
18																														0.058
max RI																0.552	0.013	0.016						0.013				0.013	0.058	0.015
correnti calde																4	16	17						16				16	4	17

Figura 3. Struttura dei moduli relativi ai singoli casi di studio (dati di 4° livello): matrice per il calcolo dell'RI per i possibili accoppiamenti di correnti definiti imponendo il vincolo che la temperatura della sorgente calda superi quella della sorgente fredda e che la potenza scambiata sia la minima tra quella richiesta (dalla sorgente fredda) e quella resa disponibile (dalla sorgente calda)

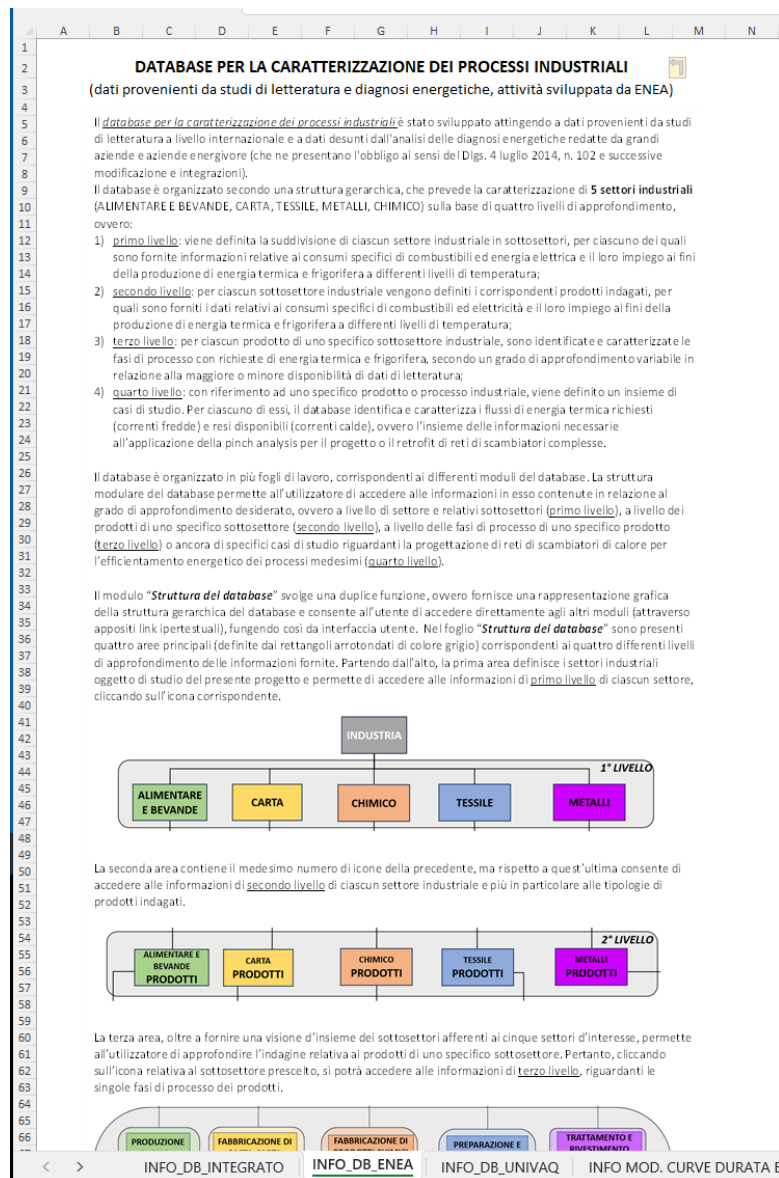


Figura 4. Descrizione della struttura del database per la caratterizzazione dei processi industriali sviluppato da ENEA

7.2 Analisi delle diagnosi energetiche dei settori industriali di interesse

Al fine di reperire ulteriori informazioni circa i possibili fattori responsabili delle fluttuazioni temporali dei processi industriali, sono state analizzate le diagnosi energetiche dei sottosettori industriali per i quali è stato possibile reperire il maggior numero di dati in fase di popolamento del database. È stato analizzato oltre l'80% delle diagnosi complessivamente disponibili per l'insieme dei sottosettori indagati, di cui mediamente il 16% avente dati utili ai fini della LA 2.2 (Tabella 2).

Dalle diagnosi è stato possibile reperire dati con differente grado di dettaglio (Tabella 3) che ha confermato quanto evidenziato dall'analisi di letteratura circa le cause di fluttuazione dei processi produttivi (turni di lavoro, modalità dei processi produttivi, variazioni dei livelli produttivi e dei parametri ambientali) ed ha inoltre permesso di quantificare quelle associate a:

- variazioni mensili dei livelli di produzione (da imputare a variazioni della disponibilità di materie prime, delle richieste dei prodotti finiti, a fermo programmato o straordinario dell'impianto, ecc.);

- variazioni mensili o orarie dei consumi di energia termica, associate alle variazioni di produzione o di parametri ambientali che influenzano i fabbisogni di fasi di processo (ad es. l'essiccamento) o del condizionamento degli ambienti.

I dati reperiti hanno permesso di identificare i campi di variazione dei livelli di produzione e dei consumi di gas naturale dei sottosettori (Tabella 4) e definire dei trend annuali dei livelli mensili di produzione e consumi di gas naturale per specifici prodotti afferenti ai sottosettori industriali (Tabella 5). In Figura 5, Figura 6 e Figura 7 sono rappresentati a titolo di esempio i trend relativi alla produzione di birra, pane e biscotti, e carta. L'analisi delle diagnosi ha anche permesso di individuare tre casi di studio reali, integrati tra i dati di 4° livello del database.

Tabella 2. Numero di diagnosi energetiche totale, analizzate e con dati utili ai fini della LA 2.2 per i sottosettori indagati

Sottosettore	n. di diagnosi totale	n. di diagnosi analizzate	n. di diagnosi con dati	% di diagnosi analizzate sul totale	% di diagnosi con dati sul totale delle analizzate
Produzione birra	16	16	4	100	25
Caseario	131	131	27	100	20.6
Prodotti da forno	171	131	26	76.6	19.8
Lavorazione e conservazione di frutta e ortaggi	56	56	5	100	8.9
Lavorazione e conservazione di carne	251	227	22	90.4	9.6
Lavorazione e conservazione di pesce	13	13	7	100	53.8
Produzione di zucchero	3	3	2	100	66.7
Amidi e prodotti amidacei	7	7	2	100	28.6
Produzione vini	38	38	9	100	23.7
Tessile	497	329	40	66.2	12.2
Carta	172	138	40	80.2	28.9
Prodotti chimici inorganici	35	33	5	94.3	15.2
Materie plastiche	178	150	11	84.3	7.3

Tabella 3. Tipologia e livello di dettaglio temporale dei dati desunti dall'analisi delle diagnosi energetiche

Tipologia di dati	Livello di dettaglio temporale
Numero di turni di lavoro	giornaliero
Numero di ore di lavoro	giornaliero/annuo
Numero di giorni di lavoro	settimanale/annuale
Produzione	mensile/annuale
Consumi di gas naturale*	orario/mensile/annuale
Ripartizione dei consumi di energia termica tra utenze di processo e servizi generali	mensile/annuale

* principale vettore energetico per la generazione di calore di processo

Tabella 4. Campi di variazione dei livelli di produzione e dei consumi di gas naturale: valori riportati per il sottosettore
Produzione birra

	Produzione (hl)	Consumi specifici (Sm ³ /hl)
media	2992426.5	2.09
mediana	1842675.0	1.72
min	2000.0	0.16
max	13366770.0	4.95
primo quartile (25%)	792777.3	1.03
secondo quartile (50%)	1842675.0	1.72
terzo quartile (75%)	2615230.8	2.89
quarto quartile (100%)	13366770.0	4.95

Tabella 5. Tipologie di prodotti per i quali è stato possibile valutare le tendenze annuali dei livelli di produzione e dei consumi di gas naturale

Settore	Sottosettore	Prodotto
Alimentare	Produzione di birra	Birra
Alimentare	Caseario	Prodotti caseari
Alimentare	Prodotti da forno	Pane e biscotti
Alimentare	Prodotti da forno	Prodotti lievitati per ricorrenze
Alimentare	Prodotti da forno	Pasta fresca ed essiccata
Alimentare	Lavorazione e conservazione di carne	Macellazione, lavorazione di carni suine e bovine
Alimentare	Lavorazione e conservazione di carne	Salumi
Alimentare	Lavorazione e conservazione di carne	Macellazione e lavorazione di carni ovine
Alimentare	Lavorazione e conservazione di pesce	Prodotti ittici freschi e congelati
Alimentare	Lavorazione e conservazione di frutta e verdura	Prodotti a base di patate
Alimentare	Lavorazione e conservazione di frutta e verdura	Puree e succhi di frutta
Alimentare	Produzione di zucchero	Zucchero
Alimentare	Produzione di amidi e prodotti amidacei	Amidi e prodotti amidacei
Alimentare	Produzione di vini	Vini e spumanti
Tessile	Preparazione e filatura di fibre	Filati
Tessile	Finissaggio di tessuti	Tessuti
Carta	Fabbricazione di carta e cartone	Carta
Chimico	Fabbricazione di prodotti chimici inorganici	Prodotti chimici inorganici
Chimico	Fabbricazione di materie plastiche	Materie plastiche

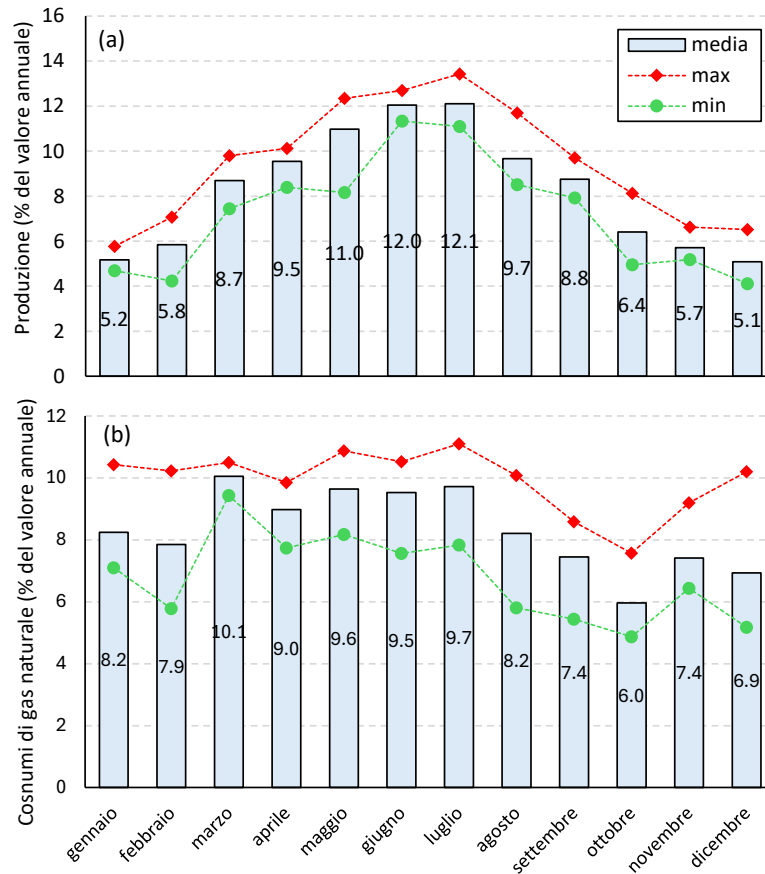


Figura 5. Trend annuale della produzione (a) e dei consumi di gas naturale (b) relativi alla produzione di *birra* (valori medi, massimi e minimi calcolati sull'insieme di diagnosi con dati utili ai fini dell'indagine)

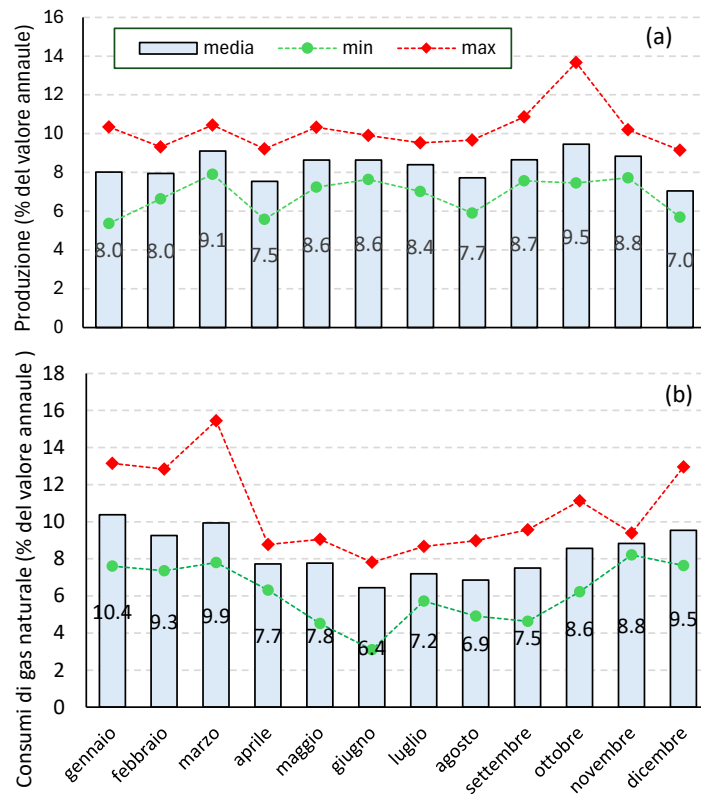


Figura 6. Trend annuale della produzione (a) e dei consumi di gas naturale (b) relativi alla produzione di *pane e biscotti* (valori medi, massimi e minimi calcolati sull'insieme di diagnosi con dati utili ai fini dell'indagine)

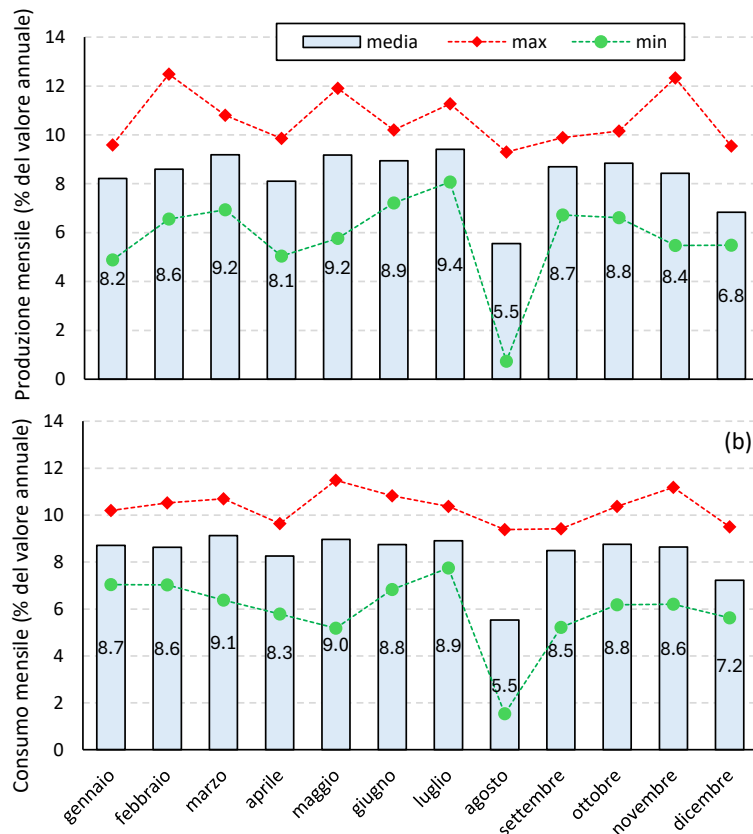


Figura 7. Trend annuale della produzione (a) e dei consumi di gas naturale (b) relativi alla produzione di carta (valori medi, massimi e minimi calcolati sull'insieme di diagnosi con dati utili ai fini dell'indagine)

7.3 Definizione di una metodologia per la creazione di profili tempo-dipendenti delle richieste/disponibilità di energia termica

È stata definita una metodologia in grado di individuare i profili tempo-dipendenti dei fabbisogni di energia termica per riscaldamento e raffreddamento dei processi industriali. La metodologia richiede che l'utente definisca le richieste energetiche delle singole fasi di processo, in termini di potenze termiche richieste, livelli di temperatura, intervallo temporale delle fasi, ecc., nel periodo oggetto di studio. Tali informazioni possono essere definite dall'utente o reperite nella sezione dei casi di studio del database per la caratterizzazione dei processi industriali. Sulla base di tali dati e di ulteriori informazioni riguardanti i periodi operativi dell'impianto e i fattori di variazione dei consumi di energia termica (tra cui ad esempio la stagionalità della produzione), il modello effettua degli step di calcolo intermedi (STEP 3, 5, 7 e 8), che conducono alla valutazione degli output descritti nello schema a blocchi di Figura 8.

La metodologia è stata implementata in ambiente Excel/VBA, attraverso la creazione di sei moduli, di cui il primo (*Input_mod_gen_curva_durata*) consente l'inserimento dei dati di input (Figura 9) e funge da interfaccia con gli altri cinque (Figura 10) che hanno carattere operativo e le cui funzioni principali sono descritte all'interno del foglio di lavoro *INFO MOD. CURVE DURATA ENEA* del database integrato (Figura 11).

Di seguito è riassunto un esempio di utilizzo del modulo per la creazione dei profili tempo-dipendenti per un caso di studio riguardante un processo batch di produzione della birra. Sulla base dei dati di input relativi al tipo di energia termica richiesta (riscaldamento) e all'intervallo di temperatura (80-160°C) delle fasi di processo (Figura 9), il modello valuta: il profilo di carico orario corrispondente (Figura 12); il profilo di carico annuale di "base"; il profilo di carico

“rimodulato” (nel caso in esame sulla base dei livelli mensili di produzione dell’impianto)(Figura 13); la curva di durata corrispondente al profilo di carico rimodulato (Figura 14) e i relativi parametri caratteristici (Figura 15).

In Figura 16, Figura 17 e Figura 18 sono mostrati gli output del modello nel caso in cui, a parità di caso di studio, i consumi di energia termica si riferiscano ai fabbisogni per raffreddamento delle correnti calde nel campo operativo 0-120°C.

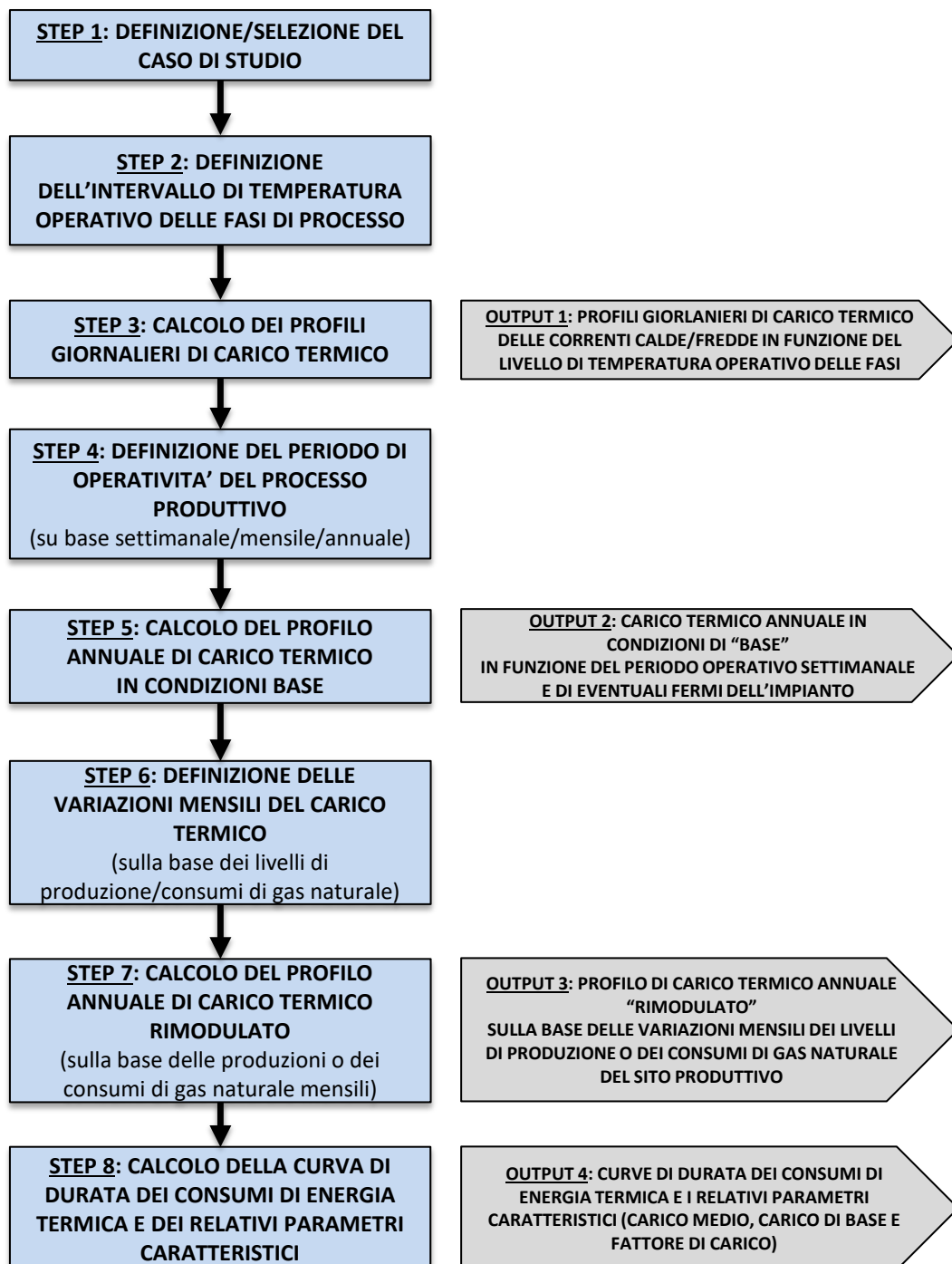


Figura 8. Schema a blocchi rappresentante i principali step della metodologia per la valutazione dei profili tempo-dipendenti dei consumi di energia termica in funzione dei livelli di temperatura delle fasi di processo indagate

DATI DI INPUT PER LA VALUTAZIONE DELLE CURVE DI DURATA DEI CONSUMI DI ENERGIA TERMICA (celle in giallo)

anno	2023	Giorni (numero di giorni/settimana)	5
data inizio	01/01/2023	Giorni (numero di giorni/anno)	365
data fine	31/12/2023	Tipo di calcolo	Basato sul trend di produzione
periodo di indagine (giorni)	365	Valori trend	media
numero di ore	8760	Consumo annuale di energia termica (kWh)	4293421.6
Tipo di energia termica richiesta	Riscaldamento		
Definizione del profilo associato al Caso_user	Caso_user/A1		

Periodo	T min_set (°C)	T max_set (°C)	T min (°C)	T max (°C)	numero max giorni/anno	numero ore profilo	tipo di profilo	data inizio periodo	data fine periodo	verifica giorni anno ok	Warning
Periodo 1	80	160	80	160	365	24	Caso_ALUM_1	01/01/23	31/12/23	365.00	

Figura 9. Modulo *Input_mod_gen_curva_durata*: area per l'inserimento dei dati di input richiesti dalla metodologia di valutazione dei profili tempo-dipendenti dei consumi di energia termica



Figura 10. Modulo *Input_mod_gen_curva_durata*: zona di interfaccia con i moduli operativi della modello per la creazione di profili tempo-dipendenti delle curve di durata dei consumi di energia termica dei processi industriali

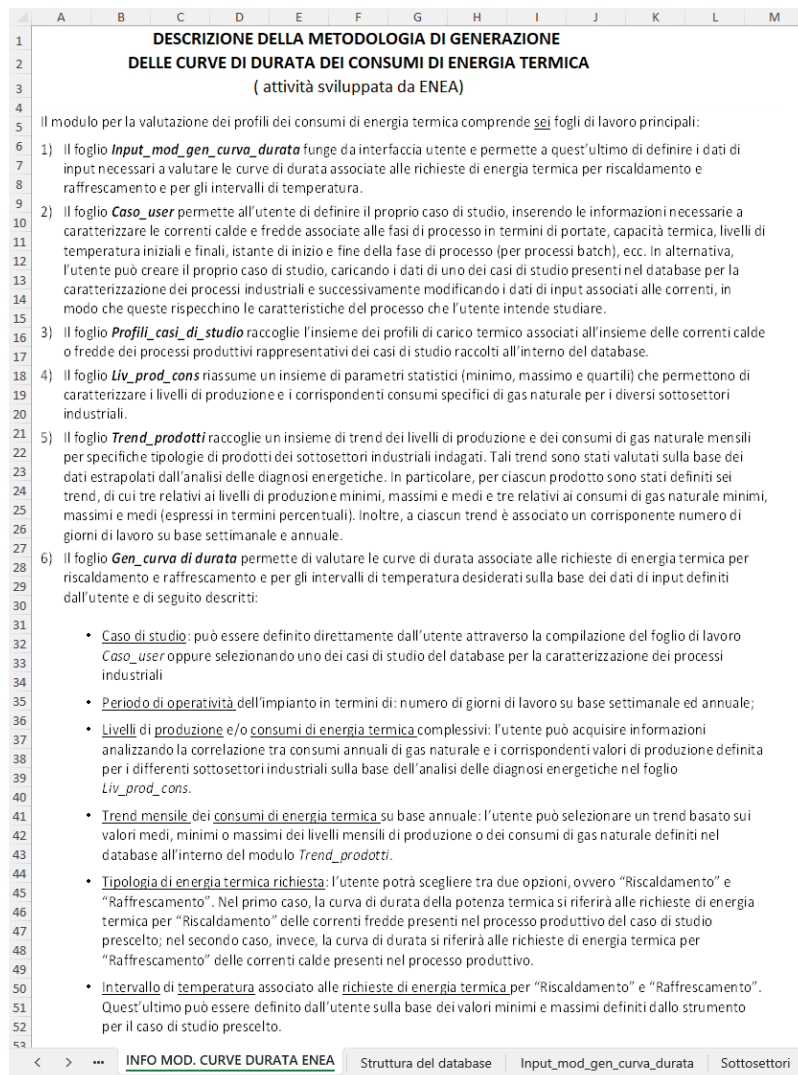


Figura 11. Descrizione della metodologia di generazione delle curve di durata dei consumi di energia termica nel foglio **INFO MOD. CURVE DURATA ENEA**

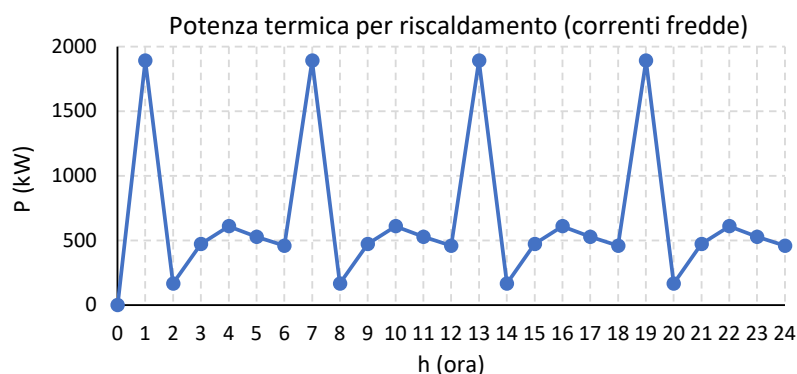


Figura 12. Profilo di carico giornaliero associato alle richieste di energia termica per riscaldamento del caso di studio **Caso-ALIM_1** (intervallo di temperatura 80-160°C)

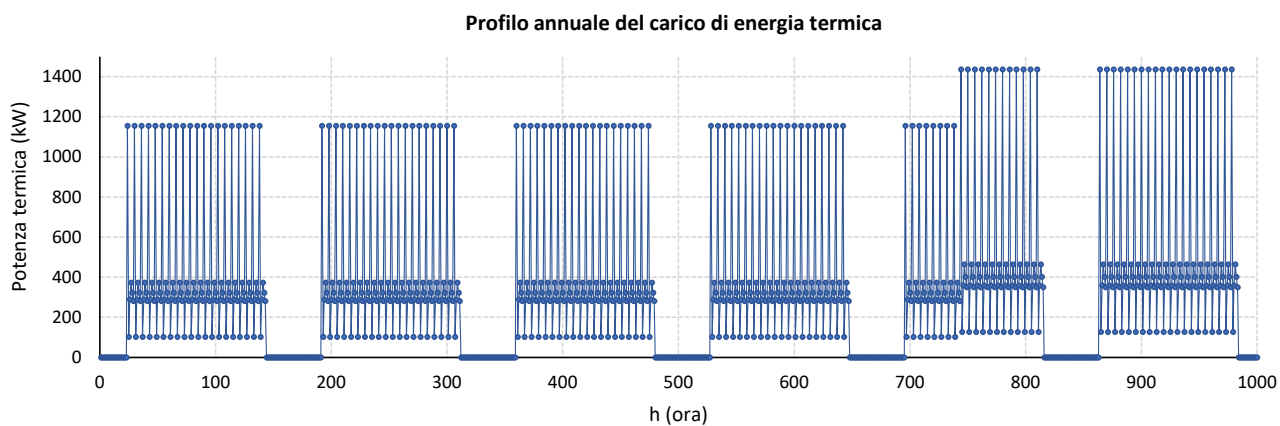


Figura 13. Profilo di carico annuale dei consumi di energia termica (dettaglio relativo ai primi 5 giorni dell'anno) rimodulato sulla base dei livelli mensili di produzione dell'impianto

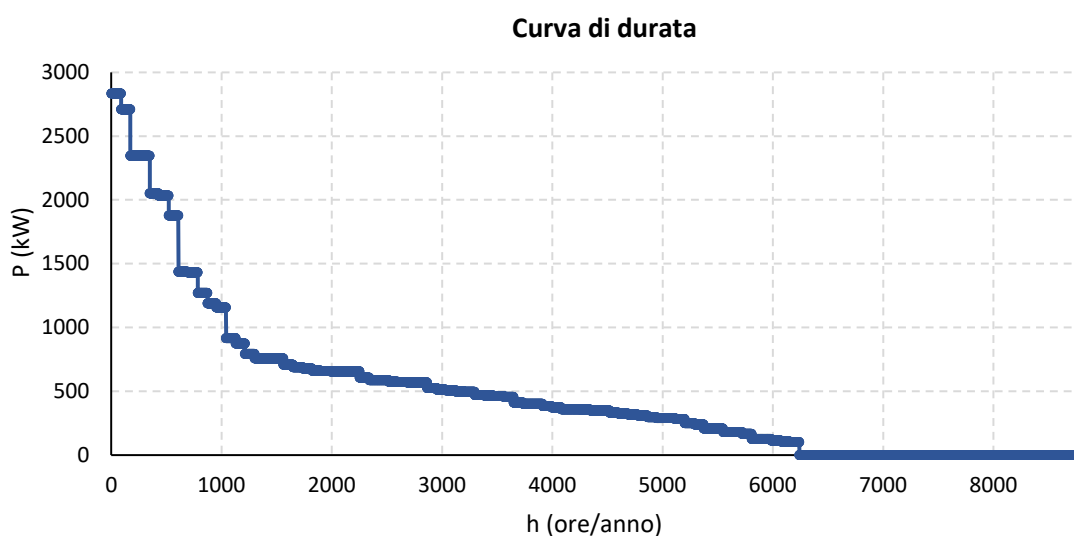


Figura 14. Curva di durata dei consumi di energia termica per riscaldamento delle correnti fredde

P_max (kW)	2834.2
P_base_load (kW)	101.8
P_avg_load (kW)	688.0
E_th (kWh)	4293422
Heat load factor	0.24
Valore di soglia del carico (kW)	1000
Durata del carico (h)	1040

Figura 15. Parametri caratteristici della curva di durata dei consumi di energia termica per riscaldamento: in ordine carico massimo, carico di base, carico medio, energia termica complessivamente richiesta, fattore di carico termico, e durata (in ore) a cui corrisponde un carico superiore al valore di soglia (1000 kW)

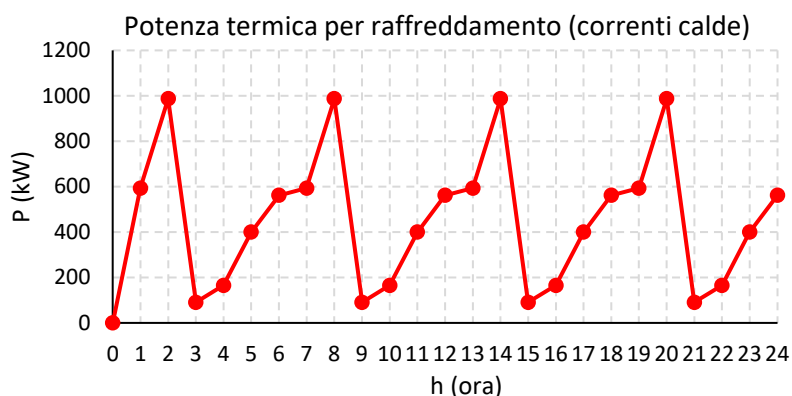


Figura 16. Profilo di carico giornaliero associato alle richieste di energia termica per raffreddamento del caso di studio Caso-ALIM_1 (intervallo di temperatura 0-120°C)

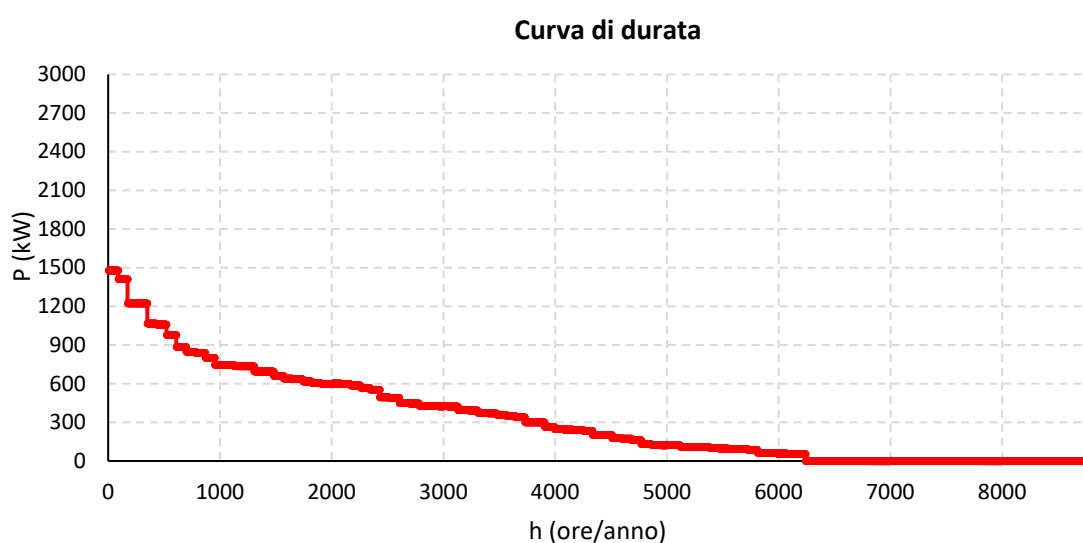


Figura 17. Curva di durata dei consumi di energia termica per raffreddamento delle correnti calde

P_max (kW)	1479.4
P_base_load (kW)	55.0
P_avg_load (kW)	466.0
E_th (kWh)	2907736
Heat load factor	0.31
Valore di soglia del carico (kW)	600
Durata del carico (h)	2080

Figura 18. Parametri caratteristici della curva di durata dei consumi di energia termica per raffreddamento: in ordine carico massimo, carico di base, carico medio, energia termica complessivamente richiesta, fattore di carico termico, e durata (in ore) a cui corrisponde un carico superiore al valore di soglia (600 kW)

7.4 Integrazione degli strumenti sviluppati e applicazione a casi di studio

Lo strumento sviluppato da ENEA è stato successivamente integrato con il database implementato da UNIVAQ_DIIIE1, risultando così in un unico database (Figura 19) in grado di:

- facilitare l'individuazione e la caratterizzazione dei flussi di energia termici coinvolti nei processi industriali;

- consentire la valutazione di profili tempo-dipendenti dei consumi di energia termica dell'intero processo o delle singole fasi e per specifici livelli di temperatura.

Il database integrato può essere utilizzato in modalità stand-alone o fungere da supporto al modulo per l'applicazione della pinch-analysis, che è stato potenziato nell'ambito della LA 2.3 per consentire lo studio di processi industriali caratterizzati da variazioni temporali (giornaliere o stagionali) dei flussi di energia coinvolti.

Al fine di realizzare delle analisi di scenario, sono stati introdotti dei modelli di costo (Tabella 6) per le utilities a supporto delle reti di scambiatori, in grado di riflettere la dipendenza dall'inflazione e dal costo dell'energia impiegata per la produzione delle medesime, fattori per i quali sono stati ipotizzati dei possibili trend di variazione (Figura 20, Figura 21).

Gli strumenti sviluppati sono stati applicati ad un caso di studio reale riguardante la produzione di pasta essiccata. L'intero studio è stato condotto da ENEA in collaborazione con UNIVAQ_DIIIIE1.

Il processo richiede energia termica per il riscaldamento dell'acqua degli impasti, dell'aria degli essiccatori, dei locali di processo e per la produzione di ACS. Tali fabbisogni sono soddisfatti grazie all'impiego di tre caldaie ed un cogeneratore, che producono acqua surriscaldata (135°C) e calda (90°C) (Figura 22).

La diagnosi energetica ha fornito i dati relativi alle correnti di processo servite da acqua surriscaldata (Tabella 7) e calda (Tabella 8) in condizioni nominali e ha permesso di individuare le principali cause di fluttuazione temporale del processo produttivo (Tabella 9), ovvero:

- le variazioni del numero di ore operative, con riflessi sulle produzioni e i carichi termici mensili;
- le variazioni stagionali della temperatura ambiente, con riflessi sui carichi termici delle linee di essiccazione e del riscaldamento degli ambienti.

Inizialmente la rete di scambiatori è stata progettata assumendo i valori nominali delle potenze termiche richieste dalle correnti fredde ed ipotizzando tre ulteriori recuperi di calore rispetto al layout d'impianto di Figura 22, ovvero il recupero di calore dai fumi delle caldaie e dal cogeneratore (fino alla temperatura di 120°C) e quello dall'acqua di raffreddamento del secondo stadio dell'intercooler del cogeneratore, che offre la possibilità di eliminare la torre evaporativa. Il modello per la pinch-analysis ha quindi permesso di valutare le superfici e costi degli scambiatori che realizzano i riscaldamenti interni ed esterni (Tabella 10, Tabella 11) e di stimare i costi operativi per la produzione delle utilities (Tabella 12). Come evidenziato dalle curve cumulative (Figura 23, Figura 24), il recupero di calore consente di ridurre l'energia termica delle utilities, a fronte di un costo di investimento associato all'installazione di scambiatori aggiuntivi (per gli scambi di calore interni) caratterizzato da tempi di ritorno inferiori ai 2 anni (Tabella 12).

Tenuto conto del trend di produzione e della temperatura dell'aria (Tabella 9), è stato condotto un ulteriore studio, assumendo che i carichi termici corrispondano a quelli effettivi, calcolati rimodulando i carichi nominali sulla base dell'energia termica prodotta da caldaie e cogeneratore e del numero di giorni di operativi degli stessi. Pertanto, il dimensionamento della rete in condizioni di massimo recupero energetico è stato condotto mediando i valori medi mensili delle potenze così ottenute e delle temperature dell'aria ambiente su due periodi caratteristici: uno rappresentativo della stagione invernale (Tabella 13 e Tabella 14) ed uno di quella estiva (Tabella 15 e Tabella 16). Con riferimento al caso "inverno", si riportano i disegni delle reti di scambiatori nella zona di alta (Figura 25) e bassa temperatura (Figura 26). Nel caso in cui si voglia garantire il soddisfacimento dei carichi in inverno ed estate, è opportuno

dimensionare la rete sulla base del caso “estivo”, che presenta le maggiori superfici degli scambiatori aggiuntivi (Tabella 17).

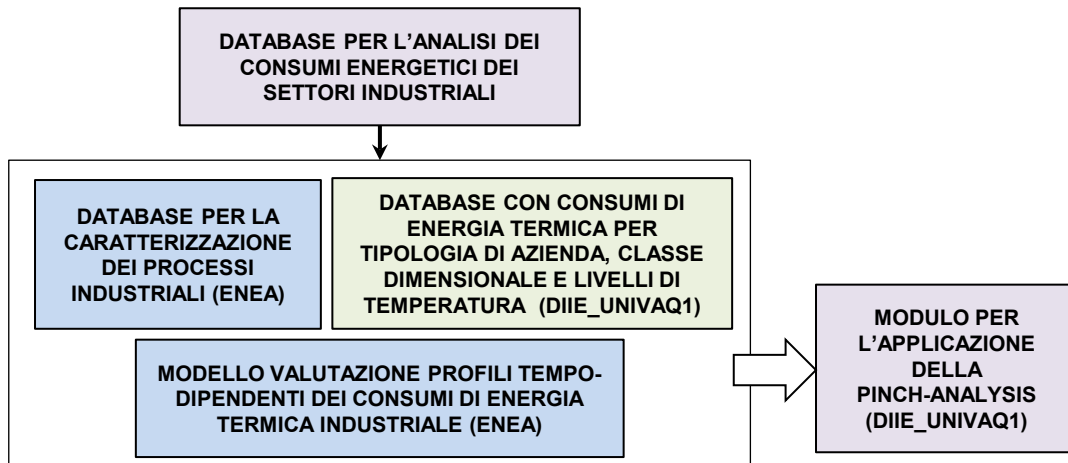


Figura 19. Struttura del database integrato per l’analisi dei consumi energetici dei settori industriali derivante dall’attività svolta da ENEA e UNIVAQ_DIIIE1 nell’ambito delle LA 2.1-2.3

Tabella 6. Modelli di costo per la valutazione delle utilities in funzione del Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI), del costo del combustibile C_{comb} impiegato per generare le utilities calde o l’energia elettrica per azionare le macchine adibite alla produzione delle utilities fredde, della potenza termica richiesta (Q_u) e relativa temperatura (T_u) o della portata di acqua (q)

$$C_u = a \cdot CEPCI + b \cdot C_{comb}$$

Parametri del modello	a (\$/kJ)	b (-)	Q_u (kW)	T_u (K)	q (m ³ /s)
Tipo di utility					
Vapore, acqua calda	$6 \cdot 10^{-7} Q_u^{-0.9} T_u^{0.5}$	$6 \cdot 10^{-8} T_u^{0.5}$	100-20000	350-850	-
Refrigerante	$0.5 Q_u^{-0.9} T_u^{-3}$	$1.1 \cdot 10^6 T_u^{-5}$	1-1000	0-300	-
Acqua di raffreddamento	$0.00007 + 2.5 \cdot 10^{-5} q^{-1}$	0.003	-	-	0.01-10

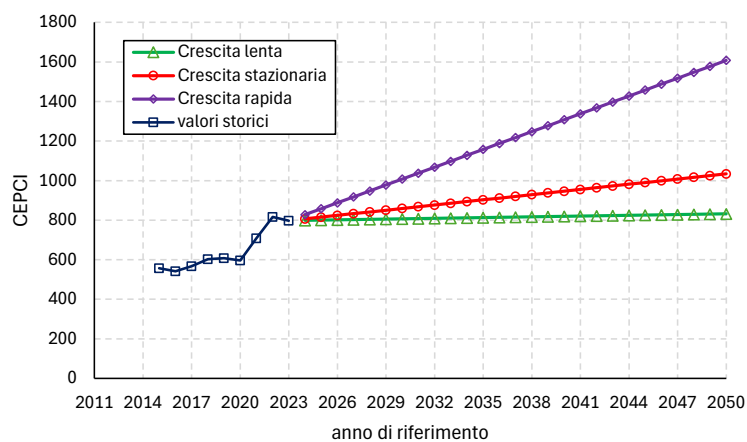


Figura 20. Valori storici del CEPCI e potenziali scenari di crescita: crescita lenta (+0.2%/anno), crescita stazionaria (+1%/anno) e crescita rapida (+4%/anno)

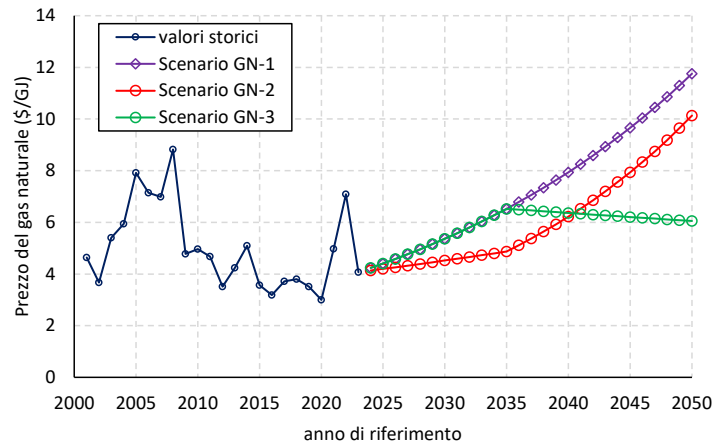


Figura 21. Valori storici del costo del gas naturale e potenziali scenari di crescita: Scenario GN-1 (crescita costante +4%/anno), Scenario GN-2 (crescita dell'1.5% fino 2035 e del 5% dal 2035 al 2050) e Scenario GN-3 (crescita dell'4% fino 2035 e del -0.5% dal 2035 al 2050)

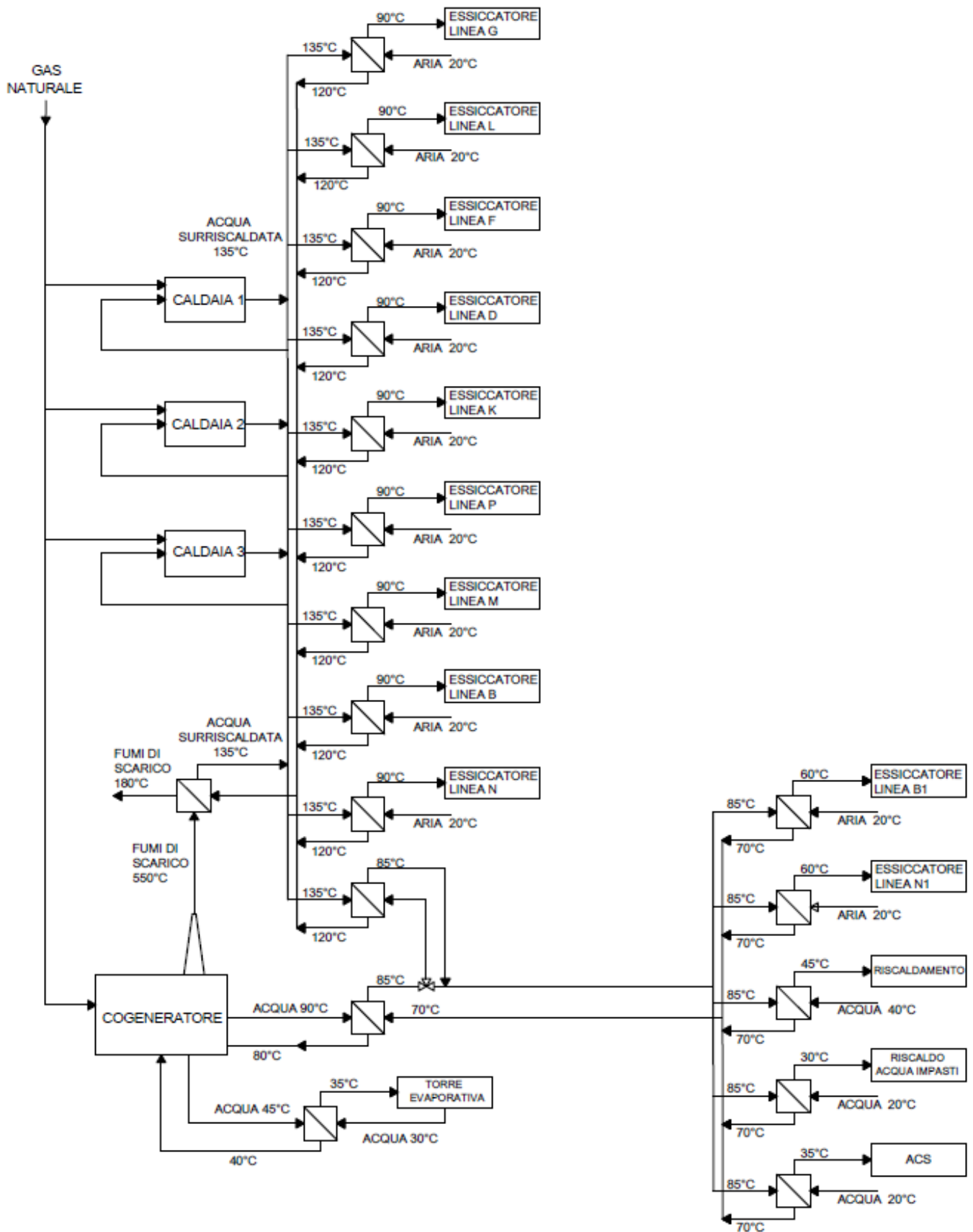


Figura 22. Schema delle linee di distribuzione dell'energia termica a due livelli di temperatura (135°C e 90°C) alle utenze di processo: 11 linee di essiccamento della pasta, riscaldamento acqua impasti, riscaldamento locali di produzione e ACS

Tabella 7. Caratterizzazione delle correnti fredde di processo e delle correnti calde (fumi di scarico caldaie e cogeneratore) con potenzialità di recupero di calore nella zona di alta temperatura in condizioni nominali

Descrizione corrente	n° di corrente	Tipo di corrente	Capacità termica (kW/K)	Temperatura iniziale (°C)	Temperatura finale (°C)	Potenza termica (kW)
aria in ingresso all'essiccatore linea G	1	fredda	10.50	20	90	734.7
aria in ingresso all'essiccatore linea L	2	fredda	14.82	20	90	1037.3
aria in ingresso all'essiccatore linea F	3	fredda	7.22	20	90	505.3
aria in ingresso all'essiccatore linea D	4	fredda	8.00	20	90	560.0
aria in ingresso all'essiccatore linea K	5	fredda	8.51	20	90	596.0
aria in ingresso all'essiccatore linea P	6	fredda	3.40	20	90	237.7
aria in ingresso all'essiccatore linea M	7	fredda	3.39	20	90	237.0
aria in ingresso all'essiccatore linea B	8	fredda	3.23	20	90	226.3
aria in ingresso all'essiccatore linea N	9	fredda	3.24	20	90	227.0
riscaldamento locali produttivi	10	fredda	19.12	40	45	95.6
fumi cogeneratore	11	calda	0.79	180	120	47.3
fumi caldaie	12	calda	2.14	180	120	128.3

Tabella 8. Caratterizzazione delle correnti fredde di processo e della corrente calda con potenzialità di recupero di calore (acqua di raffreddamento del secondo stadio dell'intercooler) nella zona di bassa temperatura in condizioni nominali

Descrizione corrente	n° di corrente	Tipo di corrente	Capacità termica (kW/K)	Temperatura iniziale (°C)	Temperatura finale (°C)	Potenza termica (kW)
aria in ingresso all'essiccatore linea B1	1	fredda	3.36	20	60	134.3
aria in ingresso all'essiccatore linea N1	2	fredda	3.38	20	60	135.0
acqua per il riscaldamento degli impasti	3	fredda	6.67	20	30	66.7
ACS	4	fredda	0.64	20	35	9.6
acqua di raffreddamento secondo stadio dell'intercooler	5	calda	13.82	45	40	69.1

Tabella 9. Dati di produzione e consumi di energia termica del processo di produzione di pasta essiccata e temperatura media dell'aria ambiente (*valori esatti non mostrati per ragioni di riservatezza)

	Produzione (%)	Consumi di energia termica (%)	Temperatura media aria ambiente (°C)
Gennaio	8.9	10.2	1.9
Febbraio	9.7	10.6	3.1
Marzo	9.2	8.4	7.4
Aprile	7.0	5.7	11.2
Maggio	7.6	6.6	15.5
Giugno	7.4	8.5	20.1
Luglio	10.0	5.2	22.6
Agosto	5.0	5.2	22.1
Settembre	9.1	10.5	17.7
Ottobre	8.2	7.9	12.7
Novembre	9.2	9.9	7.0
Dicembre	8.8	11.2	2.5
Anno	40000-50000 t*	10000-18000 MWh*	

Tabella 10. Progetto della rete di alta temperatura con recupero di calore dai fumi delle caldaie e dal cogeneratore in condizioni nominali: specifiche e costi degli scambiatori di calore interni ed esterni

	Potenza termica scambiata (kW)	Fluido freddo	Fluido caldo	T _{f,IN} (°C)	T _{f,OUT} (°C)	T _{c,IN} (°C)	T _{c,OUT} (°C)	U (W/m ² K)	LMTD (K)	A (m ²)	C _{hx} (\$)
hx-01	128.3	8	12	20	59.7	180	120	50.0	109.8	23.4	22319.8
hx-02	47.3	2	11	20	23.2	180	120	50.0	126.3	7.5	7325.0
hu-01	734.7	1	hu	20	90	135	120	85.7	68.9	124.4	117110.3
hu-02	596.0	5	hu	20	90	135	120	85.7	68.9	101.0	95201.3
hu-03	560.0	4	hu	20	90	135	120	85.7	68.9	94.9	89501.9
hu-04	505.3	3	hu	20	90	135	120	85.7	68.9	85.6	80838.1
hu-05	237.7	6	hu	20	90	135	120	85.7	68.9	40.3	38258.5
hu-06	237.0	7	hu	20	90	135	120	85.7	68.9	40.1	38152.1
hu-07	227.0	9	hu	20	90	135	120	85.7	68.9	38.4	36556.2
hu-08	95.6	10	hu	40	45	135	120	272.7	84.9	4.1	4139.0
hu-09	990.0	2	hu	23.2	90	135	120	85.7	67.6	170.8	160139.4
hu-10	98.0	8	hu	59.7	90	135	120	85.7	52.3	21.9	20921.8

Tabella 11. Progetto della rete di bassa temperatura con recupero di calore dal secondo stadio dall'intercooler in condizioni nominali: specifiche e costi degli scambiatori di calore interni ed esterni

	Potenza termica scambiata (kW)	Fluido freddo	Fluido caldo	$T_{f,IN}$ (°C)	$T_{f,OUT}$ (°C)	$T_{c,IN}$ (°C)	$T_{c,OUT}$ (°C)	U (W/m ² K)	LMTD (K)	A (m ²)	C_{hx} (\$)
hx-01	33.3	4	6	20	25	44.2	40	250.0	19.6	6.8	6670
hx-02	8.7	2	6	20	22.6	44.2	40	83.3	20.8	5.0	5002
hx-03	6.6	1	6	20	22	44.2	40	83.3	21.1	3.7	3767
hx-04	9.6	5	6	20	35	44.2	40	250.0	13.9	2.7	2832
hu-01	33.3	4	hu	25	30	85	70	272.7	49.8	2.5	2552
hu-02	126.3	2	hu	22.6	60	85	70	85.7	35.0	42.1	39963
hu-03	127.8	1	hu	22.0	60	85	70	85.7	35.3	42.3	40141

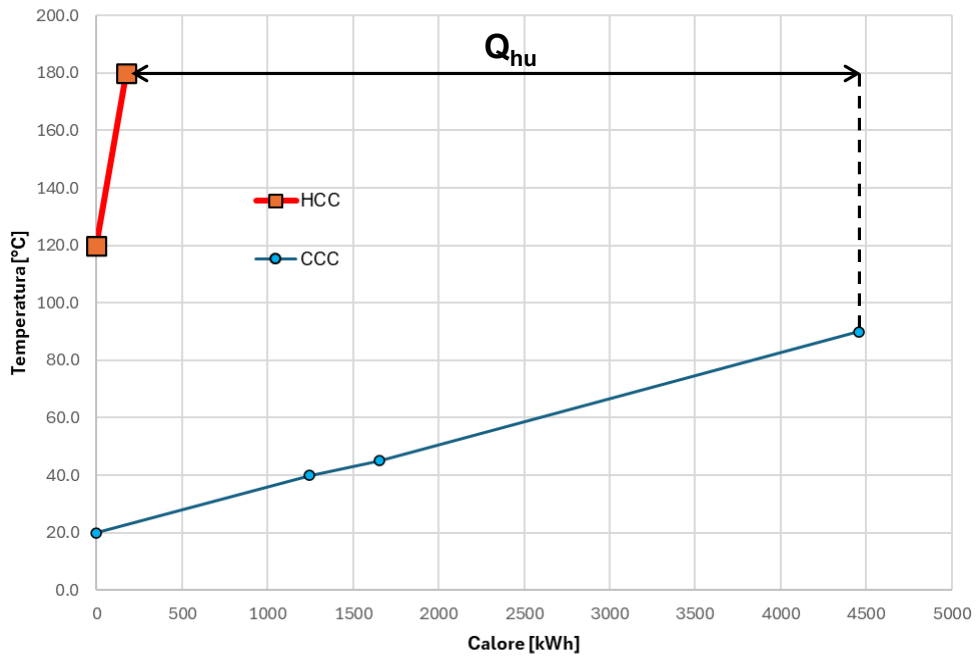


Figura 23. Curve cumulative dei fluidi caldi e freddi nella zona di alta temperatura assumendo il recupero di calore dai fumi delle caldaie e del cogeneratore

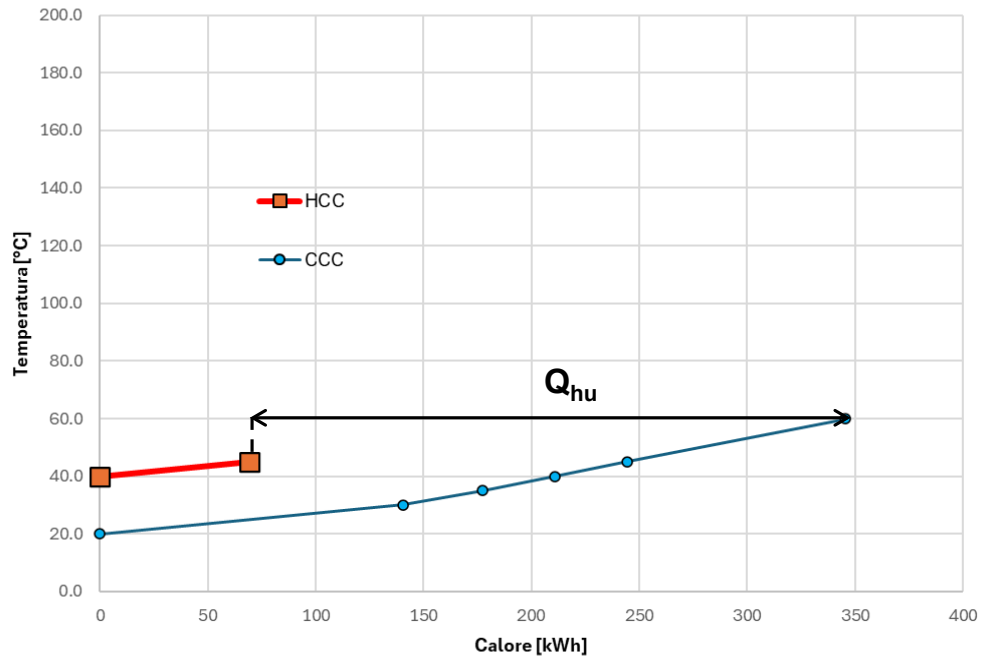


Figura 24. Curve cumulative dei fluidi caldi e freddi nella zona di bassa temperatura assumendo il recupero di calore dal secondo stadio dell'intercooler

Tabella 12. Confronto tra le reti con e senza recupero di calore in condizioni nominali: superfici e costo di investimento degli scambiatori aggiuntivi, potenza termica e costi annui delle utilities valutati assumendo un costo del gas naturale di 5 \$/GJ ed un periodo operativo dell'impianto di 6865 ore/anno

	Rete AT	Rete AT con recupero di calore	Rete BT	Rete BT con recupero di calore
Potenza richieste delle utilities calde (kW)	4456.9	4281.3	345.6	287.4
Superficie degli scambiatori interni (m ²)	-	30.9	-	18.3
Costo degli scambiatori aggiuntivi (k\$)	-	29.6	-	18.2
Costo delle utilities calde (k\$/anno)	939.2	921.8	426.4	415.1
Tempo di ritorno semplice dell'investimento associato agli scambiatori interni (anni)	-	1.7	-	1.6

Tabella 13. Caratterizzazione delle correnti di processo della zona di alta temperatura nel caso "inverno" e delle correnti calde potenzialmente recuperabili

Descrizione corrente	n° di corrente	Tipo di corrente	Capacità termica (kW/K)	Temperatura iniziale (°C)	Temperatura finale (°C)	Potenza termica (kW)
aria in ingresso all'essiccatore linea G	1	fredda	3.99	2.5	90	349.5
aria in ingresso all'essiccatore linea L	2	fredda	5.64	2.5	90	493.5
aria in ingresso all'essiccatore linea F	3	fredda	2.75	2.5	90	240.4
aria in ingresso all'essiccatore linea D	4	fredda	3.04	2.5	90	266.4
aria in ingresso all'essiccatore linea K	5	fredda	3.24	2.5	90	283.5
aria in ingresso all'essiccatore linea P	6	fredda	1.29	2.5	90	112.8
aria in ingresso all'essiccatore linea M	7	fredda	1.29	2.5	90	113.0
aria in ingresso all'essiccatore linea B	8	fredda	1.23	2.5	90	107.7
aria in ingresso all'essiccatore linea N	9	fredda	1.29	2.5	90	113.0
riscaldamento locali produttivi	10	fredda	9.10	40.0	45	45.5
fumi di scarico cogeneratore	11	calda	0.78	180.0	120	47.1
fumi di scarico caldaie	12	calda	0.9	180.0	120	56.4

Tabella 14. Caratterizzazione delle correnti di processo a bassa temperatura nel caso "inverno" e della corrente calda potenzialmente recuperabile

Descrizione corrente	n° di corrente	Tipo di corrente	Capacità termica (kW/K)	Temperatura iniziale (°C)	Temperatura finale (°C)	Potenza termica (kW)
aria in ingresso all'essiccatore linea B1	1	fredda	2.33	2.5	60	134.1
aria in ingresso all'essiccatore linea N1	2	fredda	2.33	2.5	60	134.0
Acqua per il riscaldamento degli impasti	3	fredda	2.41	2.5	30	66.4
ACS	4	fredda	0.29	2.5	35	9.5
Acqua calda dall'intercooler	5	calda	13.76	45.0	40	68.8

Tabella 15. Caratterizzazione delle correnti di processo della zona di alta temperatura nel caso "estivo" e delle correnti calde potenzialmente recuperabili

Descrizione corrente	n° di corrente	Tipo di corrente	Capacità termica (kW/K)	Temperatura iniziale (°C)	Temperatura finale (°C)	Potenza termica (kW)
aria in ingresso all'essiccatore linea G	1	fredda	4.32	21.6	90	295.2
aria in ingresso all'essiccatore linea L	2	fredda	6.09	21.6	90	416.9
aria in ingresso all'essiccatore linea F	3	fredda	2.97	21.6	90	203.1
aria in ingresso all'essiccatore linea D	4	fredda	3.29	21.6	90	225.0
aria in ingresso all'essiccatore linea K	5	fredda	3.50	21.6	90	239.5
aria in ingresso all'essiccatore linea P	6	fredda	1.40	21.6	90	95.7
aria in ingresso all'essiccatore linea M	7	fredda	1.39	21.6	90	95.4
aria in ingresso all'essiccatore linea B	8	fredda	1.33	21.6	90	91.2
aria in ingresso all'essiccatore linea N	9	fredda	1.33	21.6	90	91.1
riscaldamento locali produttivi	10	fredda	0.00	40	45	0.0
fumi di scarico cogeneratore	11	calda	0.90	180	120	54.1
fumi di scarico caldaie	12	calda	0.7	180	120	43.7

Tabella 16. Caratterizzazione delle correnti di processo a bassa temperatura nel caso "estivo" e della corrente calda potenzialmente recuperabile

Descrizione corrente	n° di corrente	Tipo di corrente	Capacità termica (kW/K)	Temperatura iniziale (°C)	Temperatura finale (°C)	Potenza termica (kW)
aria in ingresso all'essiccatore linea B1	1	fredda	4.01	21.6	60	153.9
aria in ingresso all'essiccatore linea N1	2	fredda	4.01	21.6	60	154.0
Acqua per il riscaldamento degli impasti	3	fredda	9.07	21.6	30	76.2
ACS	4	fredda	0.82	21.6	35	10.9
Acqua calda dall'intercooler	5	calda	15.80	45	40	79.0

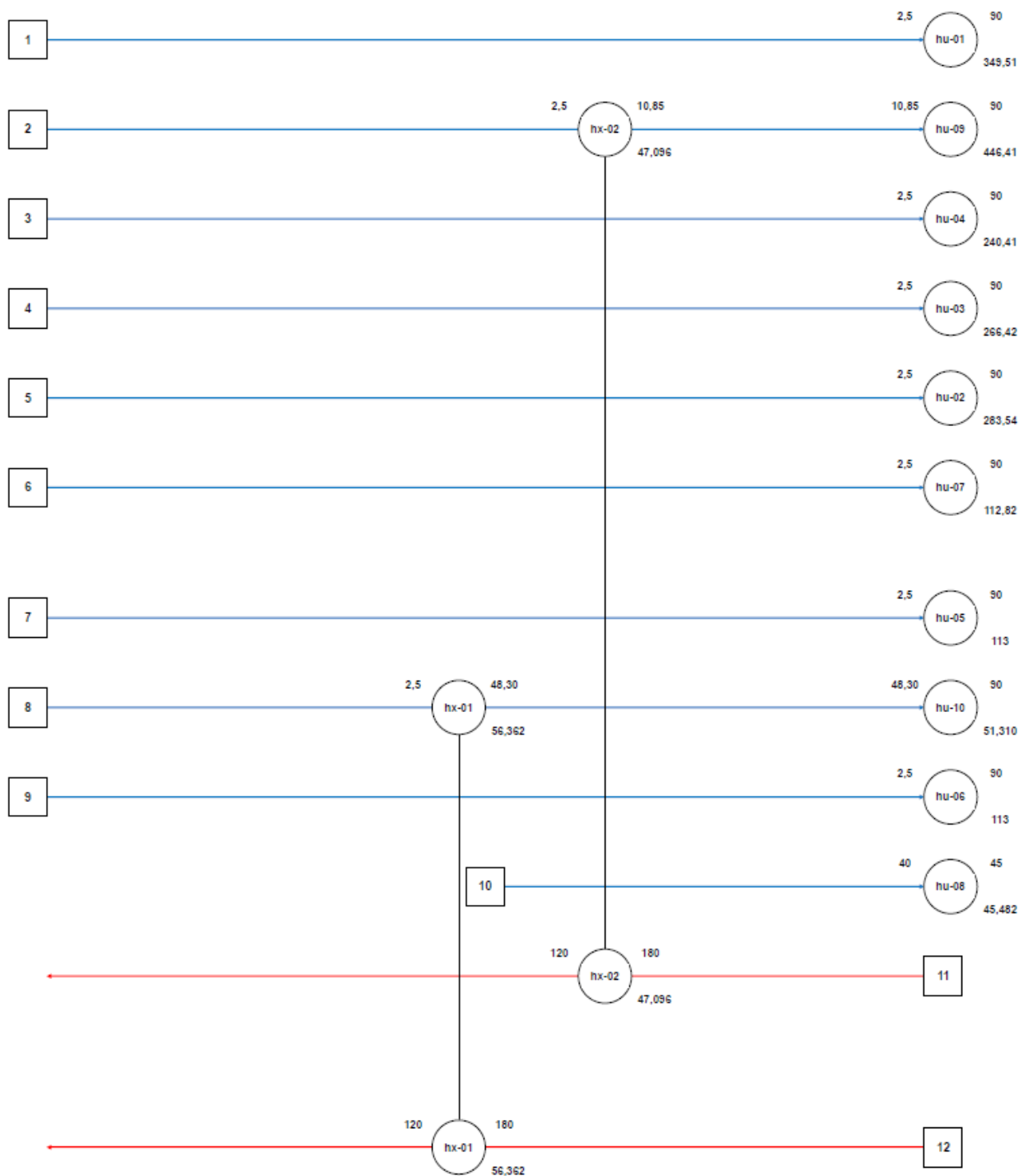


Figura 25. Disegno della rete nella zona di alta temperatura relativa al caso "inverno": il recupero di calore sui fumi delle caldaie e del cogeneratore consentono di ridurre il carico termico sulle correnti 2 (linea produttiva L) ed 8 (linea produttiva B). La struttura della rete nel caso "estate" è la medesima che nel caso "inverno", ad eccezione per la corrente associata al riscaldamento (assente in questo periodo)

7.5 Attività di coordinamento

Le attività di coordinamento hanno avuto l'obiettivo di sviluppare le sinergie tra affidatario e cobeneficiario, necessarie a consentire una conduzione efficace delle attività relative alle LA2.2 e LA2.3, attraverso la condivisione di informazioni e lo scambio di dati rilevanti all'interno e tra i due gruppi di lavoro, nonché la realizzazione di attività in collaborazione (acquisizione di dati utili al popolamento del database, individuazione di potenziali casi di studio e reperimento di dati necessari all'applicazione degli strumenti sviluppati).

Come stabilito a seguito del Kick-Off meeting e descritto già nell'allegato al report della LA2.1, si sono svolti degli incontri periodici tra il referente ENEA e il cobeneficiario. In relazione alla disponibilità dei gruppi di lavoro e alle esigenze specifiche delle attività del progetto, la cadenza degli incontri è stata mensile, quindicinale o settimanale. Tali incontri, oltre a consentire la verifica dello stato d'avanzamento del progetto, hanno permesso un proficuo scambio di idee e la risoluzione delle criticità emerse in fase di sviluppo degli strumenti ed acquisizione dei dati necessari all'applicazione di questi ultimi a casi di studio.

Le attività di coordinamento interne al gruppo di lavoro ENEA si svolgono invece regolarmente dal mese 1 con incontri circa bisettimanali (in presenza o via web a seconda delle occasioni) dell'intero gruppo di lavoro, con ordine del giorno relativo sia allo stato di avanzamento delle attività ENEA, sia allo stato di avanzamento delle attività del cobeneficiario.

Il responsabile del coordinamento generale delle attività viene inoltre periodicamente coinvolto (su base circa bimensile) in riunioni di confronto con il coordinamento di WP e di progetto al fine di verificare lo stato di avanzamento delle attività, nonché l'allineamento in termini di obiettivi, metodologie e risultati; ove necessario vengono coinvolti anche i referenti delle attività dei cobeneficiari.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

L'attività svolta nell'ambito della LA 2.2 non ha richiesto il contributo di consulenze.

9 Pubblicazioni scientifiche

Si riportano di seguito i riferimenti agli articoli predisposti nel periodo di rendicontazione considerato nel presente rapporto tecnico:

- Chinese D., Meneghetti A., Cortella G., Giordano L., Tomasinsig E., Benedetti M. Environmental and economic assessment of industrial excess heat recovery collaborations through 4th generation district heating systems. *Energy* 307 (2024) 132630. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132630>.
- Lorena Giordano, Miriam Benedetti. A new methodology for techno-economic comparison of waste heat recovery options in industry. *Proceedings of the ASME 2024 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2024*, November 17-21, 2024, Portland, OR, USA.

10 Eventi di disseminazione

Il gruppo di lavoro ENEA è stato impegnato nelle seguenti attività di disseminazione scientifica:

- Pubblicazione del contributo in rivista: Chinese D., Meneghetti A., Cortella G., Giordano L., Tomasinsig E., Benedetti M. Environmental and economic assessment of industrial excess heat recovery collaborations through 4th generation district heating systems. Energy 307 (2024) 132630. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132630>.
- Preparazione del contributo in atti di convegno: Lorena Giordano, Miriam Benedetti. A new methodology for techno-economic comparison of waste heat recovery options in industry. Proceedings of the ASME 2024 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2024, November 17-21, 2024, Portland, OR, USA.
- Curatela dello special issue della rivista Sustainability di MDPI relativo all'efficienza energetica nel settore alimentare, in cui è espressamente previsto un focus sul recupero di calore (special issue in chiusura il 31/01/2025: https://www.mdpi.com/journal/sustainability/special_issues/P4S7887YT0).
- 06/09/2023: presentazione dei database sviluppati e delle principali funzionalità del software di supporto alle decisioni sul recupero di calore industriale nell'ambito di una videoconferenza con EURAC che è attualmente coinvolta nel progetto europeo SPIRIT Spirit-Heat sulle pompe di calore ad alta temperatura.
- 01/10/2024: presentazione delle funzionalità del database dei casi di studio del recupero di calore industriale nell'ambito di una videoconferenza con EURAC che è attualmente coinvolta nel progetto europeo SPIRIT Spirit-Heat sulle pompe di calore ad alta temperatura.
- Attivazione di un corso di dottorato di ricerca in collaborazione con la facoltà di ingegneria dell'Università della Tuscia su tematiche inerenti alle attività del presente progetto ed in particolare la caratterizzazione dei fabbisogni energetici dei processi industriali.