

ALLEGATO 6

**Analisi delle tecnologie esistenti e valutazione delle filiere
industriali esistenti e da promuovere per soddisfare gli obiettivi
del Piano**

Indice

1 INTRODUZIONE	2
1.1 PROCESSI E TEMPERATURE DELL'INDUSTRIA	3
1.2 STRUTTURA DEL REPORT	5
2 INQUADRAMENTO DELL'INDUSTRIA LOMBARDA.....	6
2.1 DATI SOCIOECONOMICI	6
2.2 CONSUMI ENERGETICI.....	9
2.3 EMISSIONI DI GAS A EFFETTO SERRA	13
3 DEFINIZIONE DELLA DOMANDA ENERGETICA DELL'INDUSTRIA LOMBARDA	15
3.1 ACCIAIO.....	15
3.2 CHIMICA.....	18
3.3 CALCE E CEMENTO	21
3.4 VETRO.....	23
3.5 CERAMICA.....	25
3.6 CARTA.....	27
3.7 ALIMENTARE.....	29
3.8 METALLI NON FERROSI.....	32
3.9 SETTORE TESSILE.....	33
4 OPZIONI TECNOLOGICHE ALTERNATIVE PER LA DECARBONIZZAZIONE DELL'INDUSTRIA.....	36
4.1 TECNOLOGIE TRASVERSALI: SOLARE TERMICO	36
4.2 TECNOLOGIE TRASVERSALI: POMPE DI CALORE INDUSTRIALI	37
4.3 ACCIAIO.....	38
4.4 CHIMICA	38
4.5 CEMENTO	40
4.6 VETRO.....	43
4.7 CERAMICA.....	44
4.8 CARTA.....	45
5 POTENZIALE DIFFUSIONE DI POMPE DI CALORE E SOLARE TERMICO NELL'INDUSTRIA.....	47
5.1 METODO	47
5.2 RISULTATI.....	52
6 MAPPATURA DEL CALORE DI SCARTO RECUPERABILE	59
6.1 METODO	59
6.2 APPLICAZIONE AL CASO LOMBARDO.....	62
7 RISULTATI.....	64
APPENDICE A - NOTA METODOLOGICA	69
BIBLIOGRAFIA.....	71

1 Introduzione

Questo report raccoglie la metodologia e i risultati della seconda attività prevista all'interno del servizio di assistenza tecnica a Regione Lombardia per il percorso di costruzione del Programma Regionale Energia Ambiente e Clima (PREAC). L'attività è orientata alla ricostruzione della domanda energetica dell'industria Lombarda per studiare la possibile penetrazione di tecnologie di decarbonizzazione e per studiare il potenziale di recupero di calore di scarto. Nelle elaborazioni viene mantenuto il maggior dettaglio possibile rispetto ai settori merceologici e viene fatta distinzione tra industria ETS e non-ETS.

Il lavoro si focalizza sulle tecnologie con maggiore grado di maturità o il cui ruolo nella decarbonizzazione è riconosciuto in letteratura come non marginale. L'analisi della penetrazione delle tecnologie è fatta su base esclusivamente tecnica ed è propedeutica alle analisi tecnico-economiche delle successive attività previste. La metodologia e i dati descritti conservano il maggior dettaglio possibile per trasparenza (nelle assunzioni e nella produzione delle stime) e per permettere successive integrazioni, possibili miglioramenti o futuri aggiornamenti, anche ad opera esterna rispetto al gruppo di lavoro.

Per ragioni storiche e per la grande varietà di prodotti generati, l'industria è un settore molto eterogeneo, che si compone di processi produttivi differenti, con tecnologie, temperature, dimensioni, consumi e vettori energetici differenti. Nel tentativo di ricostruire la domanda energetica nei vari settori merceologici e stimare il potenziale di decarbonizzazione dell'industria, una prima distinzione può essere fatta tra quattro macrocategorie di usi energetici:

- (i) gli **usi elettrici obbligati** (e.g. per movimentazione dei macchinari, per la compressione e movimentazione dell'aria, o dei fluidi in generale, e per le apparecchiature elettroniche);
- (ii) **l'uso del calore per i processi**, ottenuto normalmente mediante combustione (di gas naturale, olio combustibile, ecc.), spesso in regime cogenerativo (i.e. producendo calore ed elettricità) oppure mediante vettore elettrico (e.g. tramite resistenze, pompe di calore, microonde, ecc.) oppure ancora da recupero interno di calore di scarto o da teleriscaldamento;
- (iii) **l'uso del freddo per i processi**, ottenuto principalmente per mezzo del vettore elettrico mediante macchine frigorifere;
- (iv) il **riscaldamento** e il **raffrescamento degli ambienti**.

La ricostruzione della domanda energetica industriale pone difficoltà rispetto a tutti e quattro gli usi citati, per via della difficile reperibilità di dati, spesso considerati sensibili nel loro trattamento. La difficoltà nella ricostruzione del potenziale di decarbonizzazione risulta invece circoscritta principalmente al segmento della domanda di calore per i processi. Infatti, il segmento degli usi elettrici obbligati ha raggiunto una buona maturità tecnologica, con un ridotto margine di miglioramento dell'efficienza (principalmente nelle linee di aria compressa o, più in generale, nell'ottimizzazione tramite digitalizzazione delle linee produttive). La domanda di freddo, poi, come la domanda di riscaldamento e raffrescamento ambientale, possono contare su tecnologie efficienti già disponibili sul mercato (e.g. pompe di calore, cicli raffrescamento ad assorbimento). Per tutte e tre, infine, il margine di ulteriore penetrazione di energia rinnovabile è rimandato in grossa parte al settore della generazione elettrica.

All'interno del segmento, un'ulteriore distinzione fra processi può essere fatta in funzione del livello di temperatura. Una grossa fetta del totale delle industrie si compone infatti di processi a bassa temperatura (e.g. cibi e bevande), mentre un minore numero di industrie si compone di processi *energy intensive*, che hanno però un impatto maggiore in termini di consumi ed emissioni (e.g. acciaio, cemento, ecc.). Una distinzione in base alla temperatura si applica coerentemente anche alle soluzioni tecnologiche in grado di decarbonizzare il settore: a basse temperature si può intervenire con elettrificazione ad alta efficienza

(pompe di calore) o con il solare termico; ad alte temperature si hanno soluzioni che si possono definire *ad hoc*.

È per i motivi appena elencati che questo lavoro si concentra maggiormente sulla domanda termica dei processi e suddivide spesso le informazioni in base alla temperatura.

1.1 Processi e temperature dell'industria

Il variegato mondo industriale offre una molteplicità di processi completamente diversi e temperature che possono variare da valori inferiori a -30°C a oltre 1500°C . La letteratura non è uniforme nella classificazione dei processi per temperatura, ma identifica generalmente:

- (i) processi sotto ai 15°C per il freddo;
- (ii) una soglia a 100°C per i processi che usano acqua calda;
- (iii) un intervallo tra i 100°C e i 500°C per i processi che usano vapore
- (iv) un intervallo a partire da 500°C per i processi energy intensive (fornaci, altoforni, ecc.).

Si veda la Tabella 1.1 per una sintesi (fonte: Rehfeldt et al. [1]).

Tabella 1.1 - Livelli di temperatura per calore e freddo di processo. [Fonte: Rehfeldt et al. [1]]

End-use	Temperature level	Description
Process cooling	$<-30^{\circ}\text{C}$	Mostly air separation in chemical industry
	$-30-0^{\circ}\text{C}$	Mostly refrigeration in food industry
	$0-15^{\circ}\text{C}$	Mostly cooling in food industry
Process heating	$<100^{\circ}\text{C}$	Low temperature heat (hot water) used in food industry and others
	$100-200^{\circ}\text{C}$	Steam, of which much is in paper, food and chemical industry
	$200-500^{\circ}\text{C}$	Steam used mostly in chemical industry
	$>500^{\circ}\text{C}$	Industrial furnaces in steel, cement, glass and other industries

Ad oggi, non esistono o non sono disponibili sufficienti informazioni per studiare e stimare, a livello regionale, i consumi e le temperature con il dettaglio di ogni singolo processo in ogni singola industria. In letteratura esistono generalmente due approcci al problema:

- (i) ricostruzioni bottom-up, che estendono la conoscenza di singoli processi noti al resto dei processi simili in un determinato settore;
- (ii) ricostruzioni top-down che partono dai bilanci energetici (e.g. Eurostat) per suddividere i consumi nei vari settori e processi.

Trasversalmente, nel problema della trattazione di un argomento così vasto ed eterogeneo e in un ambito di lavoro in cui le informazioni e i dati sono una risorsa scarsa, vi è una seconda distinzione che riguarda la suddivisione appunto in settori merceologici o in processi. Le differenze tra i processi industriali tra Paesi sono minori rispetto alle differenze tra sottosettori: ad esempio, nel sottosettore acciaio, esistono notevoli differenze tra Italia e Germania in termini di *share* di acciaio prodotto da ciclo integrale o da rottame, ma, guardando all'uno o all'altro processo, le differenze diminuiscono. L'assunzione che il consumo specifico di calore e lo *share* di temperature sia costante per tutti i Paesi è dunque più giustificata per processi che per sottosettori [1].

La Tabella 1.2 (fonte: Rehfeldt et al. [1]) mostra i consumi specifici per unità di prodotto e la distribuzione nei vari livelli di temperatura. Il grafico di Figura 1.1 mostra invece la suddivisione in temperatura per settore merceologico.

Tabella 1.2 - Consumi specifici di combustibile e elettricità per tonnellata di prodotto e distribuzione percentuale nelle fasce di temperatura. [Fonte: Rehfeldt et al. [1]]

Process	Fuel use [GJ/t]	Electricity use [GJ/t]	15°C-75°C	75°C-100°C	100°C-125°C	125°C-150°C	150°C-200°C	200°C-500°C	500°C-1000°C	>1000°C
Blast furnace	11.64	0.60						0.03	0.20	0.77
Electric arc furnace	0.98	2.28							0.10	0.89
Aluminum, primary	5.20	53.64							1.00	
Aluminum foundries	7.20	5.60							1.00	
Copper, primary	8.00	2.79								1.00
Chemical pulp	12.65	2.30			0.10	0.20	0.70			
Mechanical pulp	-2.01	7.92		1.00						
Container glass	5.78	1.41			0.06	0.06	0.08	0.19	0.30	0.30
Clinker calcination-dry	3.50	0.14						0.10	0.60	0.30
Bricks	1.40	0.20	0.10	0.10					0.60	0.20
Ammonia	11.27	0.48							0.66	0.33
Ethylene	35.90	0.00							1.00	
Methanol	15.03	0.49							0.22	0.78
Dairy	1.57	0.53	0.45	0.45	0.03	0.03	0.03			
Brewing	0.97	0.39	0.28	0.28	0.15	0.15	0.15			
Bread & bakery	2.40	1.45	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.47		

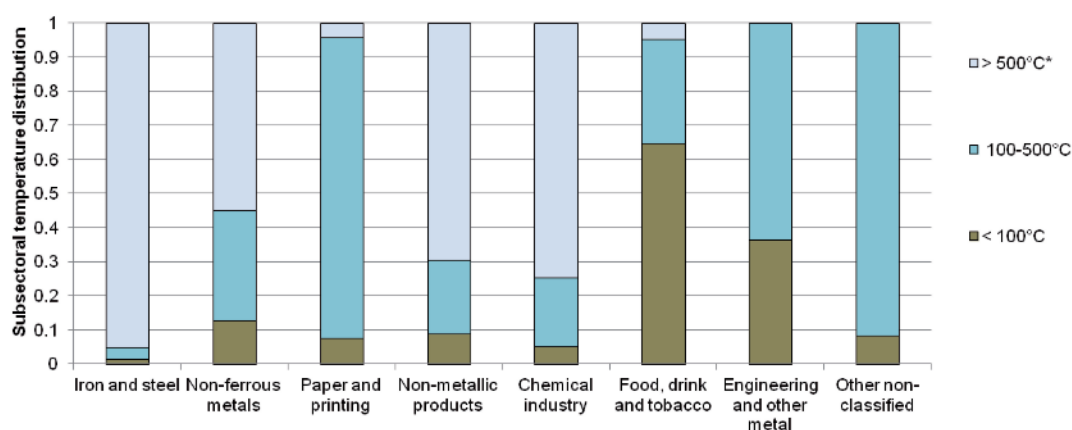


Figura 1.1 - Distribuzione delle temperature per sottosettore. [Fonte: Rehfeldt et al. [1]]

Come anticipato, una parte della domanda dell'industria è da riferire al riscaldamento e al raffrescamento degli ambienti. Per l'Italia, il lavoro di Rehfeldt et al. [1] stima un contributo non trascurabile del riscaldamento degli ambienti, pari a circa un 20% della domanda di energia finale. La Tabella 1.3 riporta i valori dello studio riferiti alla domanda di calore per processo e riscaldamento e la domanda di raffrescamento, escludendo il dettaglio per processo o settore.

Tabella 1.3 - Calore di processo per livello di temperatura e domanda di riscaldamento e raffrescamento ambienti. [Fonte: estratto da Rehfeldt et al. [1]]

TWh	PH <100°C	PH 100- 200°C	PH 200- 500°C	PH >500°C	SH	Total heating	Cooling
Italy	27.9	26.5	16.6	117.7	47.7	236.4	14.9

Va notato che i processi che coinvolgono alte temperature ricadono in pochi settori industriali *energy intensive*, che possono essere più facilmente identificati e studiati. Il segmento industriale più complesso da ricostruire riguarda invece i processi a basse temperature. In questo contesto, la letteratura propone alcuni studi interessanti, sebbene le informazioni che si possono ricavare devono essere necessariamente generalizzate, trattandosi, nel caso di industria a bassa temperatura, di un vasto numero di realtà eterogenee.

1.2 Struttura del report

Le parti successive del report prevedono, nel Capitolo 2, la proposta di una visione di insieme dell'industria lombarda, per comprendere l'importanza dei vari settori dal punto di vista socioeconomico, energetico e ambientale. Il Capitolo 3 si focalizza invece sui singoli settori per descrivere i processi e ricostruire la domanda energetica, mentre il Capitolo 4 restituisce un quadro delle tecnologie disponibili per la decarbonizzazione nei vari settori. Il Capitolo 0 analizza il potenziale di penetrazione delle tecnologie di decarbonizzazione nell'industria non-ETS ed i successivi Capitoli 6 e 7 rispettivamente analizzano il potenziale di recupero da calore industriale di scarto e offrono alcune considerazioni conclusive.

2 Inquadramento dell'industria lombarda

Il presente capitolo inquadra il tessuto industriale lombardo nel suo insieme per capire l'importanza dei vari settori, dapprima in termini socioeconomici (fatturato, valore aggiunto e occupati) e successivamente in termini energetici (consumi elettrici e termici) e ambientali (emissioni).

2.1 Dati socioeconomici

I dati socioeconomici qui riportati a partire da ISTAT sono relativi al 2018 (ultimo anno disponibile) e si riferiscono in particolare ai soli settori appartenenti all'industria manifatturiera lombarda, vale a dire i codici ATECO a due cifre da 10 a 33 [2]. I grafici mostrano i settori più rilevanti in termini di fatturato, valore aggiunto e numero di occupati sul territorio regionale al fine di inquadrare i settori in cui la vocazione industriale lombarda è più sviluppata.

Il grafico in Figura 2.1 esplicita i 13 settori trainanti, racchiudendo i rimanenti nella categoria "altro". I dati relativi ai settori dell'*industria del tabacco e della carta* non sono resi disponibili da ISTAT *per tutela del segreto statistico* e per questo motivo non compaiono nei grafici. Va notato comunque che il valore complessivo di questi ultimi due, ricavabile per differenza dal fatturato totale dell'industria manifatturiera (260 miliardi €), non è significativo. Il fatturato dell'industria manifatturiera è pari a circa 260 miliardi di euro ed è costituito per il 30% dalla meccanica¹, dalla fabbricazione di prodotti in metallo², dalla metallurgia (tra cui la produzione di acciaio secondario), dall'industria alimentare e dalla chimica alla base della produzione di articoli in plastica e gomma. I successivi settori per importanza in termini di fatturato sono la produzione di prodotti della raffinazione del petrolio, la farmaceutica ed anche il tessile.

¹ La definizione di industria meccanica raggruppa i codici ATECO dal 26 al 31 e il 33 in un unico settore. I comparti appartenenti alla meccanica sono quattro: i) mezzi di trasporto (autoveicoli, treni, navi, aerei), ii) elettrodomestici, iii) macchine per la produzione e infine iv) macchine di precisione. La fabbricazione di mobili (codice ATECO 31) è riportata in alcune fonti come industria meccanica e per questo motivo il settore non è stato scorporato dalla meccanica benché Federmeccanica non la consideri strettamente parte di essa. Ad ogni modo la fabbricazione di mobili costituisce una percentuale poco rilevante sul totale della meccanica. Anche, la riparazione, manutenzione e installazione di macchine e apparecchiature (codice ATECO 33) non è ufficialmente parte dell'industria meccanica; tuttavia, è stato qui considerato all'interno del raggruppamento per affinità. Un altro accorpamento settoriale possibile è l'industria metalmeccanica che comprende i settori della meccanica (26,27,28,29,30), la fabbricazione di prodotti in metallo (25) e la metallurgia (24).

² Il codice ATECO 25 riguarda la fabbricazione di prodotti in metallo e quindi è parte dell'estensione dell'industria meccanica alla metalmeccanica che comprende i codici ATECO da 24 a 30, come da definizione di Federmeccanica. Il codice 25 conterrà dunque anche i settori relativi ai metalli non ferrosi.

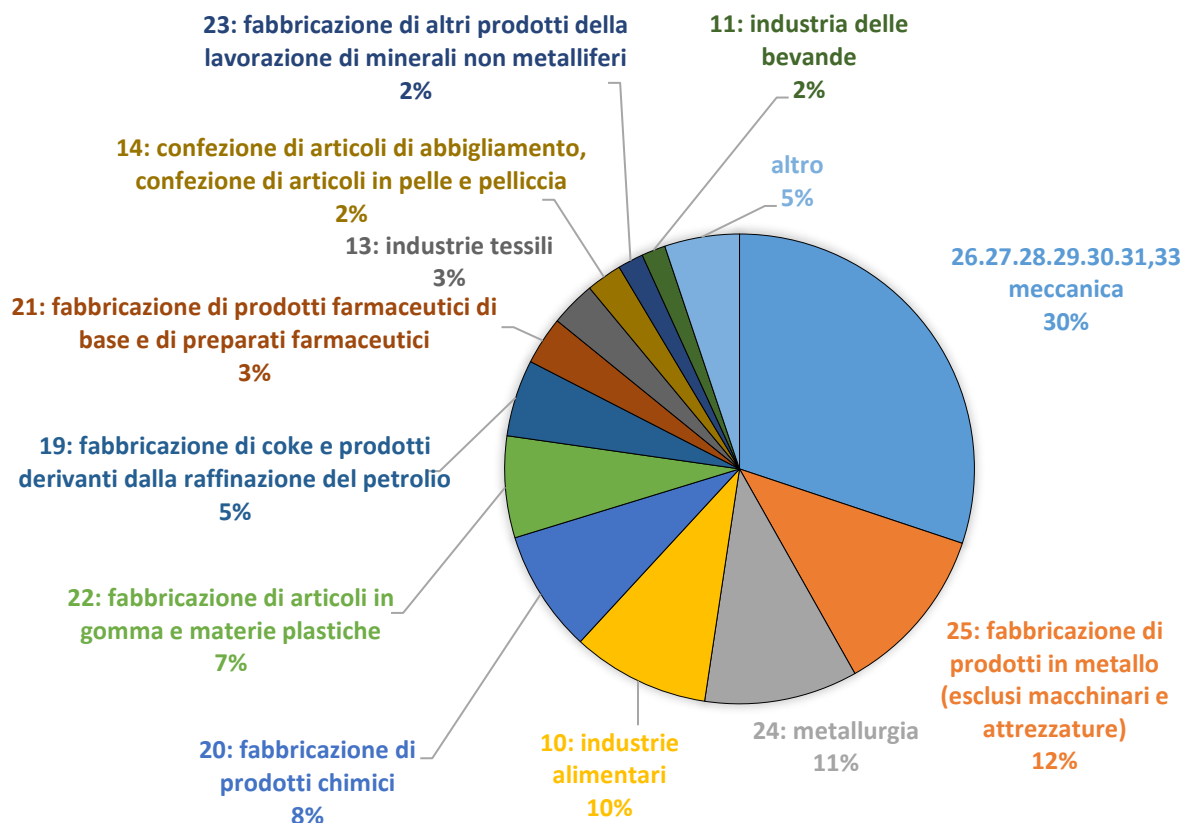


Figura 2.1 – Ripartizione del fatturato dell'industria lombarda per settore merceologico, anno 2018 [Fonte ISTAT [3]]

Il seguente grafico riporta invece la composizione percentuale del **valore aggiunto**, con qualche differenza rispetto al fatturato. È possibile notare infatti che l'industria chimica e la produzione di materie plastiche (rispettivamente la terza e quarta posizione) sono settori ad alto valore aggiunto (come confermato dal report di Federchimica [4]) e occupano dunque posizioni più alte rispetto al fatturato. Al contrario, la metallurgia, caratterizzata principalmente dalla siderurgia, è un settore ad alto fatturato ma basso valore aggiunto. Infine, è interessante notare che anche il settore farmaceutico e il tessile guadagnano posizioni mostrandosi comparti ad alto valore aggiunto per il tessuto industriale lombardo.

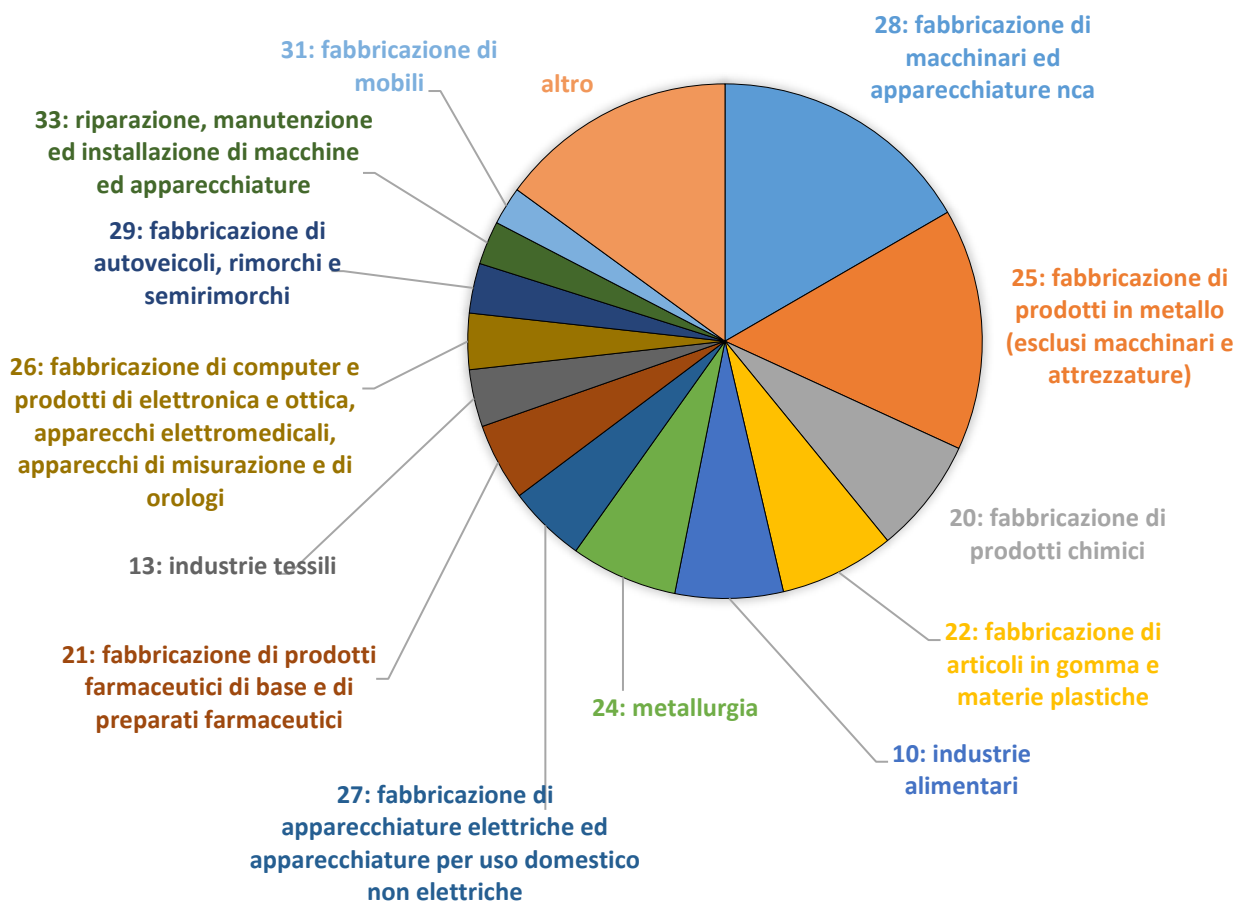


Figura 2.2 – Ripartizione del valore aggiunto dell'industria lombarda per settore merceologico, anno 2018 [Fonte ISTAT [3]]

Gli occupati delle attività manifatturiere sono circa 900 mila in Lombardia, che si conferma quindi la regione trainante dell'industria manifatturiera nazionale. L'ordine dei settori, in Figura 2.2, non mostra particolari differenze rispetto ai grafici precedenti, allineandosi maggiormente al valore aggiunto, ad eccezione dell'industria alimentare, che torna ad occupare la terza posizione.

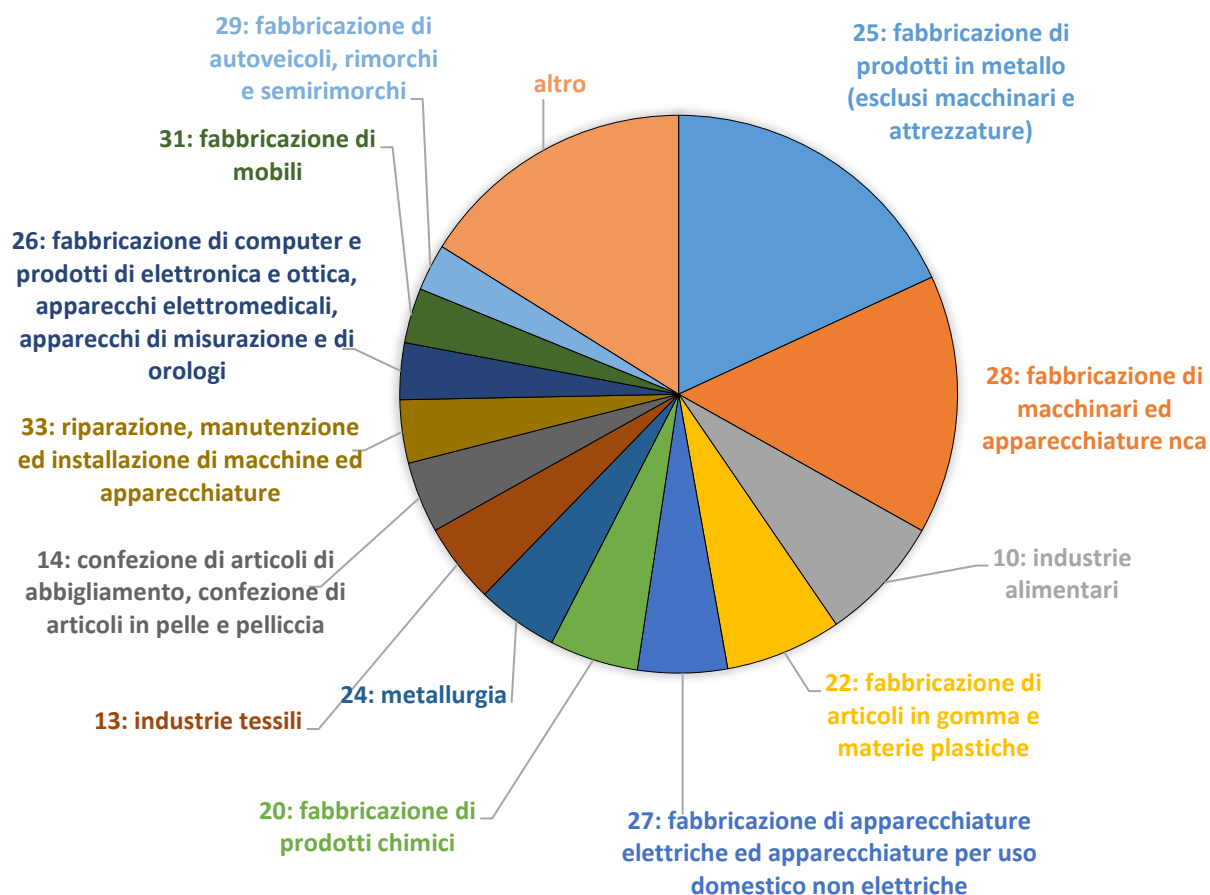


Figura 2.3 – Ripartizione del numero di occupati nell'industria lombarda per settore merceologico, anno 2018 [Fonte ISTAT [3]]

2.2 Consumi energetici

I dati di Terna del 2018 [5], riportati nel seguente grafico di Figura 2.4, offrono una panoramica sui **consumi elettrici** dell'industria manifatturiera lombarda, con un buon dettaglio sul settore merceologico. Il grafico evidenzia il grande peso dei settori siderurgico e meccanico e dell'industria chimica, che insieme assorbono più del 60% dei consumi elettrici. Il settore delle lavorazioni di plastica e gomma, il tessile e l'alimentare hanno consumi simili, circa il 7% ciascuno. Infine, la produzione di carta, cemento e vetro non superano la soglia del 3% del totale.

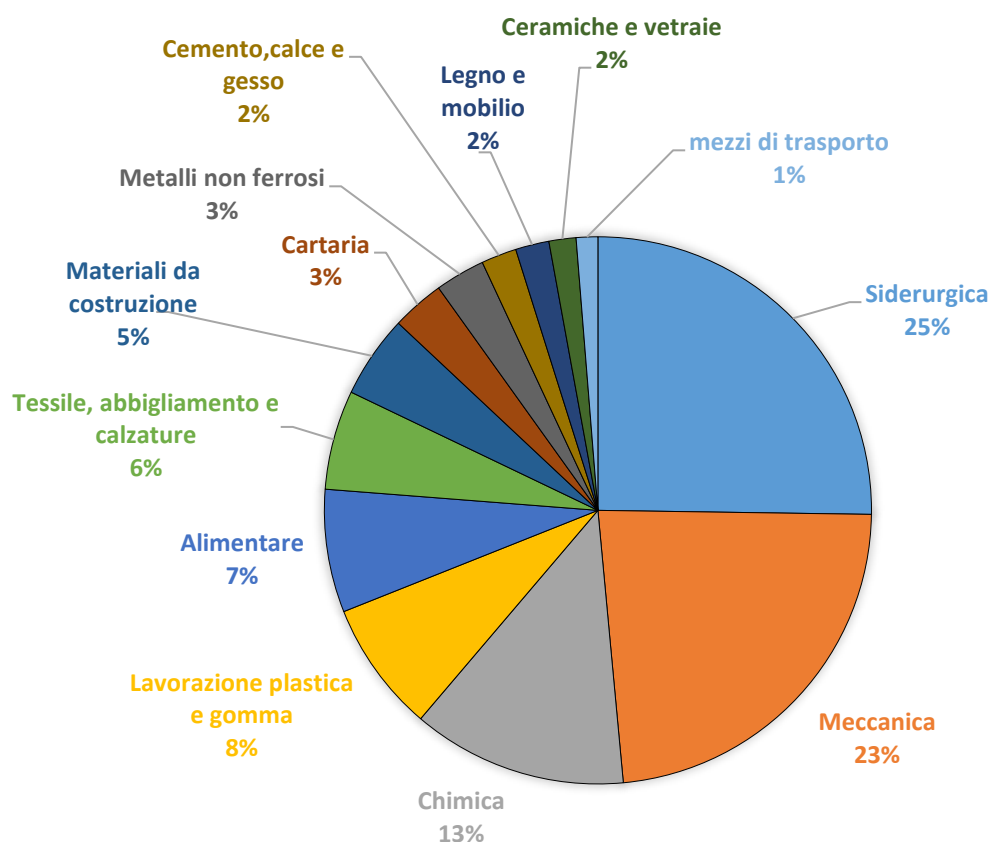


Figura 2.4 - Distribuzione per settore merceologico dei consumi elettrici nell'industria lombarda, anno 2018 [Fonte: Elaborazioni Fondazione Politecnico da dati Terna [5]]

Il grafico di Figura 2.5 mostra invece la composizione dei consumi termici dell'industria manifatturiera lombarda e utilizza le informazioni dichiarate contestualmente alle autorizzazioni AIA e le stime dei consumi partendo dalle emissioni dichiarate nel registro ETS³. È necessario ricordare che le industrie coperte da tali informazioni sono solo una quota del totale, definita da determinate soglie produttive o limiti ambientali, e che quindi il dataset risultante non è esaustivo. Il grafico conferma comunque il settore siderurgico quale principale consumatore di energia termica, seguito dalla chimica e dai metalli non ferrosi. Il cemento si posiziona al quarto posto, con un contributo maggiore di quanto mostrato nel grafico precedente, relativo ai consumi elettrici.

³ I consumi termici delle industrie facenti parte del mercato di scambio di quote di emissione europeo sono stati stimati partendo da coefficienti emissivi assunti per ogni settore (come spiegato nell'Appendice A).

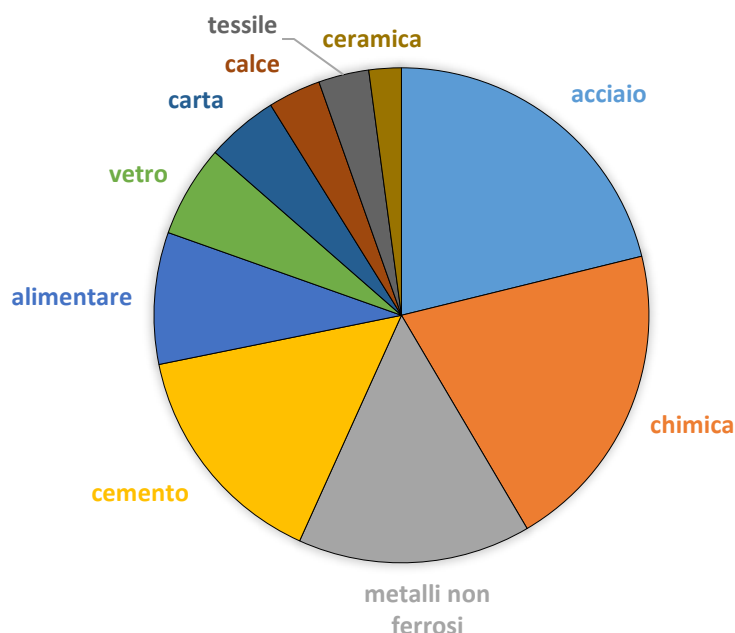


Figura 2.5 – Distribuzione per settore merceologico dell'energia termica richiesta dall'industria lombarda, anno 2018 [Fonte: Elaborazioni Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

Dai due dataset utilizzati (AIA e ETS), è possibile ottenere i consumi associati ai settori merceologici, distinguendo tra industrie ETS e non-ETS. Tale distinzione permette di fornire indicazioni di utilità differente in base allo spazio di manovra del decisore politico. Dai grafici di Figura 2.6 (per il consumo termico) e di Figura 2.7 (per il consumo elettrico), è possibile osservare che i settori *Ferro e acciaio*, *Cemento*, *Ceramica*, *Vetro* e *Carta* risultano quasi interamente costituiti da industrie in regime ETS, a differenza degli altri settori.

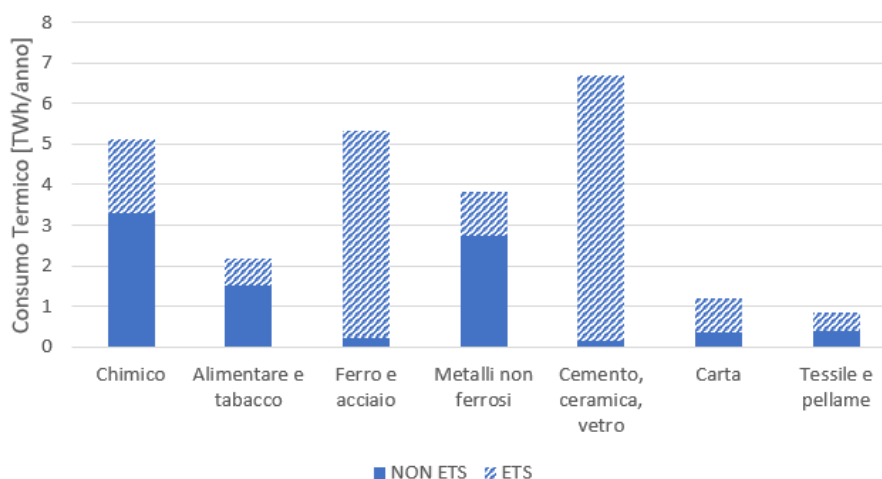


Figura 2.6 – Consumo termico per alcuni sottosettori industriali differenziando quelli ETS da quelli non-ETS [TWh/anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

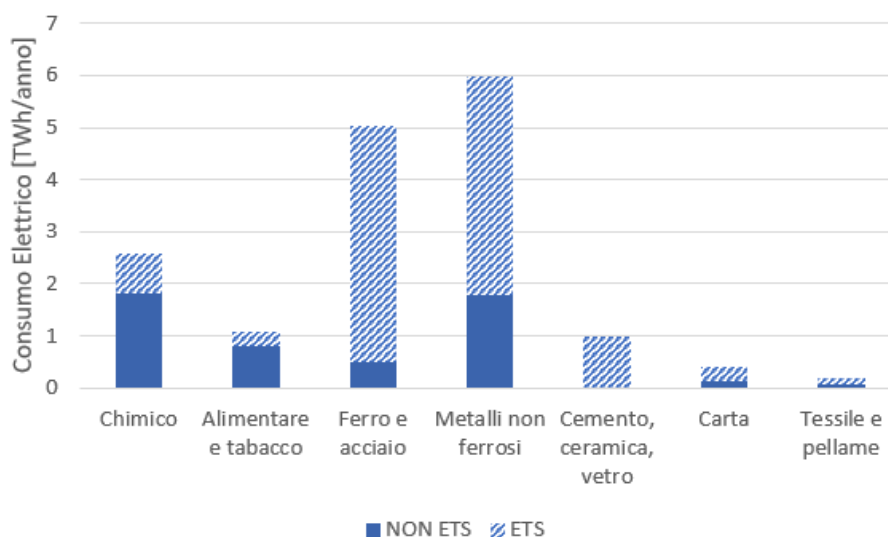


Figura 2.7 – Consumo elettrico per alcuni sottosettori industriali differenziando quelli ETS da quelli non-ETS [TWh/anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registro AIA e ETS]

In Figura 2.8 viene mostrata la distribuzione spaziale sul suolo regionale dei siti produttivi, differenziati per settore merceologico. In Figura 2.9 e in Figura 2.10, invece, è mostrata la distribuzione spaziale, rispettivamente in termini di energia termica ed elettrica richiesta, distinguendo tra industria ETS e non-ETS.

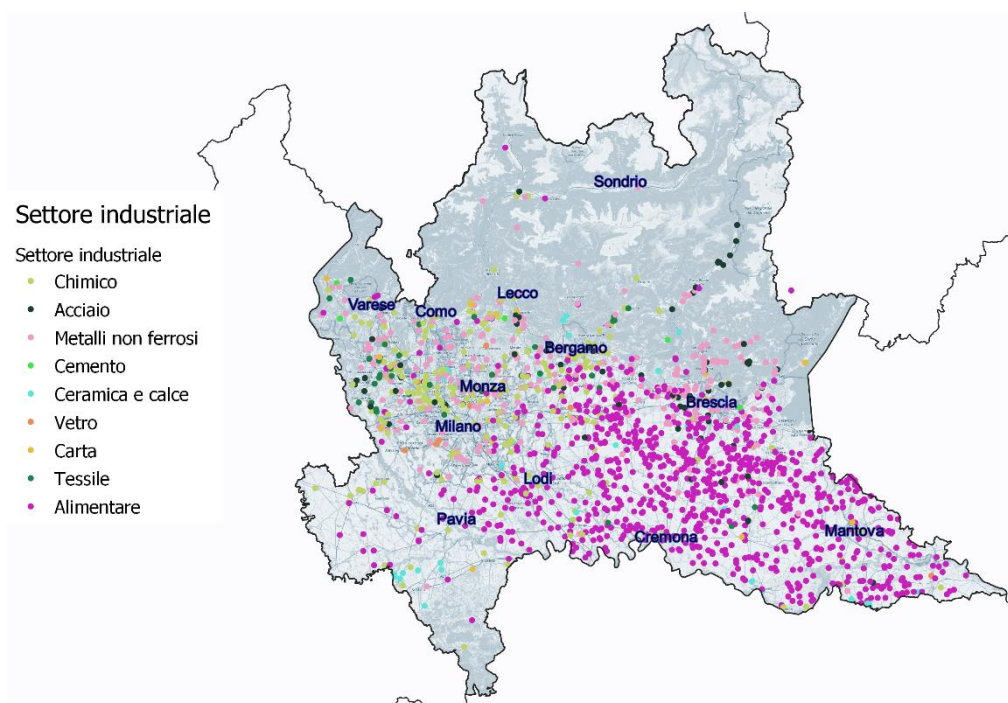


Figura 2.8 – Distribuzione spaziale dei siti industriali lombardi presenti nei registri AIA ed ETS nei diversi settori merceologici. [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

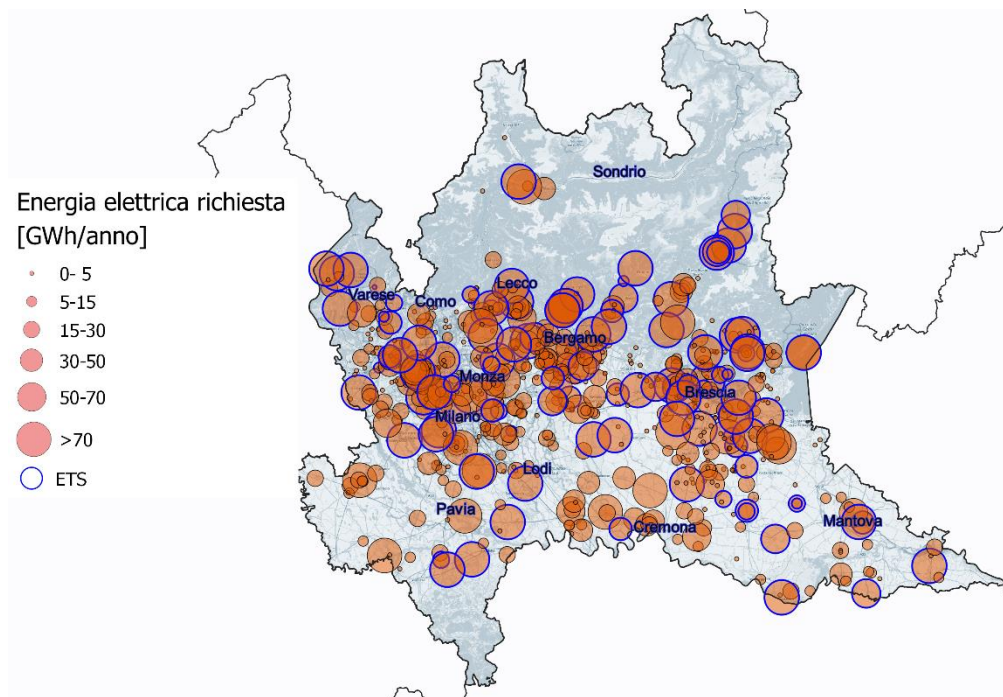


Figura 2.9 - Energia termica richiesta dai siti industriali lombardi presenti nei registri AIA ed ETS [GWh/anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

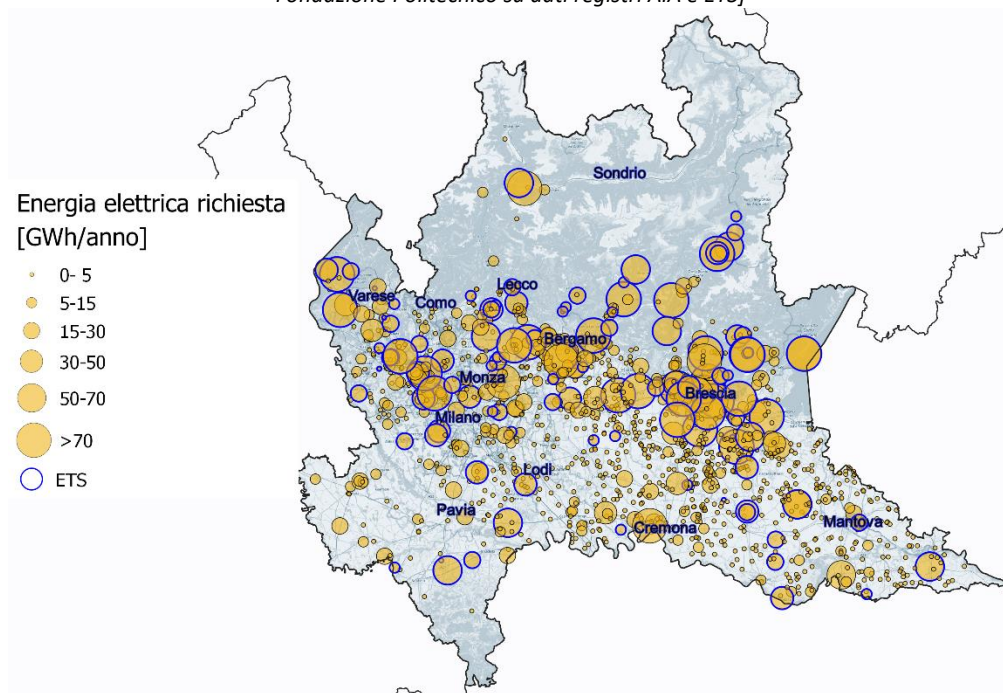


Figura 2.10 - Energia elettrica richiesta dai siti industriali lombardi presenti nei registri AIA ed ETS [GWh/anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

2.3 Emissioni di gas a effetto serra

È interessante riportare la distribuzione per settore industriale delle emissioni di gas ad effetto serra. In ambito ETS, spicca nel contesto regionale il settore della raffinazione di prodotti petroliferi, che emette circa

2,38 Mt di CO₂eq (pari al 70% delle emissioni totali, che equivalgono a 3,4 Mt di CO₂eq). Il grafico di Figura 2.11 mostra la distribuzione in ambito ETS per il resto dei settori e conferma la preponderanza dei segmenti della chimica e dell'acciaio.

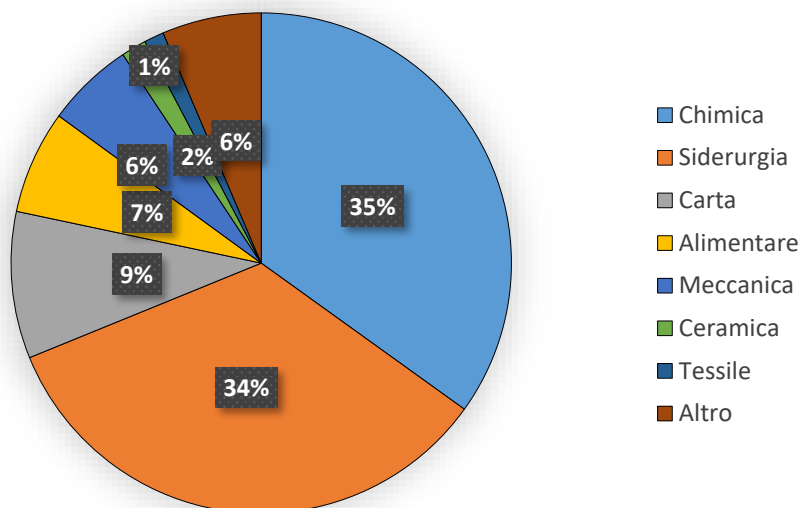


Figura 2.11 – Ripartizione delle emissioni di gas a effetto serra nei settori ETS, con esclusione dei settori di raffinazione e compressione in metanodotti [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registro ETS]

Escludendo le emissioni ricadenti in regime ETS, le emissioni climalteranti del comparto industriale sono stimate in circa 6,9 Mt di CO₂eq [6]. Complessivamente, dunque, le emissioni del settore industriale sono costituite dalla somma dei due contributi, pari a circa 10,3 Mt di CO₂eq.

3 Definizione della domanda energetica dell'industria lombarda

Ciascuna sezione del presente capitolo si focalizza su un particolare segmento industriale o settore merceologico per dare una descrizione del settore o dei processi e riportarne il consumo e la distribuzione spaziale. Questi ultimi vengono dedotti dai dataset relativi alle dichiarazioni AIA e ETS. Va anche in questo caso evidenziata la mancanza di informazioni relative a molte attività escluse dai dataset, con impatto tuttavia verosimilmente marginale. Per maggiori dettagli sulla descrizione e sull'utilizzo dei dati si rimanda alla nota metodologica riportata in appendice.

3.1 Acciaio

La siderurgia è il settore che comprende la produzione di ferro e delle sue leghe. È un settore solido nell'economia italiana, nonostante le contrazioni del fatturato registrate nel 2019 (-7,3%) e nel 2020 (-15,7%). L'efficienza dell'industria siderurgica italiana è la migliore d'Europa [7] e le emissioni di CO₂ del settore si sono drasticamente ridotte nell'ultimo trentennio. La sola Lombardia costituisce quasi la metà dell'acciaio grezzo italiano prodotto tramite forno elettrico (11 Mt vs 24 Mt), grazie in particolare alle acciaierie bresciane, che assorbono metà della produzione. Un'idea sommaria dell'importanza dei vari sottosettori attorno alla produzione e alla lavorazione dell'acciaio può essere ottenuta guardando alla composizione degli occupati⁴ nel 2017 in Lombardia nel settore della metallurgia, definita dal codice ATECO 24. Il grafico seguente mostra i sottosettori con 3 cifre ATECO: la siderurgia è il sottosettore prevalente (44,3%), seguito dalle fonderie (22%) e dalla produzione di metalli non ferrosi (e altri metalli preziosi), a fronte del totale degli occupati, pari a circa 61 300 unità.

⁴ I grafici relativi agli occupati in Lombardia per ogni settore sono frutto di elaborazione dei dati ISTAT [8]. In particolare, i grafici mostrano la somma dei lavoratori dipendenti delle imprese attive, i lavoratori indipendenti delle imprese attive, i lavoratori esterni e i lavoratori temporanei. Alcune figure professionali, come ad esempio i lavoratori esterni, possono fornire i loro servizi a più aziende contemporaneamente; per questo motivo la somma delle quattro figure lavorative è maggiore rispetto agli occupati consultabili sulla pagina relativa ai "risultati economici delle imprese" [3]. Ad ogni modo, lo scopo del grafico è mostrare la distribuzione degli occupati in ogni sottosettore piuttosto che il numero esatto di unità lavorative.

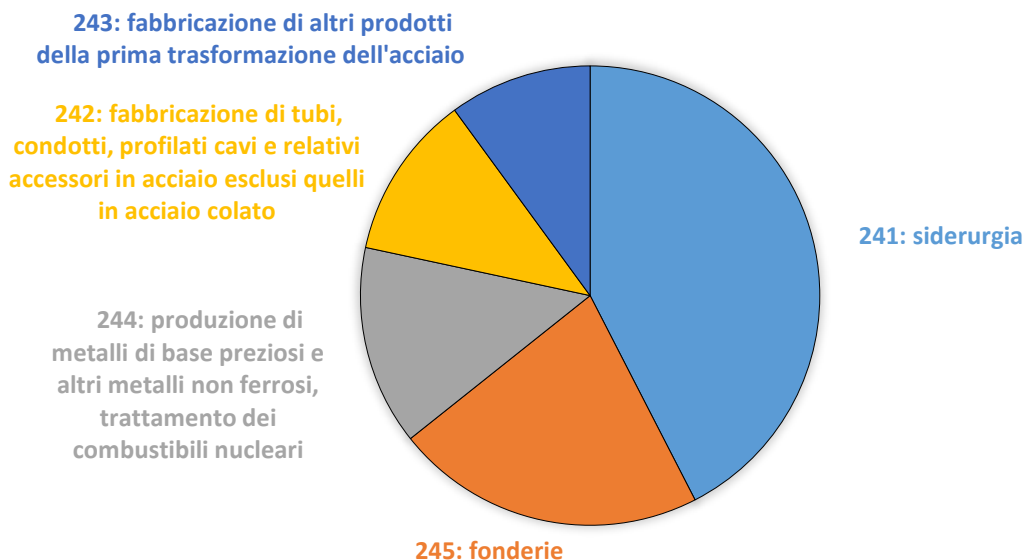


Figura 3.1 – Ripartizione del numero degli occupati nel settore industriale della metallurgia (ATECO 24) [Fonte Elaborazione Fondazione Politecnico su dati ISTAT [8]]

L'acciaio può essere prodotto a partire da minerali ferrosi (ciclo integrale) o da rottami. Il ciclo integrale, il più impattante in termini di emissioni di gas serra⁵, non è presente in Lombardia (in Italia è attivo solo l'impianto di Taranto), mentre sono attivi sul territorio regionale stabilimenti che producono acciaio partendo da rottami. La produzione da rottami di acciaio è più semplice e molto meno emissiva rispetto al ciclo integrale. I rottami vengono introdotti in un forno ad arco elettrico (EAF, Electric Arc Furnace) in cui sono fusi dal calore dell'arco elettrico che si forma tra degli elettrodi in grafite e la carica metallica (raggiungendo temperature fino a 2000°C). Il prodotto in uscita è acciaio liquido, pronto per le lavorazioni successive. Il forno comporta un elevato consumo di energia elettrica e una certa quantità di gas naturale. Nelle fasi di lavorazione successive, identiche per il ciclo integrale e per il ciclo da rottame, si utilizza gas naturale nei forni di riscaldamento e di trattamento termico nei quali si trasforma l'acciaio grezzo in prodotti semilavorati e prodotti finiti. In Italia il rottame utilizzato è per due terzi di provenienza interna [9].

Per quanto riguarda i consumi in Lombardia, la metodologia descritta nella nota riportata in appendice ha portato alla stima di **5.32 TWh/anno** di consumo finale di energia termica e di **5.03 TWh/anno** di consumo di energia elettrica per l'anno 2018. Tali valori, tra i vari settori merceologici analizzati in questo studio, rendono l'industria dell'acciaio la prima in termini di consumi termici e la seconda in termini di consumi elettrici. Osservando le mappe in Figura 3.2 e Figura 3.3, si può notare come le province lombarde

⁵ Nel ciclo integrale, le materie prime sono minerali ferrosi e carbone (Coke), miscelati insieme alla calce e fusi negli altiforni, per ottenere la ghisa. Dalla ghisa viene poi eliminato il carbonio in eccesso tramite ossidazione nei convertitori ad ossigeno, ottenendo acciaio. L'utilizzo di Coke come combustibile e agente riducente genera sia CO₂ di combustione, sia di processo. La cokeria, l'altoforno e i convertitori emettono dei gas (*off-gas*) che sono normalmente utilizzati per la cogenerazione di energia elettrica e vapore.

maggiormente interessate siano quelle di Brescia, con 29 siti industriali mappati, e di Bergamo (12 siti), seguite dalle province di Lecco, Milano e Varese (7 siti industriali ciascuna).

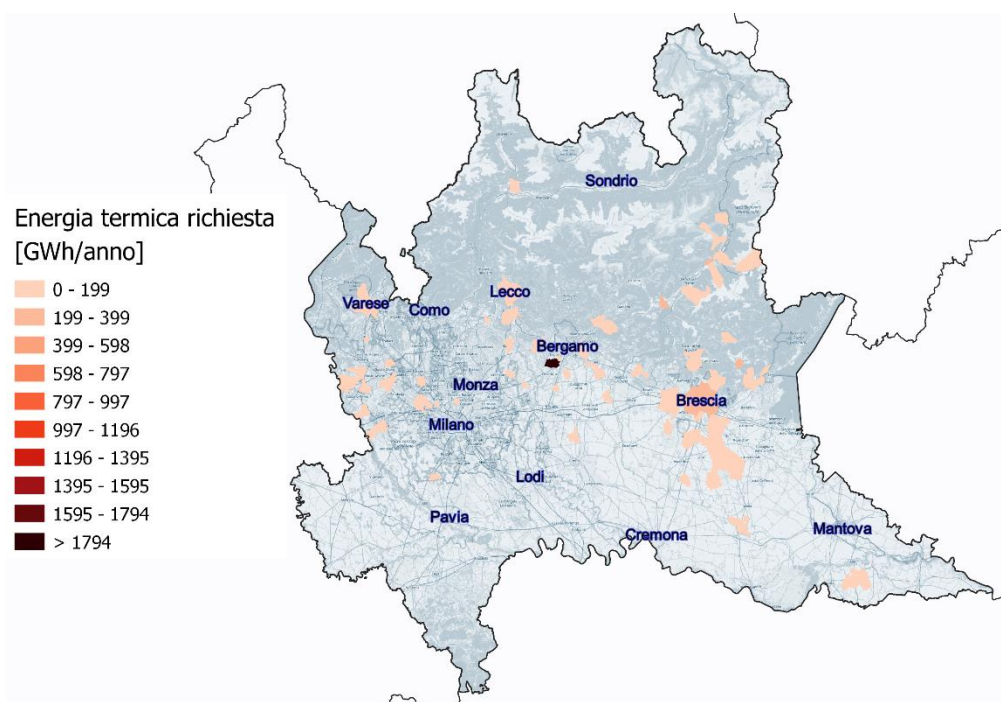


Figura 3.2 – Energia termica richiesta dall'industria dell'acciaio [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

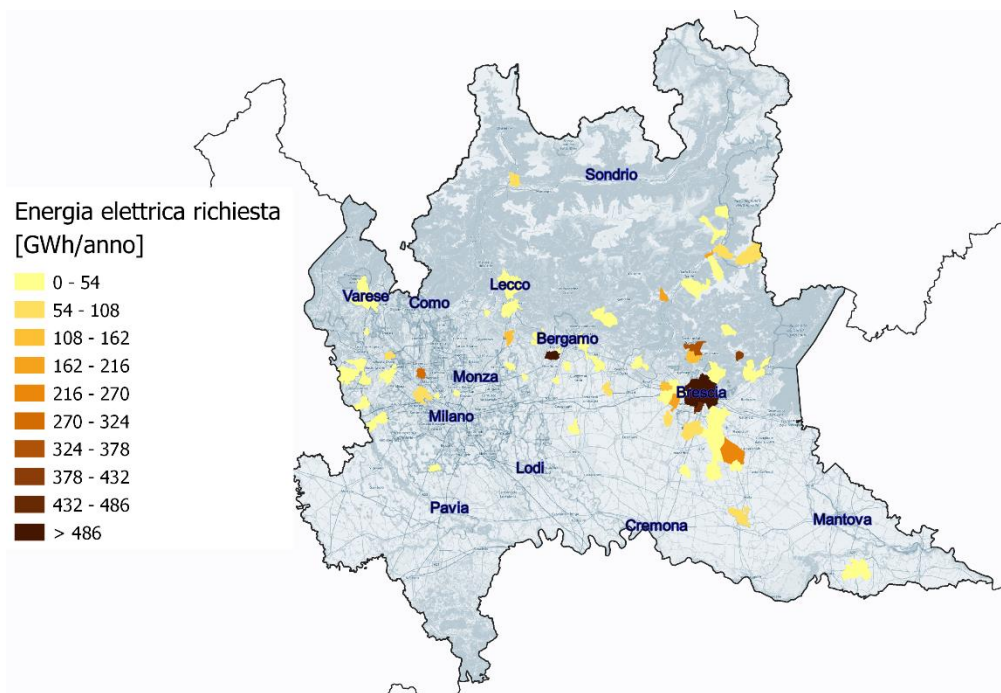


Figura 3.3 - Energia elettrica richiesta dall'industria dell'acciaio [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

3.2 Chimica

Il settore della chimica ha un tessuto industriale molto sviluppato in Italia, costituito sia da grandi poli produttivi (come, ad esempio, Mantova), sia da una marcata diffusione di piccole e medie realtà produttive. Secondo i dati ISTAT, la Lombardia spicca nel contesto nazionale generando un fatturato nella “*fabbricazione di prodotti chimici*” (codice ATECO 20) di circa 21,5 mld € sul totale nazionale, corrispondente a quasi 53 mld € (dati 2018 [3]), e un numero di occupati pari a circa 46 mila unità, che rappresenta il 41% del totale nazionale (pari a 111 mila unità). Federchimica [4] offre una panoramica del settore descrivendo la trasformazione avvenuta nel corso dell’ultimo ventennio, durante il quale il comparto si è specializzato sempre più nei sottosettori ad alto valore aggiunto e alto contenuto conoscitivo e tecnologico. Ciò spiega la diffusione capillare delle industrie sul territorio poiché la produzione è limitata a modeste quantità di prodotto ma ad alto valore economico.

Il grafico seguente mostra con maggiore dettaglio il numero di occupati del settore chimico (3 cifre ATECO): i tre settori di maggior rilievo sono la fabbricazione di prodotti chimici di base, fertilizzanti, materie plastiche e gomma in forme primarie, seguiti dalla fabbricazione di prodotti per la cura del corpo e la pulizia della casa e infine il comparto delle vernici, pitture e smalti e inchiostri.

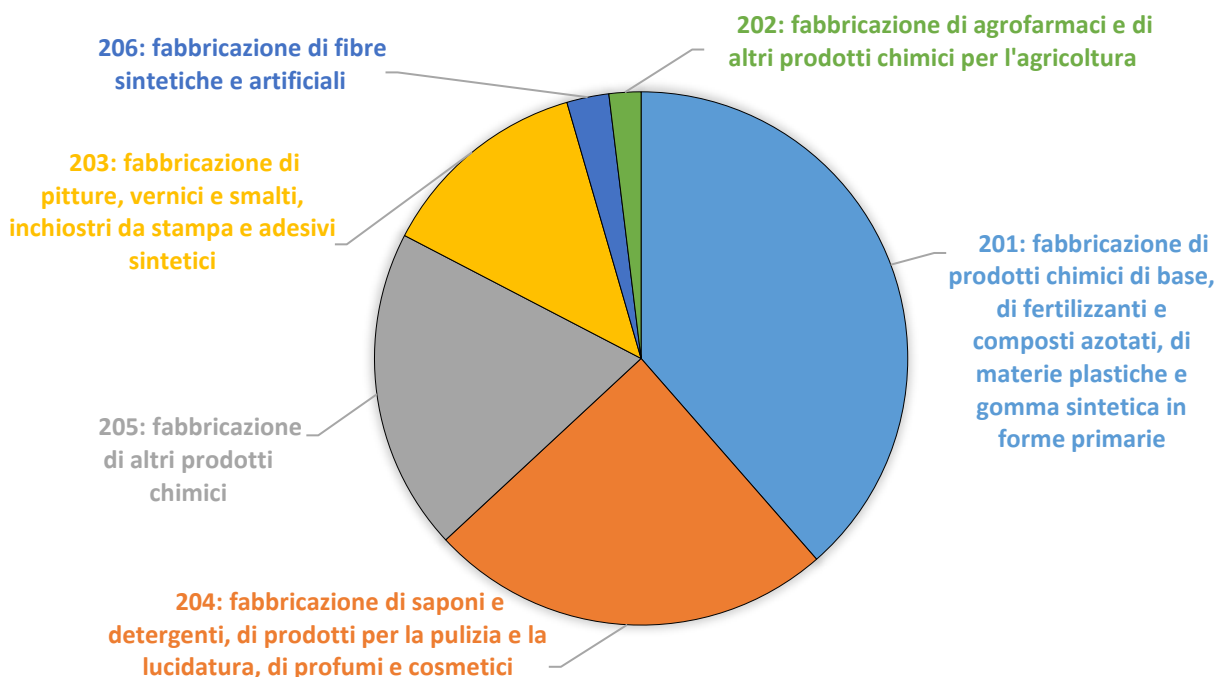


Figura 3.4 – Distribuzione del numero di occupati del settore chimico ripartiti per codice ATECO [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati ISTAT [8]]

I principali prodotti chimici di base che vengono prodotti in Italia sono etilene (C_2H_4), propilene (C_3H_6), e ammoniaca [10]. L’ammoniaca, non prodotta in Lombardia, è utilizzata soprattutto per produrre fertilizzanti (es. urea, nitrato d’ammonio). Etilene, e propilene, insieme ai BTX (benzene, toluene, xylene) costituiscono i cosiddetti *High Value Chemicals* (HVCs), i composti principali delle plastiche. Queste, costituite da un materiale organico ad elevato peso molecolare e caratterizzato da molecole polimeriche con una catena molto lunga, sono il primo prodotto finale della chimica, in termini di massa, con una domanda in forte crescita, che si prevede resterà il principale *driver* della produzione globale di HVCs [11]. Il loro processo di

produzione vede come primo passaggio lo *steam cracking* degli idrocarburi (in un intervallo di temperatura compreso fra 850°C e 1100°C), nel quale avviene la scissione delle lunghe molecole idrocarburiche in monomeri (i.e. gli elementi costitutivi dei materiali plastici). I monomeri vengono uniti tra loro formando i polimeri nel processo successivo, detto appunto di *polimerizzazione*.

Ad oggi, nel settore chimico, i combustibili fossili sono sia fonte di energia, sia materia prima. L'idrogeno e il carbonio, che sono contenuti nei combustibili, sono infatti gli elementi principali dei composti chimici di base e dei prodotti finali. In Italia, circa il 45% dei combustibili consumati dall'industria chimica è utilizzato come materia prima [12]. Va poi notato che, oltre che nella fase di produzione, la CO₂ è emessa nella fase d'uso e nell'incenerimento dei prodotti giunti a fine vita.

Etilene, propilene e BTX sono prodotti attraverso il processo di *steam cracking* degli idrocarburi (cioè il loro riscaldamento controllato in assenza di ossigeno e con vapore acqueo), a una temperatura compresa fra 700°C e 950°C. Il processo è seguito da una fase di raffreddamento rapido (*quenching*), di compressione ed essiccazione e infine di separazione dei prodotti e dei sottoprodotti (normalmente l'etilene è il prodotto principale). In Europa la nafta e l'etano sono gli idrocarburi principalmente utilizzati per la produzione di etilene [13]. Vengono anche impiegati il GPL, l'etanolo e i gas di cokeria [13]. I processi di *steam cracking* dell'etano e della nafta sono molto simili, ma nel caso dell'etano viene prodotto solo etilene, mentre, utilizzando la nafta, vengono sintetizzati etilene e altri prodotti chimici di elevato valore. Il fabbisogno elettrico e termico specifici sono rispettivamente di 0,1 MWh e 3,4 MWh per tonnellata di etilene prodotto [13][14].

L'ammoniaca è sintetizzata partendo da azoto e idrogeno, quest'ultimo ad oggi prodotto per mezzo di *steam reforming* del gas naturale, generando CO₂ di processo. In Italia, il 60% circa di queste emissioni di processo è rilasciata in atmosfera in fase di produzione mentre il restante 40% viene catturata ed utilizzata come materia prima per la produzione di urea ed è comunque emessa nella fase d'uso (ISPRA, 2020 [10]). È su questa seconda parte che si può eventualmente agire in Lombardia. Il fabbisogno di gas naturale e il fabbisogno elettrico specifico del processo sono rispettivamente di 9,7 MWh e 0,1 MWh per tonnellata di ammoniaca prodotta [15][13].

Anche il metanolo (CH₃OH o MeOH) viene impiegato in numerose applicazioni industriali per la sintesi di composti chimici e solventi (per es. il processo *methanol-to-olefins* o MTO). Il metanolo viene oggi sintetizzato principalmente a partire dal gas naturale, ma è possibile produrlo anche tramite gassificazione del carbone [16][17]. A valle di un processo di steam reforming del metano, che avviene a una pressione di 10÷20 bar e alla temperatura di circa 850°C, il monossido di carbonio, il biossido di carbonio e l'idrogeno prodotti reagiscono in un reattore catalitico producendo metanolo ($\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$; $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_3\text{OH}$). La reazione avviene a una temperatura di 250°C e a una pressione compresa fra 50 e 101 bar. Gli stabilimenti produttivi richiedono in media 0,6 tonnellate di combustibili fossili e 0,2 MWh di energia elettrica per la sintesi di una tonnellata di metanolo [13]. Nel processo *methanol-to-olefins* (MTO) avviene la trasformazione del metanolo in olefine (e.g. etilene, propilene e butene). L'MTO è un processo catalitico complesso che inizia con la disidratazione del metanolo, per ottenere etere dimetilico (C₂H₆O), poi convertito in olefine (C₂H₄/C₃H₆/C₄H₈). Questa reazione avviene a una temperatura compresa fra i 350°C e i 500°C, a una pressione di 2-3 bar, in presenza di un catalizzatore [18].

Il settore chimico lombardo risulta essere il secondo più energivoro in termini di energia termica e il terzo in termini di energia elettrica. I valori stimati sono rispettivamente pari a **5.12 TWh/anno** e **2.56 TWh/anno**. Le mappe in Figura 3.5 e Figura 3.6 evidenziano come Milano e di Bergamo siano le provincie lombarde in cui

l'industria chimica è più diffusa, con 58 e 48 siti rispettivamente. A seguire la provincia di Varese con 32 stabilimenti.

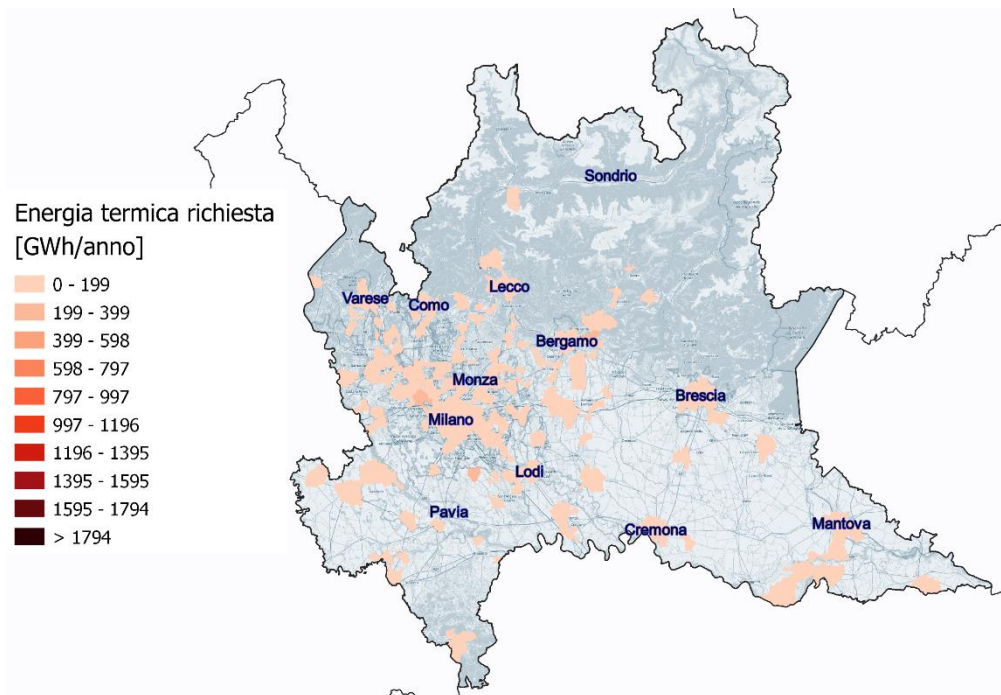


Figura 3.5 - Energia termica richiesta dall'industria chimica [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

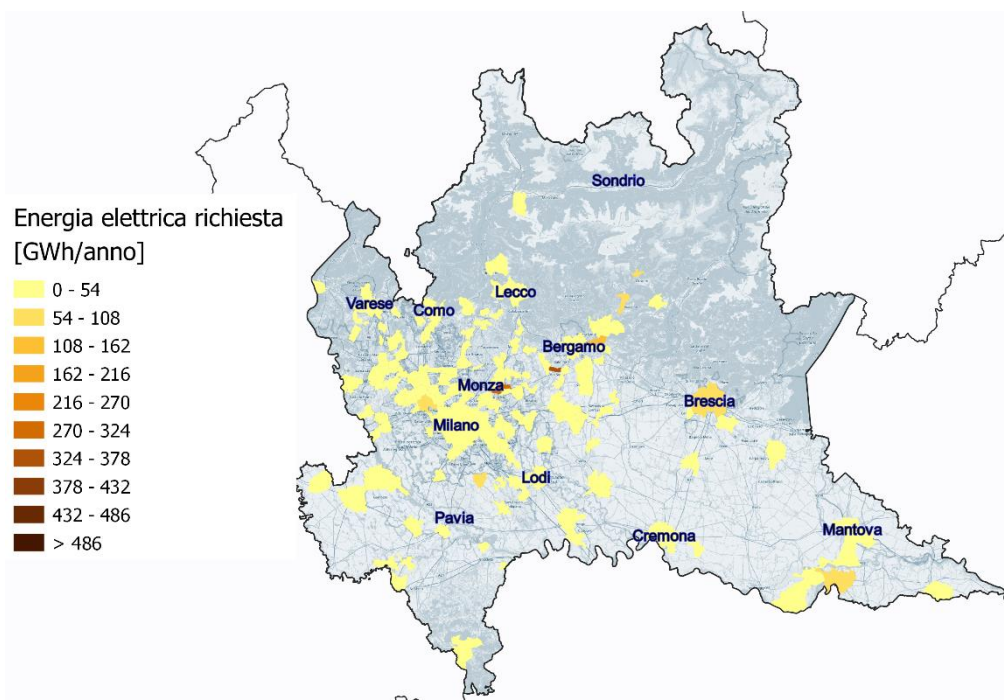


Figura 3.6 - Energia elettrica richiesta dall'industria chimica [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

3.3 Calce e cemento

La produzione di cemento in Lombardia ha luogo in 5 unità produttive (in Italia si contano complessivamente 32 siti produttivi) che operano con ciclo completo e sono situate a Calusco d'Adda, Caravate, Rezzato, Tavernola e Ternate [19]. La produzione vale 3,8 Mt (dato 2016, [20]) a fronte della produzione nazionale pari a circa 19 Mt, valore pressochè stabile negli ultimi anni (2016-2019) [19]. L'industria del cemento in Italia ha intrapreso un percorso di efficientamento negli ultimi anni, specialmente sull'ammodernamento dei forni di cottura, che pesano in modo rilevante sul consumo energetico [19]. I produttori italiani di cemento, inoltre, condividono favorevolmente l'impegno assunto attraverso l'Associazione *Global Cement and Concrete Association*, per raggiungere la neutralità climatica di tutta la filiera (compreso l'approvvigionamento di materie prime) entro il 2050 [21].

Il processo di produzione di calce e cemento inizia con l'estrazione delle materie prime nelle cave. Queste vengono poi macinate e miscelate per ottenere una farina composta per l'80% da calcare (principalmente carbonato di calcio, CaCO_3) e per il 20% da argilla. In seguito, avviene la fase di cottura in un forno cilindrico orizzontale, alla temperatura di circa 900°C. Nel forno avviene la reazione di *calcinazione*, ovvero decomposizione del carbonato di calcio e formazione di ossido di calcio (calce) e anidride carbonica ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$). Per la produzione di cemento, il processo continua con la reazione di *clinkerizzazione*, durante la quale la calce viene cotta a una temperatura compresa fra 1400°C e 1600°C con silice, allumina e ossido ferroso, originando il clinker. Il clinker viene poi miscelato con gesso e altri additivi per produrre il cemento. Il processo di cottura del clinker implica un elevato consumo di energia termica e l'emissione in atmosfera di un'importante quantità di anidride carbonica di processo (il 64% delle emissioni del settore cementizio deriva dal processo di calcinazione). I consumi specifici di energia elettrica e calore per tonnellata di produzione relativi al 2017 sono quantificati da Colacem rispettivamente in 115 kWh/t e 870 kWh/t [22].

In Lombardia, l'analisi ha portato alla stima di **3.79 TWh/anno** di consumo di energia termica e **0.53 TWh/anno** di consumo di energia elettrica imputabili al settore di produzione del cemento. Gli stabilimenti per la produzione della calce invece sono considerati separatamente e ad essi sono associati **0.87 TWh/anno** di consumo termico e **0.04 TWh/anno** di consumo elettrico. Gli stabilimenti sono mappati in

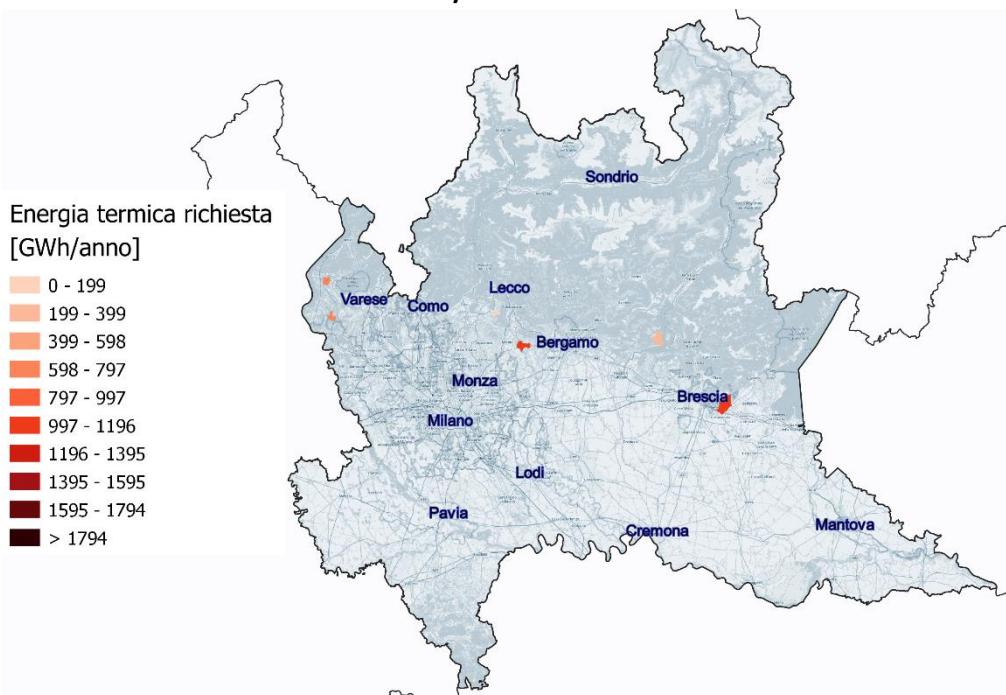


Figura 3.7, Figura 3.8, Figura 3.9 e in Figura 3.10.

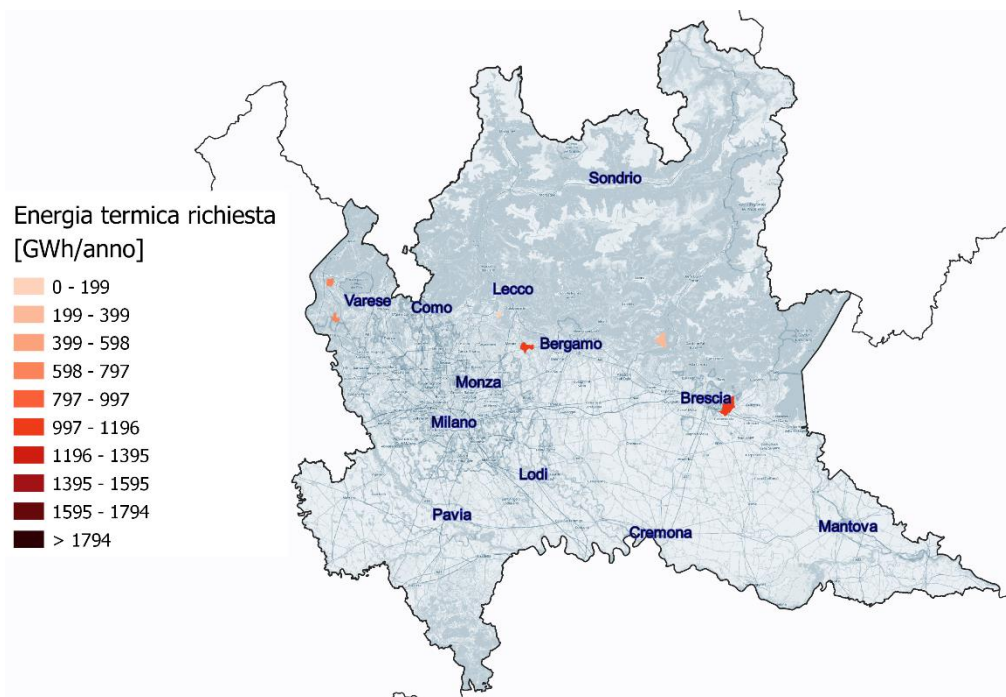


Figura 3.7 - Energia termica richiesta dall'industria del cemento [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

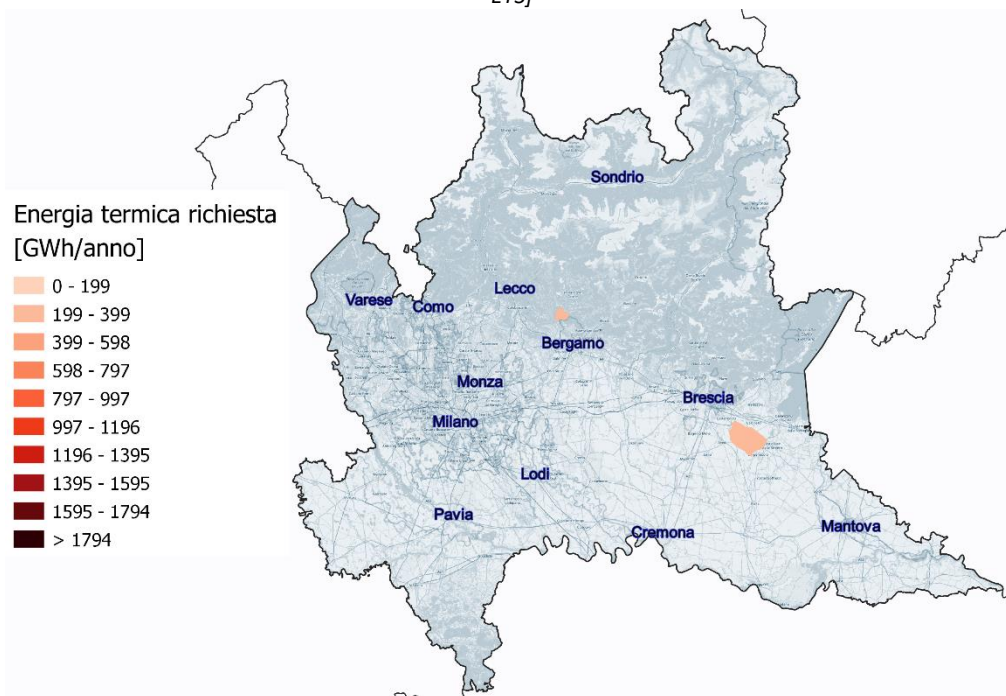


Figura 3.8 - Energia termica richiesta dall'industria della calce [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

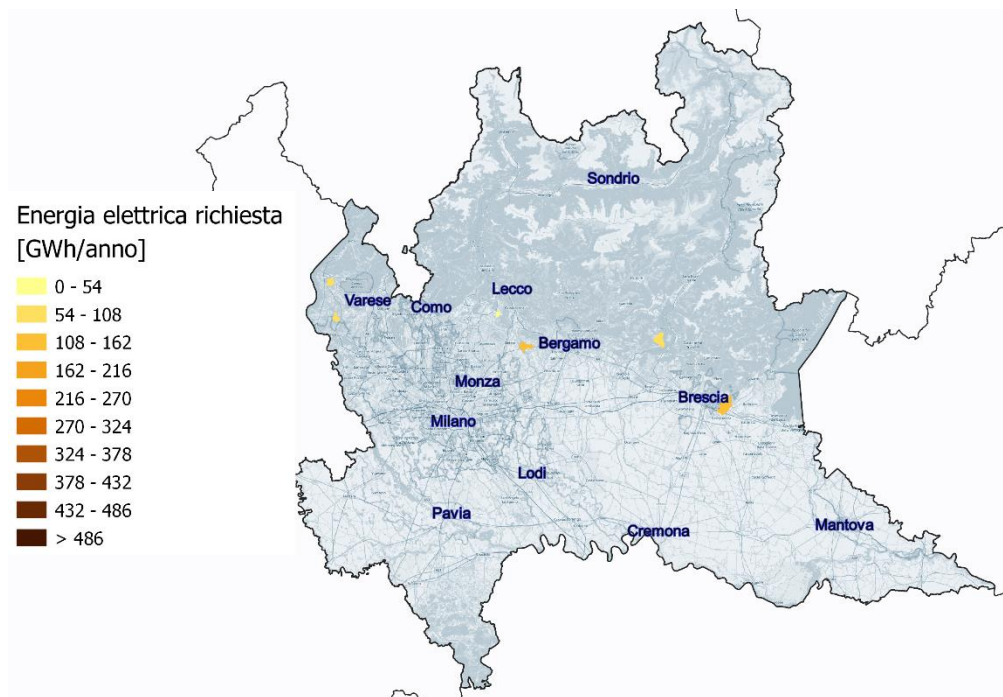


Figura 3.9 - Energia elettrica richiesta dall'industria del cemento [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

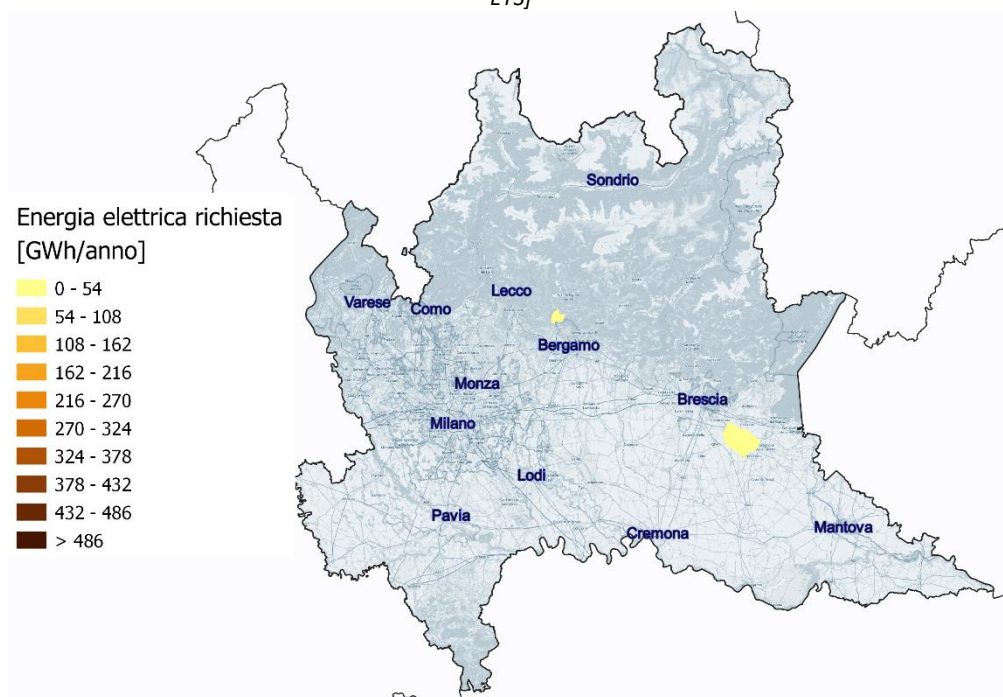


Figura 3.10 - Energia elettrica richiesta dall'industria della calce [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

3.4 Vetro

La fabbricazione di vetro e di prodotti in vetro impiega in Lombardia circa 5 mila *dipendenti delle imprese attive*, 500 *lavoratori indipendenti* e 300 *temporanei* (dati 2017 [8]). La produzione nazionale di vetro è pari a circa 5,6 Mt, in tutte le sue forme (piano, 1Mt; cavo, 4,5 Mt; lana di vetro, 0,1 Mt (dati 2019 [23])).

Applicando il rapporto tra occupati a livello regionale e nazionale alla produzione nazionale, si ottiene una stima della produzione di vetro in Lombardia di poco inferiore a 1 Mt.

Il processo produttivo del vetro si compone di cinque fasi:

- (i) preparazione della carica, per frantumare, dosare e miscelare le materie prime (principalmente sabbia, soda e calcare);
- (ii) fusione della carica in una fornace, normalmente a gas, a una temperatura compresa fra 1300 e 1700°C a seconda del prodotto da realizzare [24], [25], richiedendo complessivamente il 75% dell'energia termica di tutto il processo [15];
- (iii) raffreddamento fino a circa 1100°C, per ottenere una viscosità che permetta la colata;
- (iv) formatura per il vetro cavo tramite soffiatura o tramite colata e stampaggio; per il vetro piano tramite il processo Pilkington, su bagno di stagno fuso [26];
- (v) lavorazioni finali quali trattamenti superficiali, trattamenti di fluorurazione interna, ricottura e taglio (la ricottura, a 550°C, in forni alimentati a gas naturale oppure elettrificati, serve per aumentare la resistenza meccanica del vetro) [27]. Il fabbisogno energetico specifico per unità di prodotto può essere ricostruito come riportato in Tabella 3.1 a partire dalle informazioni di consumi e produzione totali per il 2018 dichiarati da Assovetro [23].

Tabella 3.1 – Processo di ricostruzione dei fabbisogni energetici specifici per unità di prodotto

			u.d.m	Fonte
a	Produzione vetro	5,3	Mt	[28] [23]
b	Consumi di energia elettrica	0,87	TWh	[28][29]
c	Consumi di gas naturale	7,30	TWh	
d	Consumi - altro (olio combustibile, gasolio)	3,08	TWh	
e	Fabbisogno elettrico specifico	164,2	kWh/t	$e = b/a$
f	Fabbisogno termico specifico	1958,5	kWh/t	$f = (c + d)/a$

In Lombardia, il settore di produzione del vetro è responsabile di **1.51 TWh/anno** di consumi termici e di **0.35 TWh/anno** di consumi elettrici. La provincia di Milano risulta essere quella più interessata (Figura 3.11 e Figura 3.12)

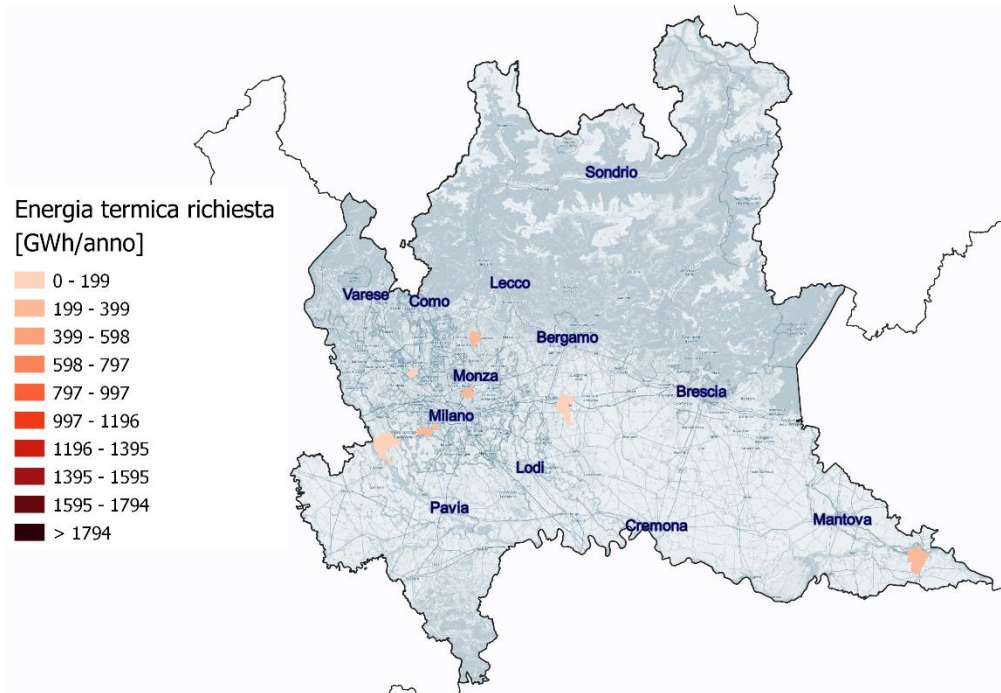


Figura 3.11 - Energia termica richiesta dall'industria del vetro [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

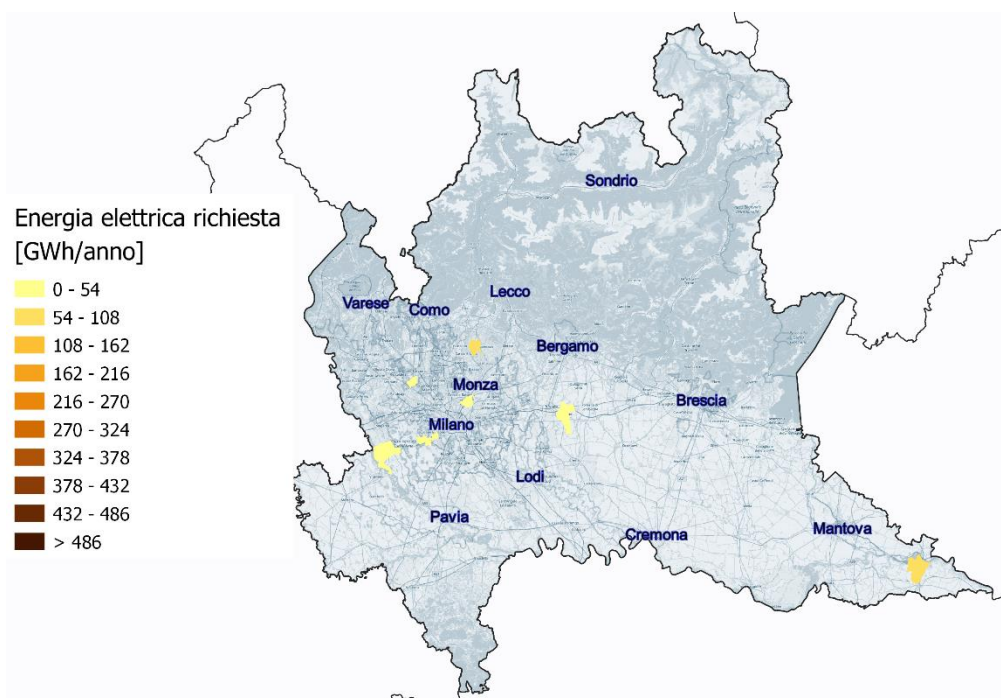


Figura 3.12 - Energia elettrica richiesta dall'industria del vetro [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

3.5 Ceramica

Il processo di produzione della ceramica può essere suddiviso in almeno cinque fasi:

- (i) preparazione delle materie prime (frantumazione, dosaggio e miscelazione della carica);
- (ii) modellazione (conferimento della forma finale mediante metodi a secco o a umido);

- (iii) rimozione dell'umidità presente nei manufatti tramite essiccazione (può durare diversi giorni);
- (iv) cottura nei forni (può durare diversi giorni);
- (v) trattamenti finali (e.g. test per il controllo della qualità, molatura e segatura).

Eventualmente, dopo l'essiccazione vengono effettuati degli ulteriori trattamenti, come la smaltatura, l'ingobbiatura o la metallizzazione. Nei forni di cottura, tipicamente alimentati a gas naturale, le temperature variano a seconda della composizione dei materiali e dello specifico oggetto che si vuole ottenere⁶.

In Lombardia si stima un consumo di energia termica dovuto alla produzione di ceramica pari a **0.53 TWh/anno** e un consumo di energia elettrica pari a **0.05 TWh/anno**, nell'anno 2018. Le mappe in Figura 3.13 e Figura 3.14 mostrano la posizione e la richiesta di energia termica ed elettrica degli impianti.

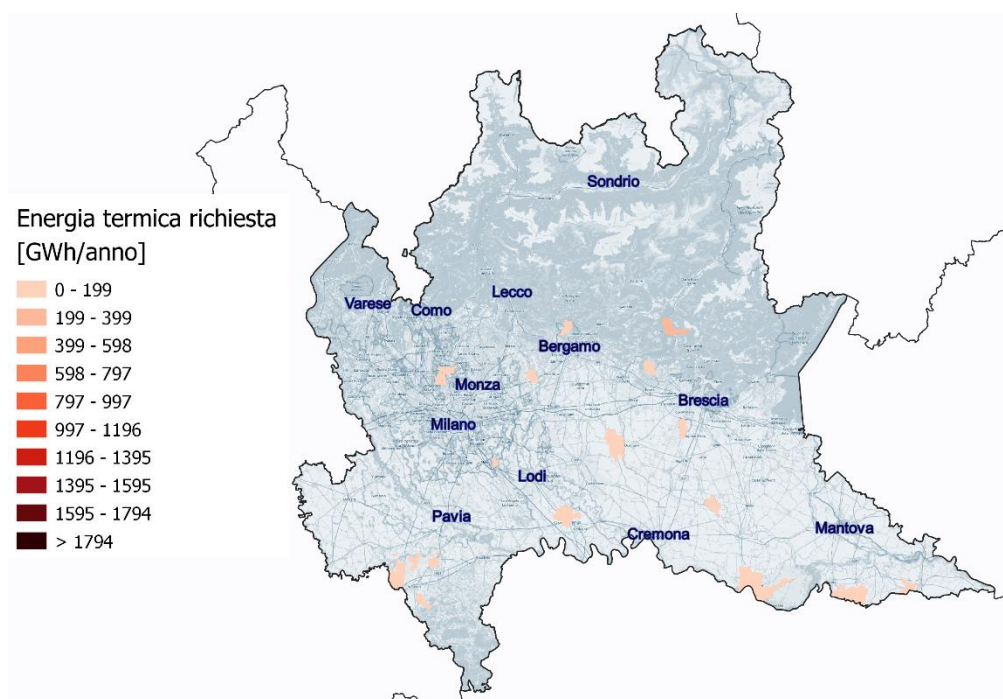


Figura 3.13 - Energia termica richiesta dall'industria della ceramica [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

⁶ Si raggiungono i 900°C-1250°C per le piastrelle [29]; 1250°C per la ceramica sanitaria [92]; 950°C-1280°C per la stoviglie [13]; 1250°C-1800°C per i materiali refrattari [13]. I fabbisogni elettrici e termici specifici per unità di prodotto sono dichiarati dal Centro Ceramico di Bologna, rispettivamente in 211 kWh/t e 1810 kWh/t (dati 2016 [93]).

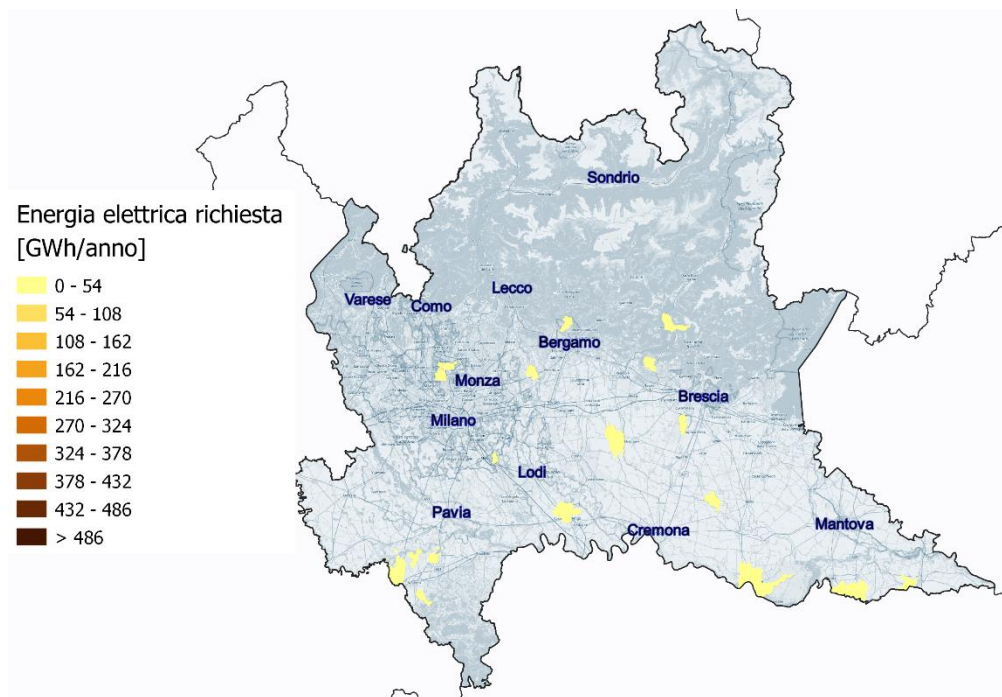


Figura 3.14 - Energia elettrica richiesta dall'industria della ceramica [Fonte Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

3.6 Carta

Per quanto riguarda il settore della produzione e lavorazione della carta, a livello nazionale, Assocarta riscontra nel 2020 circa 18 900 addetti, su un totale di 119 imprese (a cui corrispondono 153 stabilimenti produttivi). La produzione si è assestata, nel medesimo anno, a circa 8,5 Mt, generando un fatturato nazionale di quasi 6,4 mld € [30]. ISTAT non fornisce informazioni di tipo economico a livello regionale per motivi di riservatezza dei dati. Il numero di stabilimenti produttivi lombardi nei registri AIA ed ETS è pari a circa il 13% del totale.

Il processo produttivo della carta può essere distinto in quattro fasi:

- (i) estrazione della cellulosa dal legno (fibra vergine) o dalla carta da riciclare⁷, attraverso un processo meccanico (il legno viene macinato e raffinato) o un processo chimico (sostanze a base di solfiti o solfati separano la lignina dalle fibre);
- (ii) sbiancamento della pasta di cellulosa e acqua con biossido di fluoro;
- (iii) formazione del foglio tramite feltrazione (sottrazione dell'acqua per unire le fibre) - sulla macchina continua, l'acqua viene eliminata attraverso il drenaggio, la pressatura e l'essiccamento, facendo passare i fogli nelle cappe di asciugatura, attraverso una serie di cilindri riscaldati, con gas naturale, a temperature crescenti da 60°C a 160°C [27], mentre viene insufflata aria calda secca per rimuovere l'acqua che evapora;
- (iv) trattamenti superficiali a seconda del prodotto finale che si vuole ottenere. Va notato che la lignina separata viene bruciata, assieme a una quota maggioritaria di gas naturale (quasi

⁷ In media il legno è composto per il 38-50% da cellulosa, per il 23-32% da emicellulosa, per il 15-25% da lignina e per la restante parte da terpeni, resine e acidi grassi [94]. La cellulosa e la emicellulosa sono le fibre del legno, mentre la lignina è la sostanza che tiene unite queste fibre.

totalitaria negli impianti italiani [31]) all'interno di impianti cogenerativi dedicati, per la generazione dell'energia termica necessaria durante il processo produttivo della carta.

I fabbisogni elettrico e termico specifici per unità di prodotto sono ricavati dai consumi complessivi del 2015 stimati dal JRC [32] per la produzione totale dello stesso anno da RSE [27]. In Tabella 3.2 si riportano i valori di partenza e i valori ottenuti.

Tabella 3.2 - Processo di ricostruzione dei fabbisogni energetici specifici per unità di prodotto

			u.d.m.	Anno	Fonte
a	Fabbisogno elettrico	6,5	TWh	2015	[32]
b	Fabbisogno termico	18,1	TWh	2015	[32]
c	Produzione carta e cartone	8,8	Mt	2015	[27]
d	Fabbisogno elettrico specifico	735,6	kWh/t	2015	$d = a/c$
i	Fabbisogno termico specifico	2054,2	kWh/t	2015	$e = b/c$

In territorio lombardo, per l'anno 2018 è stimato per il settore della carta un consumo di energia termica di **1.18 TWh/anno** e un consumo di energia elettrica pari a **0.40 TWh/anno**. La Figura 3.15 e la Figura 3.16 mostrano la loro ripartizione sul suolo regionale.

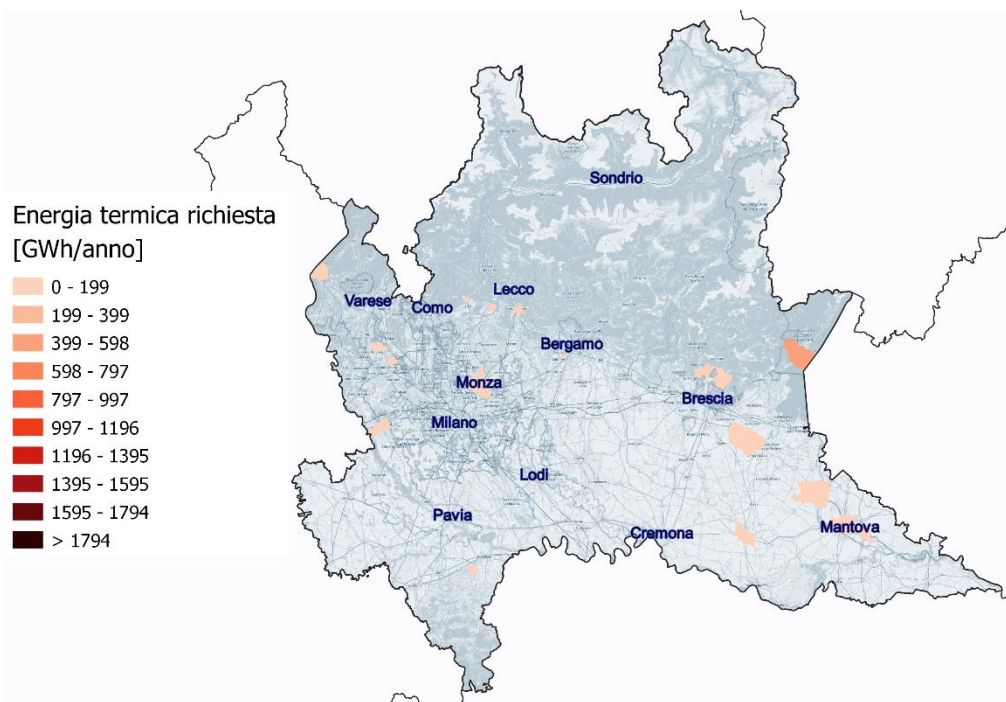


Figura 3.15 - Energia termica richiesta dall'industria della carta [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

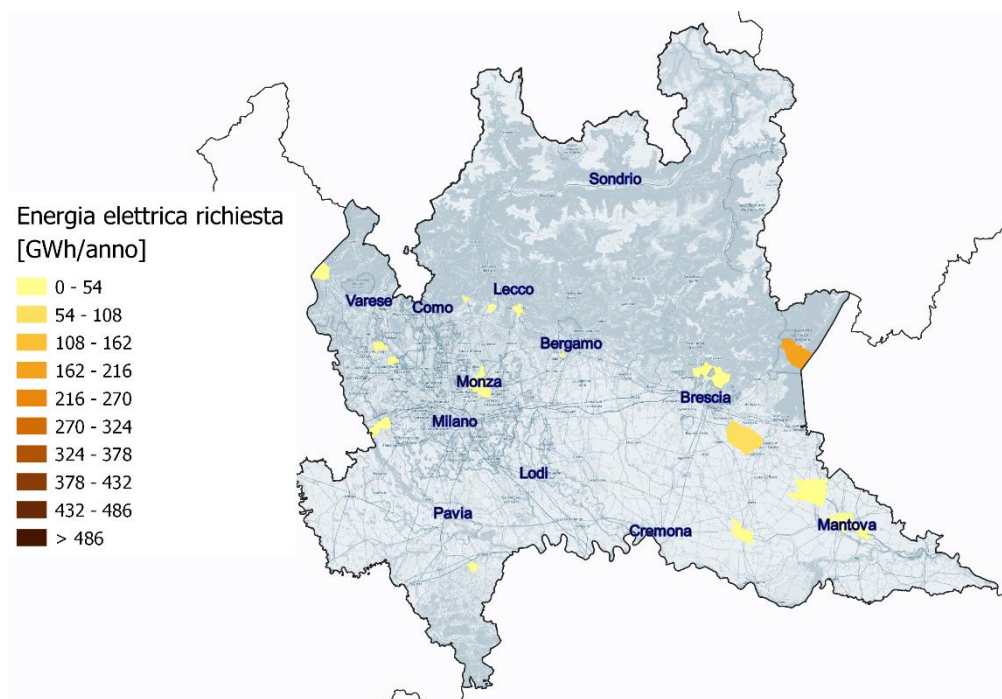


Figura 3.16 - Energia elettrica richiesta dall'industria della carta [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

3.7 Alimentare

Il settore alimentare è la seconda industria manifatturiera del paese ed è costituito da un tessuto imprenditoriale molto diffuso su tutto il territorio nazionale grazie soprattutto alle piccole e microimprese a conduzione familiare, ma anche alle grandi industrie multinazionali [33]. Il settore si dimostra un'eccellenza italiana nel mondo grazie alla qualità dei prodotti che esporta e al legame che gli stessi hanno con il territorio. Il settore ha espresso tassi di crescita positivi in controtendenza alla complessiva industria manifatturiera. Nei dati sui risultati economici delle imprese (dati ISTAT 2018, [3]) il settore alimentare lombardo ha fatturato circa 24 mld € (circa il 12,5% rispetto a quanto dichiarato da Federalimentare [34] per il territorio nazionale) e conta 64 700 occupati (circa il 16,7%). Il seguente grafico (Figura 3.17) mostra la composizione del settore alimentare in termini di occupati con dettaglio settoriale a 3 cifre ATECO ed evidenzia come la "produzione di prodotti da forno e farinacei" e la "produzione e conservazione di carne e prodotti a base di carne" rappresentino più della metà degli occupati nel settore alimentare, seguiti dal segmento lattiero-caseario.

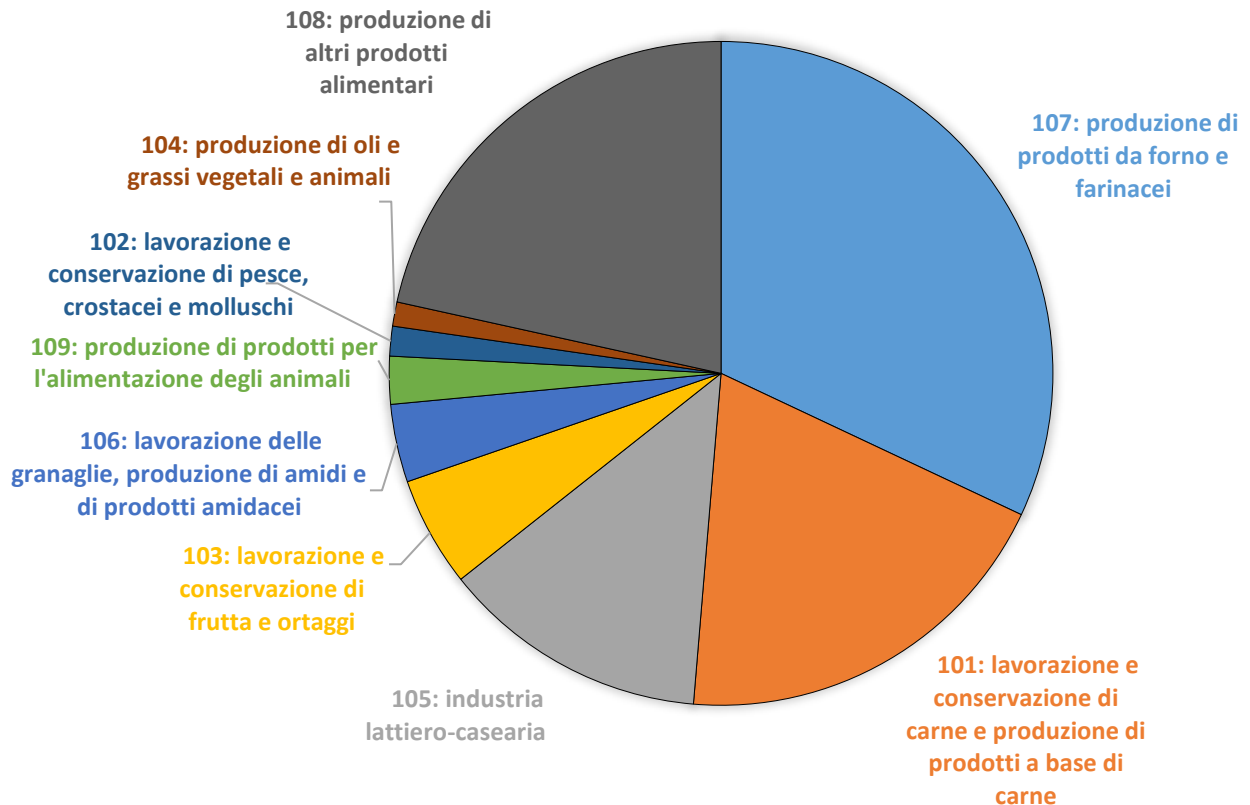


Figura 3.17 – Ripartizione degli occupati nel settore alimentare [fonte: ISTAT [8]]

L'industria alimentare è costituita da svariati processi volti a trattare gli alimenti grezzi e al fine di generare prodotti finiti, pronti per raggiungere i consumatori finali. I processi industriali tipici del settore alimentare variano tuttavia in funzione del prodotto. Si riportano i sottosettori in conformità ai codici ATECO a tre cifre per offrire una panoramica generale:

- i) carni e prodotti a base di carne;
- ii) pesce, crostacei e molluschi;
- iii) frutta e ortaggi;
- iv) oli e grassi vegetali e animali;
- v) industria lattiero-casearia;
- vi) lavorazione delle granaglie, produzione di amidi e di prodotti amidacei.

Le fasi di processo sono spesso costruite ad hoc per il bene prodotto e per questo motivo difficilmente uniformabili in pochi procedimenti come nel caso di altre industrie manifatturiere. Si può comunque individuare una classificazione rappresentativa in [27]:

- i) lavaggio;
- ii) taglio, affettatura, sbucciatura, macinazione, schiacciatura, spappolamento ecc. ;
- iii) processi fisici o chimici di separazione (estrazione, scambio ionico, ammollo, solubilizzazione, sedimentazione, filtrazione, distillatura ecc.);
- iv) Processi termici di cottura e trattamento (essiccazione, scongelamento e congelamento, raffreddamento, pastorizzazione, ebollizione, sterilizzazione, ecc.);
- v) imballaggio e confezionamento. I consumi energetici legati ai processi sono di tipo termico e elettrico in funzione del trattamento che il prodotto deve subire.

Per l'anno 2018, le analisi a partire dai registri AIA ed ETS vedono il consumo termico totale imputabile al settore alimentare pari a **2.16 TWh/anno** e il consumo elettrico pari a **1.08 TWh/anno**. Dalle mappe in Figura 3.18 e Figura 3.19, è possibile notare quanto siano numerose le industrie di questo tipo in Lombardia – se ne contano 957 in totale - con maggiore diffusione nell'area pianeggiante della regione, in particolare nelle province di Brescia, Mantova e Cremona. Pur costituendo il settore merceologico più consistente, l'industria alimentare ricopre il quinto posto per consumi termici totali e il quarto posto per consumo elettrico totale.

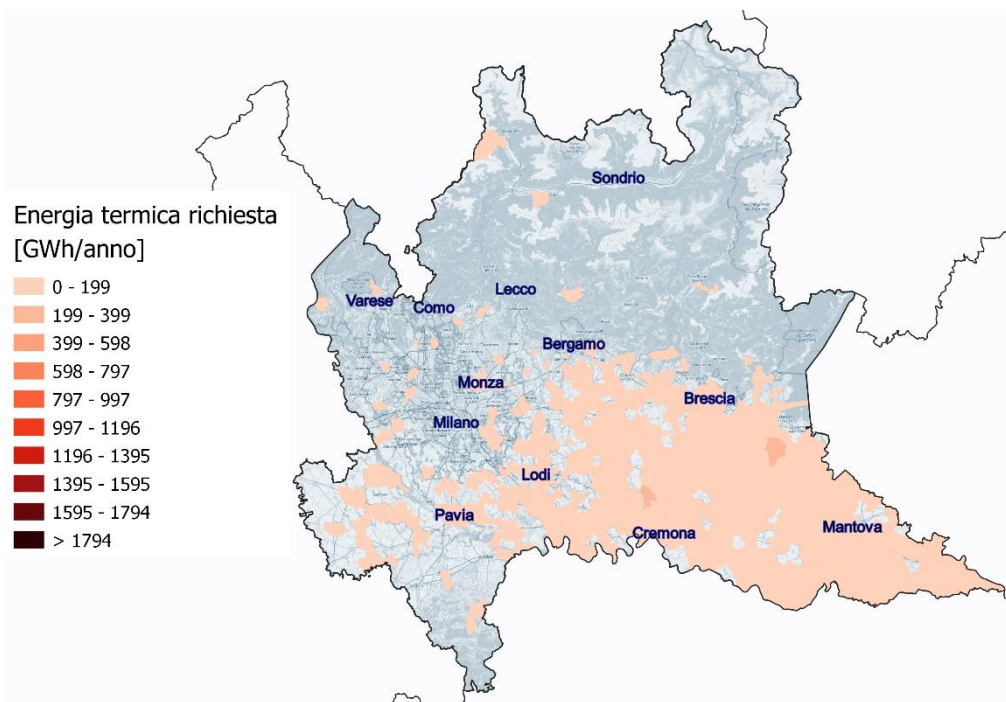


Figura 3.18 - Energia termica richiesta dall'industria alimentare [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

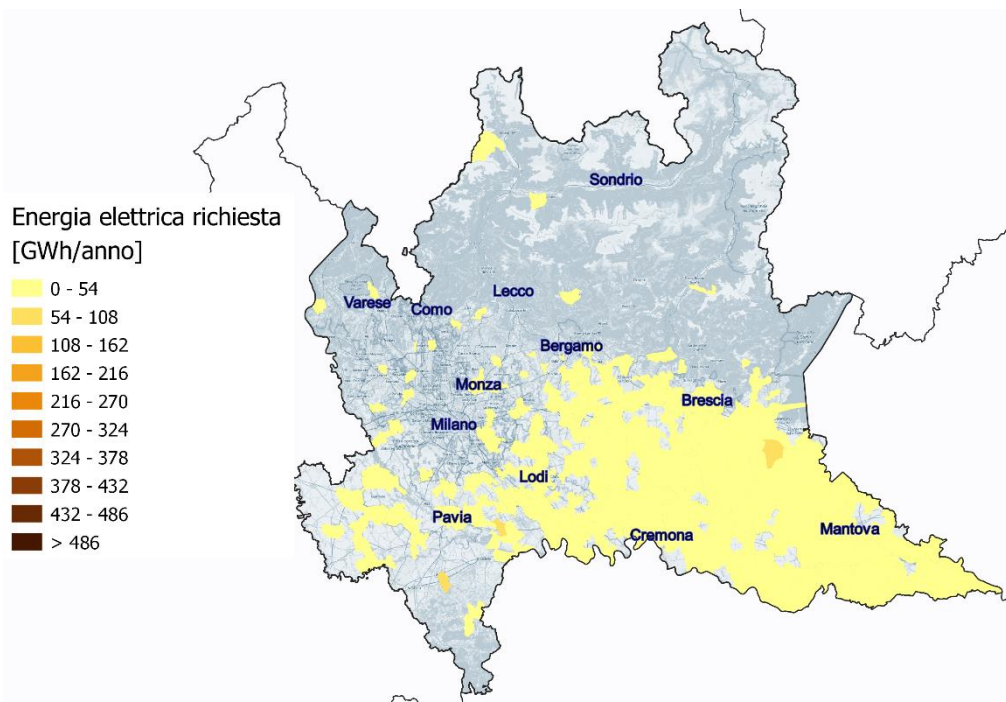


Figura 3.19 - Energia elettrica richiesta dall'industria alimentare [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

3.8 Metalli non ferrosi

La nomenclatura “metalli non ferrosi” indica svariati processi produttivi lungo tutta la catena del valore della produzione: dalla fusione e produzione dei metalli grezzi fino alla realizzazione di beni e prodotti finiti. In questo report, le aziende presenti nel dataset delle AIA sono state classificate in base al codice IPPC e successivamente sottoclassificate per macrosettore. Alla categoria dei metalli non ferrosi sono state associate aziende appartenenti al settore ATECO 25, relativo alla produzione di prodotti in metallo (che è tuttavia composto anche dalla produzione di prodotti in metalli ferrosi) e al settore ATECO 24, relativo alla metallurgia. Nel primo caso sono compresi i processi di trattamento dei metalli e delle superfici come zincatura, fosfatazione, fissaggio, trattamenti galvanici oltre che alla produzione di prodotti finiti in metallo. Nel secondo caso rientrano in particolare le aziende produttrici di metalli non ferrosi attraverso fonderie o altri processi. In generale, i settori compresi nella categoria metalli non ferrosi ricadono completamente nella formale definizione di industria metalmeccanica.

Il settore relativo ai metalli non ferrosi risulta avere il più alto impatto tra i settori analizzati in termini di consumi elettrici, con **5.97 TWh/anno**, e il terzo in termini di consumi termici, con **3.83 TWh/anno**. È il secondo per numerosità, con 335 siti industriali in totale, come è possibile vedere in Figura 3.20 e Figura 3.21, maggiormente diffusi nella provincia di Brescia, Milano e Bergamo.

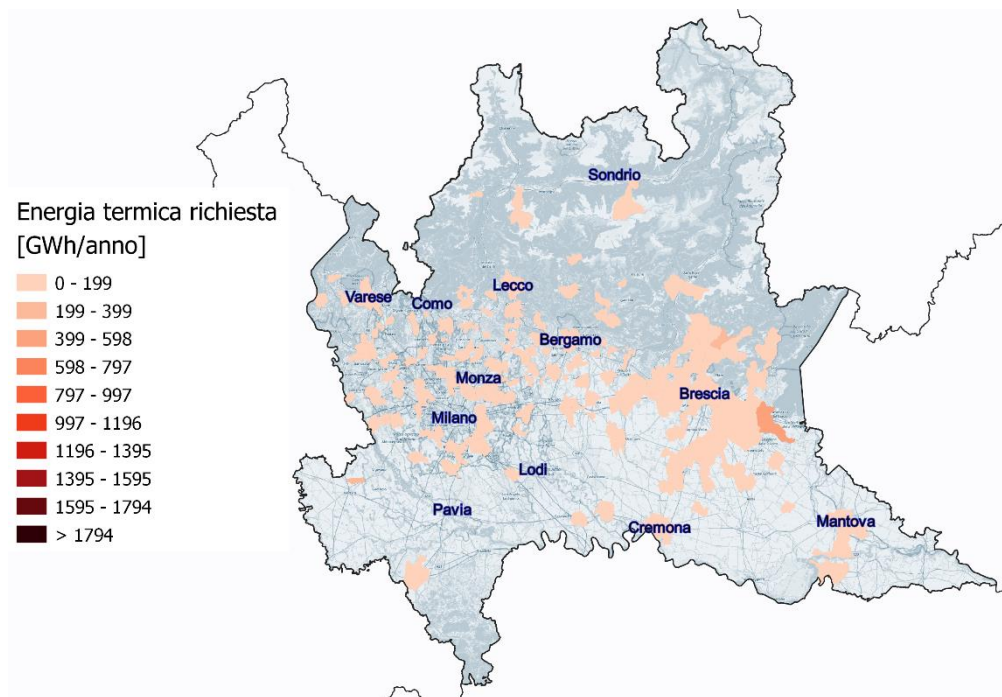


Figura 3.20 - Energia termica richiesta dall'industria dei metalli non ferrosi [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

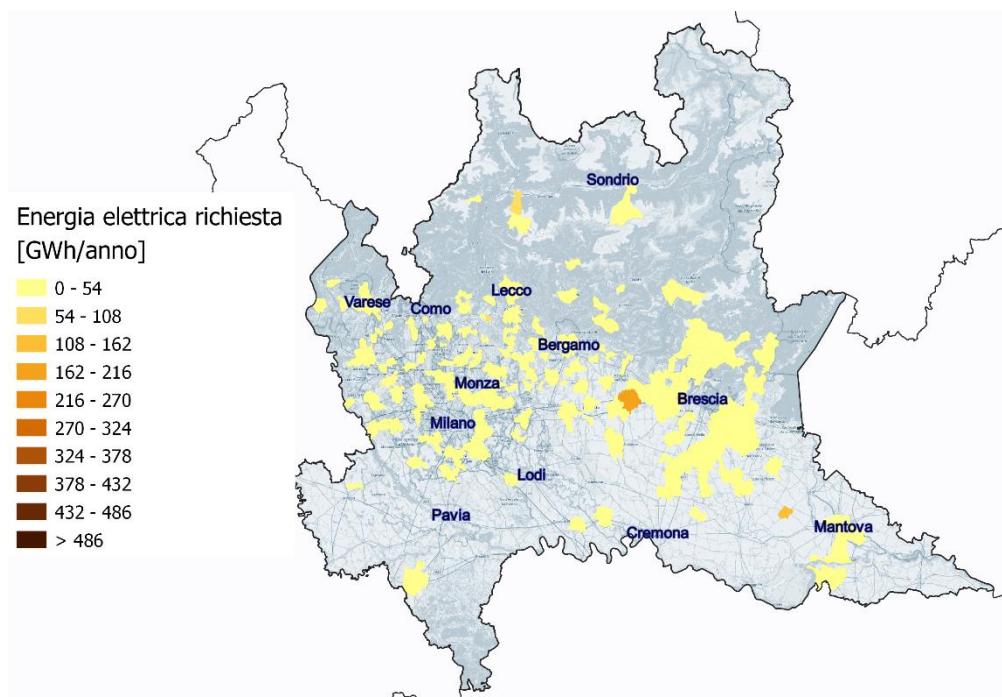


Figura 3.21 - Energia elettrica richiesta dall'industria dei metalli non ferrosi [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

3.9 Settore tessile

Per quanto riguarda il settore tessile e moda, una situazione economica è restituita per l'anno 2019 dall'Associazione di settore, Confindustria Moda [35], che tuttavia include imprese del tessile e del pellame, ma anche il comparto di oreficeria e di articoli ottici.

Le fasi che caratterizzano il ciclo produttivo possono essere raggruppate principalmente in due grandi classi di operazioni: la filatura e la tessitura [36]. Nella prima parte del processo le fibre tessili vengono raccolte e trasformate in un filato, un filo molto lungo e resistente. La materia prima (e.g. lana) viene dapprima lavata, per poi essere sottoposta ad una fase di pettinatura e poi essere purificata nella cardatura. La filatura consiste nell'assottigliamento del filo grossolano ottenuto, per conferire consistenza al filamento. Successivamente, attraverso il processo di tessitura è possibile ottenere un tessuto, composto da due o più insiemi di filati (ordito e trama). Una volta ottenuto, quest'ultimo può essere sottoposto a processi di nobilitazione, volti a conferire determinate proprietà al tessuto. Un esempio può essere il processo di tintura e candeggio.

Il settore tessile lombardo è responsabile di **0.83 TWh/anno** di consumi termici e **0.18 TWh/anno** di consumi elettrici. Le province più coinvolte in questo caso sono Varese, con 12 impianti, e a seguire Bergamo e Milano con 8 e 7 stabilimenti rispettivamente (Figura 3.22 e Figura 3.23).

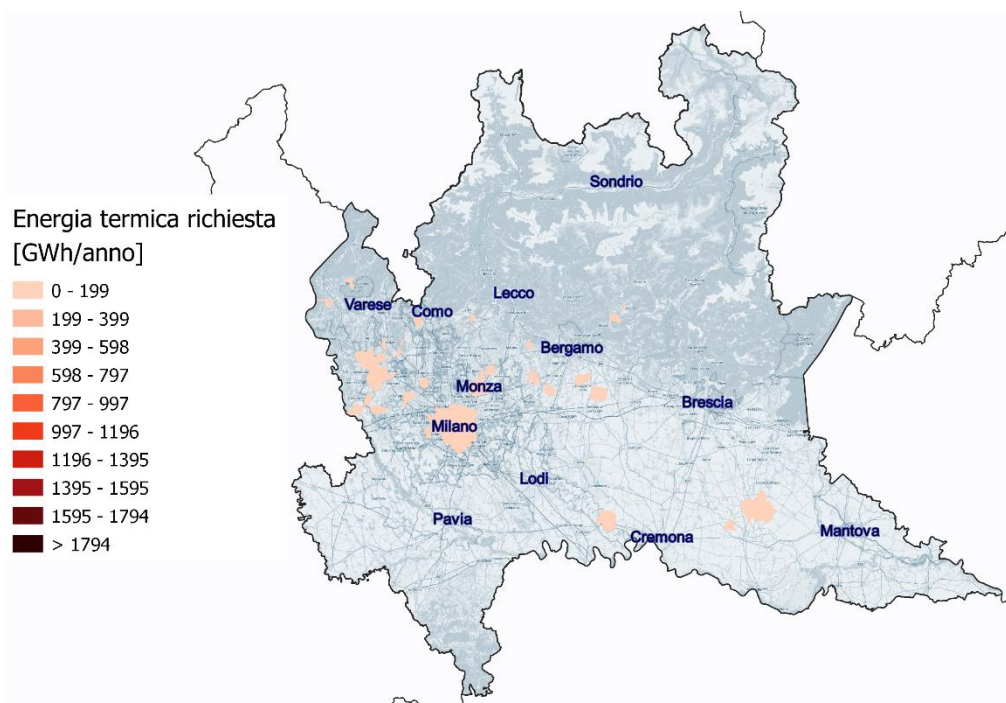


Figura 3.22 - Energia termica richiesta dall'industria tessile [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

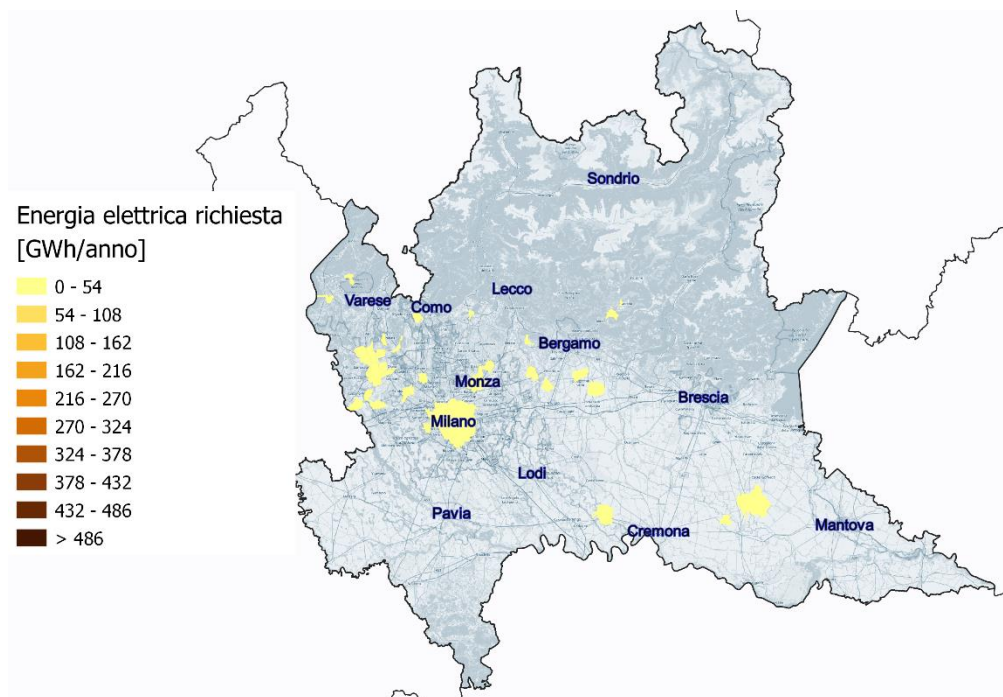


Figura 3.23 - Energia elettrica richiesta dall'industria tessile [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

4 Opzioni tecnologiche alternative per la decarbonizzazione dell'industria

In letteratura, le opzioni disponibili per la decarbonizzazione del settore industriale sono generalmente raggruppate in cinque macrocategorie:

- (i) riduzione della domanda di prodotto o di materie prime;
- (ii) efficienza energetica;
- (iii) sostituzione di combustibili e materie prime fossili con fonti low-carbon;
- (iv) elettrificazione del calore e dei processi di separazione;
- (v) cattura e stoccaggio/utilizzo della CO₂ (CCUS), anche associato a emissioni neutre (BECCS) [37].

Nelle industrie energy intensive la decarbonizzazione può avvenire a fronte di cambiamenti radicali nei processi produttivi.

Questo capitolo intende fornire una visione generale delle opzioni tecnologiche disponibili. A questo fine, si distingue in una prima parte dedicata a due tecnologie trasversali, quali il solare termico e le pompe di calore, che possono intervenire principalmente alle basse temperature (sezioni 4.1 e 4.2), e una seconda parte focalizzata sui settori *energy intensive* che richiedono soluzioni *ad hoc* (sezioni 4.3-4.8).

4.1 Tecnologie trasversali: solare termico

I collettori solari termici sono una tecnologia in grado di trasferire energia solare ad un fluido (tipicamente acqua, olio o aria), il quale può essere utilizzato direttamente nei processi industriali, oppure indirettamente, cioè trasferendo calore ad un altro fluido. I collettori solari termici si distinguono per la temperatura che sono in grado di raggiungere (impianti a bassa, media e alta temperatura) e per la capacità di seguire o meno la radiazione solare durante l'arco della giornata (impianti fissi, ad asse singolo o a doppio asse).

La Tabella 4.1 riassume le tipologie di collettori solari secondo la capacità di seguire la radiazione solare, la temperatura e il possibile campo di applicazione.

Tabella 4.1 Caratteristiche e ambito di applicazione dei diversi tipi di collettori solari [38]

Movimento	Collettore	Temperatura [°C]	Applicazione
Stazionario	Collettore piano	30-90	Domestico, piscine e alcuni processi industriali
	Tubolare	50-200	
	Parabolico composto	60-240	
Asse singolo	Parabolico	60-390	Processi industriali
	Lineare	150-450	
Asse doppio	Disco parabolico	100-900	Elettricità
	Ricevitore centrale	300-900	

L'applicazione del solare termico in ambito industriale risulta conveniente nei casi in cui i processi richiedono calore a temperature fino a 250°C in modo continuo e costante. Questo calore a temperatura relativamente bassa può essere introdotto nei processi dell'industria alimentare per lavaggio e sterilizzazione dei contenitori o per la cottura di cibi, nei processi dell'industria tessile per il lavaggio dei vestiti, nell'industria cartaria per l'essiccazione e in alcuni trattamenti chimici [39]. La letteratura (per es. Farjana et al. [40], Braccio et al. [39]) indica il lavaggio o la pulizia, nell'industria alimentare, tessile, chimica ed estrattiva, come principali processi interessati. Nell'industria alimentare il solare termico è inoltre utilizzato per la cottura dei cibi. Il *Solar Heating & Cooling (SHC) Programme* dell'IEA può essere considerato il riferimento principale

nell'ambito del solare termico per l'industria. Il task 33 (*Solar Heat for Industrial Processes*), in particolare con Vannoni et al. [41], nel 2008 concludeva che in Italia il potenziale di calore industriale servibile da solare a bassa e media temperatura era di 31,8 PJ/anno, con 10 GWt di potenza termica. Il task 49 (*Solar heat integration in industrial Processes*) identifica principalmente due possibili configurazioni:

- (i) integrazione nella linea di produzione e distribuzione del calore di un complesso industriale;
- (ii) integrazione specificatamente in determinati processi.

Sono principalmente tre le categorie di processi che utilizzano calore in cui il solare può integrarsi:

- (i) il (pre)riscaldamento dei fluidi di processo;
- (ii) il riscaldamento e il mantenimento della temperatura dei macchinari o degli accumuli;
- (iii) i processi di separazione su base termica.

Nel complesso, nella pianificazione dell'integrazione del solare nell'industria, non è importante il dimensionamento del solo collettore solare ma anche la scelta del punto di integrazione con l'impianto industriale e il dimensionamento dell'accumulo termico.

L'effettiva convenienza economica del solare termico nei processi industriali dipende da diversi criteri. Il task 49 distingue, in generale, fra (i) criteri "*pre-integration*" che possono essere applicati semplicemente attraverso un'analisi dei flussi energetici all'interno dell'industria, senza ulteriori dettagli, e (ii) criteri "*post-integration*" che dipendono dal tipo di integrazione che si vuole ottenere. I criteri "*pre-integration*" includono per esempio informazioni sulle temperature del processo, la domanda annuale di calore, i cicli produttivi e la vetustà delle tecnologie.

4.2 Tecnologie trasversali: pompe di calore industriali

La pompa di calore è una tecnologia che permette il passaggio di calore da una sorgente a bassa temperatura a un pozzo a temperatura più alta tramite l'utilizzo di energia elettrica o di calore. Può funzionare sia in modalità riscaldamento che in modalità raffrescamento: nel primo caso, la pompa di calore sottrae calore da una sorgente esterna, quale aria (pompa di calore aerotermiche), acqua (pompe di calore idrotermiche) o terreno (pompe di calore geotermiche), e lo trasferisce all'elemento da scaldare; nel secondo caso, invece, sottrae calore dall'elemento da raffreddare e lo disperde all'esterno. Le pompe di calore possono essere di tipo a compressione, con azionamento elettrico, o ad assorbimento, con azionamento termico.

Le pompe di calore possono trovare applicazione in ambito industriale (oltre che in ambito civile), sia per il riscaldamento degli ambienti che per soddisfare la richiesta di calore nei processi. La diffusione delle pompe di calore nell'industria è però ad oggi limitata, in quanto sono pochi i produttori in grado di raggiungere le temperature richieste dai processi industriali. Le pompe di calore esistenti possono raggiungere una temperatura di mandata al massimo compresa tra 90°C e 165°C. Sono ad oggi in corso progetti di ricerca che studiano pompe di calore con temperature di mandata tra 165°C e 200°C. La mancanza di produzione di pompe di calore ad alte temperature è principalmente dovuta al fatto che i produttori non sono a conoscenza della possibilità di applicazione di tali tecnologie ai processi industriali e quindi alla loro potenziale diffusione in tale mercato [42]. Gli stessi Marina et al. in [42] analizzano la possibile diffusione, a livello europeo, delle pompe di calore nei processi industriali che richiedono temperature fino a 200°C. Lo studio si concentra in particolare sui settori della carta, alimentare, chimico e raffinaria, che costituiscono la domanda di calore più elevata in Europa. Lo studio assume una differenza di temperatura limitata a 100°C per mantenere un coefficiente di prestazione (o *coefficient of performance*, COP) economicamente sensato; assume che il calore in ingresso alla pompa di calore sia calore di scarto originato dal processo stesso e considera infine che solo una parte della domanda di calore del processo possa essere coperta. Il fabbisogno di calore di processo

che può essere soddisfatto risulta più alto nel settore della carta, seguito dal chimico, raffineria e alimentare, mentre il calore di scarto sfruttabile è maggiore nelle raffinerie e nel chimico, seguiti da carta e alimentare. Va sottolineato come complessivamente soltanto il 19,5% del calore in eccesso ha una temperatura superiore ai 100°C, inverso è invece il caso del calore di processo che è quasi tutto superiore a 100°C. Il potenziale di mercato maggiore per le pompe di calore, in termini di capacità cumulata, si ha nel settore chimico, seguito dal settore della carta, alimentare e infine le raffinerie. La Figura 4.1 mostra la distribuzione della capacità legata all'utilizzo di pompe di calore nei processi dei settori industriali considerati dallo studio. Circa il 48% della capacità totale risulta essere coperta da pompe di calore di taglia inferiore a 10 MW e il rimanente 52% da pompe di calore di taglia superiore a 10 MW, con COP principalmente compresi tra 2 e 5.

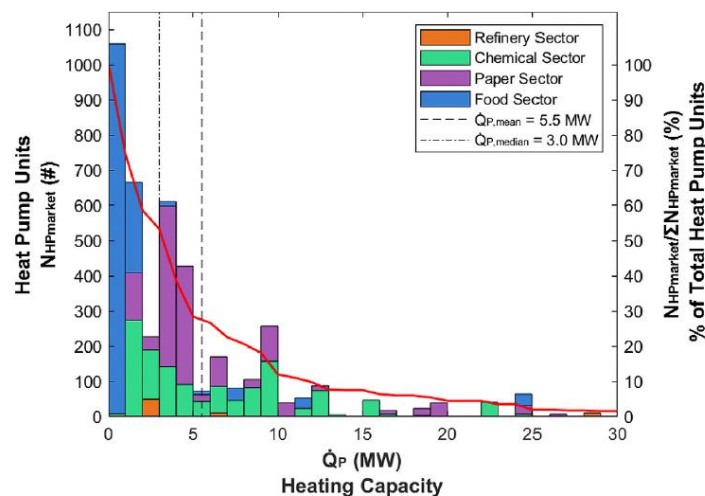


Figura 4.1 Distribuzione della capacità di riscaldamento delle pompe di calore (<30 MW) nei settori industriali considerati [42]

4.3 Acciaio

Nella produzione di acciaio è possibile migliorare l'efficienza energetica nei processi tradizionali nelle fasi di lavorazione secondaria [27] e attraverso recupero di calore in turbine Organic Rankine Cycle per la produzione di elettricità [43] o in reti di teleriscaldamento [44]. Tuttavia, ai fini dell'obiettivo di decarbonizzazione, è necessario sviluppare processi innovativi nella produzione, anche quella da rottami, presente in Lombardia, nonché nella lavorazione successiva. In generale, la soluzione più applicabile è la sostituzione del gas naturale o dei combustibili fossili con idrogeno verde. La società Tenaris Dalmine (Bergamo) ha avviato il progetto di ricerca "*Dalmine 0 emissions*", che mira a sostituire il gas naturale con idrogeno ottenuto da elettrolisi. In una prima fase, il progetto mira allo switch del gas utilizzato nell'EAF e successivamente a quello utilizzato nell'intero stabilimento [45].

4.4 Chimica

Per la decarbonizzazione dell'industria chimica si possono individuare in senso lato tre categorie di intervento:

- (i) riduzione dei consumi (in particolare di plastica e di fertilizzanti) e riciclo dei rifiuti in plastica;
- (ii) decarbonizzazione dell'energia utilizzata;

(iii) sostituzione dei fossili come materia prima.

Secondo la IEA [11], il riciclo di una tonnellata di polietilene (la plastica più comune usata nel packaging), permette di evitare di produrre oltre 1 tonnellata di etilene, risparmiando almeno 1,5 tep. Sono importanti in questo senso soluzioni che vadano a rimuovere degli ostacoli tecnici ed economici nel riciclo di alcuni tipi di polimeri (es. plastiche miste, vaschette alimentari mono e multistrato, film multistrato, ecc.). Sono altrettanto importanti soluzioni di economia circolare per ridurre la produzione dei rifiuti (es. progettazione di prodotti durabili, riparazione). In parallelo, vanno sviluppate nuove soluzioni tecnologiche per la selezione e il riciclo dei rifiuti. Esistono soluzioni in fase di sviluppo, con TRL 7-9, che cercano di affrontare il problema della perdita di qualità e funzionalità del materiale riciclato (es. dissoluzione con solventi, depolimerizzazione chimica, decontaminazione termica sottovuoto) [46]. Per ridurre, invece, la domanda di fertilizzanti minerali, è possibile ottimizzare i metodi di applicazione per migliorarne l'assorbimento ed è possibile la sostituzione con fertilizzanti di origine vegetale o animale (già largamente utilizzate nell'agricoltura europea). La riduzione dell'utilizzo di fertilizzanti minerali comporta per altro diversi benefici ambientali e sanitari collaterali. I principali limiti sono di tipo logistico e legati alla non programmabilità della produzione. Va notato che anche la riduzione degli sprechi alimentari permetterebbe di ridurre la domanda.

Per quanto riguarda l'energia utilizzata, gli impianti chimici europei sono già altamente efficienti anche per via della forte concorrenza dei produttori extra-europei [12]. Si stima dunque che una riduzione ulteriore, adottando le BAT rimanenti, sia minima [13]. Un maggiore potenziale di riduzione (-20%) è dato dal *cracking* catalitico della nafta (TRL 9 secondo [46]), che riduce i tempi e le temperature rispetto al processo tradizionale, a seguito di una modifica delle colonne di cracking. Le **membrane selettive** (con TRL pari a 6/7 e facilmente integrabili negli impianti esistenti) potrebbero ridurre del 5% il fabbisogno termico del processo di distillazione rispetto alle tecniche più diffuse (separazione criogenica, assorbimento e adsorbimento) [13]. Per decarbonizzare l'energia utilizzata vi sono tecnologie e processi innovativi in fase pre-commerciale:

- (i) l'elettificazione dei processi di steam cracking (TRL 3 e moderato potenziale secondo [46]);
- (ii) il *fuel switch* da gas naturale a gas rinnovabili (biometano, idrogeno verde);
- (iii) la cattura e stoccaggio della CO₂, con la possibilità di realizzare emissioni negative se combinata all'uso di biomassa.

Per la produzione di etilene, gli impianti di cattura permettono di eliminare fino al 90% delle emissioni di CO₂. In particolare, le soluzioni più adatte sono quelle che si basano sulla **post-combustione**, che consente di catturare circa 0,7 t di CO₂/t di etilene. Si stima che il TRL per questa applicazione sia compreso fra 5 e 8 [13]. Nel caso della produzione di metanolo gli impianti di cattura più utilizzati sono quelli post-combustione basati sull'assorbimento chimico, sull'assorbimento fisico e sull'adsorbimento fisico, con TRL da 5 a 8 [46].

Per quanto riguarda la sostituzione dei fossili come materia prima, una soluzione emergente prevede l'uso di metanolo "defossilizzato" come feedstock per la produzione di HVCs, e quindi della plastica. È già commerciale il processo *Methanol-to-Olefine* (anticipato nel precedente capitolo), mentre il processo *Methanol-to-Aromatics* (BTX) è ancora in fase pilota ([47], [11]). Il metanolo potrebbe essere "defossilizzato" in tre modi:

- *Gassificazione della biomassa* (in fase pre-commerciale con TRL 6-8 ([46]), che fornirebbe anche l'apporto energetico al processo, per cui andrebbe tuttavia considerata la sostenibilità e la competizione con altri settori;

- *Sintesi a partire da* H₂ verde e CO₂ neutra ([48]) (già commerciale in condizioni stabili e con CO₂ a basso costo; in fase di sviluppo, con TRL 7, con idrogeno elettrolitico da rinnovabili non programmabili [46]. La difficoltà di questa via è legata ai consumi elettrici per l'elettrolisi e alla richiesta di CO₂. Inoltre, il processo di sintesi avviene in condizioni di temperatura e pressione elevate (circa 300°C e 85 bar) e non può quindi essere flessibile quanto le fonti non programmabili;
- *Gassificazione/pirolisi dei rifiuti* (riciclo chimico) (TRL 9 secondo [46]), che riporta i rifiuti di plastica mista non riciclabili ai loro composti chimici di base (monomeri), riutilizzabili per produrre nuova plastica assimilabile a un prodotto vergine. In Italia è in corso un progetto di *waste-to-hydrogen* presso la raffineria di Porto Marghera, estendibile alla produzione di *waste-to-chemicals* [49]. Il riciclo chimico, tuttavia, è più energivoro del riciclo meccanico e ad oggi, il contributo del riciclo chimico alla riduzione delle emissioni di gas serra è ancora moderato [46]. Potrebbe crescere in futuro poiché benefici legati al recupero energetico dai rifiuti saranno sempre più ridotti in un sistema elettrico sempre più decarbonizzato [15]. Secondo Bloomberg, la tecnologia potrebbe dare comunque un contributo al problema della plastica in mare [50].

Oltre all'uso del metanolo, prodotti chimici ad alto valore aggiunto (HVC) e idrogeno possono essere prodotti attraverso la cosiddetta *fotosintesi artificiale*, che riproduce il processo naturale, con luce solare e anidride carbonica in input. I cicli produttivi sono tuttavia lenti e direttamente dipendenti dalla disponibilità di luce solare. Questa soluzione non permette inoltre di sfruttare gli impianti già esistenti per la sintesi di etilene. Il TRL di questa tecnologia è pari a 2/3 [13]. Va menzionato, infine, per la produzione di etilene, il processo di deidratazione dell'etanolo o bioetanolo (C₂H₆O), che richiede temperature inferiori e può sfruttare quindi calore di scarto proveniente da altre applicazioni. Questo processo non è economico attualmente per via del prezzo dell'etanolo.

4.5 Cemento

Per decarbonizzare la produzione di cemento è necessario abbattere sia le emissioni derivanti dalla combustione, sia quelle di processo. Le soluzioni possono essere raggruppate in tre grandi macrocategorie:

- (i) decarbonizzazione dell'energia utilizzata o riduzione dei consumi energetici nel processo;
- (ii) riduzione della domanda di cemento e in generale di clinker
- (iii) cattura della CO₂.

Sul fronte energia, per la generazione del calore necessario al processo di produzione del cemento, è possibile sostituire i combustibili fossili con la biomassa e l'idrogeno. È inoltre possibile utilizzare impianti a concentrazione dell'energia solare e forni elettrificati per la cottura del clinker. Il *fuel switch* verso la **biomassa** (attualmente, a livello europeo, il 16% dell'input termico del settore [51]) permette di decarbonizzare la produzione di calore anche ad alta temperatura, senza richiedere significative modifiche agli stabilimenti né la cattura della CO₂ (che tuttavia potrebbe portare a emissioni negative). Di contro, la biomassa permetterebbe di ridurre solamente le emissioni da combustione e non permetterebbe una completa sostituzione dei combustibili fossili a causa del basso potere calorifico inferiore [51]. La risorsa sarebbe inoltre in competizione con altri segmenti del sistema energetico [52]. La sostituzione di carbone e gas naturale con **idrogeno** puro non è immediata e richiede modifiche agli impianti attualmente in uso. L'utilizzo dell'idrogeno nel settore cementizio ha un TRL pari a 4 [46] con importanza moderata secondo la IEA [53]. Gli **impianti a concentrazione dell'energia solare** (CSP – *Concentrated Solar Power*) possono essere utilizzati per generare il calore necessario per la produzione del clinker. Secondo la IEA, il TRL è pari a 6, ha

importanza moderata e l'entrata sul mercato è prevista per il 2025 [46]. Gli impianti CSP permettono di ridurre solamente le emissioni da combustione e comportano svantaggi legati all'intermittenza della fonte e alla necessità di elevata irradiazione solare. È infine possibile l'elettificazione del processo di cottura del clinker, attraverso generatori al plasma o microonde. I **generatori al plasma** producono calore a elevata temperatura con un'efficienza compresa fra l'85% e il 90% [15]. Questi generatori sono già stati testati in vari contesti industriali, ma la diffusione è limitata dalla sensibilità alla polvere e dalla necessità di frequente manutenzione e pulizia (circa ogni 200-300 ore di funzionamento) [32]. La diffusione su vasta scala di questa tecnologia è prevista per il 2030-2035 [54]. Le **microonde** permettono di trasferire energia termica uniformemente, evitando un riscaldamento graduale dalla parte esterna fino all'interno e riducendo così il fabbisogno di energia termica anche del 40% [15]. Presentano molti vantaggi: minori tempi di processo, impianti di produzione modulari, minori costi di manutenzione e maggiore flessibilità degli altiforni. L'elettificazione dei forni di cottura del clinker ha un TRL pari a 4 e, secondo l'IEA, ha un'importanza moderata ([46] [53] [54]). Con gli impianti CSP e l'elettificazione degli altiforni la CO₂ di processo viene rilasciata come flusso quasi puro, semplificandone l'eventuale cattura, con costi operativi limitati alla compressione.

La riduzione della domanda di clinker può essere ottenuta (i) riducendo il contenuto di cemento nel calcestruzzo e utilizzando meno calcestruzzo per la costruzione di nuovi edifici, (ii) attraverso nuovi tipi di cemento basati sulla parziale sostituzione del clinker con altri materiali e, infine, (iii) attraverso il riciclo. Secondo alcuni studi è possibile utilizzare nel calcestruzzo fino al 20% di cemento in meno rispetto agli standard attuali, mantenendo inalterate le performance ([15] e [55]). È anche possibile utilizzare materiali innovativi e nuovi metodi costruttivi, come il **calcestruzzo armato con fibre di carbonio** (TRL fra 7 e 8 [13]), che permette di eliminare il problema della corrosione e quindi ridurre lo spessore del calcestruzzo, con un vantaggio economico e potenzialmente un maggior spazio abitabile. Cementi innovativi, con minor contenuto di clinker, sono detti *low-carbon cements*. Ne esistono varie tipologie, raggruppate qui in funzione del potenziale di riduzione delle emissioni. Nella categoria **low carbon cements -30%** si trovano l'*Aether* e il *Calcium Sulfo Aluminate Cement*. Nel primo, il clinker viene in parte sostituito con l'ossido di alluminio. La sua produzione è facilmente adattabile ai forni rotativi attualmente in uso e richiede un consumo di energia termica del 15% inferiore rispetto al cemento Portland. Il TRL è di 8/9, ma per ora è ancora poco diffuso dato il costo elevato dell'ossido di alluminio [13]. Per la produzione del *Calcium Sulfo Aluminate Cement* viene impiegato un clinker con quantità significative di solfati, che non richiede grandi modifiche agli impianti in uso. Il breve tempo di presa ne limita l'impiego alla produzione di elementi prefabbricati. È caratterizzato poi da elevati costi e scarsa disponibilità delle materie prime [13] [55]. Alla categoria **Low carbon cements -50%** appartengono il *Celitement* (TRL pari a 7 [13]) e l'*Alkali Activated Binder* (TRL pari a 9 [46]). La produzione del *Celitement*, in cui il clinker viene in parte sostituito con idrosilicati di calcio, richiede una minore quantità di calce e di energia (il 30-40% in meno rispetto al Portland) [13]. La produzione dell'*Alkali Activated Binder* permette di ridurre le emissioni di CO₂ dal 40% all'80% sfruttando la reazione chimica fra minerali alluminosilicati e attivatori alcalini e usando scorie e ceneri volatili ricche di calcio [13] come materie prime. Gli svantaggi più rilevanti sono legati a problemi di sicurezza nell'utilizzo di alcali forti, tempi di asciugatura e indurimento rapidi e mancanza di miscele che ne possano migliorare la lavorabilità. Inoltre non è ancora stata studiata la durabilità delle strutture nel tempo. L'uso dell'*Alkali Activated Binder* è dunque limitato a elementi prefabbricati. Nella categoria **Low carbon cements -70%** rientrano i cementi basati sulla carbonatazione dei silicati di calcio, in grado di catturare la CO₂ durante la stagionatura. Un esempio è il cemento *Solidia* (TRL pari a 8/9 [55]), prodotto nei medesimi forni rotativi utilizzati per il *Portland*, ma con temperature inferiori, impiegando minerali silicati di calcio con un basso contenuto di calce. La stagionatura del calcestruzzo, in apposite camere, può catturare fino a 300 kg di CO₂ per tonnellata di cemento prodotto [13]. Nel complesso, è possibile ridurre di circa il 20% i consumi energetici e del 70% le emissioni di CO₂ [13]. Il *Solidia* viene

utilizzato per la produzione di elementi prefabbricati e non può essere utilizzato per produrre il calcestruzzo armato, perché non protegge l'acciaio dalla corrosione. Infine, i **Low carbon cements -90%** (TRL pari a 3 [53]), a base di rocce di silicato di magnesio, possono ridurre significativamente le emissioni o addirittura ottenere emissioni negative attraverso il processo di stagionatura [13]. Le rocce di silicato di magnesio si trovano in grandi quantità solamente in specifiche zone geografiche e in profondità nella crosta terrestre, di conseguenza un loro ampio uso richiederebbe significativi investimenti e dispendio energetico per estrazione e trasporto. La disponibilità di questi ultimi cementi è prevista solo nel lungo termine [55]. Il **riciclo** del calcestruzzo è invece una pratica già diffusa che consiste nell'utilizzo di aggregati provenienti dalle demolizioni. Per ridurre il rischio di degradazione della qualità, che risulterebbe in cementi con resistenze inferiori, esistono soluzioni innovative quali la **frammentazione elettrodinamica** (TRL pari a 7 [13]), che separa il calcestruzzo in ghiaia, sabbia e calce attraverso scariche elettriche che rompono i legami senza danneggiare le fibre, a fronte, tuttavia, di un'elevata richiesta di energia. Il **recupero degli ossidi di calcio non carbonati** (TRL pari a 6 [46]), permette di sostituire parzialmente il calcare nella produzione del clinker e ci si aspetta possa ridurre le emissioni di processo del 20% [15]. Infine, poichè fino al 50% del cemento non viene idratato durante il processo di stagionatura, sono in sviluppo macchinari per lo smantellamento degli edifici in grado di **recuperare il cemento non idratato**, da riutilizzare nella produzione di nuovo cemento. Queste tecnologie (TRL pari a 9 [46]) sono attualmente utilizzate per la produzione di un legante a base di cemento non idratato chiamato *Freement*.

Per quanto riguarda la Cattura della CO₂ vi sono diverse alternative disponibili, basate principalmente sulla post-combustione (tramite assorbimento chimico, adsorbimento fisico, membrane selettive) poichè permette di catturare sia le emissioni da combustione che di processo. Vi sono poi tecnologie che agevolano la cattura, come la *direct separation* e l'ossicombustione, che elevano la concentrazione di CO₂ nel flusso gassoso. Esiste infine il sistema di *calcium-looping*. Per l'**assorbimento chimico** (TRL pari a 7 [56]) vengono utilizzati solventi a base di ammine, senza determinare modifiche sostanziali agli impianti già in uso [57]. Il principale svantaggio di questa soluzione è legato all'elevato consumo energetico, principalmente dovuto alla rigenerazione del solvente (0,6 MWh termici per 1t di CO₂ catturata, in parte derivabili da recupero di calore di scarto). L'**adsorbimento fisico** prevede l'uso di materiali, come la zeolite o il carbone attivo, che adsorbono selettivamente le molecole di CO₂ dagli *off-gas*. L'adsorbimento fisico ha alte velocità di cattura e rilascio e un trascurabile impatto ambientale. L'efficienza di cattura è circa pari all'85% [55]. Il TRL è pari a 6 e si stima che possa entrare sul mercato nel 2035 ([46] e [53]). L'impiego di **membrane selettive** (TRL pari a 4 [46]) si basa su interazioni fisiche e/o chimiche fra le membrane e i diversi costituenti dei gas combusti sfruttandone le diverse grandezze molecolari, in un processo multistadio [52]. Con un processo a due stadi può essere separato un flusso di CO₂ con una purezza del 90%, che può eventualmente aumentare utilizzando tre o più stadi [52]. La necessità di pressione per muovere i gas attraverso le membrane determina un consumo di energia elettrica compreso fra 253 e 347 Wh/kg di CO₂ separata ([58], [59]). Non è necessario, tuttavia, effettuare la rigenerazione del solvente. La **direct separation** permette di gestire separatamente le emissioni di processo e quelle derivanti dalla combustione. Il calcare viene riscaldato in appositi reattori, evitando che i gas combusti si mischino con i gas di processo. Le emissioni di processo sono quindi costituite da un flusso quasi puro di CO₂ (95%) ed è possibile raggiungere efficienze di cattura quasi del 100% ([15] e [60]). Per eliminare le emissioni da combustione si potrebbero poi usare soluzioni di *fuel switch* già menzionate. Questa tecnologia non richiede l'utilizzo di sostanze chimiche e sono necessari minimi cambiamenti del processo produttivo, focalizzati sul forno di cottura. Il TRL è di 5/6 e l'entrata sul mercato è prevista per il 2030 ([46] e [53]). L'**ossicombustione** prevede la combustione con ossigeno puro, anziché con aria, in modo da ottenere negli *off-gas* un flusso di anidride carbonica quasi puro e favorirne così la cattura. L'ossicombustione evita che parte del combustibile venga destinato al riscaldamento dell'azoto presente nell'aria, raggiungendo inoltre temperature di fiamma più elevate. Questa tecnologia permette efficienze di

cattura del 95% [61]. Il TRL di questa tecnologia è di 6-7 e si stima che possa entrare sul mercato fra il 2025 e il 2030 ([52], [13] e [62]). Lo svantaggio risiede nella necessità di avere un impianto per la separazione dell'ossigeno dall'aria e bruciatori riadattati. Il **calcium looping** è un sistema di cattura della CO₂ basato sulla reazione reversibile di carbonatazione. I vantaggi del *calcium looping* sono il minor consumo di energia rispetto alle altre tecnologie di cattura e una facile integrazione negli attuali stabilimenti produttivi, nonché un basso impatto ambientale. La reazione di carbonatazione è esotermica ed è quindi possibile effettuare un recupero termico. Il *calcium looping* ha un'efficienza di cattura compresa fra il 91% e il 99% ([55] e [63]) ma comporta alti consumi di combustibile (+47% rispetto all'assenza di cattura [64]). Ha un TRL pari a 6-7 e secondo alcune stime sarà disponibile sul mercato nel 2025 ([46], [51] e [53]).

4.6 Vetro

Anche per la produzione del vetro l'obiettivo di decarbonizzazione implica l'abbattimento sia delle emissioni derivanti dalla combustione, sia di quelle di processo. Oltre all'efficientamento dei processi, comunque auspicabile, le soluzioni possono essere classificate in tre macro categorie:

- (i) decarbonizzazione dell'energia utilizzata;
- (ii) riciclo;
- (iii) cattura della CO₂.

Per quanto riguarda l'efficientamento dei processi, tra le migliori soluzioni disponibili emerge il **recupero di calore** contenuto nei gas combusti per preriscaldare le materie prime (TRL pari a 8 [13]), in grado di ridurre dal 10% al 15% il fabbisogno termico del forno di fusione ([13] e [65]). La quantità di calore recuperabile è comunque minore con forni elettrici ben isolati. Tecnologie per il **monitoraggio della qualità del vetro**, basate sulla spettroscopia, permettono invece di evitare che un 15-20% del vetro debba essere rifiuto a causa di difetti [13]. Queste soluzioni, con TRL pari a 2-3 [13], possono essere implementate nelle linee produttive in uso.

Per quanto riguarda l'energia, le fornaci delle vetrerie, oggi alimentate con gas naturale e olio combustibile, possono essere alimentate da biometano, idrogeno oppure elettrificate [11]. L'utilizzo del **biometano** (TRL di 9-10 [66]) non ha impatto sul processo di combustione e sulla qualità dei prodotti finali [67]. La risorsa va tuttavia inquadrata nel contesto di verosimile competizione con altri segmenti del sistema energetico. Le **fornaci elettrificate** (TRL di 5-9 [13]) sono già utilizzate in piccoli stabilimenti e per la produzione di alcune particolari tipologie di vetro (vetri opalini o borosilicati e cristalli al piombo). Gli elettrodi in ossido di stagno sono immersi nel vetro fuso e possono essere impiegati da soli o come potenziamento nei forni tradizionali, fornendo dal 5% al 20% dell'input termico richiesto [68]. Le fornaci elettrificate riducono, oltre a CO₂, anche le emissioni di NO_x e di SO_x. L'energia viene trasferita direttamente al vetro, riducendo le perdite di calore dalle pareti ed eliminando quelle al camino, ottenendo un risparmio dal 35% al 56% sul fabbisogno termico ([13] e [68]). È possibile, inoltre, migliorare la qualità del vetro prodotto permettendo un buon controllo della temperatura. I forni elettrici hanno tuttavia vita utile inferiore rispetto a quelli alimentati a gas naturale (2-7 anni contro i 10-20 anni delle fornaci tradizionali) [68]. Non è inoltre possibile fondere vetri che richiedono una temperatura superiore ai 1500°C e alcune tipologie di vetri con particolari composizioni, che possono degradare i materiali di cui sono costituiti gli elettrodi [68].

Il riciclo del vetro è una pratica già largamente diffusa, trattandosi di un materiale che non presenta problemi di degrado, se non in termini di colore. Il riciclo del vetro riduce la quantità di rifiuti da trattare o da depositare in discarica e i danni ambientali derivanti dallo sfruttamento delle cave per l'estrazione delle materie prime. Una tonnellata di rottame vetroso permette di sostituire 1,2 tonnellate di materie prime vergini. Il consumo

di energia termica, inoltre, si riduce per la presenza di rottame ferroso che accelera il processo di fusione e fa diminuire la temperatura di fusione a circa 1000°C ([11] e [69]). L'impiego del rottame permette di ridurre anche le emissioni di CO₂ di processo, derivanti dalla decomposizione dei carbonati presenti nelle materie prime vergini, con una diminuzione variabile tra il 32% e il 41% delle emissioni di CO₂ complessive ([13] e [70]). Nel 2016, di 1,8 Mt di vetro raccolto a livello nazionale, l'industria vetraria italiana ha consumato circa 1,7 Mt [69]. Non è tuttavia possibile riciclare qualsiasi tipo di vetro mediante fusione (schermi TV, vetro colorato del settore automobilistico, cristalli), ma questi vetri possono comunque trovare altri impieghi, ad esempio, per la produzione di fibre di vetro e come additivi nella produzione di asfalto.

Per quanto concerne la cattura della CO₂, abbinando l'ossicombustione a impianti di cattura della CO₂ è possibile abbattere le emissioni in uscita dal camino del forno fusorio. Il TRL di questa tecnologia in abbinamento alla produzione di vetro è compreso fra 5 e 8 [13]. L'ossicombustione permette inoltre di ridurre il consumo di combustibile a parità di calore generato, di aumentare la temperatura della fiamma, di ridurre il volume del forno (per effetto dell'eliminazione dell'azoto) e di migliorare la qualità del vetro prodotto. Con questa tecnologia è possibile ridurre del 17% ÷ 20% le emissioni di CO₂ anche senza impianti di cattura. Questa soluzione permette anche di dimezzare le emissioni di ossidi di azoto, che si limitano solamente a quelli derivanti dalla decomposizione dei nitrati [71]. Si stima che entrerà sul mercato nel 2025 [13].

4.7 Ceramica

Anche nel caso della ceramica, oltre all'efficientamento dei processi, comunque auspicabile, le soluzioni di decarbonizzazione possono essere classificate in tre macrocategorie:

- (i) decarbonizzazione dell'energia utilizzata;
- (ii) riciclo;
- (iii) cattura della CO₂.

Efficientamento - Le migliori tecnologie ad oggi disponibili riguardano la fase di cottura e la fase di essiccamento. Per la **fase di cottura** vi sono bruciatori a impulso, recuperatori di calore e materiali isolanti di elevata qualità. Mediante la combinazione di queste soluzioni tecnologiche è possibile ridurre del 17% il fabbisogno termico dell'intero processo produttivo [13]. Per la **fase di essiccamento**, esiste l'essiccamento a vuoto, che rispetto al processo di essiccamento termico tradizionale è più veloce e delicato. Inoltre, è possibile abbinare l'essiccamento a vuoto alle microonde o ai raggi infrarossi per ridurre i tempi e i consumi energetici di questa fase del processo. Questa tecnologia ha un TRL pari a 6-7 e non si è ancora diffusa nel settore ceramico a causa dei costi operativi elevati [13].

Energia - I forni per l'essiccamento e per la cottura vengono generalmente alimentati con gas naturale, ma è possibile sostituire questo combustibile con il **biometano** senza richiedere investimenti elevati [13]. La sostituzione con **idrogeno** (che potrebbe essere problematica per la presenza di vapore acqueo nei fumi normalmente usati per l'essiccazione) avrebbe efficienza complessiva minore rispetto ai forni elettrici ma avrebbe il vantaggio di poter abilitare un'introduzione graduale. Alcuni progetti o proposte di progetto sono, ad esempio, indirizzati alla parziale sostituzione del metano [72], [73]. L'**elettificazione** richiede infatti un cambio dei forni, elemento principale dei processi produttivi, integrato con il resto del sistema di produzione. Si hanno dunque incertezze laddove sono richiesti forni elettrici di grandi dimensioni. Nel settore della ceramica, i large-scale electric kiln hanno TRL 5-6 [74].

Riciclo - L'industria ceramica è in grado di riutilizzare al proprio interno la maggior parte degli scarti che si generano durante la fase di produzione, riducendo per altro la movimentazione di mezzi pesanti. Confindustria Ceramica stima 600 kt/anno di materie prime non estratte grazie al recupero del 99,5% degli

scarti di produzione [74]. Un'ulteriore riduzione delle materie prime vergini viene ottenuta riutilizzando residui provenienti da altri settori industriali. L'utilizzo degli scarti produttivi può avvenire secondo diversi schemi organizzativi, in funzione della dotazione impiantistica presente negli stabilimenti e della tipologia di materiale da riciclare. Il riciclo della ceramica di provenienza esterna al ciclo produttivo o esterna ad altre produzioni industriali ha un TRL pari a 6-7 [74], con costi di implementazione molto bassi ma difficoltà pratiche nell'organizzazione di una raccolta.

Cattura della CO₂ - In uscita dal camino degli stabilimenti ceramici si ha un flusso di gas combusti con una bassa concentrazione di CO₂, fattore che rende inefficiente un impianto di cattura post-combustione. Peraltro, si tratta normalmente di piccole medie imprese, per cui risulterebbe meno pratica. Gli impianti di cattura più adatti sono quelli basati sulla **pre-combustione** oppure sull'**ossicombustione**. Queste soluzioni hanno un TRL di 5-8 e la loro diffusione è ostacolata principalmente da fattori economici [13].

4.8 Carta

Nel caso dell'industria cartaria, oltre all'efficientamento dei processi, comunque auspicabile, le soluzioni di decarbonizzazione possono essere classificate in due macrocategorie:

- (i) decarbonizzazione dell'energia utilizzata;
- (ii) riduzione della domanda.

È possibile efficientare la fase di estrazione della cellulosa impiegando pretrattamenti enzimatici e solventi. I **pretrattamenti con enzimi** dei *chips* di legno permettono di ridurre dal 10% al 40% l'energia elettrica necessaria durante la fase di preparazione delle materie prime [13]. Il TRL è pari a 6-8 e la diffusione sul mercato è prevista prima del 2025 [13]. I **Deep Eutectic Solvents** sono invece solventi naturali che permettono l'estrazione della cellulosa a bassa temperatura e a pressione atmosferica, anche a partire dagli scarti delle cartiere, eliminando anche l'inchiostro e i contaminanti dalla carta. Mediante il loro impiego è possibile ridurre del 40% la domanda di energia primaria in questa fase [13]. Il TRL è pari a 3 e si stima che possano entrare sul mercato tra il 2030 e il 2035 [13]. Tecnologie per una maggiore efficienza nella fase di essiccamento, sono l'*impingement* ad aria o vapore, l'asciugatura su nastro di condensazione e l'asciugatura per impulso. Nel caso di essiccamento per **impingement ad aria** viene utilizzata aria calda. Questo metodo è caratterizzato da una velocità di essiccamento elevata e può essere utilizzato da solo o in combinazione con i tradizionali cilindri riscaldati e permette di ridurre le dimensioni della sezione di essiccamento sulla macchina continua. Nel caso di essiccamento per **impingement a vapore** al posto dell'aria calda viene utilizzato un flusso di vapore alla temperatura di 300°C e alla pressione di 1,1 bar [75]. L'**asciugatura a impulsi** combina gli effetti della pressatura e dell'essiccazione per contatto, facendo passare il nastro di carta bagnato attraverso una linea di pressatura riscaldata. Si stima che, in media, queste soluzioni possano ridurre del 12% il fabbisogno di combustibili con investimenti iniziali modesti [13]. La carta prodotta è tuttavia di bassa qualità. Il TRL è compreso fra 5 e 7 [13].

Decarbonizzazione energia utilizzata - La biomassa è già oggi molto presente fra i combustibili utilizzati nella produzione della carta. La decarbonizzazione del settore deve concentrarsi sulla sostituzione dei combustibili fossili residui. Oltre al recupero dei fanghi di cartiera e alla gassificazione del *black liquor* (sottoprodotto dell'estrazione chimica della cellulosa) per la generazione di energia elettrica [13], è possibile l'elettificazione della generazione del calore, attraverso caldaie elettriche e pompe di calore. Le **caldaie elettriche** hanno un TRL pari 9, ma la diffusione su vasta scala è ostacolata dal prezzo dell'energia elettrica [13]. Le **pompe di calore industriali** (discusse nel capitolo 4.2) sono più efficienti rispetto alle caldaie elettriche e, rispetto all'utilizzo di altri vettori energetici di sintesi, non sono presenti le perdite di conversione.

Riduzione della domanda - Per la riduzione del consumo di legno è possibile migliorare gli attuali processi di riciclo e utilizzare materie prime alternative. Nel 2019, il **riciclo** in Italia è stato pari all'81% [76], valore che può aumentare ulteriormente potenziando i sistemi di separazione della carta e anche mediante una progettazione dei prodotti che tenga già conto del fine vita e delle necessità dei processi di riciclo. Sono stati sviluppati processi per la produzione di carta a partire da **materie prime alternative**, come paglia di grano, erba e scarti del settore agricolo. L'utilizzo di questi materiali permette di ridurre il consumo di energia termica, di sostanze chimiche, acqua e materie prime e di conseguenza anche i costi di produzione. Ad esempio, aggiungendo il 40% di fibre di erba alla pasta-carta, è possibile ridurre del 92% il fabbisogno di energia termica (elaborazione dati da [11], [37], [77] e [78]). Generalmente l'erba proviene da superfici di compensazione ecologica limitrofe alle cartiere, così da ridurre il trasporto. La carta di fibre di erba è al 100% biodegradabile, ma ha una resistenza inferiore rispetto a quella prodotta dal legno, di conseguenza al momento non è possibile realizzare imballaggi costituiti solamente in erba ([77] e [79]). Il TRL della produzione di carta a partire da nuove materie prime è pari a 8 [80].

5 Potenziale diffusione di pompe di calore e solare termico nell'industria

Le pompe di calore o il solare termico potrebbero costituire una valida alternativa alle fonti energetiche fossili per la produzione del calore, per il riscaldamento degli ambienti, per l'acqua calda sanitaria (ACS) e anche per i processi industriali stessi. Questo capitolo è inteso a stimare il potenziale di diffusione di tali tecnologie nell'industria lombarda. Il capitolo distingue una prima sezione in cui viene illustrato il metodo e una seconda sezione per presentare i risultati.

5.1 Metodo

In questa sezione viene esposto il metodo di analisi seguito per individuare i fabbisogni energetici che potrebbero essere soddisfatti tramite pompe di calore o solare termico in Lombardia.

Come per altre tecnologie di decarbonizzazione dell'industria, anche per solare termico e pompe di calore, la stima di potenziale penetrazione su un'area estesa come la Lombardia è resa difficile dalla mancanza di dati specifici per i singoli processi delle singole industrie. In questo caso è ipotizzabile usare un approccio che parta dallo studio di alcuni siti industriali o da grandezze statistiche ricavate da più siti industriali (anche in altri contesti) per applicare considerazioni "medie" per ciascun settore merceologico. La letteratura, scientifica e non, offre alcuni lavori in tal senso, comunque non focalizzati specificamente sul caso studio lombardo.

Un dettaglio rispetto ai processi con temperature raggiungibili da queste due tecnologie è dato da Farjana et al. [40], focalizzati sulle applicazioni possibili per il solare termico (Figura 5.1 e Figura 5.2).

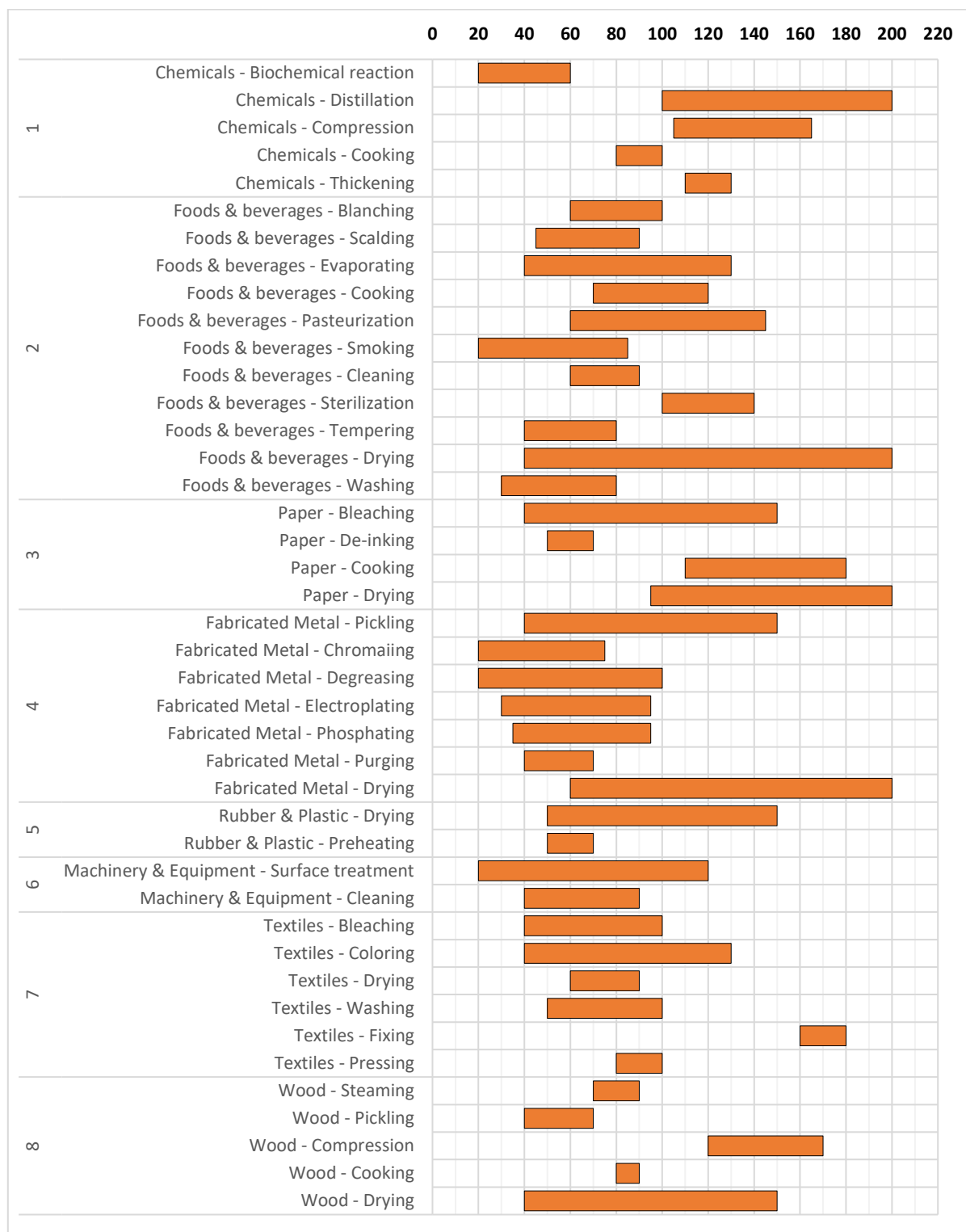


Figura 5.1 - Livelli di temperatura richiesti per processo e per settore merceologico (1/2).
[Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati di Farjana et al. [40]]



Figura 5.2 - Livelli di temperatura richiesti per processo e per settore merceologico (2/2).
[Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati di Farjana et al. [40]]

Kosmadakis, nel suo studio circa la potenziale diffusione di pompe di calore industriali in Europa [81], fornisce una stima della domanda di calore in Italia per diversi settori industriali, suddivisa nei diversi usi finali (riscaldamento, acqua calda sanitaria e processi con diversi range di temperatura). Questi dati possono essere utilizzati per suddividere, per range di temperatura, i consumi per la produzione di calore nell'industria

lombarda, ricavabile dai dataset di AIA e ETS (Figura 5.3 per l'industria non-ETS e Figura 5.4 per l'industria ETS).

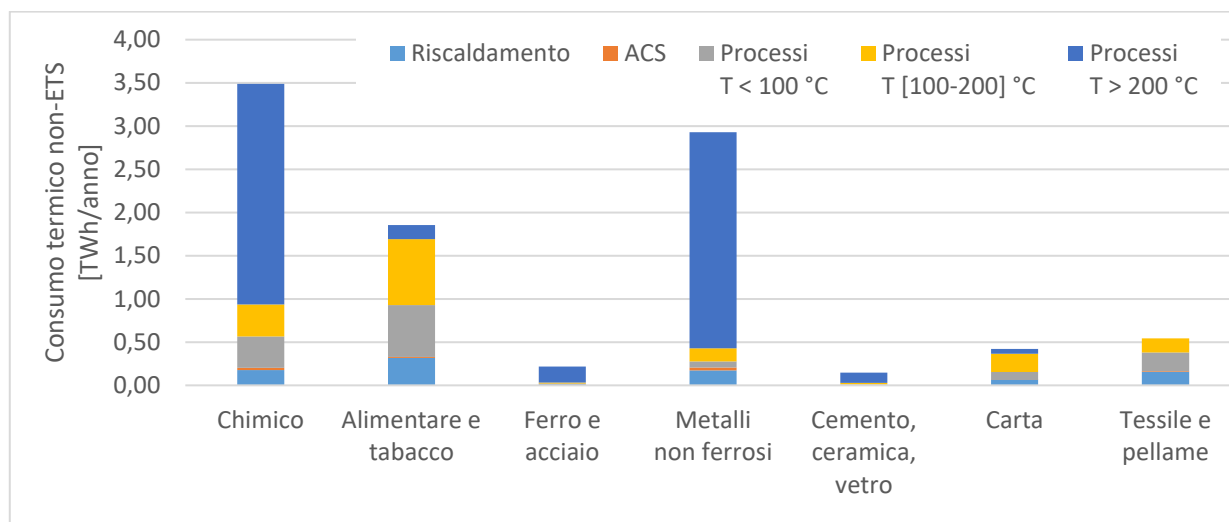


Figura 5.3 – Consumi di combustibile per la produzione di calore nell'industria lombarda non-ETS, per uso finale e per sottosettore [TWh/anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

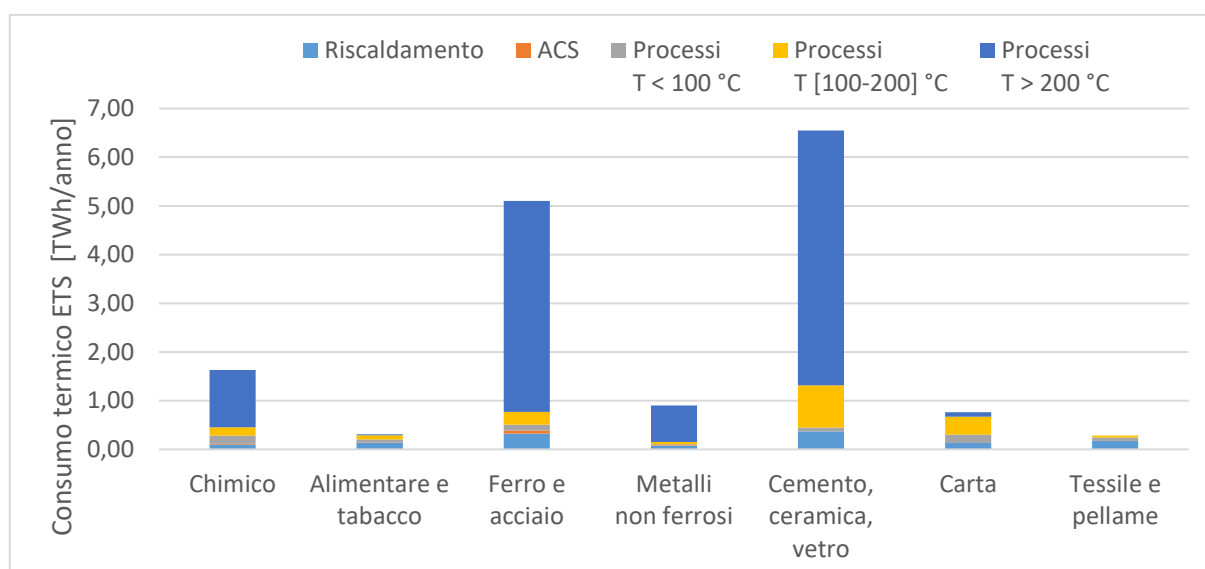


Figura 5.4 – Consumi di combustibile per la produzione di calore nell'industria lombarda ETS, per uso finale e per sottosettore [TWh/anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

Tale suddivisione permette di individuare lo spazio entro cui si possono collocare tecnologie che operano solo entro certi range di temperatura. In particolare, in Tabella 5.1 si riassumono i risultati complessivi ottenuti per i consumi nelle industrie ETS e non-ETS.

Tabella 5.1 - Consumo di energia termica di processo per range di temperatura e per ETS e non-ETS [TWh/anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS]

Consumi di combustibile per la produzione di calore	Temperatura < 100°C [TWh/anno]	Temperatura [100-200°C] [TWh/anno]
Industrie non-ETS	1,35	1,69
Industrie ETS	0,67	1,84

Per quanto riguarda le pompe di calore, pur ipotizzando che la tecnologia si svilupperà ulteriormente, viene assunto che solo una quota del consumo di processo riportato in Tabella 5.1 possa essere soddisfatto. In particolare, vengono distinte tre quote in funzione del tipo di fabbisogno coperto e della fascia di temperatura. Per il calore di processo a temperature comprese tra 100°C e 200°C, sono stati presi come riferimento i valori utilizzati da Kosmadakis nei vari settori [81], riportati in Tabella 5.2.

Tabella 5.2 - Quote percentuali di calore di processo nella fascia 100-200°C potenzialmente copribili da pompe di calore [Fonte: Kosmadakis [81]]

Settore	Quota [%]
Chimico	2%
Alimentare e Tabacco	6%
Ferro e acciaio	0%
Metalli non ferrosi	100%
Cemento, ceramica, vetro	35%
Carta	11%
Tessile e pellame	1%

Per il calore di processo a temperature minori di 100°C, si è assunta una quota pari al 90%, immaginando di escludere in tal modo situazioni di difficile applicazione. Si è assunto invece che il fabbisogno di riscaldamento ambienti e ACS possa essere corrisposto potenzialmente al 100% da pompe di calore.

Si è assunto che i consumi dichiarati nelle AIA e ricavati a partire dalle emissioni nel registro ETS siano convertiti in calore utile, con un'efficienza media pari a 80%. Per le pompe di calore è invece assunto un COP medio pari a 3,28, come indicato da Marina et. al in [42] nel caso industriale, mentre pari a 3,05 per le pompe di calore per riscaldamento e ACS assunto da valori di analisi interne⁸.

Le potenze necessarie per le pompe di calore sono ottenute dividendo i consumi elettrici per le corrispondenti ore equivalenti di funzionamento, riportate in Tabella 5.3. Per il riscaldamento è assunto un funzionamento in zona climatica E dal 15 ottobre al 15 aprile. Per i processi industriali si è mantenuto il rapporto tra il calore fornito da pompe di calore e la capacità installata ottenuta dalle analisi di Marina et. al in [42].

Tabella 5.3 – Ore equivalenti di funzionamento ipotizzate per gli usi finali

Uso finale	h equivalenti
Riscaldamento	4368,0
ACS	8760,0
Processi industriali	7741,5

⁸ il COP è più alto nell'applicazione industriale perchè può giovare di una fonte fredda a temperatura più alta, derivante da calore di scarto

Il solare termico potrebbe potenzialmente soddisfare il fabbisogno industriale di calore senza particolari distinzioni di temperatura, data l'evoluzione raggiunta da tale tecnologia. La soluzione è tuttavia condizionata dalla disponibilità di superfici (terreno o tetti) dove installare i pannelli o spazi per i sistemi di accumulo necessari per un'intera produzione industriale. Anche in questo caso, si assume quindi che la domanda di calore di processo possa essere soddisfatta da solare termico solo per una quota. In particolare, si assume un valore pari al 45% del fabbisogno termico a bassa temperatura ($< 200^{\circ}\text{C}$), come assunto anche nei lavori di Cottret et. al [82] e IRENA [83] sulla diffusione del solare termico nei processi industriali.

Per il calcolo delle emissioni di CO_2 è stato utilizzato un fattore di emissione pari a $204,1 \text{ kgCO}_2/\text{MWh}$ per il gas naturale [84], mentre, per i consumi elettrici, si fa distinzione tra consumi che si hanno durante tutto l'anno (ACS e processi industriali) e consumi che si hanno soltanto in un determinato periodo (es. riscaldamento). Tale distinzione è necessaria al fine del calcolo del fattore di emissione medio a partire da un fattore di emissione dinamico (ora per ora) ottenuto tramite simulazione del mix nazionale di generazione elettrica al 2030. In particolare, si è utilizzato un fattore di emissione medio annuo pari a $164,3 \text{ kgCO}_2/\text{MWh}_{\text{el}}$ per ACS e processi industriali e un fattore di emissione medio sul periodo di riscaldamento di $183,4 \text{ kgCO}_2/\text{MWh}_{\text{el}}$.

5.2 Risultati

Sono qui riassunti i risultati ottenuti dall'applicazione dei metodi appena esposti per il calcolo della potenziale penetrazione di pompe di calore e solare termico nel settore industriale, dividendo tra consumi di processo industriale e consumi per riscaldamento e ACS.

Applicando ai dati disponibili le ipotesi e le assunzioni esposte ai consumi relativi ai processi industriali si ottiene un fabbisogno termico pari a $1,95 \text{ TWh/anno}$ che è possibile soddisfare con pompe di calore ($1,15 \text{ TWh/anno}$ in industrie non-ETS). Valori simili si ottengono per il solare termico, pari a $2,00 \text{ TWh/anno}$ ($1,10 \text{ TWh/anno}$ in industrie non-ETS), come riportato in Figura 5.5 rispetto al fabbisogno complessivo.

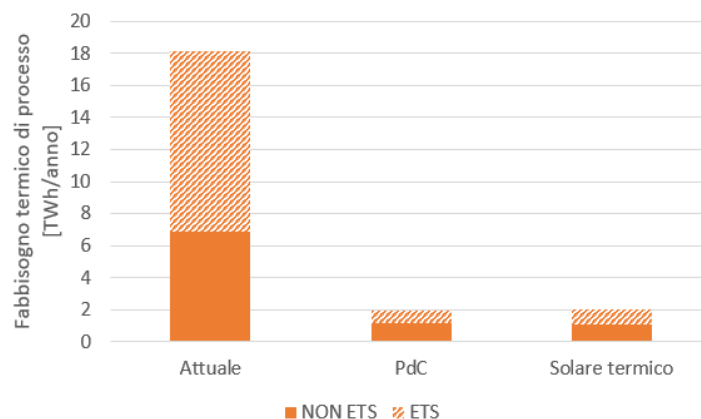


Figura 5.5 - Fabbisogno termico di processo industriale che è possibile soddisfare con PdC o solare termico per industrie ETS e non-ETS [TWh/anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS, Martina et. al [42] e Kosmadakis [81]]

La suddivisione nei diversi settori industriali è mostrata in Figura 5.6 per le pompe di calore e in Figura 5.7 per il solare termico.

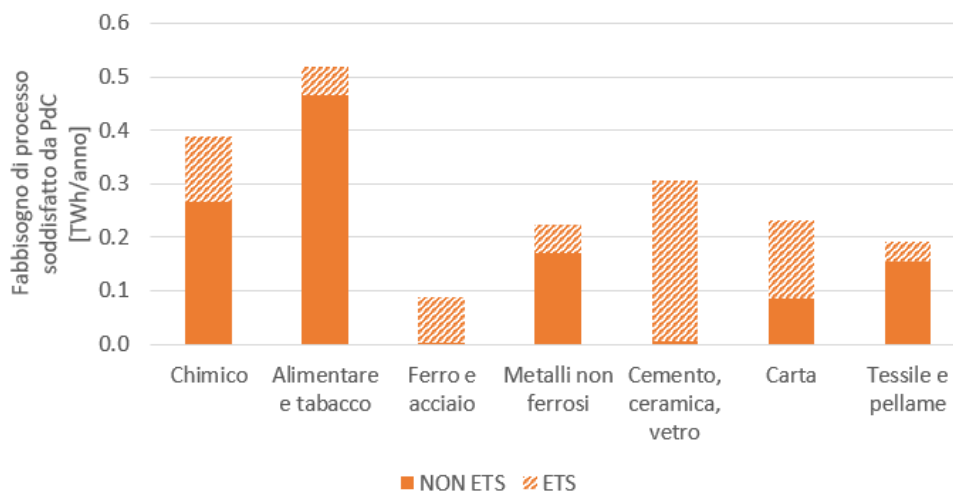


Figura 5.6 – Fabbisogno termico di processo industriale che è possibile soddisfare con pompe di calore industriali. I valori sono distinti per settore industriale e per quote ETS e non-ETS [TWh/anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS, Martina et. Al [42] e Kosmadakis [81]]

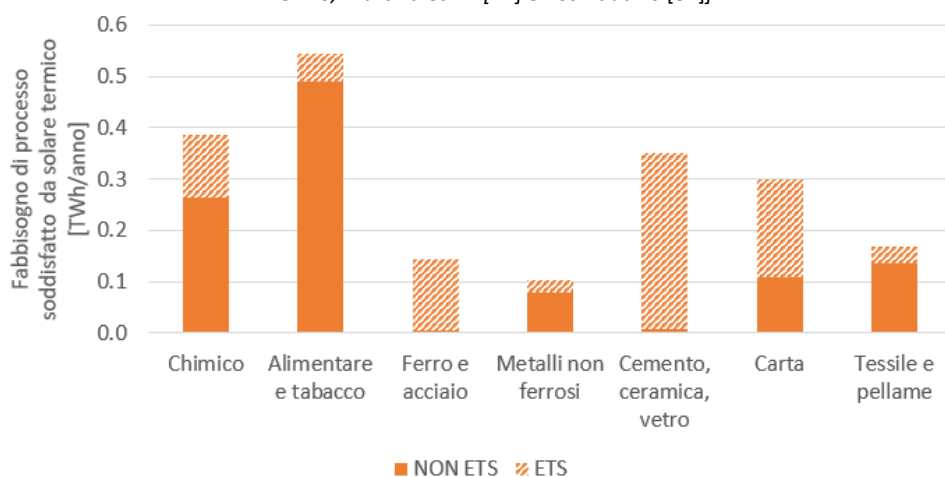


Figura 5.7 – Fabbisogno termico di processo industriale che è possibile soddisfare con solare termico per settore industriale e suddiviso per industrie ETS e non-ETS [TWh/anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS, Martina et. al [42] e Kosmadakis [81]]

In termini di emissione, si ottengono complessivamente 4,64 MtCO₂/anno per il caso attuale, 4,24 MtCO₂/anno nel caso di utilizzo di pompe di calore o 4,13 MtCO₂/anno nel caso di utilizzo di solare termico (Figura 5.8). Le emissioni saranno quindi ridotte del 9% attraverso l'utilizzo di pompe di calore o del 11% ricorrendo al solare termico.

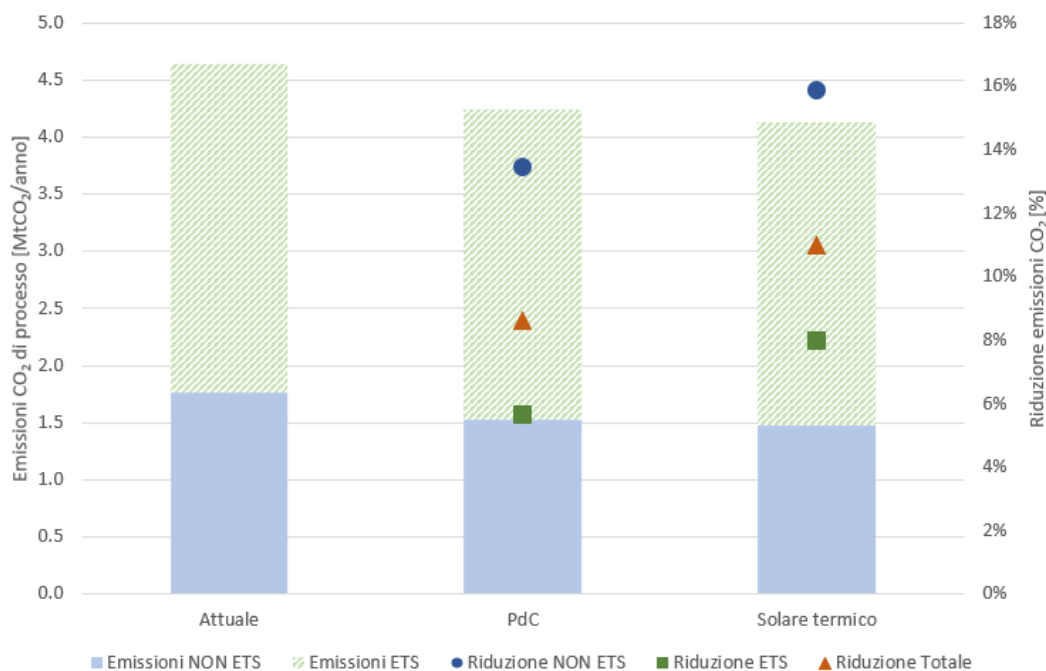


Figura 5.8 – Emissioni di CO₂ nella situazione attuale e dopo la sostituzione con PdC o solare termico nei processi industriali, con specifica per industrie ETS e non-ETS [MtCO₂/anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS, Martina et. al [42] e Kosmadakis [81]]

Nei grafici sottostanti si mostrano le emissioni di CO₂ a seguito dell'utilizzo di pompe di calore (Figura 5.9) o solare termico (Figura 5.10), sia in termini assoluti che in termini percentuali rispetto al caso attuale in cui si assume che tutto il fabbisogno sia soddisfatto da gas naturale. Si osserva come i settori dove la riduzione di emissioni sia più marcata (*Alimentare e tabacco, Carta, Tessile e pellame*) siano anche quelli con un valore assoluto basso rispetto agli altri settori.

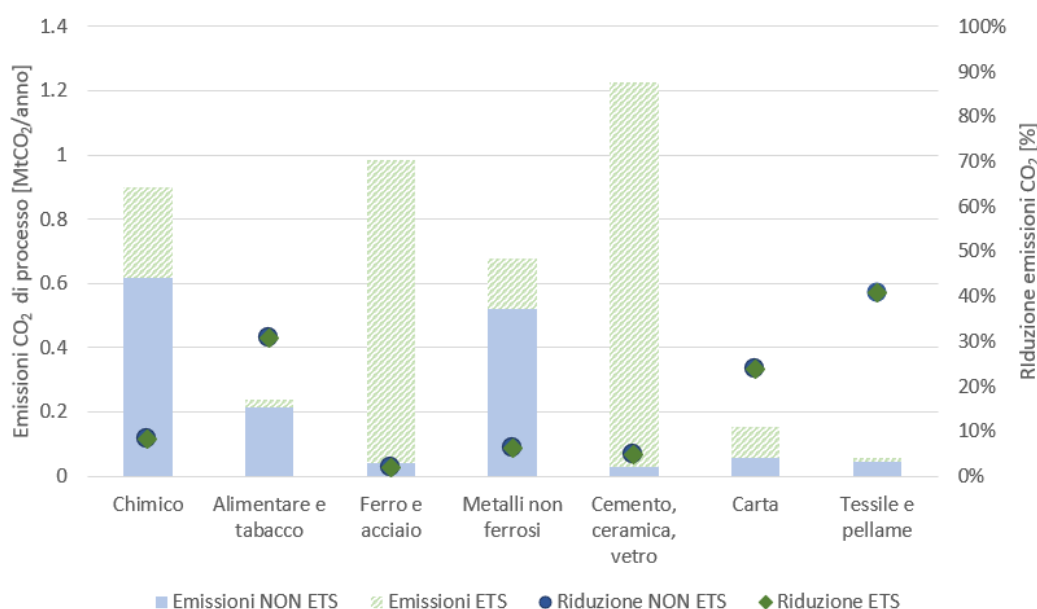


Figura 5.9 – Emissioni di CO₂ nei processi industriali, in valore assoluto e in termini di riduzione percentuale, ottenute con l'utilizzo di PdC per settore industriale con specifica per industrie ETS e non-ETS [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS, Martina et. al [42] e Kosmadakis [81]]

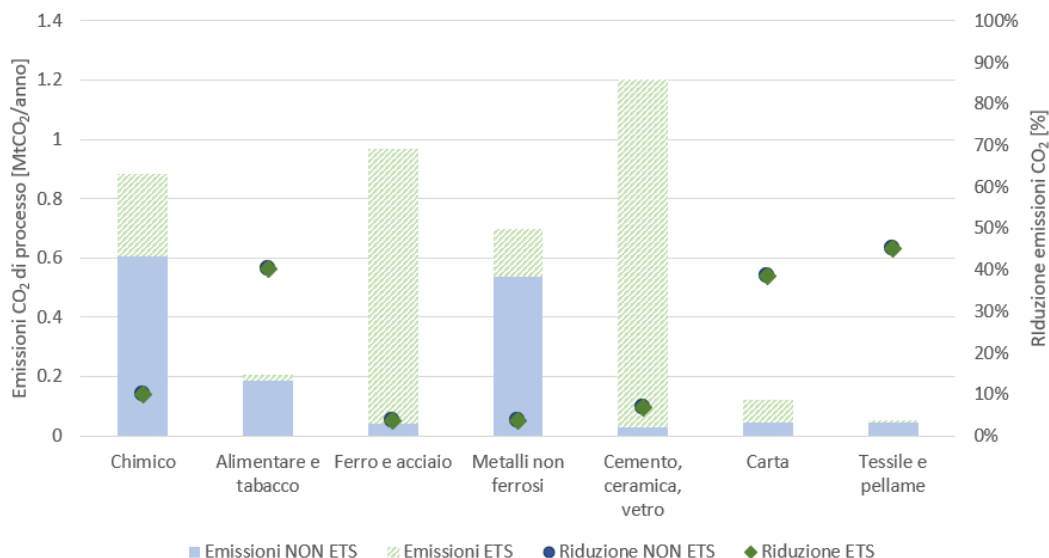


Figura 5.10 – Emissioni di CO₂ nei processi industriali, in valore assoluto e in termini di riduzione percentuale, ottenute con l'utilizzo di solare termico per settore industriale con specifica per industrie ETS e non-ETS [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS, Martina et. al [42] e Kosmadakis [81]]

Il fabbisogno di riscaldamento e ACS si assume che sia soddisfatto al 100% da pompe di calore, che permettono quindi di ridurre i consumi ad esso associati. Nel grafico in Figura 5.11 si mostra il consumo associato al fabbisogno di riscaldamento e ACS nella situazione attuale (2,41 TWh/anno di cui 0,99 TWh/anno non-ETS) e dopo la sostituzione con pompe di calore (0,63 TWh/anno di cui 0,26 TWh/anno non-ETS). Il consumo viene ridotto quindi del 74%.

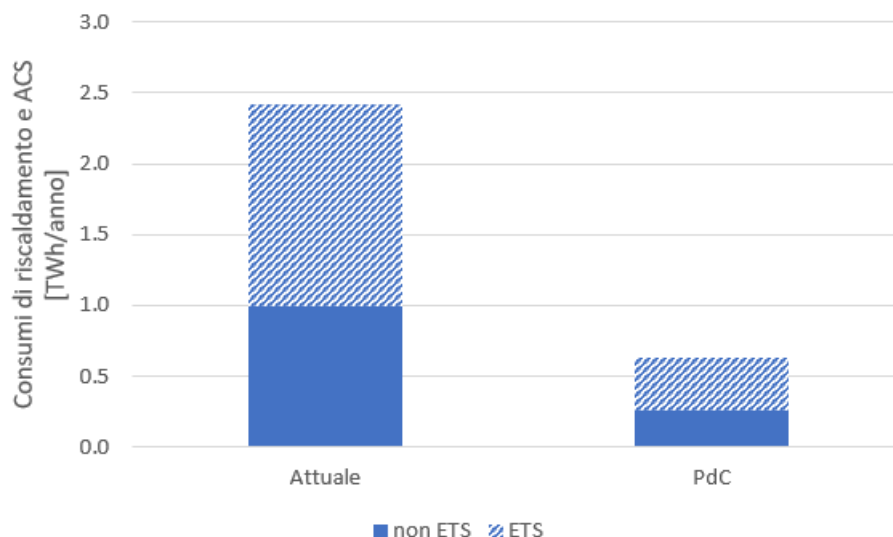


Figura 5.11 – Consumi del settore industriale per riscaldamento e ACS nella situazione attuale e dopo la sostituzione con PdC [TWh/anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS, Martina et. al [42] e Kosmadakis [81]]

In Figura 5.12 si mostra il consumo di riscaldamento e ACS soddisfatto da PdC per i sottosettori industriali analizzati.

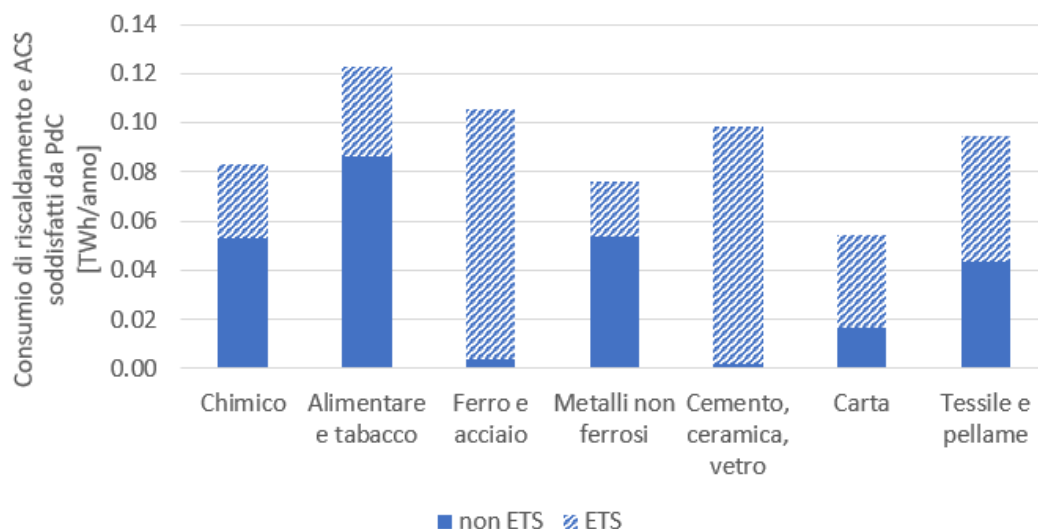


Figura 5.12 – Consumi del settore industriale per riscaldamento e ACS nella situazione attuale e dopo la sostituzione con PdC diviso per settore [TWh/anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS, Martina et. al [42] e Kosmadakis [81]]

In termini di emissione, si ottengono complessivamente 0,492 MtCO₂/anno per il caso attuale e 0,115 MtCO₂/anno nel caso di utilizzo di pompe di calore (Figura 5.13). Le emissioni saranno quindi ridotte del 77%.

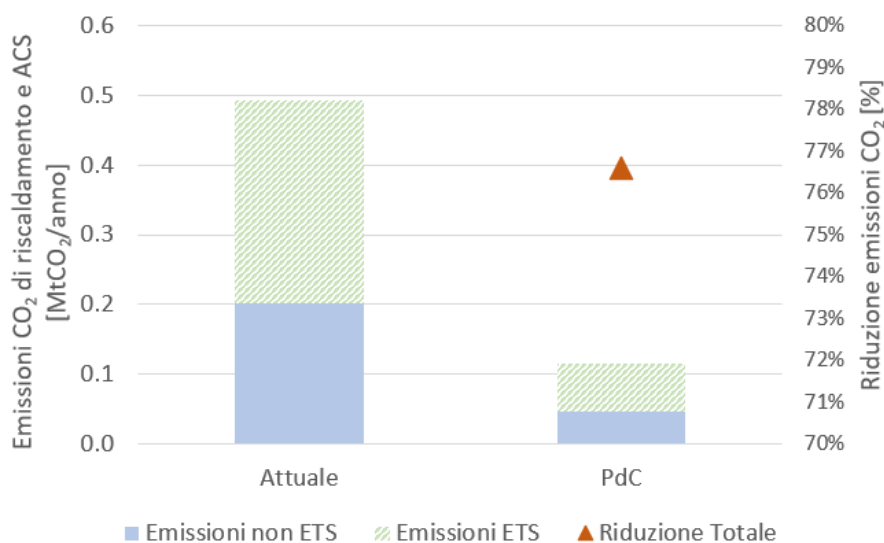


Figura 5.13 – Emissioni di CO₂ nella situazione attuale e dopo la sostituzione con PdC per riscaldamento e ACS, con specifica per industrie ETS e non-ETS [MtCO₂/anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS, Martina et. al [42] e Kosmadakis [81]]

Nel grafico in Figura 5.14 si mostrano le emissioni di CO₂ a seguito dell'utilizzo di pompe di calore.

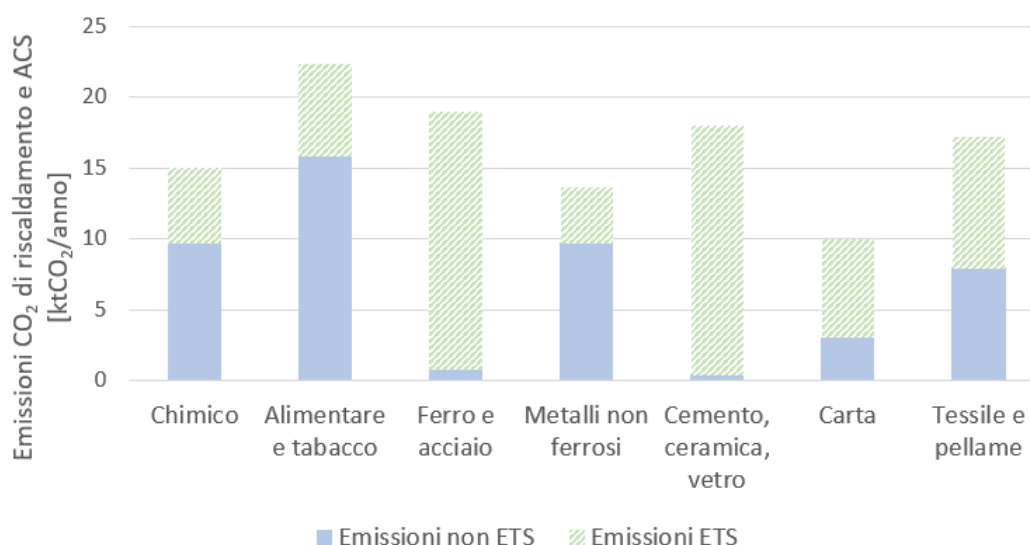


Figura 5.14 - Emissioni di CO₂ dopo la sostituzione con PdC per riscaldamento e ACS, con specifica per industrie ETS e non-ETS per ogni settore industriale [ktCO₂/anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS, Martina et. al [42] e Kosmadakis [81]]

Il calcolo delle potenze necessarie per le pompe di calore viene svolto in modo separato in base agli usi finali e considerando le corrispondenti ore equivalenti. Le potenze ottenute sono riportate in Tabella 5.4.

Tabella 5.4 – Potenze necessarie per soddisfare i consumi termici dei settori industriali tramite PdC [MW] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS, Martina et. al [42] e Kosmadakis [81]]

Uso finale	Potenza [MW]
Riscaldamento	208,5
ACS	8,9
Processi industriali (T<100°C)	155,0
Processi industriali (T [100-200°C])	31,2

Nel grafico in Figura 5.15 si mostra invece la suddivisione delle potenze complessive nei diversi settori industriali. Il settore *Alimentare e tabacco* rappresenta la quota maggiore per riscaldamento e processi industriali con temperature inferiori a 100°C, mentre nei processi industriali a temperature comprese tra 100°C e 200°C il settore predominante è quello dei *Metalli non ferrosi*.

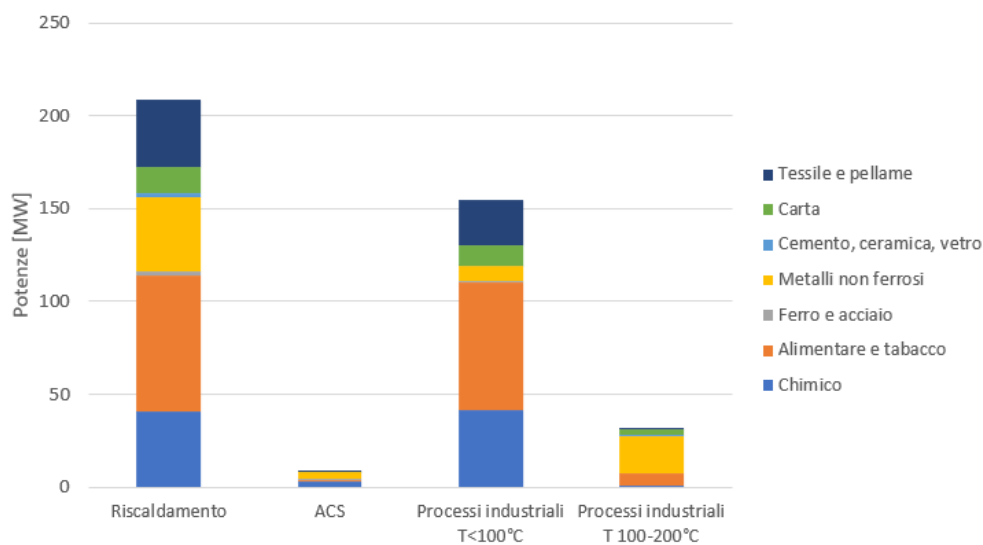


Figura 5.15 – Potenze di PdC da installare per uso finale e per settore per le industrie non-ETS [MW] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati registri AIA e ETS, Martina et. al [42] e Kosmadakis [81]]

6 Mappatura del calore di scarto recuperabile

Il presente capitolo si focalizza sul calore di scarto di origine industriale, per individuarne il potenziale di recupero, all'interno del settore stesso o da parte di terzi (in particolare, attraverso reti di teleriscaldamento). Con *calore di scarto* si intende qui l'energia in eccesso derivante da tutti quei processi produttivi che hanno come sottoprodotto una quota di calore che viene emessa in ambiente e che non è direttamente riutilizzabile nello stesso processo produttivo. Il recupero può essere interno (in altri processi dell'impianto) o esterno (verso altri utenti che utilizzano calore a temperature inferiori). La conoscenza del posizionamento delle fonti è un dato rilevante in quanto la convenienza all'utilizzo del calore è legata alla distanza rispetto a un possibile utilizzatore e alla quantità di energia trasportata su tale distanza.

Il capitolo fornisce prima una descrizione generale del metodo (sezione 6.1), entra poi nel merito dei dati e delle assunzioni prese per il contesto lombardo (sezione 6.2), e infine fornisce i risultati delle elaborazioni (sezione 7).

6.1 Metodo

L'approccio utilizzato per la stima del calore recuperabile prende spunto da quello elaborato nell'ambito del progetto *Heat Roadmap Europe* [85]. In tale contesto, vengono applicati dei coefficienti che, a partire dal dato di consumo di energia primaria del singolo processo, permettono la quantificazione della *massima quota di calore di scarto teoricamente recuperabile*. In questo studio si è fatto un passo ulteriore, verso la quantificazione di un potenziale tecnico, più realistico. La stima del calore in eccesso potenzialmente recuperabile si fonda essenzialmente sull'equazione (6.1):

$$E_{prim} = E_{abs} + E_{excess} [kWh] \quad (6.1)$$

dove

- E_{prim} rappresenta l'input di energia primaria, ovvero l'energia in ingresso al processo produttivo;
- E_{abs} indica l'energia che viene assorbita nel processo produttivo (l'energia imputabile ai prodotti industriali – embedded energy);
- E_{excess} identifica il calore di scarto, i.e. il calore non utile per il processo stesso (o prodotto in eccesso), che viene rilasciato in ambiente sotto forma di acqua, aria calda o vapore.

Nella Figura 6.1 è schematicamente rappresentata la procedura, dettagliata nel seguito, utilizzata per la stima dell'energia termica recuperabile a partire dall'energia primaria consumata dalla fonte di calore.

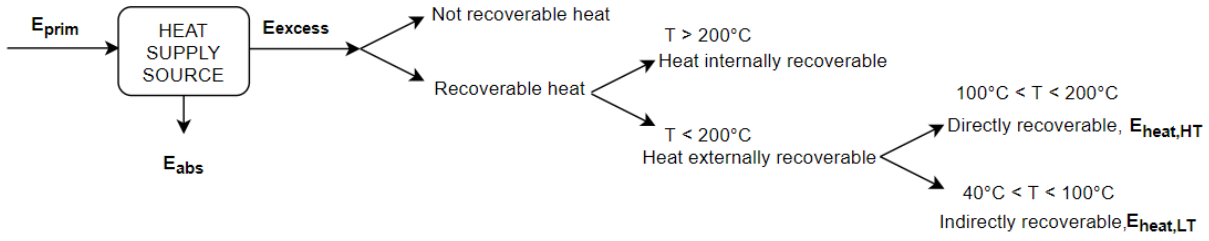


Figura 6.1 – Schematizzazione della procedura utilizzata per la stima del calore in eccesso recuperabile a partire dall’energia primaria in ingresso al processo produttivo. [Fonte: Fondazione Politecnico]

Secondo quanto riportato in [85], la quota di energia termica recuperabile (E_{heat}) può essere espressa come (i) una percentuale dell’energia termica in eccesso, E_{excess} , attraverso quello che è definito “heat recovery rate” (ζ_{heat}) nell’equazione (6.2):

$$\zeta_{heat} = \frac{E_{heat}}{E_{excess}} = \frac{E_{heat}}{(E_{prim} - E_{abs})} [\%] \quad (6.2)$$

oppure come (ii) una percentuale dell’energia primaria per mezzo dell’efficienza di recupero (η_{heat}) dell’eq. (6.3).

$$\eta_{heat} = \frac{E_{heat}}{E_{prim}} [\%] \quad (6.3)$$

Il calore in eccesso contenuto nel fluido in uscita da un processo viene recuperato con un’efficienza diversa a seconda del valore di temperatura. Si è calcolato dapprima un potenziale di recupero massimo teorico per i diversi livelli di temperatura e successivamente uno tecnico. Quest’ultimo tiene conto del livello di temperatura del calore in eccesso, del rendimento di recupero e della corrispondenza temporale fra il profilo di produzione industriale e quello della domanda termica. Per la fase di stima delle quote di calore di scarto per i diversi livelli di temperatura dei singoli settori produttivi è stato utilizzato come riferimento uno studio francese del 2012 [86]. In molti processi industriali che richiedono l’utilizzo del vapore, la quota di calore in eccesso rilasciata a temperature maggiori di 200°C, $E_{heat,INT}$, viene generalmente considerata come recuperabile internamente al sito industriale stesso. Per quanto riguarda il recupero di calore per usi terzi (per es. in rete di teleriscaldamento), vengono incluse nella valutazione fonti di calore di scarto a temperature inferiori. Questa quota di calore può essere ulteriormente scomposta in due flussi, identificati con $E_{heat,HT}$ per temperature superiori a 100°C e $E_{heat,LT}$ per temperature fra 40°C e 100°C. Se la temperatura del fluido in uscita dalla fonte è sufficientemente alta (100°C < T < 200°C), il contenuto energetico di tale fluido può essere recuperato direttamente nella rete attraverso un semplice scambiatore di calore; se invece la temperatura è inferiore, occorre prima incrementarla per mezzo di una pompa di calore, con un recupero indiretto. La procedura determina dunque due flussi di calore recuperabile esternamente, definiti tramite le seguenti equazioni:

$$E_{heat,HT} = \eta_{heat,HT}(T) \cdot E_{prim} [kWh] \quad (6.4)$$

$$E_{heat,LT} = \eta_{heat,LT}(T) \cdot E_{prim} [kWh] \quad (6.5)$$

A partire da questi due flussi, vengono poi calcolati i flussi di calore tecnicamente recuperabili, $E_{rec,HT}$ e $E_{rec,LT}$, tenendo conto dell'efficienza del recupero. L'efficienza dipende dalla resa complessiva dello scambio termico, a partire dall'efficienza degli scambiatori e dalla possibilità effettiva di recuperare completamente tutto il calore qui stimato. L'efficienza di recupero, definita η_{rec} , è qui ipotizzata pari a 75%.

Per la particolare applicazione del teleriscaldamento, come illustrato nella Figura 6.2 seguente, nel caso di calore in eccesso a temperatura maggiore di 100°C, sarà sufficiente prendere in considerazione esclusivamente l'efficienza η_{rec} , mentre nel caso a bassa temperatura occorrerà considerare anche il coefficiente di prestazione (COP) della pompa di calore.

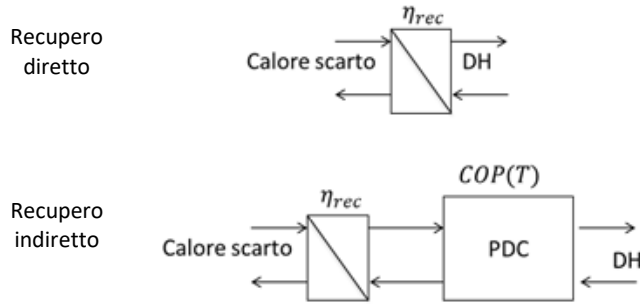


Figura 6.2 - Rappresentazione del recupero diretto e indiretto del calore in eccesso, a seconda della temperatura di quest'ultimo.
PDC= pompa di calore, DH= impianto di teleriscaldamento. [Fonte: Fondazione Politecnico]

I due flussi di energia tecnicamente recuperabili sono identificati dalle equazioni (6.6) e (6.7):

$$E_{rec,HT} = E_{prim} \cdot \eta_{heat,HT} \cdot \eta_{rec} [kWh] \quad (6.6)$$

$$E_{rec,LT} = E_{prim} \cdot \eta_{heat,LT} \cdot \eta_{rec} [kWh] \quad (6.7)$$

Un'ulteriore riduzione del calore recuperabile viene considerata nel caso del teleriscaldamento (o in generale del riscaldamento nel settore civile) per tenere conto dell'effettiva corrispondenza temporale fra la disponibilità di calore, relativamente uniforme durante l'anno, e la domanda termica che si concentra prevalentemente nella stagione invernale. Si assume qui che i processi industriali abbiano un numero di ore equivalenti hh_{heat} pari a 7000, mentre, per le reti di teleriscaldamento (normalmente tra 4500 e 2500 ore a seconda delle zone climatiche) viene qui assunto $hh_{DH} = 3500$. Il calore recuperabile nelle reti, E_{DH} , risulta dunque la metà $\left(\frac{hh_{DH}}{hh_{heat}}\right)$ di quello disponibile al recupero, come identificato dalle equazioni (6.8) e (6.9):

$$E_{DH,HT} = E_{rec,HT} \cdot \frac{hh_{DH}}{hh_{heat}} [kWh] \quad (6.8)$$

$$E_{DHLT} = E_{recLT} \cdot \frac{COP}{(COP - 1)} \cdot \frac{hh_{DH}}{hh_{heat}} [kWh] \quad (6.9)$$

6.2 Applicazione al caso lombardo

A partire dai dati a disposizione circa l'industria sul territorio lombardo, ed escludendo gli impianti di produzione di energia elettrica, i settori industriali analizzati sono:

- Alimentare,
- Chimico,
- Estrazione, ovvero approvvigionamento dei combustibili e raffinerie,
- Meccanico (inteso come produzione di beni),
- Tessile,
- Siderurgia,
- Estrazione o lavorazione di metalli non ferrosi,
- Fabbricazione o lavorazione di prodotti non metallici (cemento, calce, ceramica, vetro),
- Fabbricazione o lavorazione della carta e Altro.

Le efficienze di recupero associate a ciascuno di essi sono state ricavate a partire da alcuni degli studi più referenziati presenti in letteratura, tra cui tre progetti di ricerca in ambito europeo: (i) lo studio del 2012 di Berthou e Bory [86], (ii) il progetto europeo *Ecoheatcool* [87] del 2006 e (iii) il progetto *Heat Roadmap Europe* [85], finanziato dal programma Horizon 2020 tra il 2016 e il 2019. In particolare, nel primo viene analizzato il settore industriale francese con l'intento di quantificare il calore in eccesso disponibile a livello nazionale. Il metodo proposto è caratterizzato da un approccio di tipo *top-down*, basato su dati statistici che ricoprono il 70% dell'intero settore industriale francese. Lo studio definisce inizialmente la frazione di calore in eccesso a partire dall'energia primaria per ogni settore industriale considerato. Espande poi il dettaglio per quei settori caratterizzati da consumi energetici più elevati. Ne ottiene una disaggregazione del calore in eccesso in tre frazioni di recupero, a seconda del tipo di effluente e del livello di temperatura:

- (i) calore ad altissima temperatura estraibile dal vapore in eccesso;
- (ii) calore a temperatura inferiore, recuperabile dai gas combusti, potenzialmente utilizzabile in un sistema di teleriscaldamento ad alta temperatura;
- (iii) calore a temperatura ancor più inferiore, recuperabile dagli impianti di raffreddamento, potenzialmente utilizzabile in un sistema di teleriscaldamento a bassa temperatura.

È possibile dunque identificare tre coefficienti di recupero, per i tre diversi livelli di temperatura, per ciascuno dei settori studiati: calore da vapore η_{steam} , calore da gas combusti η_{comb} , calore da processi di raffreddamento η_{LT} . Tali coefficienti possono essere usati come valori per i coefficienti η_{heat} da inserire nelle equazioni (6.4) e (6.5), in cui $\eta_{heat,HT} = \eta_{comb}$ e $\eta_{heat,LT} = \eta_{LT}$.

L'analisi di Berthou e Bory, seppur dettagliata, non include però tutte le categorie industriali presenti nel registro ETS. Per la definizione delle efficienze di recupero relative ai settori industriali esclusi, sono stati presi dunque i coefficienti emersi dagli altri due studi sopra citati, *Heat Roadmap Europe* e *Ecoheatcool*.

Le frazioni di calore ad alta e bassa temperatura potenzialmente recuperabile (coefficienti di recupero), risultanti dall'intera analisi per il caso studio lombardo, sono riportate in Tabella 6.1 e in Figura 6.3. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** per ogni categoria industriale analizzata.

Tabella 6.1 - Frazione di calore in eccesso a partire dall'energia primaria per settore industriale.
[Fonte: Elaborazioni Fondazione Politecnico su dati [85], [88], [89]]

Settore	$\eta_{rec,HT}$	$\eta_{rec,LT}$	$\eta_{rec,int}$
Alimentare	7.5%	28.1%	18.2%
Carta	18.8%	0.5%	36.1%
Chimica	18.8%	6.5%	8.3%
Acciaio (siderurgia)	18.8%	3.5%	3.5%
Cemento	27.5%	6.5%	16%
Calce e ceramica	18.8%	2.6%	6.4%
Vetro	18.8%	4.3%	10.7%
Metalli non ferrosi	18.8%	0%	0%
Tessile	7.8%	7.8%	7.8%
Estrazione (impianti di raffinazione)	37.5%	0%	0%
Meccanica	7.8%	7.8%	7.8%
Altro	15.6%	15.6%	15.6%

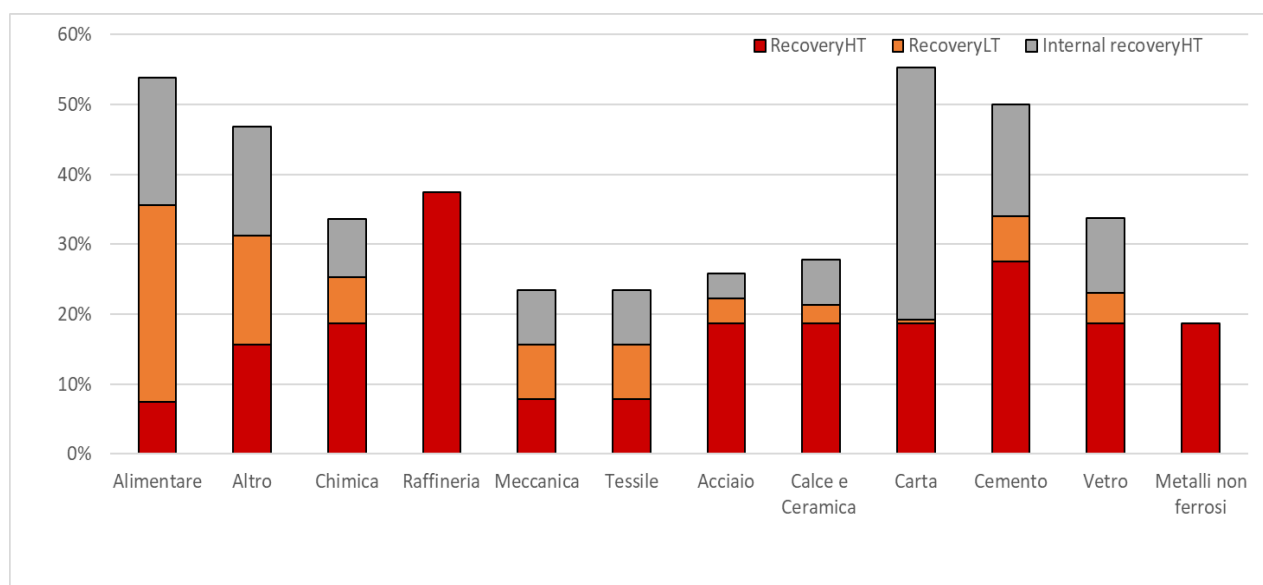


Figura 6.3 - Frazione di calore in eccesso a partire dall'energia primaria per settore industriale. [Fonte: Elaborazioni Fondazione Politecnico su dati [85], [88], [89]]

Il COP della pompa di calore necessaria per il recupero di calore a bassa temperatura è stato stimato a partire dalla formula empirica di Martynovsky [90] riportata nell'equazione (6.10):

$$COP = 0.74 \frac{T_C}{T_C - T_E} - \left(0.0032 T_E + 0.765 \frac{T_E}{T_C} \right) + 0.9 \quad (6.10)$$

Dove T_E rappresenta la temperatura all'evaporatore della pompa di calore, i.e. la temperatura del fluido caldo emesso dalla fonte, e T_C rappresenta la temperatura di condensazione, i.e., nel caso del

teleriscaldamento, la temperatura del fluido termovettore convogliato nello scambiatore di calore della sottostazione, pari a un valore medio di 90°C per il caso applicativo lombardo. I valori assunti dal COP sono mostrati nella curva della Figura 6.4 seguente.

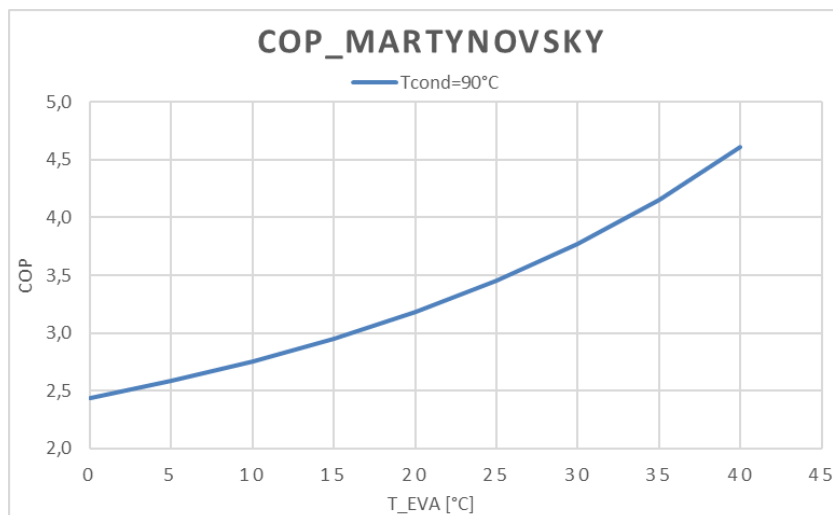


Figura 6.4 - Coefficiente di prestazione (COP) di una pompa di calore in funzione della temperatura di evaporazione, con temperatura di condensazione pari a 90°C. [Fonte: Elaborazioni Fondazione Politecnico]

Infine, un trattamento diverso è stato riservato per i siti produttivi elencati nel registro AIA nelle sezioni relative al consumo di combustibili non convenzionali (come legna, cippato e biogas). Nel registro compaiono infatti siti produttivi, per lo più di società zootecniche, di trattamento dei rifiuti o legate alla lavorazione del legno, in cui viene dettagliato il riutilizzo di scarti di lavorazione come combustibili per la produzione di energia elettrica. Tramite il dato di consumo del combustibile, il relativo potere calorifico e la produzione annuale di energia elettrica, per questi è stato possibile stimare la quantità di calore prodotto dal motore per la produzione elettrica (che viene considerato come verosimilmente dissipato in ambiente e quindi recuperabile).

7 Risultati

Sono qui mostrati i risultati della stima della disponibilità del calore di recupero in Lombardia da fonti industriali. In Figura 7.1, in particolare, sono mostrati il valore complessivo di energia primaria, il valore di calore di scarto e l'energia potenzialmente recuperabile in un sistema di teleriscaldamento. Si evince come, a partire da un valore di ingresso di energia primaria di circa 63 TWh, sulla base delle ipotesi e dei procedimenti precedentemente illustrati, la quota di energia termica di scarto si riduca a 22 TWh, pari a circa il 35%, e la quota potenzialmente recuperabile nel particolare caso del teleriscaldamento sia pari a 9 TWh, ovvero il 14% del valore in input. Questo scenario è molto cautelativo: il potenziale potrebbe notevolmente aumentare ipotizzando l'impiego di accumuli termici anche di grossa taglia che possano incidere sulla migliore corrispondenza temporale di offerta e domanda e immaginando un notevole abbassamento delle temperature di rete nei sistemi di teleriscaldamento futuri.

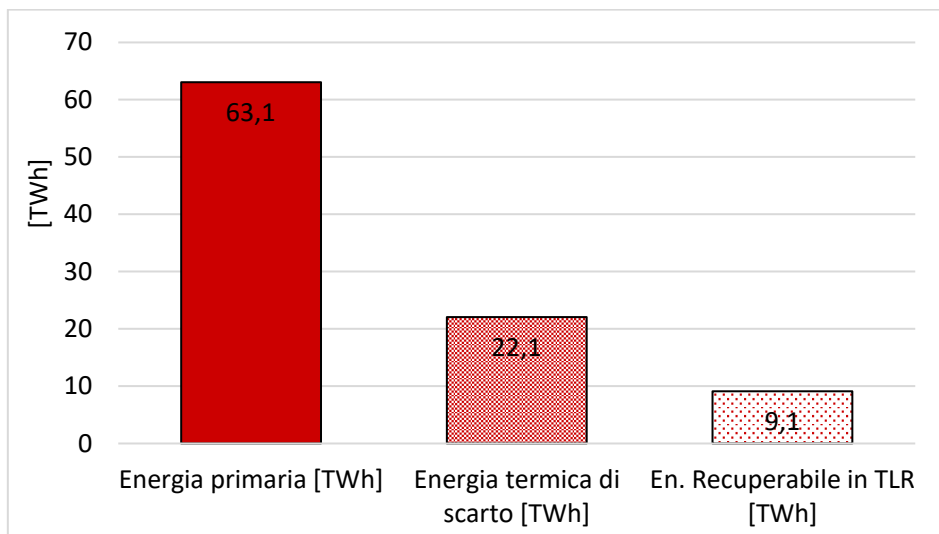


Figura 7.1- Energia primaria nel settore industriale, calore di scarto e calore di recupero disponibile nella regione Lombardia. [Fonte: Elaborazioni Fondazione Politecnico su dati registro AIA e ETS]

In Figura 7.2, si mostra come dei 22 TWh di calore di scarto una grossa quota provenga dall'industria alimentare, seguita da impianti di raffinazione, dall'industria chimica e dall'acciaio.

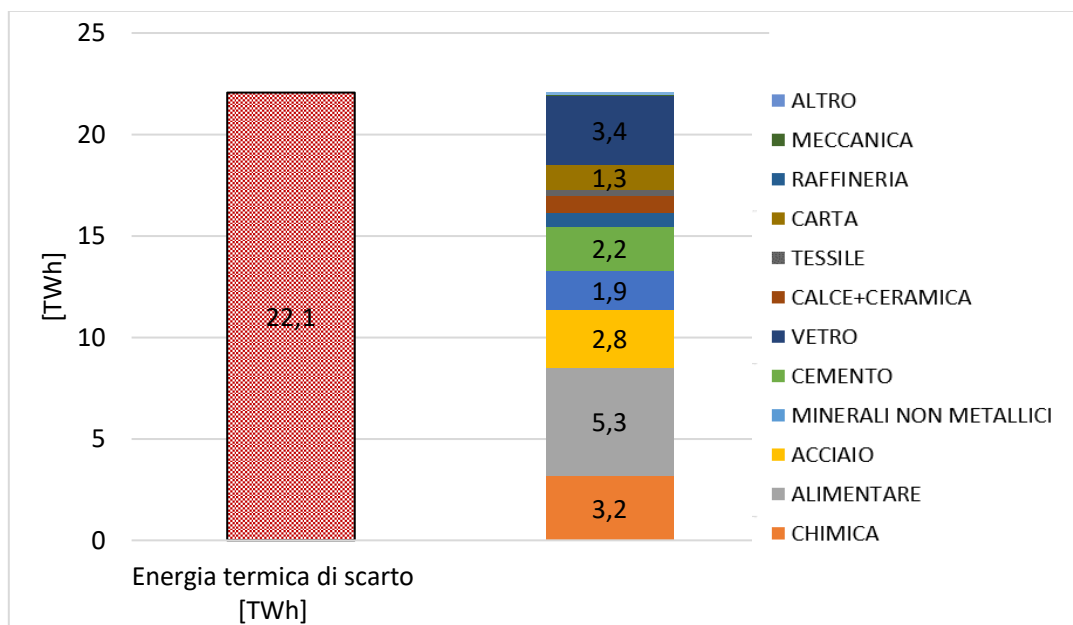


Figura 7.2 - Dettaglio sullo share dei settori industriali come fonti del calore di scarto individuato [Fonte: Elaborazioni Fondazione Politecnico su dati registro AIA e ETS]

La Figura 7.3 invece illustra il calore di scarto individuato per ogni settore industriale analizzato sul territorio lombardo, che corrisponde in maniera aggregata al risultato dei 22 TWh, con distinzione tra calore (i) ad alta

temperatura, (ii) a bassa temperatura e (iii) a temperature molto elevate adatte a recupero interno. Tra i settori più rilevanti per calore di scarto ad alta temperatura troviamo la raffinazione, la siderurgia, il settore dei metalli non ferrosi e il settore chimico. Il settore alimentare risulta invece il primo in termini di calore di scarto a bassa temperatura e ad altissima temperatura per recupero interno.

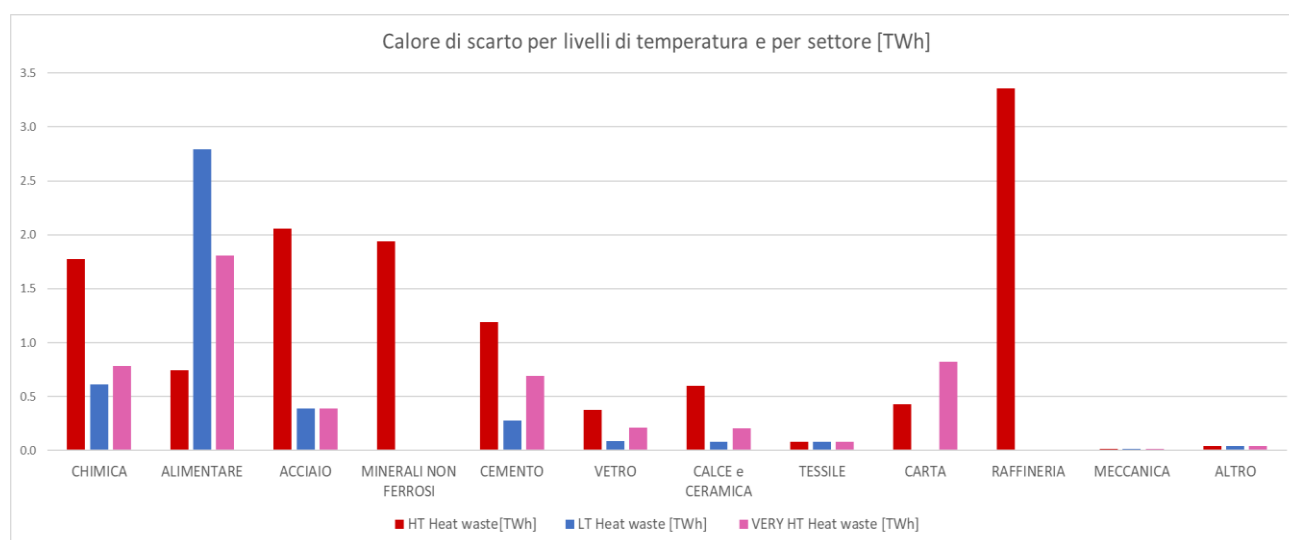


Figura 7.3 - Visualizzazione grafica del calore di scarto per livello di temperatura e per settore industriale in Lombardia. [Fonte: Elaborazioni Fondazione Politecnico su dati registro AIA e ETS]

In maniera aggregata, i valori riportati nella figura precedente corrispondono a 12.6 TWh/anno di calore di scarto ad alta temperatura, 4.4 TWh/anno di calore a bassa temperatura e 5.06 TWh/anno di calore reuperabile internamente, ad altissima temperatura.

A seguire, in Figura 7.4, Figura 7.5, Figura 7.6, è riportata la distribuzione spaziale, con dettaglio comunale, del calore nelle tre diverse fasce di temperatura.

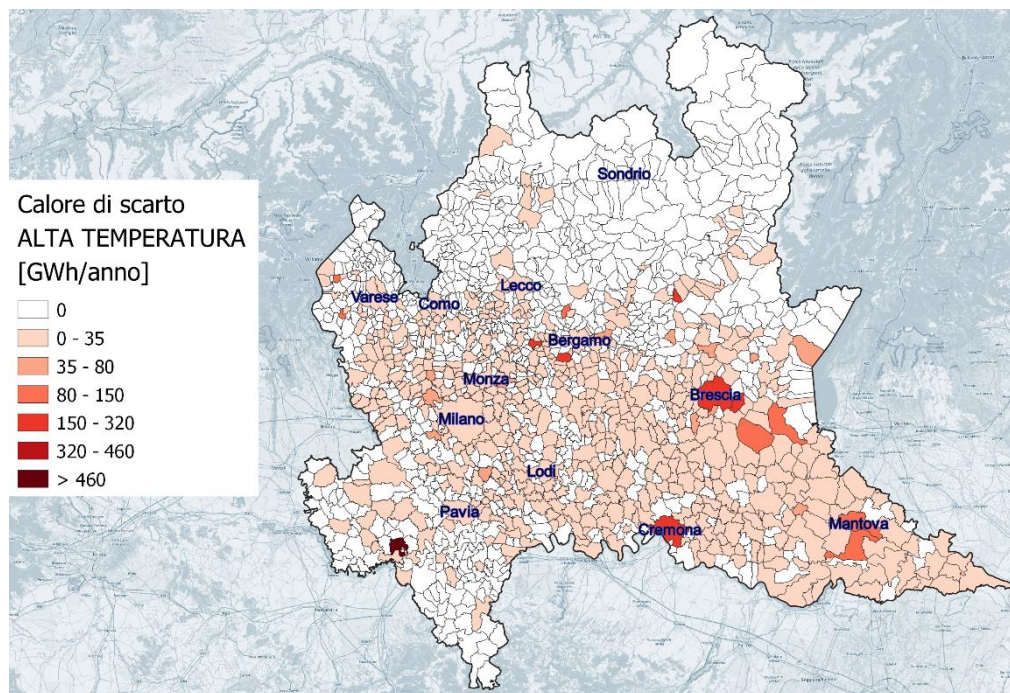


Figura 7.4 - Calore di scarto ad alta temperatura [GWh/anno] [Fonte: Elaborazioni Fondazione Politecnico su registri AIA e ETS]

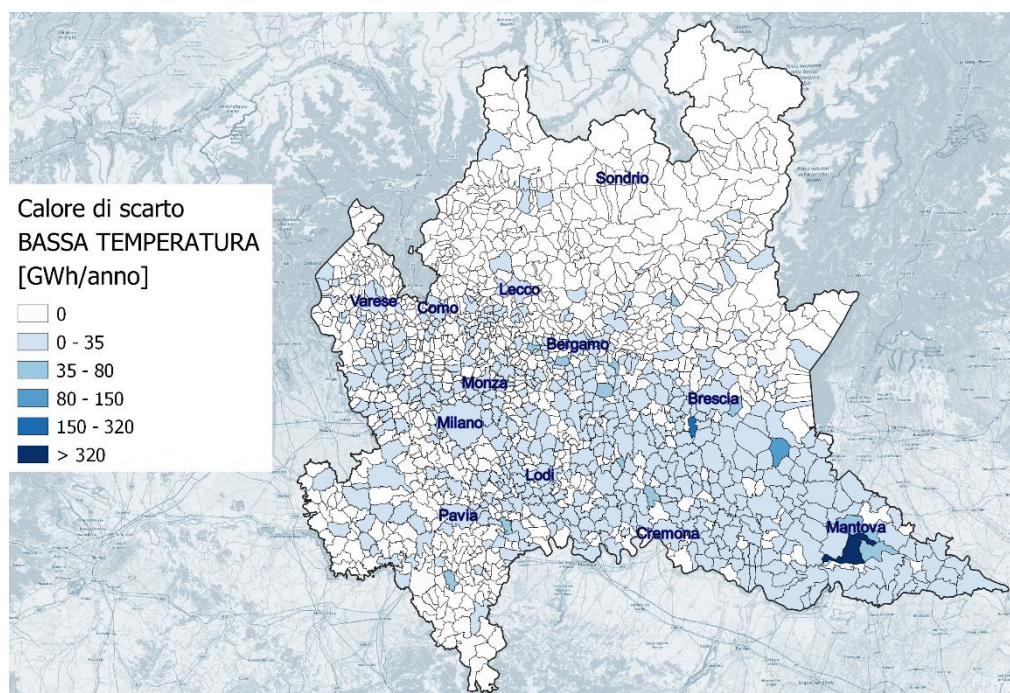


Figura 7.5 - Calore di scarto a bassa temperatura [GWh/anno] [Fonte: Elaborazioni Fondazione Politecnico su registri AIA e ETS]

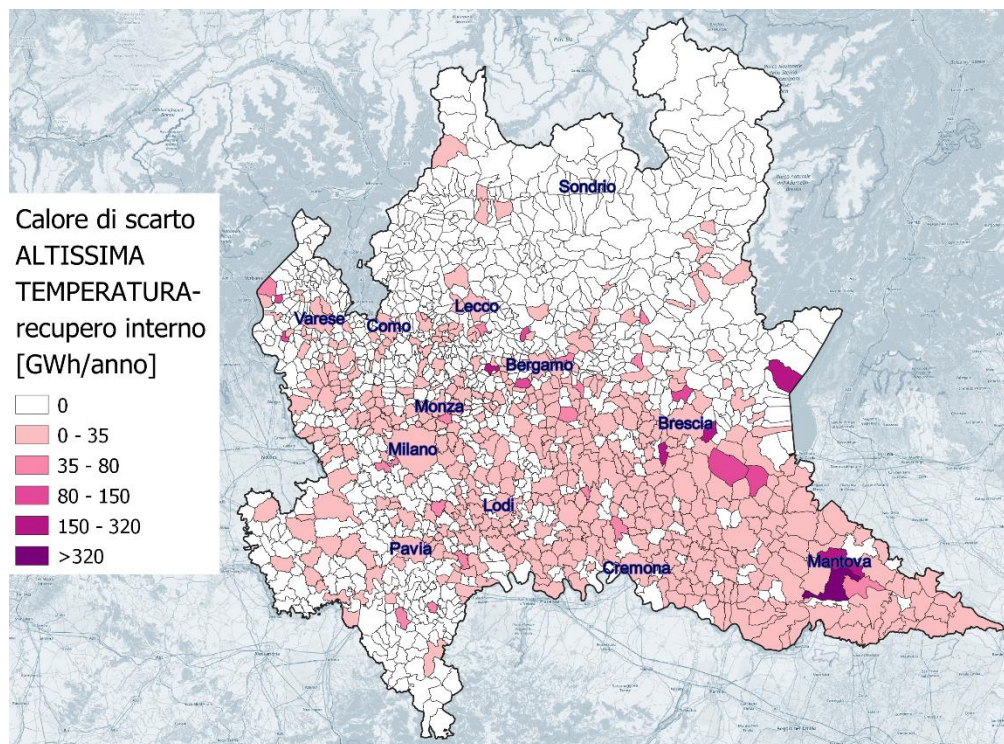


Figura 7.6 - Calore di scarto ad altissima temperatura [GWh/anno] [Fonte: Elaborazioni Fondazione Politecnico su registri AIA e ETS]

Appendice A - Nota metodologica

In questa appendice sono presentati i dati disponibili e il procedimento che ha portato dai dati alla descrizione del settore industriale lombardo in termini di consumi termici ed elettrici per settore merceologico, con il maggior dettaglio possibile relativamente a tipologia di processo e localizzazione spaziale del sito industriale.

I dati utilizzati per la stima dei consumi provengono da due fonti distinte. La prima è il dataset fornito da ARPA Lombardia, estratto da AIDA, costituito dalle informazioni trasmesse nell'ambito dei Piani di Monitoraggio contenuti nell'Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA) degli impianti. La seconda fonte è il dataset che raccoglie i valori di emissione per ogni sito contenuto nel registro ETS (Emission Trading System), fornito da ISPRA. La differente origine e struttura dei dataset utilizzati ha implicato diverse metodologie di trattazione dei dati e una fusione delle informazioni quando possibile. Il dataset estratto da AIDA contiene per ogni sito produttivo (i) il consumo di combustibile e (ii) il consumo finale di energia suddivisa in energia termica ed elettrica. Nel caso del registro ETS, il dato disponibile è quello di emissione di CO₂ nel sito produttivo. Si è reso dunque necessario in questo caso un passaggio di stima intermedio per risalire ai consumi di energia finale. I consumi puntuali di energia elettrica e termica sono stati stimati a partire dai valori di consumo di energia primaria, la quale è stata calcolata a sua volta attraverso la quantità di CO₂ emessa annualmente. I settori in cui sono classificati i siti produttivi sono: (i) Alimentare, (ii) Chimico, (iii) Estrazione, ovvero approvvigionamento dei combustibili e raffinerie, (iv) Meccanico, inteso come produzione di beni, (v) Tessile, (vi) Siderurgia, (vii) Estrazione o lavorazione di minerali non ferrosi, (viii) Fabbricazione o lavorazione di prodotti non metallici - cemento, calce, ceramica, vetro, (ix) Fabbricazione o lavorazione della carta.

Similmente a quanto fatto in [86], per ogni sito, i consumi di energia primaria (E_{prim}) sono calcolati dai dati di produzione annuale di CO₂ da combustione (m_{CO_2}) [kg] divisi per il fattore di emissione (f_{CO_2}) [kg /MWh], secondo l'equazione seguente:

$$E_{prim} = \frac{m_{CO_2}}{f_{CO_2}} [MWh] \quad (A.1)$$

Il fattore di emissione, caratteristico di ogni settore, riflette il mix nazionale medio di combustibili per ogni attività e viene calcolato per ogni settore con la stessa metodologia utilizzata in [86]. Nel calcolo vengono combinati i dati dei fattori di emissione standard di anidride carbonica [kg_{CO2} /MWh] da combustione di combustibili, come da [91], associati al consumo annuale nazionale di combustibile per settore di Eurostat [87]. I valori medi ponderati ottenuti per l'Italia vengono presentati nella seguente tabella.

Tabella A.1 - Fattori di emissione di anidride carbonica f_{CO_2} [g/MJ] risultanti per l'Italia [Fonte: Elaborazioni Fondazione Politecnico]

settore	f_{CO_2} [g _{CO2} /MJ]
thermal power Main Activity	50.7
thermal power Autoproducer	70.4
fuel refineries	73.6
chemical and petrochemical	57.4
iron and steel	70.0
non-ferrous metals	65.9
non-metallic minerals	67.5

paper, pulp and printing	46.1
food and beverage sector	56.9
Textile	63.9

Il calcolo dell'energia finale elettrica e termica, a partire dall'energia primaria così calcolata, è stato effettuato identificando una correlazione a partire dai dati dei siti produttivi in AIA che mette in relazione le grandezze investigate (i rapporti trovati sono stati applicati al valore di energia primaria consumata annualmente, ottenendo così la distinzione tra consumo di energia finale termica ed elettrica).

Bibliografia

- [1] M. Rehfeldt and F. R. C. Fleiter, T. Toro, "A bottom-up estimation of the heating and cooling demand in European industry." *Energy Efficiency* 11, 2018, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12053-017-9571-y>.
- [2] Fondoforte, "Tabella riepilogativa dei codici ATECO di tutti i comparti." 2007, [Online]. Available: <https://www.fondoforte.it/wp-content/uploads/2018/10/CODICI-ATECO-RIASSUNTIVA-DI-TUTTI-I-COMPARTI.pdf>.
- [3] ISTAT, "Risultati economici delle imprese - reg." 2018, [Online]. Available: <http://dati.istat.it/viewhtml.aspx?il=blank&vh=0000&vf=0&vcq=1100&graph=0&view-metadata=1&lang=it&QueryId=1159>.
- [4] Federchimica, "Il volto della chimica in Italia." 2020, [Online]. Available: https://www.federchimica.it/docs/default-source/la-chimica-in-cifre/3_il-volto-della-chimica-in-italia.pdf?sfvrsn=c0e57493_29.
- [5] Terna, "Statistiche regionali 2018." 2018, [Online]. Available: https://download.terna.it/terna/Statistiche Regionali_2018_8d7b93cbf9ad480.pdf.
- [6] Consiglio Regione Lombardia, "Proposta dell'Atto di indirizzi per la definizione del Programma Regionale Energia Ambiente e Clima, ai sensi dell'art. 30 della l.r. 26/2003." 2020.
- [7] Federacciai, "Rapporto di sostenibilità 2021." 2021, [Online]. Available: http://federacciai.it/wp-content/uploads/2021/10/AssembleaAnnuale_2021_Rapporto-di-Sostenibilita_2021.pdf.
- [8] ISTAT, "Imprese - occupati : Settori economici (Ateco 3 cifre), sesso." 2017, [Online]. Available: <http://dati.istat.it/viewhtml.aspx?il=blank&vh=0000&vf=0&vcq=1100&graph=0&view-metadata=1&lang=it&QueryId=20784>.
- [9] Federacciai, "Rapporto di sostenibilità 2019." 2019.
- [10] ISPRA, "Italian Greenhouse gas Inventory 1990-2018. National Inventory Report 2020." 2020, [Online]. Available: <https://unfccc.int/documents/223571>.
- [11] International Energy Agency IEA, "The Future of Petrochemicals - Towards more sustainable plastics and fertilisers." 2018.
- [12] Federchimica, "L'industria chimica in cifre." 2020.
- [13] P. Chan, Y; Petithunguenin, L; Fleiter, T; Herbst, A; Arens, M; Stevenson, "Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonisation of Industry – Part 1: Technology Analysis." Fraunhofer ISI, 2019.
- [14] M. Patel, "Cumulative energy demand (CED) and cumulative CO(2) emissions for products of the organic chemical industry." 2003, [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(02\)00166-4](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(02)00166-4).
- [15] "Industrial Transformation 2050 - Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry." *Material Economics*, 2019, [Online]. Available: <https://www.climate-kic.org/wp-content/uploads/2019/04/Material-Economics-Industrial-Transformation-2050.pdf>.
- [16] International Energy Agency IEA, "The future of hydrogen." 2019, [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.
- [17] N. Worrel, E; Philipsen, D; Einstein, D; Martin, "Energy Use and Energy Intensity of the U.S. Chemical Industry." University of California, 2000.
- [18] C. S. Dimian, A.; Bildea, "Energy efficient methanol-to-olefins process." 2017, doi: :10.1016/j.cherd.2017.11.009.
- [19] Federbeton, "Rapporto di filiera 2019." [Online]. Available: https://www.federbeton.it/Portals/0/pubdoc/pubblicazioni/Rapporti/Federbeton_Rapporto_di_Filiera_2019.pdf.
- [20] ASR Lombardia, "Produzione di cemento al 31.12. - regionale." 2018, [Online]. Available: <https://www.asr-lombardia.it/asrlomb/it/13326produzione-di-cemento-regionale>.
- [21] ANSA, "Decarbonizzare l'industria del cemento, strategia di Federbeton." 2021, [Online]. Available:

https://www.ansa.it/sito/notizie/economia/2021/09/16/decarbonizzare-lindustria-del-cemento-strategia-di-federbeton_8703ba73-8974-4034-bbec-4976d51338b2.html.

- [22] P. Baldinucci, "Cemento 4.0 – efficienza energetica." Colacem, 2017.
- [23] Assovetro, "Dati di settore." [Online]. Available: <https://www.assovetro.it/dati-di-settore/>.
- [24] Mo-Sci Corporation, "Are Electric Furnaces the Future of Glass Manufacturing?" 2019, [Online]. Available: <https://mo-sci.com/electric-furnaces-future-glass-manufacturing/>.
- [25] Ecomalu, "Il riciclo del vetro." 2017, [Online]. Available: <https://ecomalu.it/il-riciclo-del-vetro/>.
- [26] Pilkington, "Il processo di produzione del vetro Float." [Online]. Available: <https://www.pilkington.com/it-it/it/architetti/il-vetro/il-processo-di-produzione-del-vetro-float>.
- [27] F. Bazzocchi, "L'efficienza energetica nell'industria: potenzialità di risparmio energetico e impatto sulle performance e sulla competitività delle imprese. Rapporto RSE 18001189." 2018.
- [28] Assovetro, "Rapporto di sostenibilità 2020." 2020, [Online]. Available: <https://www.assovetro.it/wp-content/uploads/2020/02/report-completo-low-min2.pdf>.
- [29] Infobuild, "Piastrelle in ceramica: ecco come vengono realizzate." 2007, [Online]. Available: <https://www.infobuild.it/approfondimenti/la-produzione-delle-piastrelle/#>.
- [30] Assocarta, "L'industria Cartaria in cifre 2020." 2020, [Online]. Available: <http://www.assocarta.it/it/dati-di-settore/lindustria-cartaria-in-cifre.html>.
- [31] Assocarta, "L'industria Cartaria nel 2019." 2019, [Online]. Available: https://www.camera.it/application/xmanager/projects/leg18/attachments/upload_file_doc_acquisiti/pdfs/000/002/599/Memoria_Assocarta.pdf.
- [32] J. R. C. JRC, "JRC-IDEES 2015." 2015, [Online]. Available: <https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/jrc-10110-10001>.
- [33] ITA Italian Trade Agency, "L'agroalimentare in Italia - Produzione ed export." 2017, [Online]. Available: https://www.ice.it/sites/default/files/inline-files/NOTA_AGROALIMENTARE_E_VINI_2017.pdf.
- [34] Federalimentare, "Federalimentare - Company profile." 2019, [Online]. Available: <http://www.federalimentare.it/new2016/ChiSiamo/CompanyProfile.asp>.
- [35] Confindustria Moda, "Il settore tessile, moda e accessorio nel 2020 - Highlights," 2020, [Online]. Available: http://www.confindustriamoda.it/wp-content/uploads/2021/10/Highlights_Anno-2020_TMA_Confindustria-Moda.pdf.
- [36] E. Foddanu, S. Boeris Frusca, and E. . Merlassino, C.; Patrucco, "Analisi del ciclo produttivo del settore tessile laniero," [Online]. Available: https://www.isprambiente.gov.it/public_files/cicli_produttivi/Tessile/Tessile_lana.pdf.
- [37] J. P. . Gerres, T.; Avila, "A review of cross-sector decarbonisation potentials in the European energy intensive industry." 2019, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965261833436X>.
- [38] IPIECA, "Solar thermal." 2013, [Online]. Available: <https://www.ipieca.org/resources/energy-efficiency-solutions/power-and-heat-generation/solar-thermal/>.
- [39] V. S. G. Braccio, F. Di Maro, D. Marano, "Solare termico a bassa e media temperatura." ENEA, 2011.
- [40] R. S. S. H. Farjana, N. Huda, M.A.Parvez Mahmud, "Solar process heat in industrial systems – A global review." 2018, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.065>.
- [41] D. Vanoni, Battisti, "Potential for Solar Heat in Industrial Processes." Task 33 IEA.
- [42] A. K. W. A. Marina, S. Spoelstra, H.A. Zondag, "An estimation of the European industrial heat pump market potential." Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110545>.
- [43] A. Foresti, "Off-gas energy valorisation in high-performance electric arc furnaces." La Metallurgia Italiana, 2019.
- [44] C. Zanforlin, M.; Minini, "Economia Circolare & Simbiosi Industriale - Progetto LIFE HEATLEAP. CSMT." 2020, [Online]. Available: <https://www.officinaliberty.it/eventi/main-event-officina-liberty-economia-circolare-simbiosi-industriale>.
- [45] European Commission, "ESTP - European Steel Technology Platform (2020). Proposal for Clean Steel

- Partnership under the Horizon Europe Programme.” 2020, [Online]. Available: https://ec.europa.eu/info/files/european-partnership-clean-steel-low-carbon-steelmaking_en.
- [46] International Energy Agency IEA, “ETP Clean Energy Technology Guide.” 2020, [Online]. Available: www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide.
- [47] Frontier Economics, “The Future Cost of Electricity-Based Synthetic Fuels.” 2018.
- [48] GEA - German Environment Agency, “Power-to-Liquids - Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel.” 2016.
- [49] G. Rispoli, “Applicazioni idrogeno per le Bioraffinerie -Decarbonizzazione degli usi industriali (seminario online).” ANIMA Confindustria, ASSOLOMBARDA, H2IT, 2020.
- [50] Bloomberg NEF, “Recycling Plastics Helps the Oceans, Not the Climate.” 2020, [Online]. Available: <https://about.bnef.com/blog/recycling-plastics-helps-the-oceans-not-the-climate/>.
- [51] European Commission, “Deep decarbonisation of industry: The cement sector.” 2020.
- [52] G. Plaza, Marta, S. Martinez, and F. Rubiera, “CO2 Capture, Use and Storage in the Cement Industry: State of the Art and Expectations.” *Energies*.
- [53] International Energy Agency IEA, “Energy Technology Perspective 2020.” 2020.
- [54] S. Klugma, H. Stripple, T. Lönnqvist, E. Sandberg, and A. Krook-Riekkola, “A climate neutral Swedish industry – An inventory of technologies.” IVL, 2019.
- [55] G. Favier, A; De Wolf, C; Scrivener, K; Habert, “A sustainable future for the European Cement and Concrete Industry - Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050.” ETH Zürich, 2018.
- [56] Nouryon, “BioMCN to produce renewable methanol with green hydrogen.” 2019, [Online]. Available: <https://www.nouryon.com/news-and-events/news-overview/2019/biomcn-to-produce-renewable-methanol-with-green-hydrogen/>.
- [57] J. Barker, D, A. Turner, S, A. Napier-Moore, P, M. Clark, and E. Davison, J, “CO2 Capture in the Cement Industry.” *Energy Procedia*, 2009.
- [58] K. Lindqvist, S. Roussanaly, and R. Anantharaman, “Multi-stage membrane process for CO2 capture from cement industry.” *Energy Procedia*, 2014.
- [59] A. Scholes, Colin, T. Ho, Minh, A. Aguiar, Alita, E. Wiley, Dianne, W. Stevens, Geoff, and E. Kentish, Sandra, “Membrane gas separation processes for CO2 capture from cement kiln flue gas.” *Greenhouse Gas Control*, 2014.
- [60] CORDIS, “Lower CO2 emissions on the horizon for cement.” [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/article/id/406925-lower-co2-emissions-on-the-horizon-for-cement>.
- [61] S. Gardarsdottir, Osk *et al.*, “Comparison of Technologies for CO2 Capture from Cement Production – Part 2: Cost Analysis.” *Energies*, 2019.
- [62] Agora Energiewende, “Climate-Neutral Industry.” 2019.
- [63] N. Rodriguez, R. Murillo, and C. Abanades, “CO2 Capture from Cement Plants Using Oxyfired Precalcination and/or Calcium Looping.” *Environmental Science and Technology*, 2012.
- [64] M. Hornberger, R. Spörl, and G. Scheffknecht, “CCS in cement industry – Application of the Calcium Looping Technology.” .
- [65] Assoesco, “Guide settoriali per interventi di efficienza energetica nell’ambito del meccanismo dei certificati bianchi – Il settore industriale della produzione di vetro e prodotti in vetro.” 2017.
- [66] ingDemurtas, “Tabella potere calorifico di vari combustibili.” [Online]. Available: <http://www.ingdemurtas.it/tabelle/potere-calorifico/>.
- [67] M. Fiehl, J. Leicher, A. Giese, K. Görner, B. Fleischmann, and S. Spielmann, “Biogas as a co-firing fuel in thermal processing industries: implementation in a glass melting furnace.” *Energy Procedia*, 2017.
- [68] K. Grayson, “Are Electric Furnaces the Future of Glass Manufacturing?” Mosci corporation, 2019, [Online]. Available: <https://mo-sci.com/electric-furnaces-future-glass-manufacturing/>.
- [69] M. Tava, “Il vetro.” Provincia Autonoma di Trento, 2018.
- [70] R. Ahmad, “Everything You Need to Know About Recycling of Glass.” *EcoMENA*, 2020, [Online]. Available: <https://www.ecomena.org/recycling-glass/>.

- [71] Falornitech, "Oxifuel firing technology in the glass melting field is an advantage in all senses." [Online]. Available: <https://www.falornitech.com/solutions/heating-systems/oxy-fuel/>.
- [72] ORANGE.BAT, "Idrogeno green per la ceramica sostenibile." 2021.
- [73] Iberdola, "Iberdola and Porcelanosa launch their first project electrify ceramic production by combining renewables, green hydrogen and heat pump technology." 2021.
- [74] DEEDS, "DEEDS – Industry Ceramics." [Online]. Available: https://deeds.eu/wp-content/uploads/2020/05/Ceramics_web.pdf.
- [75] N. Martin, N. Anglani, D. Einstein, M. Khrushch, E. Worrel, and K. Price, L, "Opportunities to Improve Energy Efficiency and Reduce Greenhouse Gas Emissions in the U.S. Pulp and Paper Industry." Berkeley Lab, 2000.
- [76] Comieco, "Pack in carta e cartone protagonisti dell'economia circolare." 2019.
- [77] Gruppo Sanfaustino, "Carta erba." <https://www.psf.it/carta-erba/>.
- [78] T. Compagno, "Produrre la carta con l'erba." Coop, [Online]. Available: <https://www.cooperazione.ch/temi/fatti-non-parole/2018/produrre-la-carta-con-l-erba-142847/>.
- [79] La voce della buona notizia, "La carta italiana eco-friendly cha nasce dagli scarti delle lenticchie." 2016, [Online]. Available: <https://www.bcc-lavoce.it/2016/06/la-carta-eco-friendly-nasce-dagli-scarti-delle-lenticchie/>.
- [80] Weigel, "Multicriteria analysis of primary steelmaking technologies." Journal of Cleaner Production, 2016.
- [81] G. Kosmadakis, "Estimating the potential of industrial heat pump for exploiting waste heat in EU industries." Applied Thermal Engineering, 2019, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.082>.
- [82] N. Cottret and E. Menichetti, "Solar Heat for Industrial Processes (SHIP) – State of the art in the Mediterranean region." Observatoire Méditerranéen de l'Energie, [Online]. Available: https://www.solarthermalworld.org/sites/default/files/story/2015-10-14/solar_heat_for_industrital_process_technical_report._state_of_the_art_in_the_mediterranean_region.pdf.
- [83] International Renewable Energy Agency IRENA and International Energy Agency IEA-ETSAP, "Solar Heat for Industrial Processes - Technology Brief E21." 2015.
- [84] F. Fattori, L. Tagliabue, G. Cassetti, and M. Motta, "NEMeSI (National Energy Model for a Sustainable Italy)." Aug. 01, 2019, doi: 10.5281/ZENODO.2654871.
- [85] D. Connolly, B. V. Mathiesen, B. Möller, H. Lund, U. Persson, and S. Werner, "Heat Roadmap Europe 1 - First Pre-Study for the EU27." 2012.
- [86] M. Berthou and D. Bory, "Overview of waste heat in the industry in France." 2012.
- [87] S. Werner, "Ecoheatcool WP4: possibilities with more district heating in Europe." 2006.
- [88] IPCC, "2019 Refinement To the 2006 Ipcc Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories." 2019, doi: 10.21513/0207-2564-2019-2-05-13.
- [89] V.S. Martynovsky, "Cycles, diagrams and specifications for thermo transformers." Energy, 1979.
- [90] G. Lozza, "Turbine a gas e cicli combinati." ESCULAPIO, Società editrice, 2016.
- [91] Eurostat, "Final energy consumption by sector and fuel in Europe." 2018, [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-10/assessment>.
- [92] GSI, "Produzione." [Online]. Available: <https://gsiceramica.it/it/profilo/produzione/>.
- [93] B. Mazzanti, "Economia circolare ed efficienza energetica: binomio e sfida per il settore ceramico." Centro Ceramico, 2018, [Online]. Available: <https://docplayer.it/108937205-Economia-circolare-ed-efficienza-energetica-binomio-e-sfida-per-il-settore-ceramico-barbara-mazzanti-centro-ceramico-bologna.html>.
- [94] "Composizione e struttura del legno," [Online]. Available: <https://www.benecasa.it/faidate/composizione-e-struttura-del-legno.html>.

