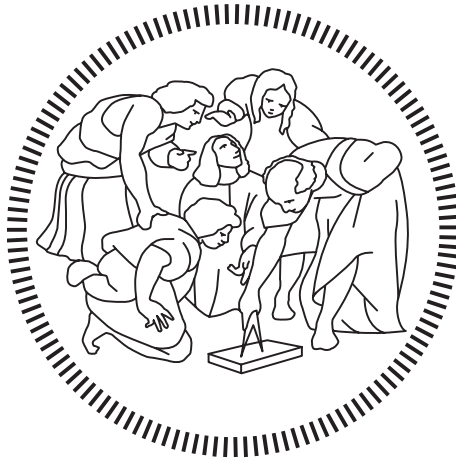


Politecnico di Milano
SCUOLA DI INGEGNERIA INDUSTRIALE E DELL'INFORMAZIONE
Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica



Decarbonizzazione dell'industria italiana Analisi del potenziale tecnico e costruzione di possibili scenari

Relatore

Dott. Ing. Marcello APRILE

Correlatore

Dott. Ric. Fabrizio FATTORI

Candidata

Giulia NOVATI – 905408

Anno accademico 2019 – 2020

Ringraziamenti

Ringrazio il Professore Marcello Aprile, docente relatore di questa tesi.

I miei sentiti ringraziamenti vanno a Fabrizio Fattori, che mi ha seguita con professionalità durante la stesura di questo elaborato, per i suoi preziosi consigli e per le conoscenze che mi ha saputo trasmettere.

Ringrazio Laura Tagliabue per avermi fornito il materiale utile alla stesura dell'elaborato.

Desidero inoltre ringraziare Emanuele Peschi di ISPRA per la disponibilità e i dati forniti.

Ringrazio infine Marianna, Vittoria e mio fratello Federico per avermi aiutata durante questo lavoro di tesi.

Sommario

Il 15 dicembre 2015 gli stati membri della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici hanno firmato l'Accordo di Parigi, con l'obiettivo di limitare il riscaldamento globale al di sotto dei 2°C. A tal fine l'Unione Europea si è impegnata ad abbattere le emissioni di anidride carbonica entro il 2050 e l'industria è uno dei temi centrali in questo obiettivo.

Questo lavoro di tesi ha come obiettivo l'individuazione delle soluzioni disponibili per la decarbonizzazione di alcuni settori dell'industria italiana, cioè quello dei minerali non metallici, chimico, siderurgico e della carta. A partire da un'analisi della letteratura e dall'elaborazione dei dati disponibili circa la situazione attuale, per ogni processo produttivo vengono elaborati degli scenari nazionali al 2050, in cui vengono combinate tra loro alcune delle soluzioni disponibili per la decarbonizzazione, che includono (i) l'efficientamento energetico, (ii) la sostituzione dei combustibili fossili attraverso l'elettrificazione, l'utilizzo di biomassa o vettori energetici di sintesi, (iii) la riduzione della domanda di prodotti finali e (iv) la cattura e stoccaggio/utilizzo di CO₂. Da tali scenari emerge che saranno fondamentali gli interventi di efficienza energetica. Essenziale sarà anche il passaggio dai combustibili fossili all'energia elettrica, che potrà essere utilizzata sia per la generazione di calore sia per la produzione di idrogeno. L'idrogeno potrà poi essere impiegato come combustibile e anche come materia prima. Nel percorso di transizione sarà importante implementare strategie di economia circolare, come il riciclo e la riduzione degli sprechi nei processi produttivi.

La transizione dovrà avvenire in tempi brevi, se comparati con la vita utile degli impianti industriali. È quindi necessario definire un piano di interventi che possa favorire gli investimenti in tecnologie che permettano di ridurre le emissioni. Ciò avverrà in un contesto economico complicato e reso instabile dalla crisi del 2008 e dalla pandemia da COVID19. Il supporto politico sarà di fondamentale importanza per guidare il processo di innovazione.

Abstract

On December 15 2015 the Member States of the United Nations Framework Convention on Climate Change signed the Paris Agreement with the aim of limiting global warming to below 2°C. To this end the European Union is committed to reducing to zero carbon dioxide emissions by 2050 and industry is a central theme in this goal.

This work aims to identify available solutions for the decarbonization of some sectors of the Italian industry, including the non-metallic minerals, chemical, steel and paper sectors. Starting from an analysis of the literature and from the elaboration of data about the current situation, national scenarios to 2050 are developed for each production process, combining some of the solutions available for decarbonisation, which include (i) energy efficiency, (ii) the substitution of fossil fuels through electrification, the use of biomass or synthetic energy carriers, (iii) the reduction of the demand for final products and (iv) carbon capture and storage/utilization of CO₂. The analysis shows that energy efficiency interventions will be fundamental. It will also be essential the transition from fossil fuels to electricity, which can be used both for the generation of heat and for the production of hydrogen. Hydrogen can then be used both as a fuel and as a raw material. During the transition circular economy strategies, such as recycling and waste reduction in production processes, will have to be implemented.

The transition will have to take place soon, taking into account the long service life of industrial facilities. Therefore, it is necessary to define an action plan to promote investments in technologies aimed at reducing emissions. The current economic context is unstable, due to the crisis of 2008 and the COVID-19 pandemic. For this reason, political support will be of paramount importance so as to guide the process of innovation.

Indice

Ringraziamenti	iii
Sommario	iv
Abstract	v
Indice	vi
Indice delle figure	viii
Indice delle tabelle	xi
Capitolo 1 Introduzione	1
1.1 Le conseguenze dell'Accordo di Parigi sull'industria italiana	1
1.1.2 Individuazione dei settori industriali di interesse.....	2
1.2 Obiettivo e struttura della tesi	6
1.3 Studi sulla decarbonizzazione industriale presenti in letteratura.....	7
Capitolo 2 Settore dei minerali non metallici	11
2.1 Calce, cemento e calcestruzzo	12
2.1.1 Processo produttivo attuale	13
2.1.2 Soluzioni di decarbonizzazione.....	21
2.1.3 Scenari.....	35
2.2 Vetro	39
2.2.1 Processo produttivo attuale	40
2.2.2 Soluzioni di decarbonizzazione.....	43
2.2.3 Scenari.....	47
2.3 Ceramica	52
2.3.1 Processo produttivo attuale	53
2.3.2 Soluzioni di decarbonizzazione.....	57
2.3.3 Scenari.....	61
Capitolo 3 Settore chimico	64
3.1 Ammoniaca.....	66
3.1.1 Processo produttivo attuale	66

3.1.2 Soluzioni di decarbonizzazione.....	68
3.1.3 Scenari.....	75
3.2 Etilene	77
3.2.1 Processo produttivo attuale	78
3.2.2 Soluzioni di decarbonizzazione.....	81
3.2.3 Scenari.....	86
3.3 Metanolo	89
3.3.1 Processo produttivo attuale	89
3.3.2 Soluzioni di decarbonizzazione.....	90
3.4 Plastica	92
3.4.1 Processo produttivo attuale	94
3.4.2 Soluzioni di decarbonizzazione.....	95
3.4.3 Scenari.....	100
Capitolo 4 Settore siderurgico	102
4.1 Processo produttivo attuale	104
4.2 Soluzioni di decarbonizzazione.....	111
4.3 Scenari.....	121
Capitolo 5 Settore della carta	127
5.1 Processo produttivo attuale	129
5.2 Soluzioni di decarbonizzazione.....	132
5.3 Scenari.....	137
Capitolo 6 Conclusioni	140
Appendice 1 Cattura e stoccaggio della CO₂	143
Appendice 2 Technology Readiness Level.....	146
Bibliografia e sitografia.....	147

Indice delle figure

Figura 1.1 – Occupazione per settore nell’industria manifatturiera italiana nel 2017. (Fonte [5]).	2
Figura 1.2 – Emissioni di gas a effetto serra dell’industria italiana dal 1990 al 2018.	3
Figura 1.3 – Share delle emissioni industriali derivanti dalla combustione. Italia, 2018. (Fonte EUROSTAT [6]).	3
Figura 1.4 – Share delle emissioni industriali di processo. Italia, 2018. (Fonte EUROSTAT [6]).	4
Figura 1.5 – Share delle emissioni industriali (esclusa la combustione). Italia, 2018. (Fonte EU ETS [7]).	5
Figura 1.6 - Share delle emissioni industriali. Italia, 2018. (Fonte: dati forniti da ISPRA)..	5
Figura 2.1 – Emissioni di CO ₂ eq relative alla produzione di minerali non metallici in Italia nel 2018. (Fonte EU ETS [7]).	11
Figura 2.2 – Utilizzo del cemento nella catena del valore. EU, 2015 (Fonte [12]).	12
Figura 2.3 – Localizzazione geografica dei siti di emissione. Elaborazione grafica basata sui dati forniti da ISPRA.	13
Figura 2.4 - Schematizzazione del processo produttivo del cemento. (Fonte [22]).	14
Figura 2.5 - Composizione del cemento e relative emissioni. (Fonte [12]).	14
Figura 2.6 – Schema dei calcoli svolti per la stima delle emissioni specifiche e dei fabbisogni energetici delle varie fasi del processo produttivo.	17
Figura 2.7 - Sankey diagram relativo al processo produttivo del cemento. Elaborazione grafica basata su informazioni provenienti da ENEA [32], per quanto riguarda lo share di energia elettrica e termica necessarie durante le varie fasi, e COLACEM [25], per quanto riguarda i fabbisogni termici ed elettrici specifici.	20
Figura 2.8 – Schematizzazione del sistema di calcium looping. (Fonte [41]).	28
Figura 2.9 – Reattore di calcinazione impiegato nella direct separation. (Fonte [42]).	30
Figura 2.10 – Potenziale di riduzione delle emissioni di CO ₂ di alcune delle tecnologie disponibili per la decarbonizzazione del settore cementizio. (Fonte [13]).	31
Figura 2.11 – Fabbisogno termico ed elettrico relativi agli scenari illustrati.	38
Figura 2.12 - Potenziale di riduzione delle emissioni relativo agli scenari presentati.	39
Figura 2.13 - Localizzazione geografica dei siti di emissione. Elaborazione grafica basata sui dati forniti da ISPRA.	40
Figura 2.14 - Schema dei calcoli svolti per la stima delle emissioni specifiche e dei fabbisogni energetici delle varie fasi del processo produttivo.	42
Figura 2.15 – Sankey diagram relativo alla processo produttivo del vetro. Elaborazione grafica basata su informazioni provenienti da RSE [10], per quanto riguarda gli share di	

energia elettrica e termica assorbiti dalle varie fasi del processo produttivo, ASSOJETRO [44] e ASSOJETRO [47], per la stima del fabbisogno elettrico e termico specifico.....	43
Figura 2.16 – Fabbisogno termico ed elettrico relativi agli scenari illustrati.....	50
Figura 2.17 – Potenziale di riduzione delle emissioni relativo agli scenari presentati.....	51
Figura 2.18 – Stima degli investimenti associati agli scenari presentati.	51
Figura 2.19 - Localizzazione geografica dei siti di emissione. Elaborazione grafica basata sui dati forniti da ISPRA.	53
Figura 2.20 – Schematizzazione del processo produttivo della ceramica.	55
Figura 2.21 - Schema dei calcoli svolti per la stima della produzione e dei fabbisogni energetici delle varie fasi del processo produttivo.	56
Figura 2.22 – Sankey diagram relativo al processo di produzione della ceramica. Elaborazione grafica basata su informazioni provenienti da RSE [10], per quanto riguarda lo share percentuale di energia richiesta dalle varie fasi del processo produttivo, e CENTRO CERAMICO [52], per quanto riguarda i fabbisogni specifici complessivi, elettrico e termico.	57
Figura 2.23 – Fabbisogni termici ed elettrici relativi agli scenari presentati.	63
Figura 2.24 – Riduzione delle emissioni relativa agli scenari presentati.	63
Figura 3.1 - Localizzazione geografica dei siti di emissione. Elaborazione grafica basata sui dati forniti da ISPRA.	65
Figura 3.2 –Processo produttivo dell’ammoniaca.	67
Figura 3.3 - Schema dei calcoli svolti per la stima della produzione, delle emissioni e dei fabbisogni energetici.....	68
Figura 3.4 – Schematizzazione di una cella elettrolitica. (Fonte [92])......	70
Figura 3.5 - Fabbisogni termici ed elettrici relativi agli scenari presentati.	77
Figura 3.6 – Potenziali di riduzione delle emissioni relativi agli scenari presentati.	77
Figura 3.7 – Schematizzazione del processo produttivo dell’etilene.	78
Figura 3.8 – Idrocarburi utilizzati per la produzione di etilene a livello mondiale. (Fonte [13]).	79
Figura 3.9 - Schema dei calcoli svolti per la stima delle emissioni e dei fabbisogni energetici.	80
Figura 3.10 - Sankey diagram relativo al processo di produzione dell’etilene. Elaborazione grafica basata su informazioni provenienti dal report [13], per quanto riguarda il fabbisogno termico totale, e dal report [100], per quanto riguarda lo share percentuale di energia termica richiesta dalle varie fasi del processo produttivo. Non sono state trovate informazioni riguardanti lo share percentuale di energia elettrica.	81
Figura 3.11 – Variazione del fabbisogno termico ed elettrico relativa agli scenari presentati.	88
Figura 3.12 – Potenziale di riduzione delle emissioni relativo agli scenari presentati.....	89
Figura 3.13 – Tipi di plastica e relativo consumo in Europa nel 2017. (Fonte [12]).	93
Figura 3.14 – Schema dei calcoli svolti per la stima delle emissioni.....	95
Figura 3.15 – Potenziale di riduzione delle emissioni relativo agli scenari presentati.....	101
Figura 4.1 – Produzione di acciaio mondiale e per aree geografiche dal 1996 al 2016. (Fonte [13]).	102
Figura 4.2 - Localizzazione geografica dei siti di emissione. Elaborazione grafica basata sui dati forniti da ISPRA.	103

Figura 4.3 – Utilizzo dell'acciaio in Europa (media dal 2012 al 2016). (Fonte [13]).	104
Figura 4.4 – Schema semplificato del processo BF-BOF. (Fonte [73]).	106
Figura 4.5 – Schema semplificato del processo EAF. (Fonte [73]).	107
Figura 4.6 - Schema dei calcoli svolti per la stima delle emissioni specifiche e dei fabbisogni energetici specifici delle singole fasi del processo produttivo.	108
Figura 4.7 – Sankey diagram relativo al processo di produzione dell'acciaio con ciclo integrato. Elaborazione grafica basata su informazioni provenienti da RSE [10], per lo share di energia termica ed elettrica della varie fasi del processo produttivo, e FEDERACCIAI [69].	109
Figura 4.8 - Schema dei calcoli svolti per la stima delle emissioni specifiche e dei fabbisogni energetici specifici delle singole fasi del processo produttivo.	110
Figura 4.9 – Sankey diagram relativo al processo di produzione dell'acciaio nelle EAF. Elaborazione grafica basata su dati provenienti da RSE [10], per quanto riguarda gli assorbimenti di energia elettrica e termica della produzione di acciaio EAF.	111
Figura 4.10 – Potenziale di riduzione delle emissioni di CO2 di alcune delle tecnologie per la decarbonizzazione del settore industriale in esame. (Fonti [9] e [12]).	118
Figura 4.11 – Fabbisogni termici ed elettrici relativo agli scenari presentati.	125
Figura 4.12 – Potenziale di riduzione delle emissioni relativo agli scenari presentati.	125
Figura 5.1 - Localizzazione geografica dei siti di emissione. Elaborazione grafica basata sui dati forniti da ISPRA.	128
Figura 5.2 – Schematizzazione del processo produttivo della carta. (Fonte [84]).	130
Figura 5.3 - Schema dei calcoli svolti per la stima delle emissioni specifiche e dei fabbisogni energetici specifici.	131
Figura 5.4 – Consumi energetici delle cartiere in Europa. (Fonte [13]).	133
Figura 5.5 – Fabbisogno elettrico e termico relativo agli scenari presentati.	139
Figura 5.6 – Potenziale di riduzione delle emissioni relativo agli scenari presentati.	139
Figura A1.1 – Schematizzazione della chemical looping combustion. (Fonte [90]).	144
Figura A1.2 – Principio di funzionamento dell'Enhanced Oil Recovery. (Fonte [40]).	145
Figura A1.3 – Siti di stoccaggio individuati in Italia. (Fonte [102]).	145
Figura A2.1 – Scala del TRL proposta da IEA. (Fonte [91]).	146

Indice delle tabelle

Tabella 2.1 – Produzione, emissioni e fabbisogno energetico relativi alla produzione di cemento in Italia.	17
Tabella 2.2 – Stima delle emissioni derivanti dalla combustione per la produzione di cemento in Italia.	18
Tabella 2.3 – Stima delle emissioni da combustione e di processo nel 2018 in Italia.	18
Tabella 2.4 – Stima delle emissioni di processo e da combustione mediante la reazione di calcinazione. Italia, 2018.	19
Tabella 2.5 - Riepilogo delle principali tecnologie e strategie alternative per la decarbonizzazione del settore cementizio.	32
Tabella 2.6 – Ipotesi relative agli scenari di decarbonizzazione.	35
Tabella 2.7 - Potenziale di riduzione del fabbisogno energetico - Scenario 1.	36
Tabella 2.8 - Sostituzione del cemento <i>Portland</i> con i low carbon cements.	36
Tabella 2.9 – Stima del fabbisogno elettrico e termico e del potenziale di riduzione delle emissioni.	37
Tabella 2.10 – Stima del fabbisogno elettrico e termico e della riduzione delle emissioni relativi allo Scenario 3.	37
Tabella 2.11 – Produzione, emissioni e fabbisogno energetico relativi alla produzione di vetro nel 2018 in Italia.	42
Tabella 2. 12 – Riepilogo delle principali tecnologie e strategie alternative per la decarbonizzazione delle industrie vetrarie. (Fonte [13]).	46
Tabella 2.13 – Ipotesi relative agli scenari di decarbonizzazione.	47
Tabella 2.14 – Stima del fabbisogno elettrico e termico e delle emissioni relativi allo Scenario 1.	48
Tabella 2.15 – Stima del fabbisogno termico ed elettrico e della riduzione delle emissioni relativi allo Scenario 2.	49
Tabella 2.16 – Variazione del fabbisogno elettrico e termico e stima del potenziale di riduzione delle emissioni relative allo Scenario 3.	49
Tabella 2.17 – Produzione, emissioni e consumi energetici relative alla produzione di ceramica in Italia nel 2018.	56
Tabella 2.18 – Riepilogo delle tecnologie e strategie alternative per la decarbonizzazione delle industrie produttrici di ceramica. (Fonte [13]).	60
Tabella 2.19 – Ipotesi alla base degli scenari presentati per il settore ceramico.	61
Tabella 2.20 – Fabbisogno elettrico e termico e riduzione delle emissioni previsti nello Scenario 1.	61
Tabella 2.21 – Riduzione del fabbisogno termico e delle emissioni relativa allo Scenario 2.	62

Tabella 3.1 – Stima della produzione, delle emissioni e dei fabbisogni energetici relativi al processo di produzione dell’ammoniaca nel 2018.	68
Tabella 3.2 – Riepilogo delle tecnologie e strategie alternative per la decarbonizzazione delle industrie produttrici di NH ₃	73
Tabella 3.3 – Ipotesi relative agli scenari di decarbonizzazione.	75
Tabella 3.4 – Stima del fabbisogno elettrico e termico e del potenziale di riduzione delle emissioni relative allo Scenario 1.	75
Tabella 3.5 – Stima del fabbisogno elettrico e termico e della riduzione delle emissioni relative allo Scenario 2.	76
Tabella 3.6 – Stima della produzione, delle emissioni e dei fabbisogni energetici relativi alla produzione di etilene in Italia nel 2020.	80
Tabella 3.7 – Riepilogo delle tecnologie e strategie alternative per la decarbonizzazione delle industrie produttrici di etilene. (Fonte [13]).	85
Tabella 3.8 – Ipotesi relative agli scenari di decarbonizzazione.	86
Tabella 3.9 – Variazione del fabbisogno elettrico e termico e potenziale di riduzione delle emissioni relativi allo Scenario 1.	86
Tabella 3.10 – Variazione del fabbisogno elettrico e termico e potenziale di riduzione delle emissioni relativi allo Scenario 2.	87
Tabella 3.11 - Variazione del fabbisogno elettrico e termico e potenziale di riduzione delle emissioni relativi allo Scenario 3.	87
Tabella 3.12 – Riepilogo delle principali tecnologie e strategie alternative per la decarbonizzazione delle industrie produttrici di metanolo (Fonte [15]).	92
Tabella 3.13 – Stima della produzione e delle emissioni relative alla produzione di plastica in Italia nel 2018.	95
Tabella 3.14 – Riepilogo delle tecnologie e strategie alternative per la decarbonizzazione delle industrie produttrici di plastica (Fonte [15]).	99
Tabella 3.15 – Ipotesi alla base degli scenari elaborati per la plastica.	100
Tabella 3.16 – Potenziale di abbattimento delle emissioni relativo allo Scenario 1.	100
Tabella 3.17 – Potenziale di riduzione delle emissioni relativo allo Scenario 2.	101
Tabella 4.1 - Produzione, emissioni e stima del fabbisogno energetico relativi alla produzione di acciaio mediante ciclo integrato in Italia nel 2018.	108
Tabella 4.2 - Produzione, emissioni e fabbisogni energetici relative alla produzione di acciaio nei forni ad arco elettrico in Italia nel 2018.	110
Tabella 4.3 – Riepilogo delle tecnologie e strategie alternative per la decarbonizzazione delle acciaierie.	119
Tabella 4.4 - Ipotesi relative agli scenari di decarbonizzazione.	121
Tabella 4.5 – Produzione, fabbisogni energetici ed emissioni previsti al 2050 nello Scenario 1 per produzione tramite riduzione diretta a gas naturale ed EAF.	121
Tabella 4.6 – Stima del fabbisogno elettrico e termico e del potenziale di riduzione delle emissioni relativi allo Scenario 1.	122
Tabella 4.7 – Produzione, fabbisogni energetici ed emissioni previsti al 2050 nello Scenario 2 per la produzione COREX ed EAF.	123
Tabella 4.8 – Stima del fabbisogno elettrico e termico e del potenziale di riduzione delle emissioni relativi allo Scenario 2.	123

Tabella 4.9 – Produzione, fabbisogni energetici ed emissioni previsti al 2050 nello Scenario 2 per la produzione con riduzione diretta a idrogeno ed EAF.....	124
Tabella 4.10 – Stima del fabbisogno elettrico e termico e del potenziale di riduzione delle emissioni relativi allo Scenario 3.	124
Tabella 5.1 – Produzione, emissioni e stima del fabbisogno energetico delle aziende produttrici di carta. Italia, 2018.	131
Tabella 5.2 – Riepilogo delle principali tecnologie e strategie alternative per la decarbonizzazione delle cartiere.....	136
Tabella 5.3 - Ipotesi alla base degli scenari di decarbonizzazione.....	137
Tabella 5.4 – Variazione del fabbisogno elettrico e termico e riduzione delle emissioni previsti nello Scenario 1.	137
Tabella 5.5 – Stima dei fabbisogni elettrici e termici, della domanda di energia elettrica alla rete e della riduzione delle emissioni relativa allo Scenario 2.	138

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Le conseguenze dell'Accordo di Parigi sull'industria italiana

Il 15 dicembre 2015 gli stati membri della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici hanno sottoscritto l'Accordo di Parigi, stabilendo un piano d'azione a livello internazionale per limitare i cambiamenti climatici. L'obiettivo dell'Accordo è quello di limitare il riscaldamento globale al di sotto dei 2°C rispetto ai livelli pre-industriali. L'UE ha ratificato questo accordo il 5 ottobre 2016 ed è poi entrato in vigore il 4 novembre del medesimo anno. L'Unione Europea si è così impegnata a ridurre del 40% le emissioni di anidride carbonica entro il 2030 (rispetto al 1990), per raggiungere poi l'obiettivo di emissioni nette pari a zero entro il 2050 [1].

Vi è quindi un naturale fermento attorno alla ricerca e allo studio delle soluzioni tecnologiche e delle strategie politiche da adottare. L'industria pesante è al centro dell'attenzione in quanto elemento critico per la transizione. La decarbonizzazione del settore elettrico (e conseguentemente anche del settore civile e del trasporto leggero) è relativamente semplice, dato che sono settori facilmente elettrificabili. La decarbonizzazione dell'industria e del trasporto pesante invece pone particolari ostacoli, di tipo tecnologico ed economico. I limiti tecnici riguardano per esempio il fatto che molti processi industriali necessitano di calore a temperature elevate, che ne rendono difficile l'elettrificazione. Inoltre, spesso i processi produttivi si basano su reazioni chimiche che generano emissioni di CO₂; tali emissioni vengono dette emissioni di processo e sono particolarmente difficili da abbattere. Vi sono poi degli ostacoli di natura economico-finanziaria, perché gli impianti industriali hanno una vita utile molto lunga, in alcuni casi maggiore dell'orizzonte temporale considerato dalla transizione. Inoltre, come per gli altri settori, molto spesso i nuovi impianti e molte soluzioni innovative sono più costose delle alternative meno "green" nel breve-medio periodo.

Al contempo però la decarbonizzazione dell'industria può essere un'opportunità per la penetrazione sempre maggiore delle rinnovabili nel settore elettrico. L'utilizzo dell'idrogeno e dei combustibili e-fuels nell'industria permette di far assorbire a questo settore l'eccesso di generazione elettrica prodotto dalle fonti rinnovabili non programmabili. Inoltre utilizzando più energia elettrica rinnovabile l'Unione Europea, e in particolare l'Italia, diventerebbe meno dipendente dalle importazioni di energia e verrebbe così garantita la

sicurezza dell'approvvigionamento energetico. Nel 2017 il 55% dell'energia lorda disponibile dell'UE-28 era coperta dalle importazioni [2]. Per di più molte delle soluzioni per la decarbonizzazione comportano anche la riduzione delle emissioni in atmosfera di sostanze inquinanti e ciò permette di migliorare la qualità dell'aria. Le tecnologie disponibili non sono mature ed è necessario che la politica delinea gli sforzi necessari per raggiungere la decarbonizzazione dell'industria, riuscendo però a mantenere questo settore competitivo ed evitando che gli stabilimenti vengano delocalizzati all'estero. I governi devono quindi sviluppare delle strategie politiche che favoriscano la transizione, ma che tengano anche in considerazione della difficile situazione economica generata dalla crisi del 2008 e dalla pandemia in atto.

1.1.2 Individuazione dei settori industriali di interesse

Nel presente lavoro di tesi non viene analizzata tutta l'industria manifatturiera italiana, ma solo quei settori industriali che contribuiscono maggiormente alle emissioni in atmosfera di gas a effetto serra. L'industria italiana contribuisce al 14% del PIL e nel 2018 ha dato lavoro a quasi quattro milioni di persone ([3] e [4]). La Figura 1.1 mostra l'occupazione nell'industria suddivisa per settore.

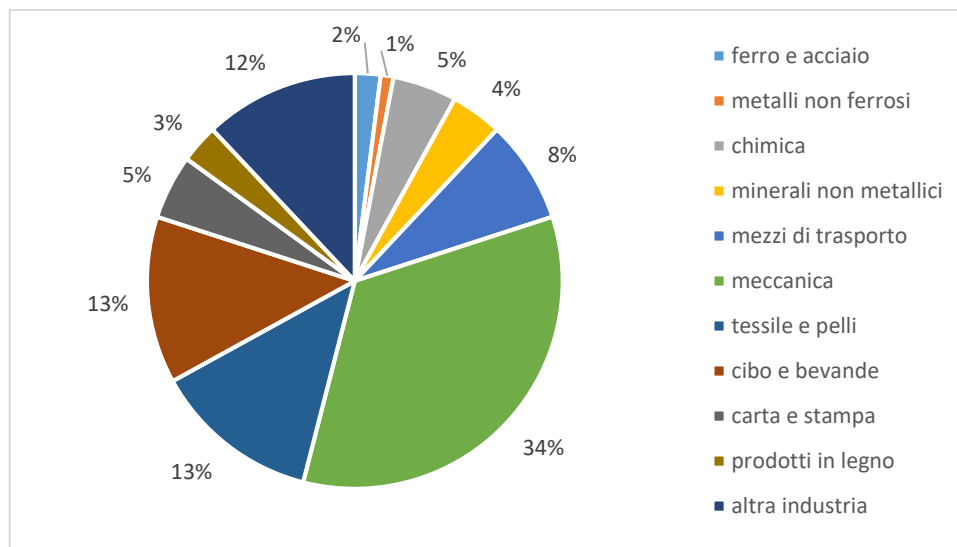


Figura 1.1 – Occupazione per settore nell'industria manifatturiera italiana nel 2017. (Fonte [5]).

Nel 2018 in Italia il settore industriale ha emesso 88.7 Mt di CO₂ eq (di processo e da combustione), corrispondenti al 22.7% delle emissioni totali nazionali [6]. Come illustrato in Figura 1.2, dal 1990 al 2018 le emissioni dell'industria italiana sono state ridotte quasi del 33%. Ciò è dovuto agli interventi di efficienza energetica, alla parziale sostituzione dei combustibili fossili solidi e liquidi con il gas naturale e alla diffusione delle rinnovabili. Un altro importante fattore che ha contribuito a questa riduzione delle emissioni è stata la crisi

economica degli anni 2008-2010 e le relative ripercussioni che ha avuto sull'industria, come il calo della produzione e la delocalizzazione di alcune imprese all'estero.

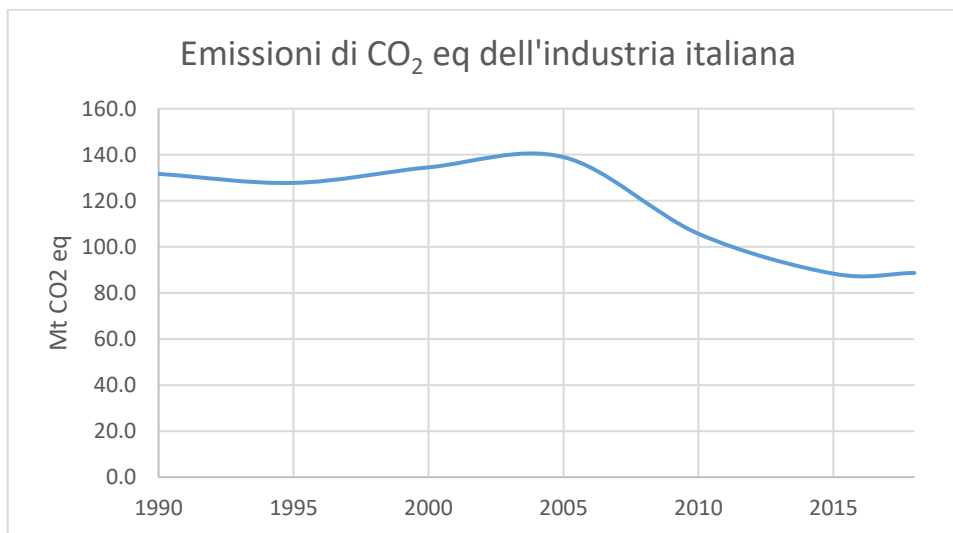


Figura 1.2 – Emissioni di gas a effetto serra dell'industria italiana dal 1990 al 2018.

Nel settore industriale le emissioni di anidride carbonica derivano innanzitutto dalla combustione necessaria per produrre il calore che serve durante il processo produttivo. Ad esempio per produrre il vetro le materie prime vengono fuse in una fornace dove si mantiene una temperatura di 1575°C. I prodotti ceramici, dopo essere stati modellati, vengono cotti in forni dove si mantiene una temperatura che può variare fra i 900°C e i 1800°C. Nel 2018 la combustione ha generato in Italia il 61% delle emissioni di CO₂ eq industriali ([6]). In Figura 1.3 si riporta il contributo dei vari settori industriali alle emissioni da combustione: i settori più responsabili sono quello dei minerali non metallici, chimico, siderurgico e della carta.

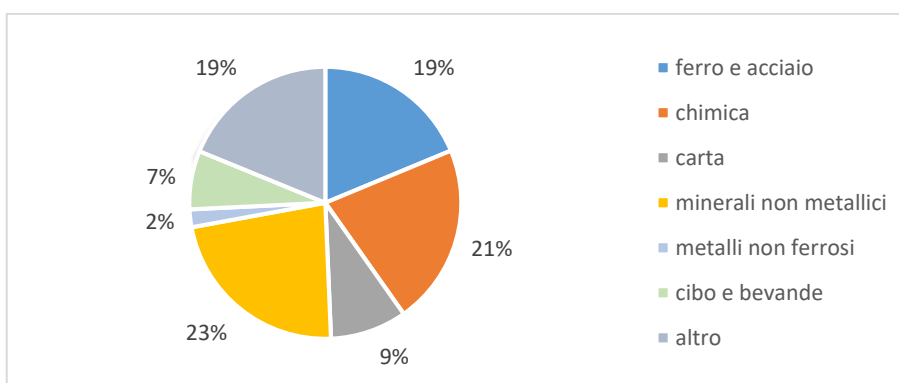


Figura 1.3 – Share delle emissioni industriali derivanti dalla combustione. Italia, 2018. (Fonte EUROSTAT [6]).

Vi sono poi le emissioni di processo, cioè quelle che si originano dalle reazioni chimiche che avvengono durante il processo produttivo. Ad esempio, per produrre il cemento viene fatta avvenire la reazione di decomposizione del calcare, durante la quale si libera anidride carbonica; per la produzione dell'ammoniaca è necessario l'idrogeno, che oggi si ricava quasi esclusivamente dal gas naturale, rilasciando biossido di carbonio in atmosfera. Nel database EUROSTAT [6] le emissioni di processo di CO₂ eq vengono fornite in forma aggregata insieme alle emissioni derivanti dall'utilizzo di prodotti, come solventi e lubrificanti, e complessivamente costituiscono il restante 39% delle emissioni industriali. In Figura 1.4 è rappresentato lo share nei vari settori industriali delle emissioni legate al processo produttivo e all'utilizzo di determinati prodotti; anche in questo caso i settori più emissivi sono quello dei minerali non metallici, chimico e siderurgico.

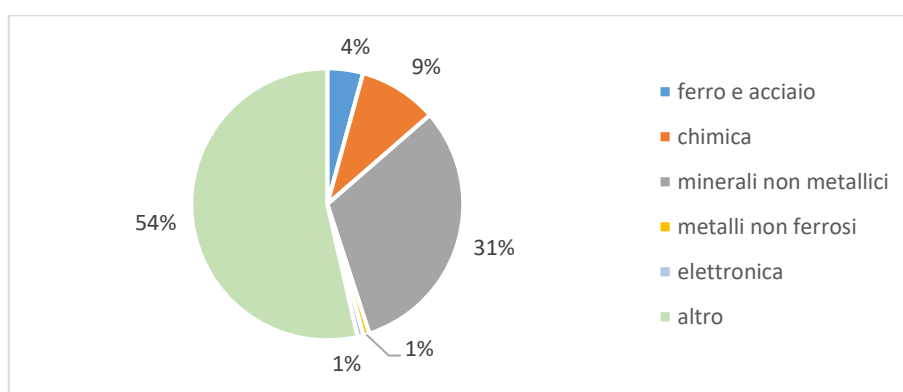


Figura 1.4 – Share delle emissioni industriali di processo. Italia, 2018. (Fonte EUROSTAT [6]).

Le emissioni da combustione e di processo vengono dette emissioni dirette, perché sono prodotte durante il processo industriale. Vi sono poi le emissioni indirette, cioè quelle che vengono emesse in atmosfera durante la produzione dell'energia elettrica. In questo lavoro di tesi vengono considerate solamente le emissioni dirette.

Una stima delle emissioni può essere ottenuta anche a partire dal database EU ETS [7], che riporta le emissioni degli stabilimenti industriali che rientrano nel sistema di scambio di quote dell'Unione Europea (EU Emissions Trading System). Il sistema ETS è basato sul principio "cap and trade", per cui viene fissato un tetto massimo (cioè un "cap") al livello totale di emissioni che possono essere rilasciate in atmosfera dai soggetti vincolati e consente ai partecipanti di acquistare e vendere sul mercato ("trade") diritti di emissione di CO₂ (le cosiddette "quote") secondo le loro necessità. Il sistema, avviato nel 2005, ha coinvolto fin dall'inizio gli impianti termoelettrici, le attività energetiche, i produttori di metalli, cemento, ceramica, vetro e carta. Dal 2012 il sistema EU ETS è stato esteso anche agli operatori del settore aereo e ad altri grandi produttori industriali. In tale sistema rientrano solo le industrie che emettono più di 25 kt di CO₂ all'anno, certificate da un verificatore accreditato. Il database riporta le emissioni da combustione in forma aggregata per tutti i settori; in Italia nel 2018 queste sono state pari a 87.7 Mt. Le emissioni di processo vengono suddivise invece per settore industriale e complessivamente sono state pari a 58.8 Mt. In Figura 1.5 si riporta

la suddivisione di tali emissioni in funzione dei settori industriali. Anche focalizzandosi sulle sole emissioni ETS emerge che i settori con il maggior contributo sono quello dei minerali non metallici, il siderurgico, il chimico e la carta.

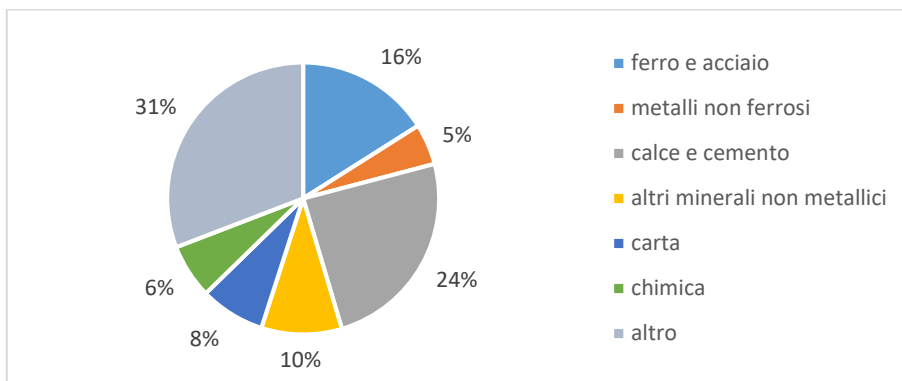


Figura 1.5 – Share delle emissioni industriali (esclusa la combustione). Italia, 2018. (Fonte EU ETS [7]).

Per stimare le emissioni sono stati utilizzati dei dati forniti da ISPRA su elaborazioni ETS, dai quali emerge che nel 2018 in Italia l'industria ha emesso 48.7 Mt di CO₂. Come si può notare dalla Figura 1.6, anche in questo caso i settori maggiormente emissivi sono quello dei minerali non metallici, dell'acciaio e della chimica.

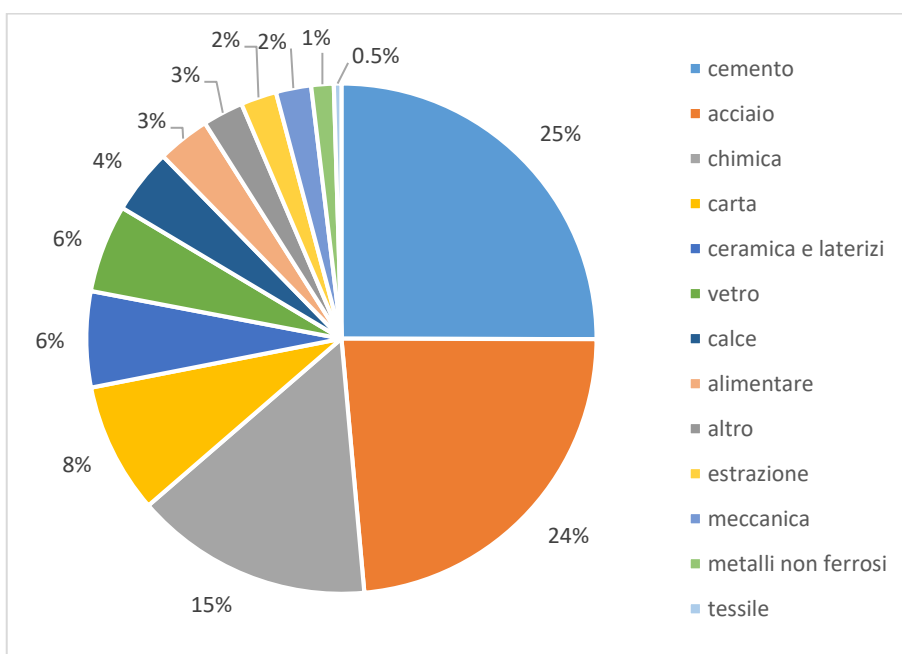


Figura 1.6 - Share delle emissioni industriali. Italia, 2018. (Fonte: dati forniti da ISPRA).

In questo lavoro vengono quindi analizzati i settori dei minerali non metallici, chimico, siderurgico e della carta, dato che questi risultano i settori industriali più emissivi. Considerando il database EUROSTAT [6] questi settori contribuiscono al 61% delle totale delle emissioni industriali. Delle restanti emissioni il 33% viene fornito in forma aggregata e comprende anche le emissioni derivanti dall'utilizzo di alcuni prodotti (come lubrificanti, fluidi refrigeranti, agenti schiumogeni, solventi) e non è quindi stato possibile analizzarlo. In questa tesi è stata posta l'attenzione sui settori maggiormente emissivi, mentre sono stati trascurati quello alimentare e dei metalli non ferrosi, che complessivamente contribuiscono solo al 6% delle emissioni.

1.2 Obiettivo e struttura della tesi

A cinque anni dalla sottoscrizione dell'Accordo di Parigi, diventa sempre più urgente definire i cambiamenti necessari per raggiungere la piena decarbonizzazione dell'industria. Questo soprattutto perché le facility industriali hanno vite utili molto lunghe, spesso maggiori dei 30 anni disponibili per la completa decarbonizzazione entro il 2050. E' quindi necessario che fin da oggi i rinnovamenti degli impianti industriali siano realizzati tenendo conto dell'obiettivo di decarbonizzazione e per questo motivo è necessaria una chiara pianificazione degli inventi necessari in questo settore.

Lo scopo di questa tesi è prima di tutto fornire un quadro sulla situazione dell'industria, descrivendo i processi attuali in termini di fabbisogno di materie prime e risorse energetiche, e in termini di impatto ambientale, indagando anche la distribuzione spaziale. La tesi si propone poi di raccogliere e presentare le soluzioni disponibili per i settori industriali più emissivi, passando dalle soluzioni per l'efficientamento dei processi, per la sostituzione dei vettori energetici e delle materie prime utilizzate, ma anche per la riduzione della domanda e tecnologie di cattura e stoccaggio o utilizzo della CO₂. Obiettivo finale del lavoro è individuare e suggerire le soluzioni che meglio si adattano al contesto industriale italiano, configurando diversi possibili scenari di decarbonizzazione entro il 2050.

Con gli obiettivi descritti, la tesi prosegue, con il Capitolo 1, presentando una revisione degli studi più rilevanti sulla decarbonizzazione industriale presenti in letteratura e definendo i settori che maggiormente contribuiscono alle emissioni, su cui si concentrano i capitoli successivi. Nel Capitolo 2 viene trattato il settore dei minerali non metallici e in particolare la produzione di calce, cemento e calcestruzzo, vetro e ceramica; il Capitolo 3 riguarda il settore chimico, con focus sulla produzione di ammoniaca, etilene, metanolo e plastica. Nel Capitolo 4 viene analizzata l'industria siderurgica, mentre nel Capitolo 5 il settore della produzione della carta. In letteratura sono state trovate molte informazioni riguardanti la decarbonizzazione della produzione di cemento e acciaio, di conseguenza questi due processi produttivi vengono trattati approfonditamente in questo elaborato.

Per ogni capitolo viene presentato il processo produttivo attuale e i dati relativi all'industria italiana. Viene poi fornita un'analisi delle tecnologie di decarbonizzazione disponibili suddivise in:

- Efficienza energetica;
- Nuovi processi produttivi;
- Fonti energetiche alternative;
- Riduzione della domanda;
- Cattura della CO₂ (con un focus a parte in Appendice 1).

Ogni categoria è poi suddivisa in ulteriori sottocategorie. In particolare nei paragrafi riguardanti l'efficienza energetica rientrano le migliori tecnologie disponibili (BAT, Best Available Technologies). Queste sono soluzioni già disponibili a livello commerciale, ma per ora sono ancora poco diffuse. Le altre tecnologie presentate sono invece delle soluzioni innovative ancora in fase di studio e di sviluppo.

Biometano, gas naturale sintetico e idrogeno fanno parte delle fonti energetiche alternative. Il biometano è un combustibile gassoso che si ottiene dalle biomasse agricole (colture dedicate, sottoprodotti e scarti agricoli, deiezioni animali), agroindustriali (scarti dell'industria alimentare) e dalla frazione organica dei rifiuti solidi urbani. Attraverso la digestione anaerobica di queste biomasse è possibile ottenere un biogas, dal quale viene poi rimossa l'anidride carbonica, ottenendo così il biometano. Con questo combustibile è possibile rispondere agli obiettivi di riduzione delle emissioni sfruttando gli impianti e le infrastrutture già esistenti per il trasporto e lo stoccaggio del gas naturale. In Italia il biometano non si è ancora diffuso su vasta scala principalmente a causa del suo costo elevato, delle lunghe tempistiche per allacciare gli impianti a biometano alla rete gas e a causa di ostacoli derivanti dall'accettabilità sociale [49]. Il gas naturale sintetico è costituito da metano prodotto da idrogeno e biossido di carbonio tramite il processo di metanazione biologica o catalitica. L'idrogeno è un vettore energetico che viene ricavato principalmente dal gas naturale o tramite l'elettrolisi dell'acqua. L'utilizzo di idrogeno non genera emissioni né di gas climalteranti né di sostanze nocive per l'uomo e per l'ambiente. In Italia sono presenti grandi operatori in tutta la filiera idrogeno, dalla produzione, alla logistica e al trasporto, fino agli usi finali.

Nei paragrafi relativi alla riduzione della domanda vengono presentate soluzioni come l'utilizzo di nuove materie prime, il riciclo, la sostituzione del materiale in analisi con altri più sostenibili, l'adozione di nuovi modelli di business basati sulla condivisione. Queste strategie hanno come obiettivo finale la riduzione della produzione.

Vengono infine elaborati degli scenari al 2050 contestualizzati a livello nazionale. In questi scenari si prevede l'adozione di una o più tecnologie di decarbonizzazione e si forniscono delle stime sulla riduzione delle emissioni e sulla variazione del fabbisogno energetico.

1.3 Studi sulla decarbonizzazione industriale presenti in letteratura

Nel dibattito scientifico e politico sulle soluzioni da adottare al fine di raggiungere gli obiettivi stabiliti dall'Accordo di Parigi, stanno emergendo anche per l'industria diversi articoli e studi, sebbene la letteratura sia più limitata per questo settore. Per questo lavoro di

tesi sono state raccolte e confrontate informazioni provenienti da diversi report e sono poi state utilizzate quelle soluzioni che meglio si adattano al contesto industriale italiano per la definizione di scenari di decarbonizzazione al 2050. Nel seguito vengono presentate le relazioni maggiormente utilizzate.

Il report *A sustainable future for European Cement and Concrete Industry* (2018) [8], elaborato dallo *Swiss Federal Institute of Technology* (ETHZ) di Zurigo e dallo *Swiss Federal Institute of Technology* (ETHL) di Losanna e commissionato dall'*European Climate Foundation*, ha come obiettivo la stima del potenziale di riduzione delle emissioni delle soluzioni disponibili per le industrie produttrici di cemento e calcestruzzo in Europa. Oltre a presentare la situazione attuale europea, il lavoro fornisce un'analisi delle soluzioni che possono essere già adottate ed elabora poi tre scenari: uno basato sull'utilizzo efficiente delle risorse e sul riciclaggio, uno sull'ottimizzazione delle strutture e sui principi dell'economia circolare e uno sulle soluzioni innovative. Anche in questo caso, ogni scenario viene confrontato con il caso base, che prevede di mantenere l'attuale assetto industriale anche nel 2050. Interessante, fra gli altri lavori, perché fornisce le strategie politiche che andrebbero adottate specificamente per l'industria legata alla produzione del cemento. Il messaggio comunicato dal report è che gli sforzi per la riduzione delle emissioni riguardano l'intera catena del valore e devono quindi essere supportati non solo dai produttori di cemento e calcestruzzo, ma anche da ingegneri, architetti, imprese edili, aziende che si occupano della demolizione e della gestione dei rifiuti.

Il lavoro *The Circular Economy* (2018) [9] di *Material Economics* si focalizza invece sulla stima del potenziale di riduzione delle emissioni ottenibile in particolare con l'economia circolare a livello europeo. Il report non presenta tecnologie innovative o nuovi processi industriali, ma analizza strategie per la riduzione della domanda di materiali quali acciaio, plastica e alluminio e pone inoltre particolare attenzione al settore dei trasporti e delle costruzioni. Il report illustra infine gli ostacoli che possono limitare l'economia circolare e fornisce a tal riguardo iniziative e strategie politiche per superarli. Il report conclude mettendo in luce l'importanza dell'economia circolare nel processo di decarbonizzazione, soprattutto perché l'adozione delle strategie proposte implica dei costi molto bassi (se paragonati a quelli connessi con il cambiamento degli impianti produttivi o all'adozione di sistemi CCS).

La relazione *L'efficienza energetica nell'industria* (2018) [10] è un report elaborato dalla società *Ricerca Sistema Energetico* (RSE) per il Ministero dello Sviluppo Economico, dove vengono riportati i risultati del progetto *InduCo (Industria: Consumi e Ottimizzazione)*. Tale progetto è durato tre anni, dal 2015 al 2017, e ha affrontato il tema dell'efficienza energetica nell'industria italiana con focus su tre punti fondamentali:

- Valutazione tecnologica dei settori industriali per identificarne le potenzialità;
- Analisi dell'impatto delle misure di efficienza energetica sulla performance, sulla produttività e sulla competitività delle imprese;
- Confronto fra gli interventi di efficienza energetici in Italia e in Europa.

Questo è l'unico report trovato in letteratura che pone l'attenzione sull'Italia e che analizza i fabbisogni energetici delle singole fasi dei processi industriali. Il lavoro si focalizza in

particolare sulle soluzioni già disponibili sul mercato e che possono quindi essere adottate nel breve-medio termine. I dati sono presi dai database ISTAT, EUROSTAT, AIDA (Analisi Informatizzata delle Aziende Italiane), Banca Italia, EU-ETS e vengono anche forniti da varie associazioni di categoria (Confindustria, Assovetro). Fra i risultati ottenuti viene messo in luce che gli effetti dell'efficienza energetica sono molteplici e non riguardano solo la diminuzione dei consumi energetici, ma anche la sicurezza dei lavoratori, l'affidabilità produttiva e la qualità dei prodotti. Inoltre RSE ha sviluppato e messo a disposizione online l'applicazione *Dimmi cosa produci* [11], che racchiude gli interventi di efficienza energetica associati al progetto *InduCo*. Vengono inclusi quegli interventi realmente realizzati dalle industrie italiane che si sono dimostrati energeticamente ed economicamente convenienti. Gli interventi vengono classificati in funzione di indici di merito energetici, economici e ambientali, che vengono calcolati sulla base di dati di costo e di risparmio effettivamente misurati. I settori dell'industria manifatturiera parte del progetto sono quello alimentare, delle bevande, della carta, chimico, dei minerali non metallici e metallurgico. Il progetto *InduCo* è stato svolto in stretta collaborazione con le imprese e con le associazioni di categoria.

Il report *Industrial Transformation 2050* (2019) [12] di *Material Economics*, è commissionato dalla *European Climate Foundation* all'interno del progetto *Industrial Transformation 2050*, che ha l'obiettivo di sviluppare percorsi e strategie politiche per realizzare la decarbonizzazione dell'industria pesante europea entro il 2050. Il report si focalizza sulla decarbonizzazione delle industrie siderurgiche, chimiche e dei produttori di cemento e calcestruzzo. Viene fornita una presentazione generale dei settori in analisi, con i livelli di produttività, i processi attualmente in uso e le emissioni a livello europeo. Vengono poi presentate delle soluzioni per la riduzione delle emissioni, che includono anche delle strategie volte alla riduzione della domanda e l'utilizzo di impianti per la cattura della CO₂. Per ogni materiale il report elabora tre differenti scenari, uno basato sui nuovi processi produttivi, uno sull'economia circolare e uno sugli impianti di cattura. Ogni scenario viene confrontato con il caso base, che prevede l'attuale assetto industriale anche nel 2050. Per ogni scenario vengono stimati i costi per le industrie e per i consumatori, le risorse e le nuove infrastrutture necessarie, quantificando così l'impatto delle diverse soluzioni. Il risultato a cui giunge questo report è che la completa decarbonizzazione del settore industriale europeo entro il 2050 è possibile combinando insieme diverse soluzioni. Queste richiedono però investimenti elevati nel breve periodo e sono quindi necessari incentivi e strategie politiche per supportarle. Il report è l'unico trovato in letteratura che analizza dettagliatamente il processo produttivo della plastica.

La relazione *Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonisation of Industry* (2019) [13] di *Inner City Fund* (ICF) in collaborazione con il *Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research* (ISI) e con il *Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung* (DIW) di Berlino, è stata prodotta per la Commissione Europea con l'intento di fornire informazioni dettagliate sulle tecnologie disponibili per la decarbonizzazione industriale. Sono analizzati i settori siderurgico, chimico (etilene e ammoniaca), dei minerali non metallici, della carta, dei minerali non ferrosi e delle raffinerie. Il report è l'unico trovato in letteratura che tratta nello specifico il processo produttivo dell'etilene ed è uno dei pochi che fornisce soluzioni anche per la decarbonizzazione delle industrie produttrici di ceramica e vetro. Per ogni

materiale viene fornita un'introduzione che riporta l'andamento della produzione nel tempo e i processi produttivi utilizzati sia a livello internazionale che europeo. Viene poi fornito un lungo elenco di tecnologie per la decarbonizzazione con relativo potenziale di riduzione delle emissioni e dei consumi energetici. Per quanto riguarda le soluzioni riportate questo è uno dei report più completi, in quanto per ogni tecnologia viene fornito il TRL, la riduzione delle emissioni e del fabbisogno energetico e l'entrata prevista sul mercato.

La relazione *Clean Energy Innovation* (2020) [14] dell'*International Energy Agency* (IEA) ha l'obiettivo di mettere in luce gli interventi prioritari di innovazione tecnologica necessari per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione. In particolare vengono individuati quei settori dove tali interventi sono al momento più urgenti, come quello dell'industria pesante e dei trasporti sulle lunghe distanze. La crisi innescata dal COVID19 ha complicato la transizione verso la decarbonizzazione e il report evidenzia come sia fondamentale che i governatori integrino nelle loro politiche gli interventi di innovazione. In allegato a questo report l'IEA ha messo a disposizione online il tool *ETP Clean Energy Technology Guide* (2020) [15], che contiene più di 400 soluzioni tecnologiche per la riduzione delle emissioni derivanti dal settore energetico, dei trasporti, dell'industria e delle costruzioni. Il software permette di filtrare velocemente le tecnologie relative al settore industriale di interesse e per ogni soluzione fornisce molte informazioni dettagliate, come il TRL, l'importanza per la decarbonizzazione e le aziende e i progetti che stanno sviluppando queste tecnologie. I dati sono forniti a livello europeo e sono aggiornati al 2020. Nel tool non vengono però riportati i costi relativi alle varie soluzioni e per quanto riguarda il settore dei minerali non metallici viene analizzata solo la produzione di cemento e calcestruzzo.

Il report *Ossigeno per la crescita* (2020) [3] di *REF-E* è stato finanziato con il supporto della *European Climate Foundation* ed è stato realizzato in collaborazione con esperti del settore economico, accademico, associativo e della consulenza. L'obiettivo di questo lavoro è quello di identificare gli interventi e le misure necessarie per definire la ripresa economica dopo la pandemia causata dal COVID19. Focus centrale del lavoro sono gli obiettivi di decarbonizzazione dell'economia. Viene infatti messo in luce il contributo che la decarbonizzazione può dare per superare la crisi in corso e vengono proposte e analizzate strategie di rilancio sostenibile. In particolare tale report pone l'accento sul fatto che la decarbonizzazione può essere vista come un motore per lo sviluppo, anziché come un costo per il sistema economico.

Capitolo 2

Settore dei minerali non metallici

In Italia l'industria legata alla produzione di minerali non metallici (ceramica, vetro, cemento, gesso, laterizi, calce) dà lavoro a circa 162000 persone e vale 21 miliardi di euro (dati 2018, [4] e [16]). E' un'attività a elevata intensità energetica, che in Italia ha prodotto 23.2 Mt di CO₂ eq nel 2018, corrispondenti al 26% delle emissioni industriali (88.7 Mt di CO₂ eq) [6]. Dai dati del database EU ETS [7], rappresentati in Figura 2.1, emerge che il 72% delle emissioni di questo settore è legato alla produzione di cemento e calce, il 14% alla produzione di vetro e un altro 14% alla produzione della ceramica.

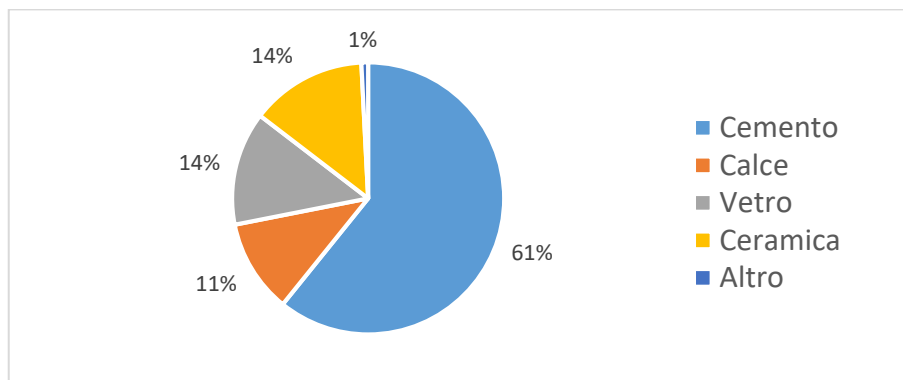


Figura 2.1 – Emissioni di CO₂ eq relative alla produzione di minerali non metallici in Italia nel 2018. (Fonte EU ETS [7]).

Nel presente capitolo viene inizialmente analizzata la produzione di calce, cemento e calcestruzzo (Capitolo 2.1); vengono poi prese in considerazione anche le industrie produttrici di vetro (Capitolo 2.2) e ceramica (Capitolo 2.3).

2.1 Calce, cemento e calcestruzzo

Il calcestruzzo è un conglomerato artificiale composto da un legante (tipicamente cemento o calce), acqua e da una miscela di aggregati lapidei, quali sabbia, ghiaia, pietrisco ed eventuali additivi. Esistono varie tipologie di cemento e di calcestruzzo. La norma europea di riferimento per la classificazione del cemento è la EN 197-1 [17], che definisce 150 tipologie di cementi in funzione delle prestazioni. In Europa la metà del cemento prodotto viene utilizzato per la costruzione di nuovi edifici, circa il 30% per la costruzione di infrastrutture come ponti, tunnel, dighe e il restante 20% viene impiegato per interventi di manutenzione e riparazione [12]. Nella Figura 2.2 si riporta l'impiego del cemento nella catena del valore in Europa nel 2015.

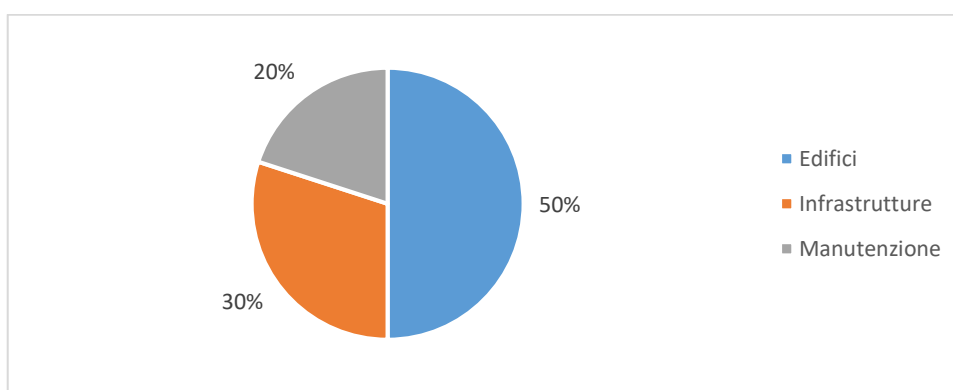


Figura 2.2 – Utilizzo del cemento nella catena del valore. EU, 2015 (Fonte [12]).

L'Asia è il continente che domina il settore cementizio a livello mondiale: in questa regione la produzione di cemento è cresciuta del 225% tra il 2004 e il 2014 rispetto al 192% registrato globalmente [13]. Tra il 2004 e il 2014 la produzione globale di calce è quasi triplicata, passando rispettivamente da 121 Mt nel 2004 a 350 Mt nel 2014 ([18] e [19]). A livello nazionale il settore delle costruzioni contribuisce all'8% circa del Prodotto Interno Lordo e nel 2018 ha dato lavoro a più di 32000 persone [20]. Nel 2018 in Italia sono state utilizzate 18.9 Mt di cemento, ne sono state importate 1.8 Mt e ne sono state esportate 2.2 Mt [20].

La produzione dei materiali cementizi è una delle principali fonti di anidride carbonica: analizzando il database EU ETS [7] risulta che il 24% delle emissioni industriali nazionali derivano proprio da questa filiera. Nel 2018 le emissioni di CO₂ eq imputabili alla produzione del cemento sono state pari a 12.2 Mt¹; la localizzazione geografica di queste emissioni è riportata in Figura 2.3.

¹ Dato fornito da ISPRA su elaborazioni EU-ETS.

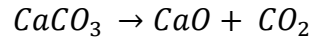


Figura 2.3 – Localizzazione geografica dei siti di emissione. Elaborazione grafica basata sui dati forniti da ISPRA.

2.1.1 Processo produttivo attuale

Il processo produttivo del cemento, schematizzato in Figura 2.4, inizia dalle cave e dalle miniere, dove vengono estratte le materie prime. Queste vengono poi essiccate, 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. Alla temperatura di circa 900°C avviene la decomposizione del carbonato di calcio, in seguito alla quale si formano ossido di calcio (CaO , comunemente detta calce) e anidride carbonica. Questa reazione prende il nome di calcinazione:



La fase successiva è quella della clinkerizzazione, durante la quale la calce viene cotta in un forno rotativo a una temperatura di circa $1400^\circ\text{C} \div 1600^\circ\text{C}$ con silice, allumina e ossido ferroso. In seguito alle reazioni chimiche che avvengono durante questo processo si origina il clinker, un materiale laterizio denso e resistente. Il clinker viene poi miscelato con additivi, come cenere, scorie di altoforno, calce e gesso, per produrre il cemento. La Figura 2.4, tratta da [21], illustra il tradizionale processo produttivo del cemento.

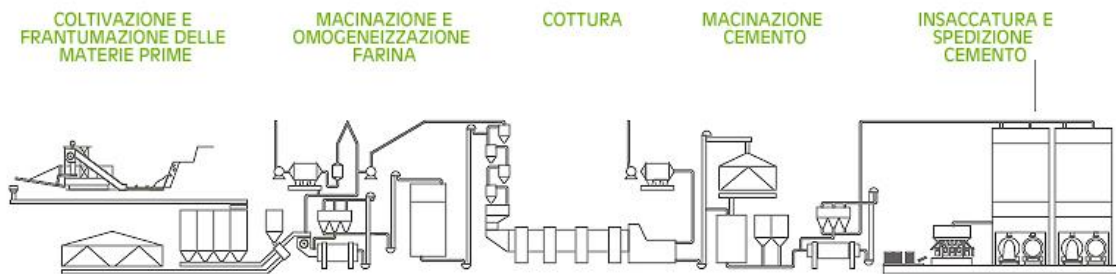


Figura 2.4 - Schematizzazione del processo produttivo del cemento. (Fonte [21]).

Il calcestruzzo è un conglomerato artificiale costituito da una miscela di cemento, acqua, aggregati e additivi che viene utilizzato come materiale da costruzione. Come emerge dalla Figura 2.5, il 95% delle emissioni dovute alla produzione del calcestruzzo derivano dalla fabbricazione del cemento, sebbene il calcestruzzo contenga solo dal 7% al 20% di cemento.

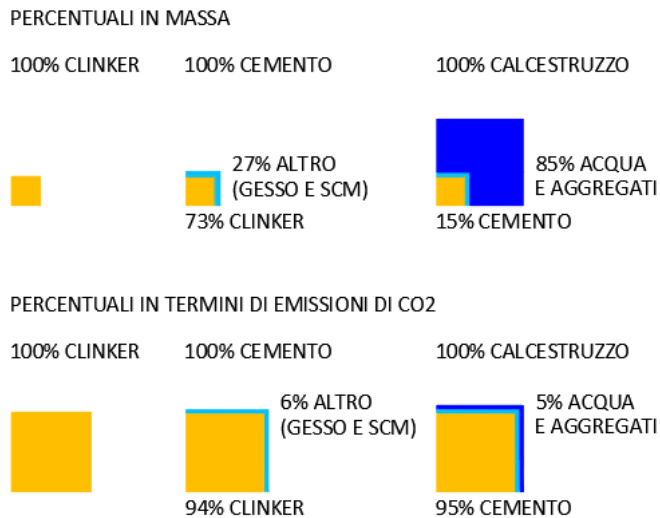


Figura 2.5 - Composizione del cemento e relative emissioni. (Fonte [12]).

I cementi vengono classificati in cinque categorie:

- Cemento Portland I, con un contenuto di clinker pari ad almeno il 95%. Nel 2018 in Italia ne sono state prodotte 3 Mt (15.8% del totale);
- Cemento Portland II, con una percentuale di clinker pari ad almeno il 65%. Nel 2018 a livello nazionale ne sono state prodotte 13.8 Mt (71.2%);
- Cemento d'altoforno III, con un contenuto di clinker tra il 20% e il 64% e un contenuto di loppa d'altoforno compreso tra il 36% e l'80%. Nel 2018 in Italia ne sono state prodotte 0.3 Mt (1.7%);
- Cemento pozzolanico IV, con una percentuale di clinker tra il 45% e l'89% e di materiale pozzolanico tra l'11% e il 55%. Sempre nel medesimo anno ne sono state prodotte 2.1 Mt a livello nazionale (11%);
- Cemento composito V, con un contenuto di clinker fra il 20% e il 64%, di loppa granulata d'altoforno fra il 18% e il 50% e di pozzolana o ceneri volatili fra il 18% e il 50% [22]. Nel 2018 in Italia non è stata prodotta questa tipologia di cemento ([20] e [23]).

Attualmente in Europa il rapporto clinker su cemento, detto clinker factor, è mediamente pari a 0.73 [8]. Il contenuto di clinker influenza le proprietà del cemento prodotto e il relativo campo di applicazione. Nei cementi dal II al V il clinker viene in parte sostituito con i materiali cementizi secondari (Secondary Cementitious Materials, SCM), come:

- Calcare;
- Ceneri volatili;
- Materiale pozzolanico naturale;
- Sedimenti di dragaggio;
- Ceneri vegetali;
- Residui da inceneritori.

Il calcare è il materiale cementizio secondario più utilizzato sia a livello europeo che a livello mondiale, perché è abbondante, facilmente reperibile e non necessita di riscaldamento per essere macinato [8]. Tuttavia il potenziale di sostituzione è piuttosto basso dato che influisce sulla resistenza meccanica del cemento [8]. Il calcare può essere utilizzato in quantità superiori quando viene miscelato a elementi ricchi di alluminio.

Le ceneri volatili sono un materiale di scarto proveniente dalla generazione elettrica a carbone e vengono largamente utilizzate per la produzione di clinker in tutto il mondo [8]. Possono essere di tipo siliceo o calcareo e ciò influenza le caratteristiche del clinker prodotto. Le ceneri volatili vengono impiegate per produrre alcune particolari tipologie di cemento Portland II; dal rapporto *Federbenton* [20] emerge che nel 2018 in Italia non sono state prodotte queste tipologie di cemento. La disponibilità delle ceneri volati è destinata a diminuire a causa della sostituzione del carbone con altri combustibili. In Italia il *Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima* [24] prevede la progressiva eliminazione del carbone per la generazione elettrica entro il 2025.

Le ceneri vulcaniche sono il materiale pozzolanico naturale più utilizzato, soprattutto in quei paesi dove sono più abbondanti, come in Italia. In accordo con lo standard europeo EN 197-

1 [17], un cemento può contenere fra il 6% e il 55% in massa di pozzolana, anche se mediamente questa percentuale è compresa tra il 15% e il 35% [8].

I sedimenti provenienti dal dragaggio di corsi d'acqua e dei porti vengono impiegati per la parziale sostituzione del clinker durante il processo produttivo del cemento².

Infine, anche altri sottoprodotti industriali possono essere utilizzati in sostituzione al clinker, come ad esempio le ceneri vegetali e i residui da incenerimento dei rifiuti solidi urbani.

Il principale ostacolo alla sostituzione del clinker con i materiali cementizi secondari è costituito dalla minor resistenza che hanno questi cementi compositi rispetto al cemento *Portland*. Attraverso una fine macinatura degli SCM è però possibile migliorarne la reattività e aumentare la resistenza del cemento prodotto.

2.1.1.1 Produzione, richiesta energetica ed emissioni

Partendo dai dati di produzione del cemento del 2018 e assumendo invariati i consumi specifici di energia elettrica e calore per tonnellata di produzione relativi al 2017 (ultimo dato disponibile), sono stati calcolati i consumi totali assunti per l'anno 2018 (Tabella 2.1). A partire poi dal fabbisogno di calore, assumendo invariato lo share di combustibili utilizzati nel 2016 (ultimo dato disponibile) e attraverso i fattori di emissione dei diversi combustibili, sono state definite le emissioni associate alla sola fase di combustione per l'anno 2018, come riassunto in Tabella 2.2. In Tabella 2.3 infine, partendo dal valore di emissione totale registrato nel 2018, si riporta, per differenza, il valore delle emissioni di processo (dalla fase di calcinazione) e lo share delle due fonti di emissione (processo e combustione) sul totale. Secondo queste elaborazioni, solamente il 44% delle emissioni deriva dalla combustione, necessaria per la produzione di energia termica, mentre il 56% è dovuto alle reazioni chimiche che avvengono durante il processo produttivo (Tabella 2.3). La Figura 2.6 riassume i calcoli svolti per la stima delle emissioni specifiche di CO₂ eq e dei fabbisogni energetici.

² Il materiale dragato contiene una significativa quantità di silice, allumina, ossidi di calcio e ferro, che sono tutti elementi fondamentali nella preparazione del cemento. In un progetto di ricerca sviluppato da alcuni studiosi americani sono state studiate le corrette proporzioni e gli effetti della miscelazione dei sedimenti dragati sulla qualità del cemento.

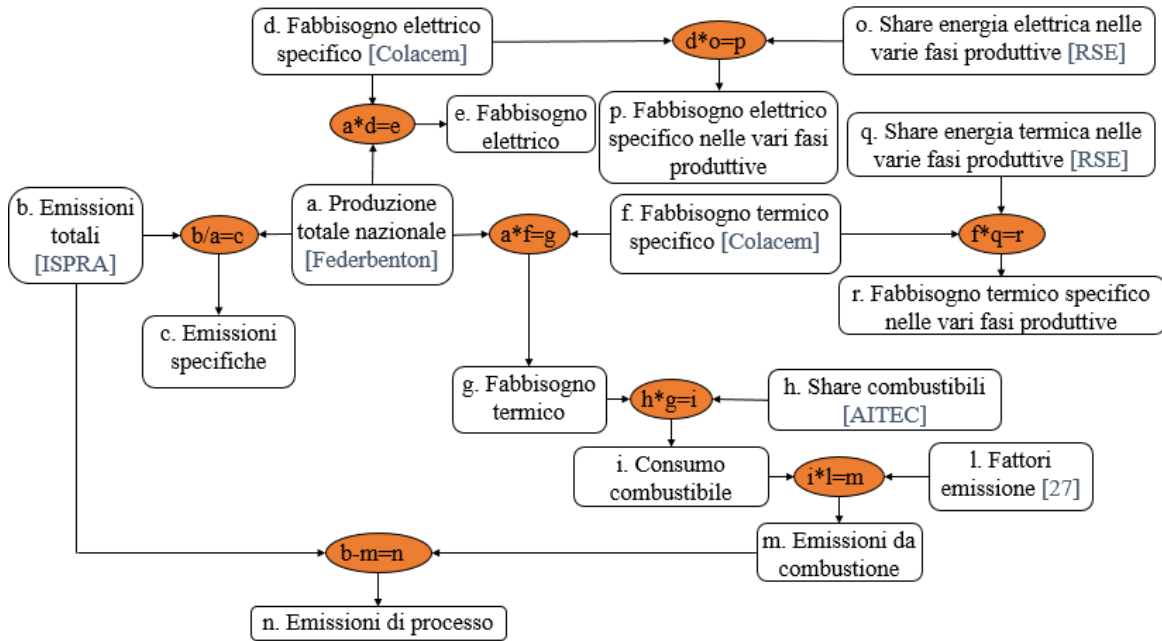


Figura 2.6 – Schema dei calcoli svolti per la stima delle emissioni specifiche e dei fabbisogni energetici delle varie fasi del processo produttivo.

Tabella 2.1 – Produzione, emissioni e fabbisogno energetico relativi alla produzione di cemento in Italia.

id			u.d.m	Anno	Fonte
a	Produzione cemento	19.3	Mt	2018	FEDERBENTON [20]
b	Emissioni CO₂ eq³	12.2	Mt	2018	
c	Emissioni specifiche CO₂ eq	0.6	t CO ₂ eq/t cemento		c=b/a
d	Fabbisogno specifico energia elettrica⁴	115	kWh/t cemento	2017	COLACEM [25]
e	Fabbisogno elettrico⁵	2.2	TWh	2018	e=a*d
f	Fabbisogno specifico energia termica⁶	870	kWh/t cemento	2017	COLACEM [25]
g	Fabbisogno energia termica	16.6	TWh	2018	g=a*f

³ Dato fornito da ISPRA su elaborazioni EU-ETS.

⁴ Analizzando il database JRC-IDEES [28] emerge che nel 2015 il fabbisogno elettrico dei cementifici italiani è stato pari a 1.2 TWh. Considerando che in quell'anno sono state prodotte 20.8 Mt di cemento si ottiene un fabbisogno elettrico specifico pari a 59.2 kWh/t cemento. La fonte principale da cui provengono i dati di JRC-IDEES è il bilancio di energia fornito da EUROSTAT. Tuttavia EUROSTAT fornisce i dati in forma aggregata per tutto il settore dei minerali non metallici. I valori relativi alla sola produzione del cemento sono delle stime fatte da JRC-IDEES sulla base delle statistiche strutturali sulle imprese di EUROSTAT, delle statistiche sul volume della produzione industriale (in particolare quelle di USGS), di documenti BREF e di fonti nazionali.

⁵ Nella relazione [29] di TERNA è riportato un fabbisogno di energia elettrica aggregato per cemento, calce e gesso pari a 2.6 TWh.

⁶ Analizzando il database JRC-IDEES [28] emerge che nel 2015 il fabbisogno termico dei cementifici italiani è stato pari a 14.3 TWh. Considerando che in quell'anno sono state prodotte 20.8 Mt di cemento si ottiene un fabbisogno elettrico specifico pari a 687.9 kWh/t cemento.

Tabella 2.2 – Stima delle emissioni derivanti dalla combustione per la produzione di cemento in Italia.

	Share combustibile (2016) AITEC [26]	Consumo combustibile (2018)	Fattore emissione [27]	Emissioni combustione (2018)	Emissioni CO ₂ eq (2018)
		GWh	tCO ₂ /GWh	Mt	Mt
Combustibili fossili	81%	13601	320	4.4	5.3
CSS combustibile e rifiuti	16%	2687	330	0.9	
Olio combustibile	1%	168	260	0.04	
Metano	1%	168	190	0.03	

Tabella 2.3 – Stima delle emissioni da combustione e di processo nel 2018 in Italia.

	Emissioni CO ₂ [Mt]	
Totale⁷	12.2	
Combustione	5.3	(44%)
Processo	6.9	(56%)

Per fare una verifica sullo share fra emissioni di processo e da combustione sono state calcolate le emissioni derivanti dalla reazione di calcinazione. Dai dati forniti da AITEC [30] è stato possibile calcolare la quantità di clinker prodotta nel 2018. Il documento [31] riporta che per produrre 800g di clinker sono necessari 1214 g di materie prime crude. Ipotizzando che le materie prime siano costituite per l'80% da calcare e per il 20% da argilla si stima che per produrre 1kg di clinker siano necessari 1214 g di calcare. Questa quantità di calcare viene convertita in moli, considerando che la massa molare (MM) del calcare è pari a 100 g/mol. La reazione di calcinazione fornisce le proporzioni stechiometriche: a una mole di calcare (N) è associata una mole di CO₂. Sempre attraverso la massa molare è possibile calcolare la massa (M) di CO₂ associata alla produzione di 1 kg di clinker. Considerando poi la produzione tot di clinker nel 2018 è possibile calcolare le emissioni di processo e quelle derivanti dalla combustione. Questi calcoli vengono riportati in Tabella 2.4 e dipendono dalla quantità di calcare contenuta in 1 kg di clinker, che non è un valore costante. Da tali elaborazioni si ottiene che il 65% delle emissioni derivano dal processo produttivo, mentre dai calcoli basati sui fattori di emissione si ottiene che il 56% delle emissioni sono di

⁷ Dato fornito da ISPRA su elaborazioni EU-ETS.

processo. Il Sankey diagram di Figura 2.7 rappresenta i fabbisogno energetici delle varie fasi del processo produttivo del cemento.

Tabella 2.4 – Stima delle emissioni di processo e da combustione mediante la reazione di calcinazione. Italia, 2018.

id			u.d.m	Fonte
a	Emissioni CO₂ eq⁸	12.2	Mt	
b	Produzione clinker aziende associate	13.5	Mt	AITEC [30]
c	Produzione clinker aziende associate sul totale	92%		AITEC [30]
d	Produzione tot clinker	14.7	Mt	d = b/c
	Materie prime necessarie per produrre 800g di clinker	1214	g	[31]
	Contenuto di calcare nelle materie prime	80%		
	Calcare necessario per produrre 1kg di clinker	1214	g	
e	MM CaCO₃	100	mol/g	
f	N CaCO₃	12.1	mol	f = c/e
g	N CO₂ di processo	12.1	mol	f = g
h	MM CO₂	44	mol/g	
i	M CO₂ di processo	534.1	g	i = g*h
l	Emissioni specifiche di processo	0.5	kg CO ₂ /kg clinker	
m	Emissioni CO₂ di processo	7.9	(65%) Mt	m = l*d
n	Emissioni CO₂ da combustione	4.3	(35%) Mt	n = a-m

⁸ Dato fornito da ISPRA su elaborazioni EU-ETS.

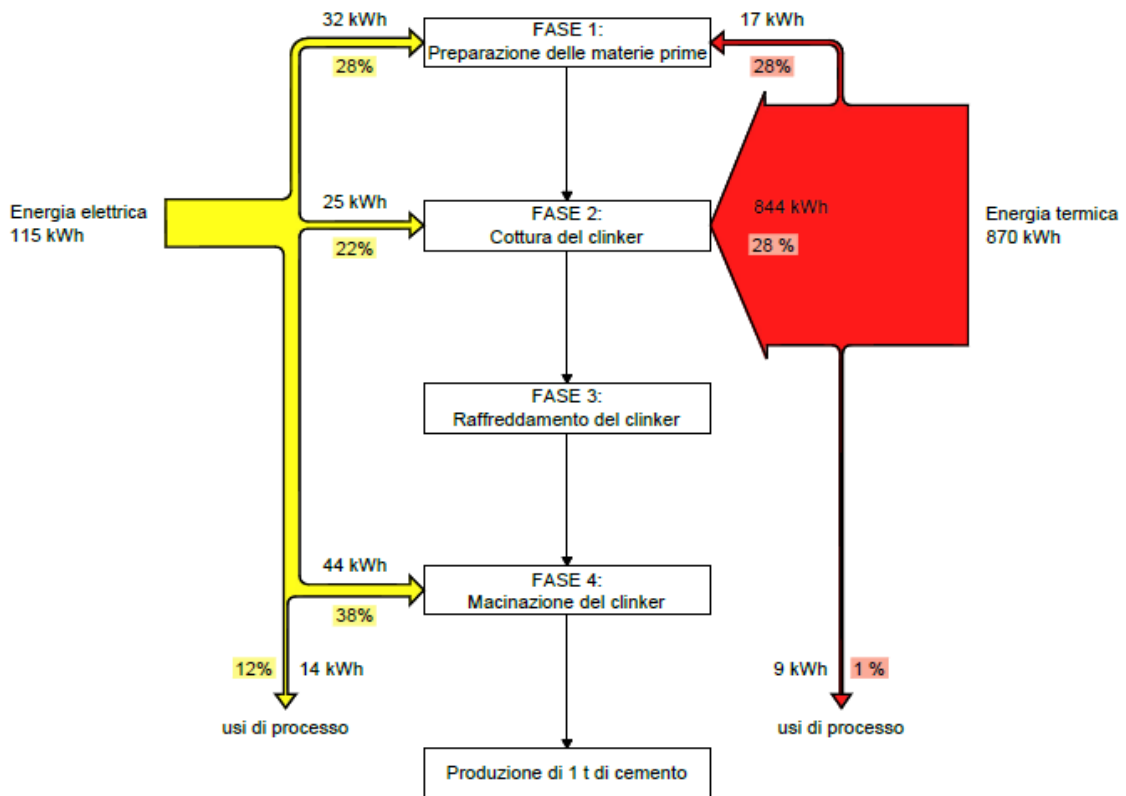


Figura 2.7 - Sankey diagram relativo al processo produttivo del cemento. Elaborazione grafica basata su informazioni provenienti da ENEA [32], per quanto riguarda lo share di energia elettrica e termica necessarie durante le varie fasi, e COLACEM [25], per quanto riguarda i fabbisogni termici ed elettrici specifici.

Per quanto riguarda la generazione del calore necessario durante il processo produttivo in Europa i combustibili più utilizzati sono il carbone, il petcoke, la biomassa e i rifiuti [12]. Dal 2000 al 2010 in Europa l'utilizzo di biomassa è triplicato, contribuendo così a una significativa riduzione delle emissioni non neutre di anidride carbonica [12]. Nell'industria cementizia europea l'impiego dei rifiuti come combustibile è cresciuto dal 3% nel 1990 al 15% nel 2015, di conseguenza le aziende produttrici di cemento sono parte integrante del sistema di smaltimento e gestione dei rifiuti in molti paesi [13]. I rifiuti sono un tipo di combustibile molto economico, quindi il loro utilizzo è vantaggioso per queste industrie. Addirittura non mancano casi in cui gli stabilimenti cementizi vengano pagati per accettare e bruciare i rifiuti [12]. In Italia nel 2016 sono stati utilizzati principalmente i combustibili fossili e il gas naturale; vengono impiegati anche olio combustibile, CSS combustibile⁹ e rifiuti in quantità inferiore [10].

⁹ Il combustibile solido secondario (CSS) è un combustibile derivante dalla lavorazione dei rifiuti solidi urbani.

2.1.2 Soluzioni di decarbonizzazione

Per l'abbattimento delle emissioni di anidride carbonica del comparto del cemento sono disponibili varie strategie innovative, anche in combinazione fra loro. Possono essere raggruppate nelle seguenti categorie:

- Efficienza energetica;
- Fonti energetiche alternative;
- Riduzione della domanda;
- Installazione di impianti per la cattura della CO₂.

Ciascuna categoria è analizzata individualmente nei prossimi paragrafi.

2.1.2.1 Efficienza energetica

Per migliorare l'efficienza energetica del processo, ovvero minor consumo di energia a parità di prodotto finale, è possibile adottare altiforni con recupero di calore, già oggi disponibili, e sono allo studio varie tecnologie avanzate di macinazione.

Migliori tecnologie disponibili

Nel corso degli ultimi anni è già stata posta molta attenzione al miglioramento dell'efficienza energetica nella produzione della calce e del cemento. Attualmente la migliore tecnologia disponibile per incrementare l'efficienza energetica del processo produttivo è costituita dagli altoforni a secco dotati di impianti per il recupero del calore, che permettono di effettuare il preriscaldamento e la pre-calcinazione delle materie prime.

Nel caso del tradizionale processo a umido il forno viene alimentato con materie prime che hanno un'umidità compresa fra il 32% e il 40% [33]. Questa tipologia di altiforni necessita di una zona aggiuntiva dove avviene l'evaporazione dell'acqua; ciò comporta anche un consumo extra di combustibile. Nel corso degli anni sono stati utilizzati questi altiforni perché la macinazione a umido di materiali molto duri permette di ottenere delle miscele più uniformi. Nel caso di processo a secco invece le materie prime entrano nel forno sotto forma di una farina asciutta. Gli impianti a secco con preriscaldatori e pre-calcinatori richiedono un input energetico di circa 833 kWh per tonnellata di clinker prodotta [13]. Non sono noti dati specifici sulla presenza di questa tecnologia in Italia, ma nel 2004 l'83% della produzione europea di cemento era già basata sul processo a secco [34].

Tecnologie di macinazione avanzate

Sono in corso studi per sviluppare sistemi di macinazione più efficienti, come ad esempio la triturazione senza contatto, la macinatura con ultrasuoni, la frammentazione tramite impulsi di potenza (EPD - Electric Pulse Disaggregation) a elevata tensione e la triturazione a bassa temperatura [15]. E' stato testato che abbinando gli ultrasuoni alla fase di macinatura è possibile ridurre il momento torcente richiesto, la sollecitazione sull'albero motore e l'energia totale consumata [35]. Il sistema EDP prevede invece l'utilizzo di impulsi elettrici a elevata tensione per frammentare selettivamente un solido composito, separando così i

diversi materiali che lo compongono. Con questa tecnologia si ottiene la rimozione precoce della ganga, cioè del materiale inerte che si trova associato ai minerali utili. Ciò rende le materie prime più morbide e quindi più facili da macinare [36]. In generale tutte queste tecnologie hanno lo scopo di ridurre i consumi energetici e il loro TRL è compreso fra 6 e 9 [15].

2.1.2.2 Fonti energetiche alternative

Per la generazione del calore necessario durante il processo di produzione del cemento è possibile sostituire i combustibili fossili solidi e liquidi con il gas naturale, la biomassa e l'idrogeno. E' inoltre possibile utilizzare impianti a concentrazione dell'energia solare e forni per la cottura del clinker elettrificati.

Per la generazione dell'energia termica nel 2017 in Italia sono stati utilizzati principalmente carbone, petcoke, CSS combustibile e rifiuti [10]¹⁰. Questi combustibili possono essere sostituiti con il **gas naturale**, che ha un fattore di emissione del 36% inferiore rispetto al carbone e del 44% rispetto al petcoke [27]. Nel 2016 in Italia solo l'1% dell'input termico necessario per la produzione del cemento è stato soddisfatto mediante il gas naturale [10]. La scelta del vettore energetico dipende da ragioni economiche e dalla situazione locale (ad esempio dalla disponibilità nazionale di carbone) [34].

I combustibili fossili possono essere in parte sostituiti con la biomassa e a livello europeo già il 15% dell'input termico è costituito dalla **biomassa** [12]. In generale questa risorsa presenta un grande potenziale di mitigazione delle emissioni non neutre di CO₂, anche se la sua disponibilità è limitata e inoltre dovrà competere in futuro con altri segmenti del sistema energetico (per es. per la generazione elettrica) [12].

L'**idrogeno** può essere utilizzato per la generazione del calore necessario durante il processo produttivo, ma è importante che durante la sua produzione non venga emessa CO₂ in atmosfera. Per l'utilizzo dell'idrogeno nei cementifici è però necessario riadattare gli impianti produttivi e ciò ne limita l'adozione su vasta scala [12].

Gli **impianti a concentrazione dell'energia solare** (CSP – Concentrated Solar Power) sono dei sistemi che permettono di convertire l'energia solare in energia termica e tali impianti possono essere utilizzati per generare il calore necessario durante il processo produttivo del clinker. Il TRL di questa tecnologia è pari a 6 [15]. L'Unione Europea ha finanziato il progetto *SOLPART*, con l'intento di sviluppare un sistema in grado di produrre calore a elevate temperature da applicare nell'industria dei minerali non metallici. Un altoforno da 1 MW alimentato da energia solare è stato messo in servizio con successo nel 2019 e si stima in questo stabilimento sia possibile produrre circa 10 kt di cemento all'anno [10]. Nello stesso anno *Heliogen* ha presentato una nuova tecnologia CSP in grado di generare calore a una temperatura superiore a 1000°C, utilizzabile per la fase di calcinazione. La sfida ora è quella di arrivare alla commercializzazione di questo sistema.

¹⁰ Dal database JRC-IDEES [28] emerge invece che nel 2015 il fabbisogno termico è stato soddisfatto per il 94% con combustibili fossili liquidi e per il 6% con vapore da recupero termico.

Secondo alcuni esperti è possibile elettrificare i forni dove avviene la cottura del clinker [12]. Attualmente gli altiforni elettrificati non sono ancora ottimizzati per la scala industriale, ma sono stati sviluppati dei prototipi per studiarne le potenzialità. L'*ETP Clean Energy Technology Guide* riporta che in generale il TRL dell'elettrificazione degli altiforni è pari a 4 [15]. Per effettuare ciò si possono usare i **generatori al plasma**¹¹ e l'**energia da microonde**. I generatori al plasma vengono alimentati con energia elettrica e sono in grado di produrre calore alla temperatura necessaria durante i processi di produzione del cemento. Questi generatori sono già stati testati in vari contesti industriali, ma la loro diffusione è limitata dalla sensibilità alla polvere e dalla necessità di frequenti operazioni di manutenzione e pulizia¹². E' possibile poi sfruttare le microonde per trasferire energia termica uniformemente a un intero volume evitando un riscaldamento graduale dalla parte esterna fino all'interno e riducendo il consumo energetico anche del 40% [12]. Le microonde presentano molti vantaggi per il settore industriale in analisi: minori tempi di processo, impianti di produzione modulari, minori costi annuali per la manutenzione degli altiforni e la possibilità di far funzionare questi ultimi in modo più flessibile¹³.

2.1.2.3 Riduzione della domanda

Diminuendo il contenuto di cemento nel calcestruzzo, utilizzando meno calcestruzzo per la costruzione di nuovi edifici e limitando gli sprechi è possibile ridurre la domanda di cemento. Tipicamente un metro cubo di calcestruzzo contiene almeno 300 kg di cemento [8], ma secondo alcuni studi ([8] e [12]) è possibile ottenere le medesime performance utilizzando anche il 20% in meno di cemento.

Le caratteristiche e le prestazioni del calcestruzzo sono influenzate dall'ambiente esterno e per tenere in considerazione le peculiarità del luogo in cui la struttura è collocata vengono definite delle classi di esposizione. Le norme UNI EN 206-1:2006 [37] e UNI 11104:2004 [38] individuano 6 classi di esposizione per il calcestruzzo strutturale in funzione della

¹¹ Il plasma è un gas ionizzato formato da una miscela di elettroni, ioni e specie neutre interagenti fra loro. Fornendo energia termica a un gas i suoi atomi si ionizzano e il suo stato di aggregazione cambia, passando da quello aeriforme a quello di plasma. Il plasma può essere quindi considerato come il quarto stato di aggregazione della materia. L'energia posseduta dal plasma può essere convertita in energia elettrica con due dispositivi: un convertitore magnetoidrodinamico oppure tramite un convertitore plasmadinamico.

¹² Nel 2017 *Vattenfall* e *Cementa* hanno avviato il progetto *CemZero* per studiare le potenzialità dei generatori al plasma nel settore cementizio. L'obiettivo di questo progetto è quello di valutare la fattibilità dell'elettrificazione nell'industria del cemento, in modo tale da azzerarne le emissioni di anidride carbonica entro il 2030.

¹³ Il progetto *DAPhNE*, finanziato dall'Unione Europea, aveva come obiettivo quello di sviluppare nuove soluzioni tecnologiche per migliorare l'efficienza dei processi produttivi di cemento, ceramica e vetro. Questo programma è stato avviato nel 2012 e i partner del progetto hanno sviluppato soluzioni per sfruttare la tecnologia delle microonde nei cementifici e per monitorare in tempo reale i consumi energetici e la qualità dei prodotti. Nel febbraio 2020 la *Mineral Products Association* ha ricevuto un finanziamento di 3.2 milioni di sterline dal governo inglese al fine di testare l'utilizzo di idrogeno, biomassa ed elettricità per la produzione del cemento. In uno studio di fattibilità svolto nel 2019 è stato considerato un utilizzo di biomassa (per il 70% dell'input termico), idrogeno (20%) e generatori al plasma (10%) per abbattere le emissioni da combustione.

resistenza alle “azioni aggressive dell’ambiente, agli attacchi chimici, all’abrasione o ad ogni altro processo di degrado che coinvolga, oltre alla pasta cementizia, anche le eventuali armature metalliche” [39]. Spesso viene stabilita una sola classe per l’intera struttura, che corrisponde alla più conservativa, perché in questo modo la logistica e la gestione dei materiali sono più facili. Tuttavia ad esempio in un edificio il calcestruzzo utilizzato per i muri interni e per quelli esterni non è sottoposto ai medesimi vincoli. Di conseguenza i diversi muri di una struttura appartengono a classi di esposizione differenti e utilizzando calcestruzzi diversi è possibile risparmiare una grande quantità di materiale.

Un’opzione per limitare le emissioni consiste nel sostituire il calcestruzzo con altri materiali, come ad esempio il legno. I vantaggi provenienti dall’utilizzo di questi materiali sono significativi: per realizzare una lastra di legno a strati incrociati di un metro quadrato vengono emessi 4 kg di anidride carbonica, mentre per realizzarne una in calcestruzzo con le medesime dimensioni e performance vengono emessi circa 27 kg di CO₂ [12]. Inoltre se questi prodotti in legno hanno delle durate nel tempo elevate possono essere considerati come dei depositi di biossido di carbonio.

Nel seguito vengono presentate le nuove materie prime che possono essere utilizzate per la produzione del cemento; viene inoltre illustrata anche la soluzione del calcestruzzo armato con le fibre di carbonio. Infine vengono presentati i metodi disponibili per effettuare il riciclaggio del calcestruzzo.

Nuove materie prime

I materiali cementizi secondari presentati nel paragrafo 2.1.1 vengono utilizzati per la produzione di tipologie di cemento già diffuse a livello commerciale. Nel corso degli ultimi anni però sono stati sviluppati nuovi tipi di cementi, sempre basati sulla parziale sostituzione del clinker con altri materiali. Questi cementi innovativi, detti *low carbon cements*, non si sono ancora diffusi su vasta scala e sono ancora in corso studi per il loro miglioramento. Nel seguito sono presentate varie tipologie di cementi basso-emissivi raggruppati in funzione del potenziale di riduzione delle emissioni.

Low Carbon Cements (-30%)

Per la produzione dei low carbon cements (-30%) il clinker viene sostituito con altre sostanze e ciò permette di ridurre le emissioni di processo. Inoltre per la produzione di questi cementi sono sufficienti delle temperature inferiori e di conseguenza è possibile ridurre anche le emissioni da combustione. Complessivamente questi cementi permettono di ridurre le emissioni del 20%-30% ([8] e [13]). Due esempi di questa tipologia di low carbon cements (-30%) sono ***Aether*** e il **Calcium Sulfo Aluminate Cement**.

Nel caso di *Aether* il clinker viene in parte sostituito con l’ossido di alluminio. La produzione del cemento *Aether* è facilmente adattabile ai forni rotativi attualmente in uso ed è possibile ridurre i consumi energetici del 15% [13]. Il TRL di questo tipo di low carbon cement (-30%) è di 8/9, ma per ora è ancora poco diffuso dato il suo costo elevato (l’ossido di alluminio è una sostanza molto costosa) [13].

Per la produzione del Calcium Sulfo Aluminate Cement viene impiegato un tipo di clinker differente da quello utilizzato per il Portland, in quanto contiene quantità significative di solfati. Questo legante ha il vantaggio di non richiedere grandi modifiche agli impianti già in uso. Il breve tempo di presa del Calcium Sulfo Aluminate Cement è però un ostacolo alla sua diffusione e ne limita l'impiego alla produzione di elementi prefabbricati. Un altro svantaggio di questo legante è dato dagli elevati costi delle materie prime e dalla loro scarsa disponibilità.

Low Carbon Cements (-50%)

I low carbon cements (-50%) prevedono la sostituzione del clinker con altre sostanze, cosa che permette di dimezzare le emissioni ([8] e [13]). Appartengono a questa categoria *Celitement* e **Alkali Activated Binder**.

Per la produzione di *Celitement* il clinker viene in parte sostituito con idrosilicati di calcio. Questo cemento viene prodotto mediante un processo a due stadi che richiede una temperatura di circa 200°C. Per la produzione di *Celitement* è necessaria una minore quantità di calce e di energia (il 30% ÷ 40% in meno rispetto alla produzione del cemento Portland) [13]. Il TRL di *Celitement* è pari a 7 [13].

La produzione di Alkali Activated Binder permette di ridurre le emissioni di anidride carbonica dal 40% all'80% perché questo cemento viene prodotto sfruttando la reazione chimica fra minerali alluminosilicati e attivatori alcalini e come materie prime vengono utilizzate scorie e ceneri volatili ricche di calcio [8]. Gli svantaggi più rilevanti sono problemi di sicurezza legati all'utilizzo di alcali forti¹⁴, tempi di asciugatura e indurimento rapidi e mancanza di miscele che ne possano migliorare la lavorabilità¹⁵; inoltre non è ancora stata studiata la durabilità delle strutture nel tempo. A causa di questi ostacoli l'uso dell'Alkali Activated Binder è limitato a elementi prefabbricati, anche se il suo TRL è pari a 9 [15].

Low Carbon Cements (-70%)

I cementi basati sulla carbonatazione dei silicati di calcio sono in grado di catturare l'anidride carbonica durante il processo di stagionatura: un esempio di questi low carbon cements (-70%) è il cemento *Solidia*. Questo legante viene prodotto nei medesimi forni rotativi utilizzati per il cemento Portland, ma per la sua produzione sono necessarie temperature inferiori. Per la produzione di *Solidia* vengono impiegati minerali silicati di calcio con un basso contenuto di calce e in questo modo viene rilasciata una minor quantità di CO₂ di processo. La stagionatura del calcestruzzo avviene in apposite camere e durante questa fase è possibile catturare 300 kg di CO₂ per ogni tonnellata di cemento prodotto [13]. In totale è possibile ridurre di circa il 20% i consumi energetici e del 70% le emissioni di biossido di carbonio [13]. Questo tipo di low carbon cement viene utilizzato per la produzione di

¹⁴ Gli alcali sono delle sostanze in grado di penetrare in profondità nei tessuti organici e di provarne la necrosi.

¹⁵ In queste miscele sono presenti degli additivi che modificano le proprietà chimiche e fisiche del calcestruzzo. In particolare i fluidificanti servono per migliorare la lavorabilità del calcestruzzo mantenendo costante il rapporto acqua/cemento.

elementi prefabbricati e non può essere utilizzato per produrre il calcestruzzo armato, perché non protegge l'acciaio dalla corrosione. Il TRL di *Solidia* è pari a 8/9 [8].

Low Carbon Cement (-90%)

Il report *Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonisation of Industry* [13] stima che i cementi a base di ossidi di magnesio possano ridurre le emissioni del 90% o potrebbero addirittura essere dei leganti a emissioni negative, in quanto, secondo alcuni studi, durante il processo di stagionatura viene assorbito più biossido di carbonio di quello rilasciato durante il processo produttivo. Il TRL dei low carbon cement (-90%) è inferiore a 5 e per ora non c'è alcun processo sviluppato su scala industriale [13].

Calcestruzzo armato con fibre di carbonio

Il calcestruzzo armato è un materiale costituito da calcestruzzo e da un'armatura di barre d'acciaio annegata al suo interno. Il calcestruzzo armato sfrutta l'unione del calcestruzzo, dotato di un'ottima resistenza alla compressione, con l'acciaio, un materiale in grado di resistere alla trazione. Il calcestruzzo ha anche la funzione di proteggere l'acciaio dalla corrosione. Nel caso in cui l'acciaio sia sostituito con un materiale che non soffra di questa problematica è possibile ridurre lo strato di calcestruzzo protettivo. Una delle possibilità è la sostituzione dell'armatura tradizionale con un'armatura in fibre di carbonio. Questo materiale possiede delle migliori qualità tecniche e permette di realizzare strutture più leggere: il consumo di calcestruzzo può arrivare a essere otto volte inferiore rispetto al tradizionale calcestruzzo armato [13]. Anche se il calcestruzzo armato con fibre di carbonio risulta più costoso di quello armato con tondini d'acciaio, il minor consumo di materiale lo rende comunque economicamente competitivo. Per di più si ha anche un guadagno in termini di spazio abitabile. Dovendo realizzare delle strutture più fini e leggere diventa però necessario sviluppare nuovi metodi costruttivi. Il TRL del calcestruzzo armato con fibre di carbonio è compreso fra 7 e 8 [13].

Riciclo

Il riciclo del calcestruzzo è una pratica già diffusa al giorno d'oggi. Dai rifiuti provenienti dalle demolizioni vengono estratti gli aggregati (materiali minerali particellari come sabbia, ghiaia, argilla espansa), ma spesso durante il processo di riciclo si ha una degradazione della qualità di questi materiali. Gli aggregati da riciclo hanno quindi una resistenza inferiore rispetto a quelli di nuova produzione e vengono utilizzati per il rifacimento del manto stradale.

L'Istituto *Fraunhofer* ha sviluppato la tecnologia della **frammentazione elettrodinamica** per separare il calcestruzzo in ghiaia, sabbia e calce. Il materiale da scomporre viene inserito in una macchina dove è sottoposto a delle scariche elettriche che rompono i legami tra le fasi senza danneggiare le fibre. E' però necessaria un'elevata quantità di energia per la generazione delle scariche elettriche, per il trasporto e il trattamento dei materiali. Il TRL di tale tecnologia è pari a 7 [13].

Un'altra tecnica di riciclaggio consiste nel **recupero degli ossidi di calcio non carbonati**, che possono essere utilizzati per sostituire parzialmente il calcare nei forni dove viene

prodotto il clinker. Questa metodologia è ancora in fase di studio, ma può contribuire a ridurre le emissioni di processo del 20% [12]. Il TRL di questa strategia è pari a 6 [15].

L'*ETP Clean Energy Technology Guide* [15] riporta che fino al 50% del cemento non viene idratato durante il processo di stagionatura. Sono in corso di sviluppo dei nuovi macchinari per lo smantellamento degli edifici che permettano di **recuperare il cemento non idratato** e di utilizzarlo nella produzione di nuovo cemento. Queste tecnologie hanno un TRL pari a 9 [15] e vengono sfruttate dalle aziende *Rutte Group* e *New Horizon Urban Mining* per la produzione di un legante a base di cemento non idratato chiamato *Freement*. Questo materiale è stato brevettato nel 2011 e un primo prototipo è stato sviluppato nel 2013.

2.1.2.4 Cattura della CO₂

Vi sono diverse alternative disponibili per la cattura dell'anidride carbonica, basate principalmente sulla post-combustione. La cattura pre-combustione permette di catturare solo le emissioni prodotte durante la combustione, di conseguenza non è adatta all'industria cementizia. Il TRL degli impianti illustrati nei prossimi paragrafi è riferito al settore cementizio.

Per la cattura post-combustione è possibile sfruttare l'**assorbimento chimico** tramite solventi a base di ammine. Tale sistema può essere integrato agli altiforni dove viene prodotto il clinker, ma il limite di questa metodologia risiede nel fatto che la concentrazione di anidride carbonica nei gas combustibili non è particolarmente elevata. L'assorbimento chimico ha un TRL pari a 7 [15]¹⁶.

Un'altra tipologia di cattura post-combustione è quella basata sull'**adsorbimento fisico**, che prevede l'uso di particolari materiali adsorbenti. Questi impianti vengono integrati ai forni dove viene prodotto il clinker e i materiali adsorbenti impiegati sono in grado di catturare e rilasciare in circa un minuto l'anidride carbonica, a differenza di altre tecnologie dove sono necessarie addirittura ore per imprigionare il biossido di carbonio. Il TRL dell'adsorbimento fisico è pari a 6 [15]¹⁷.

L'anidride carbonica può essere separata dal flusso di off-gas mediante l'impiego di **membrane polimeriche**. Per ora sono state fatte solo delle prove in laboratorio e questo

¹⁶ Nel 2016 *Norcem* ha avviato il progetto *Brevik* per testare le potenzialità di questa tipologia di cattura nei cementifici. Nel 2018 *Anhui Conch* ha lanciato un progetto per catturare fino a 50 kt di anidride carbonica all'anno utilizzando l'assorbimento chimico [15]. Nel 2019 *Dalmina Cement* ha annunciato di voler intraprendere una dimostrazione su vasta scala di processi di cattura post-combustione tramite assorbimento chimico in un suo impianto dell'India. L'obiettivo è quello di catturare 0.5 Mt di biossido di carbonio all'anno [15].

¹⁷ Nel 2019 in Canada sono iniziati i primi test per verificare le potenzialità della cattura basata sull'adsorbimento fisico: il progetto *CO2MENT* di *Svante* ha dato dei buoni risultati. All'inizio del 2020 *Svante*, *LafargeHolcim*, *Oxy Low Carbon Ventures* e *Total* hanno presentato un progetto congiunto per studiare la fattibilità e i costi necessari per realizzare un impianto su scala commerciale in Canada. L'obiettivo è quello di raggiungere un potenziale di cattura di 0.75 Mt di CO₂ all'anno [15].

sistema è ancora nelle prime fasi del suo sviluppo (TRL pari a 4) [15]. Il report *A sustainable future for the European Cement and Concrete Industry* [8] stima che il potenziale di cattura degli impianti CCS con membrane sia di 720 kg di CO₂ per tonnellata di clinker prodotto (per produrre una tonnellata di clinker vengono emesse in media 875 kg di CO₂ eq). L'impiego di membrane implica un elevato consumo di energia elettrica e, di conseguenza, i costi di produzione del cemento aumentano [8].

L'ossicombustione è una tecnica che prevede la combustione con ossigeno puro, anziché aria, in modo da ottenere negli off-gas un flusso di anidride carbonica quasi puro. Il report *Industrial Transformation 2050* [12] stima che con l'**ossicombustione** si possano raggiungere efficienze di cattura del 95%; il TRL di questa tecnologia è pari a 6 [15]¹⁸. Lo svantaggio dell'ossicombustione risiede nella necessità di avere un impianto ASU per la separazione dell'ossigeno dall'aria, che richiede un dispendio energetico di 0.2÷0.3 kWh/kg di ossigeno puro generato allo stato gassoso a pressione ambientale [40].

Il **calcium looping** è un sistema che permette di ridurre le emissioni facendo avvenire la calcinazione in presenza la particelle di calce molto calde, come illustrato in Figura 2.8.

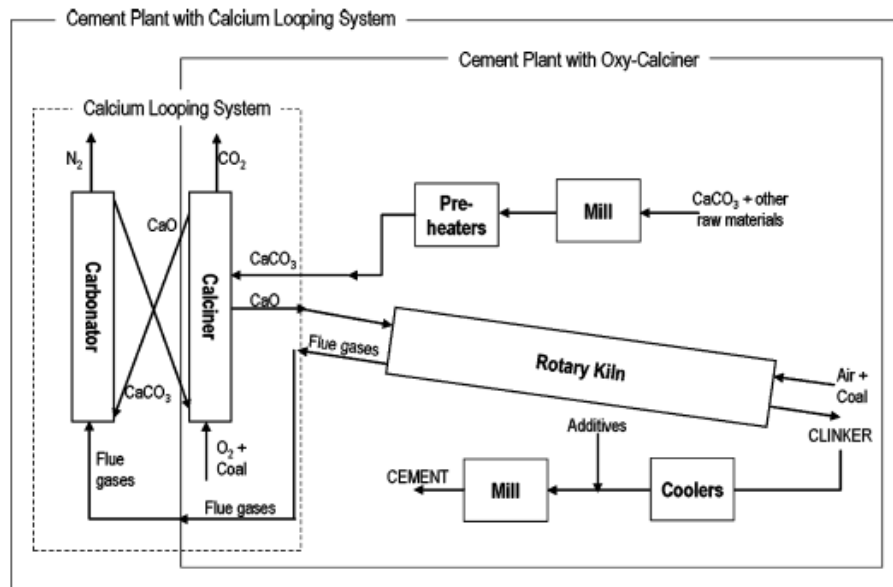
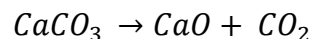


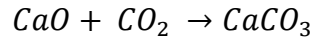
Figura 2.8 – Schematizzazione del sistema di calcium looping. (Fonte [41]).

Nel reattore di calcinazione (“*Calcliner*” in figura) entrano il calcare e il combustibile, in modo tale da far avvenire la reazione di calcinazione:



¹⁸ In Danimarca l'ossicombustione è stata implementata con successo a un altoforno dotato di pre-calcliner. *Cement Innovation for Climate* costruirà e gestirà un impianto di prova a ossicombustione su scala semi-industriale presso uno stabilimento nel sud della Germania.

Una parte della calce prodotta è inviata al forno dove viene prodotto il clinker (“*Rotary Kiln*”), mentre la restante parte viene inviata al reattore di carbonatazione (“*Carbonator*”). Qui la CaO reagisce con l’anidride carbonica contenuta negli off-gas in uscita dal forno, catturandola sotto forma di CaCO₃:



Il calcare viene poi reimpresso nel reattore di calcinazione, in modo tale da avere un processo ciclico. I vantaggi del calcium looping sono il minor consumo di energia rispetto alle altre tecnologie di cattura e la possibilità di essere integrato ai forni dove viene prodotto il clinker, permettendo quindi di continuare a utilizzare gli attuali stabilimenti produttivi. L’ossido di calcio tende a degradarsi durante il processo, di conseguenza è necessario rimuovere una parte di CaO e reintegrarla con del sorbente fresco. Questa tecnologia permette di catturare circa 800 kg di CO₂/t di clinker prodotto [8]. Il calcium looping abbinato agli stabilimenti cementizi ha un TRL pari a 7 [15].

La cattura post-combustione e lo stoccaggio del biossido di carbonico tramite **carbonatazione minerale** prevedono la reazione fra l’anidride carbonica e un minerale per formare carbonati minerali e silice. Questi minerali rimangono stabili per lunghi periodi di tempo e possono essere stoccati in miniere oppure possono essere impiegati nel settore edilizio. Il report *A sustainable future for the European Cement and Concrete Industry* [8] stima che questa tipologia di stoccaggio sia più costosa rispetto allo stoccaggio geologico a causa della maggiore richiesta di energia elettrica e termica; il potenziale di stoccaggio è di 750 kg di anidride carbonica/t di clinker prodotto.

Durante il progetto europeo LEILAC [42] è stata sviluppata una nuova tecnologia di cattura, chiamata **direct separation**, che permette di gestire separatamente le emissioni di processo e quelle derivanti dalla combustione. Le emissioni di processo sono costituite da un flusso quasi puro di CO₂, quindi, mantenendole separate dalle emissioni da combustione, è possibile raggiungere efficienze di cattura quasi del 100% [12]. Per ottenere ciò il calcare viene riscaldato indirettamente in appositi reattori in acciaio (Figura 2.9).

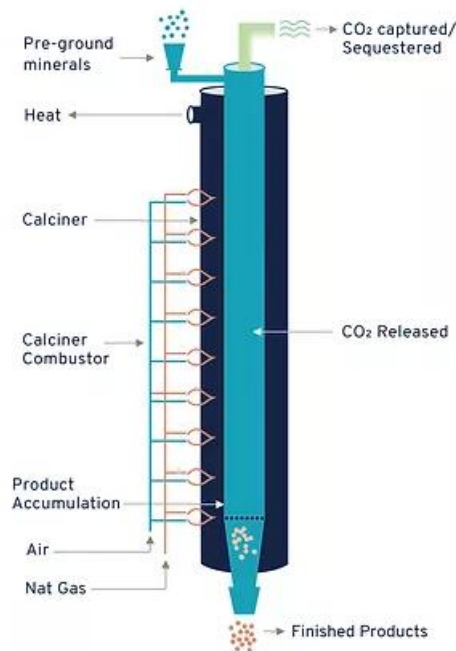


Figura 2.9 – Reattore di calcinazione impiegato nella direct separation. (Fonte [42]).

La direct separation ha il vantaggio di non richiedere una grande quantità di energia aggiuntiva e nemmeno investimenti eccessivamente elevati. Le emissioni legate ai combustibili possono essere invece eliminate attraverso l'elettificazione. Il TRL di questa tecnologia è pari a 6 [15]¹⁹.

In Figura 2.10 si riporta il potenziale di riduzione delle emissioni di alcune delle tecnologie disponibili per la decarbonizzazione del settore cementizio. Nella Figura 2.10 sono presenti solo quelle tecnologie per cui si sono trovate informazioni riguardanti il potenziale di abbattimento delle emissioni. Nella Tabella 2.5 si riassumono le opzioni disponibili per la decarbonizzazione del settore industriale in esame.

¹⁹ La cattura post-combustione tramite alghe prevede che l'anidride carbonica venga utilizzata per l'alghicoltura, in modo tale da produrre biomassa, da utilizzare come combustibile. Questo sistema ha un costo compreso fra 30€ e 50€/tonnellata di CO₂ e ha un potenziale di cattura di 750 kg di CO₂/t di clinker [8]. Il principale limite di questa strategia è la necessità di avere grandi spazi per la coltivazione delle alghe. E' in corso di sviluppo un sistema alternativo, testato in laboratorio, per convertire elettrochimicamente il carbonato di calcio in idrossido di calcio (Ca(OH)₂) all'interno di un elettrolizzatore. Durante questo processo viene prodotto un flusso di gas contenente CO₂, che può essere catturata tramite impianti CCS. L'idrossido di calcio viene poi convertito nei silicati di calcio necessari per la produzione del cemento. Il TRL di questa tecnologia è pari a 3 [15].

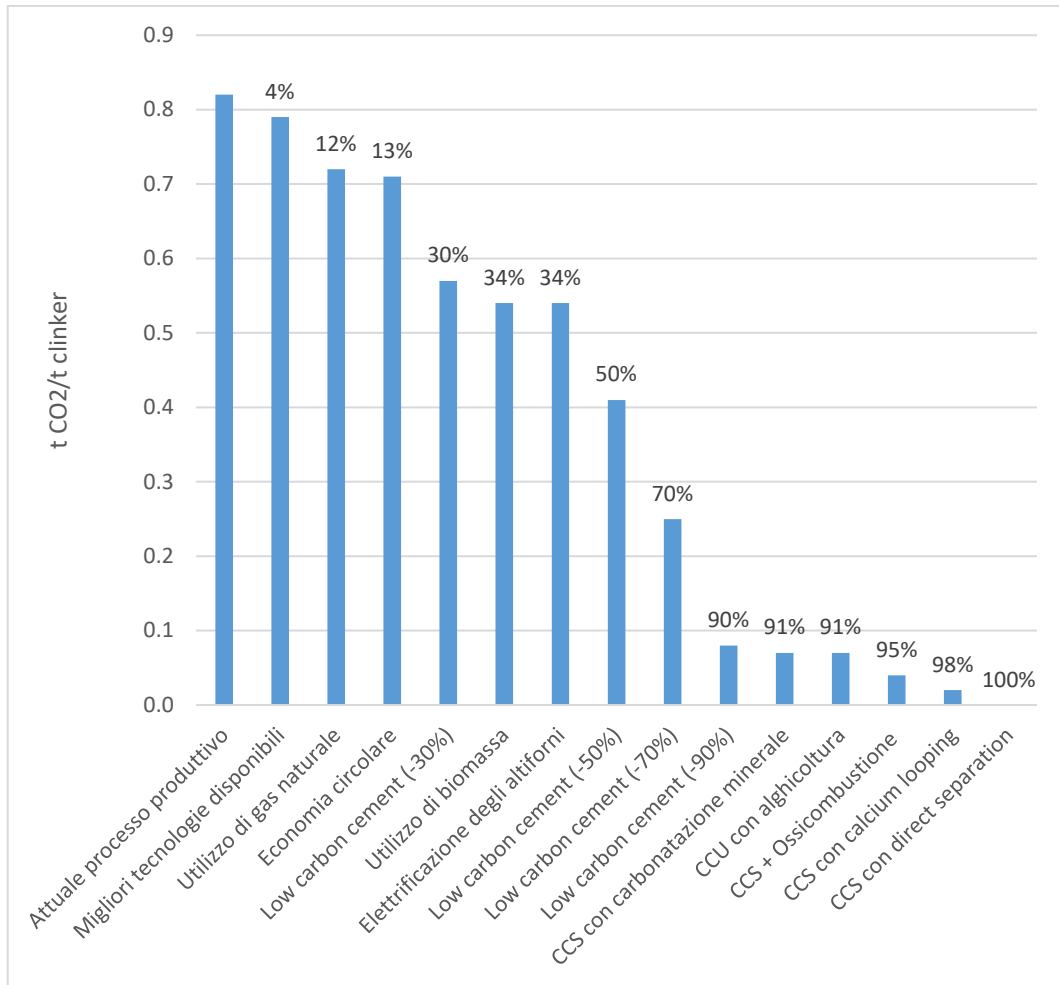


Figura 2.10 – Potenziale di riduzione delle emissioni di CO₂ di alcune delle tecnologie disponibili per la decarbonizzazione del settore cementizio. (Fonte [12]).

Capitolo 2

Tabella 2.5 - Riepilogo delle principali tecnologie e strategie alternative per la decarbonizzazione del settore cementizio.

Opzione	Opzione di riferimento attuale	TRL	Categoria di intervento	Risparmio energetico	Riduzione delle emissioni	Entrata prevista sul mercato
Altoforno a secco con recupero di calore			Efficienza energetica	17% ([13])		Già presente
Tecnologie di macinazione avanzate		6÷9 ([15])	Efficienza energetica			Entro pochi anni ([15])
Gas naturale	Carbone e petcoke		Fonti energetiche alternative		40% delle emissioni da combustione ([27])	Già presente ([10])
Biomassa	Carbone e petcoke		Fonti energetiche alternative			Già presente ([12])
Idrogeno	Carbone e petcoke	4 ([15])	Fonti energetiche alternative			
Impianti CSP	Carbone e petcoke	6 ([15])	Fonti energetiche alternative			2025 ([15])
Generatori al plasma	Carbone e petcoke	4 ([15])	Fonti energetiche alternative			
Microonde	Carbone e petcoke	4 ([15])	Fonti energetiche alternative	40% ([12])		
Pannelli di legno	Cemento Portland		Riduzione della domanda		85% ([12])	
Cemento <i>Aether</i>	Cemento Portland	8/9 ([13])	Materie prime alternative	15% ([13])	25%÷30% ([13])	Già presente ([13])
Calcium Sulfo Aluminate Cement	Cemento Portland		Materie prime alternative		20÷30% ([8])	Già presente ([8])

Capitolo 2

Opzione	Opzione di riferimento attuale	TRL	Categoria di intervento	Risparmio energetico	Riduzione delle emissioni	Entrata prevista sul mercato
Cemento <i>Celitement</i>	Cemento Portland	7 ([13])	Materie prime alternative	30÷40% ([13])	50% ([13])	2020 ([13])
Alkali activated binder	Cemento Portland	9 ([8])	Materie prime alternative		40÷80% ([8])	Già presente ([8])
Cemento <i>Solidia</i>	Cemento Portland	8/9 ([8])	Materie prime alternative	20% ([13])	70% ([13])	Già presente ([13])
Cemento a base di ossidi di magnesio	Cemento Portland	3 ([13])	Materie prime alternative		90% ([13])	
Calcestruzzo armato con fibre di carbonio	Calcestruzzo armato	7/8 ([13])	Materie prime alternative			2020 ([13])
Riciclaggio			Riduzione della domanda			
Cattura con assorbimento chimico		7 ([15])	Cattura della CO ₂			
Cattura con adsorbimento fisico		6 ([15])	Cattura della CO ₂			
Cattura con membrane polimeriche		4 ([15])	Cattura della CO ₂			
Cattura + ossicombustione		6 ([15])	Cattura della CO ₂			
Cattura con calcium looping		7 ([15])	Cattura della CO ₂			
Cattura con carbonatazione minerale			Cattura della CO ₂			

Capitolo 2

Opzione	Opzione di riferimento attuale	TRL	Categoria di intervento	Risparmio energetico	Riduzione delle emissioni	Entrata prevista sul mercato
Cattura con direct separation		6 ([15])	Cattura della CO ₂			

2.1.3 Scenari

Per l'industria cementizia italiana sono stati elaborati tre scenari di decarbonizzazione al 2050, nei quali si ipotizza di adottare alcune delle strategie proposte nei paragrafi precedenti. Si assume che entro il 2050 tutta l'elettricità sarà a emissioni zero. Nello Scenario 1 si ipotizza che nel 2050 la produzione di cemento aumenterà del 15% rispetto a quella del 2018 e che il fabbisogno termico verrà soddisfatto utilizzando idrogeno prodotto tramite elettrolisi dell'acqua. Nello Scenario 2 si ipotizza che saranno adottate le strategie volte alla riduzione della domanda e che in questo modo sarà possibile ridurre la produzione del 20%. In questo caso si ipotizza che entro il 2050 i cementi Portland I e II verranno sostituiti con i low carbon cements. Nello Scenario 3 si ipotizza che saranno adottate le strategie dell'economia circolare, che i cementi Portland I e II saranno sostituiti con i low carbon cements e che il fabbisogno termico verrà soddisfatto utilizzando idrogeno prodotto tramite elettrolisi dell'acqua. Queste ipotesi vengono riassunte in Tabella 2.6.

Tabella 2.6 – Ipotesi relative agli scenari di decarbonizzazione.

Scenario	Fonte di calore	Economia circolare	Low carbon cements	Cattura emissioni di processo	Cattura emissioni da combustione
1	idrogeno	no	no	sì	no
2	combustibili tradizionali	sì	sì	sì	sì
3	idrogeno	sì	sì	sì	no

2.1.3.1 Scenario 1

In questo scenario si ipotizza che non saranno implementate le strategie per la riduzione della domanda e che quindi la produzione di cemento in Italia aumenterà dell'8% rispetto al 2018, arrivando a 20.9 Mt nel 2050, in coerenza con i dati forniti da ISPRA. Tale previsione non tiene conto della crisi innescata dalla pandemia da COVID19. Si ipotizza che l'intero fabbisogno termico verrà soddisfatto mediante l'idrogeno (da energia rinnovabile), in modo tale da eliminare le emissioni derivanti dalla combustione. Per le emissioni di processo sarà necessario adottare impianti di cattura. Il fabbisogno termico aumenterà, passando da 16.6 TWh nel 2018 a 18.2 TWh nel 2050, che corrisponderà a una richiesta di 546 kt di idrogeno²⁰. In Tabella 2.7 si riporta una stima del fabbisogno energetico al 2050 e il potenziale di riduzione delle emissioni.

²⁰ Si considera un PCI dell'idrogeno pari a 120 MJ/kg.

Tabella 2.7 - Potenziale di riduzione del fabbisogno energetico - Scenario 1.

	2018	2050	u.d.m.
Fabbisogno elettrico	2.2	2.4	TWh
Fabbisogno termico	16.6	18.2	TWh
Δ Fabbisogno elettrico	+8%		
Δ Fabbisogno termico	+10%		
	2018	2050	u.d.m.
Emissioni CO₂ eq	12.2	7.5	Mt
Δ Emissioni CO₂ eq	-39%		
HP: Efficienza di cattura del 91%			
	u.d.m.		
Emissioni catturate	6.8	Mt	
Emissioni rimanenti	0.7	Mt	

2.1.3.2 Scenario 2

In questo scenario si ipotizza che verranno implementate le strategie dell'economia circolare. Il report [12] stima che con queste soluzioni sia possibile ridurre la produzione del 39%, mentre la relazione [43] ipotizza che sia possibile ridurla solo dell'1.2%. Questi dati sono relativi all'Unione Europea, ma si ritiene che possano essere validi anche per l'Italia. Si ipotizza quindi che la produzione diminuirà del 20% rispetto al 2018, arrivando a 15.4 Mt nel 2050. Inoltre si ipotizza che entro il 2050 il cemento *Portland* verrà sostituito con i low carbon cements *Solidia*, *Aether* e con il Calcium Sulfo Aluminate Cement. *Solidia* e il Calcium Sulfo Aluminate Cement verranno utilizzati per la produzione di elementi prefabbricati, che costituiscono il 28% del mercato del cemento [20]. Complessivamente solo i low carbon cements permettono di dimezzare le emissioni, di ridurre del 20% il fabbisogno elettrico e del 56% quello termico. Per produrre i low carbon cements è infatti necessaria una minore quantità di calcare e durante la fase di cottura vengono raggiunte delle temperature inferiori. In questo scenario si prevede che nel 2050 verranno ancora emesse 6 Mt di CO₂ eq e per questo motivo saranno necessari impianti di cattura, sia per le emissioni di processo che per quelle da combustione. In Tabella 2.8 si riporta la proporzione di sostituzione del Portland con i low carbon cements, mentre in Tabella 2.9 si riporta la variazione del fabbisogno di energia elettrica e termica e la riduzione delle emissioni previsti in questo scenario. Il fabbisogno termico potrà essere soddisfatto mediante l'utilizzo di gas naturale sintetico o biometano.

Tabella 2.8 - Sostituzione del cemento *Portland* con i low carbon cements.

Tipologia di cemento	2018	2050
	Mt	Mt
CEM I	3	-
CEM II	13.8	-

Tipologia di cemento	2018	2050
<i>Solidia</i>	-	1.9
<i>Aether</i>	-	9.7
Calcium Sulfo Aluminate Cement	-	1.9

Tabella 2.9 – Stima del fabbisogno elettrico e termico e del potenziale di riduzione delle emissioni.

	2018	2050	u.d.m.
Fabbisogno elettrico	2.2	1.8	TWh
Fabbisogno termico	16.6	6.2	TWh
Δ Fabbisogno elettrico	-20%		
Δ Fabbisogno termico	-63%		
	2018	2050	u.d.m.
Emissioni CO₂ eq	12.2	6	Mt
Δ Emissioni CO₂ eq	-50%		
HP: Efficienza di cattura del 91%			
			u.d.m.
Emissioni catturate	5.5		Mt
Emissioni rimanenti	0.5		Mt

2.1.3.3 Scenario 3

Anche in questo scenario si ipotizza che verranno adottate le strategie dell'economia circolare e quindi la produzione di cemento sarà pari a 15.4 Mt nel 2050. Inoltre si ipotizza che entro tutti i cementifici adotteranno le migliori tecnologie disponibili e che tutto il cemento *Portland* verrà sostituito con i low carbon cements *Solidia*, *Aether* e con il Calcium Sulfo Aluminate Cement, con le medesime proporzioni ipotizzate nello Scenario 2. Si ipotizza che entro il 2050 l'intero fabbisogno termico dei cementifici verrà soddisfatto mediante l'idrogeno. In Tabella 2.10 si riporta una stima del fabbisogno elettrico e termico e la riduzione delle emissioni previsti in questo scenario. Per le 3.3 Mt di CO₂ eq di processo rimanenti si prevede l'adozione di impianti di cattura. Un fabbisogno termico di 6.2 TWh comporta un consumo annuale di 186 kt di idrogeno²¹.

Tabella 2.10 – Stima del fabbisogno elettrico e termico e della riduzione delle emissioni relativi allo Scenario 3.

	2018	2050	u.d.m.
Fabbisogno elettrico	2.2	1.8	TWh
Fabbisogno termico	16.6	6.2	TWh
Δ Fabbisogno elettrico	-20%		
Δ Fabbisogno termico	-63%		

²¹ Si considera un PCI dell'idrogeno pari a 120 MJ/kg.

	2018	2050	u.d.m
Emissioni CO₂ eq	12.2	3.3	Mt
Δ Emissioni CO₂ eq	-73%		
HP: Efficienza di cattura del 91%			
			u.d.m
Emissioni catturate	3		Mt
Emissioni rimanenti	0.3		Mt

2.1.3.4 Confronto

La Figura 2.11 mostra i fabbisogni termici ed elettrici relativi agli scenari presentati. Nello Scenario 1 si ha un aumento dei fabbisogni energetici a causa dell'incremento di produzione. I fabbisogni degli Scenari 2 e 3 sono identici, in quanto l'unica differenza fra i due scenari è la fonte energetica utilizzata per soddisfare il fabbisogno termico. Grazie alle strategie volte alla riduzione della produzione di clinker è possibile più che dimezzare il fabbisogno termico e ridurre del 20% quello elettrico.

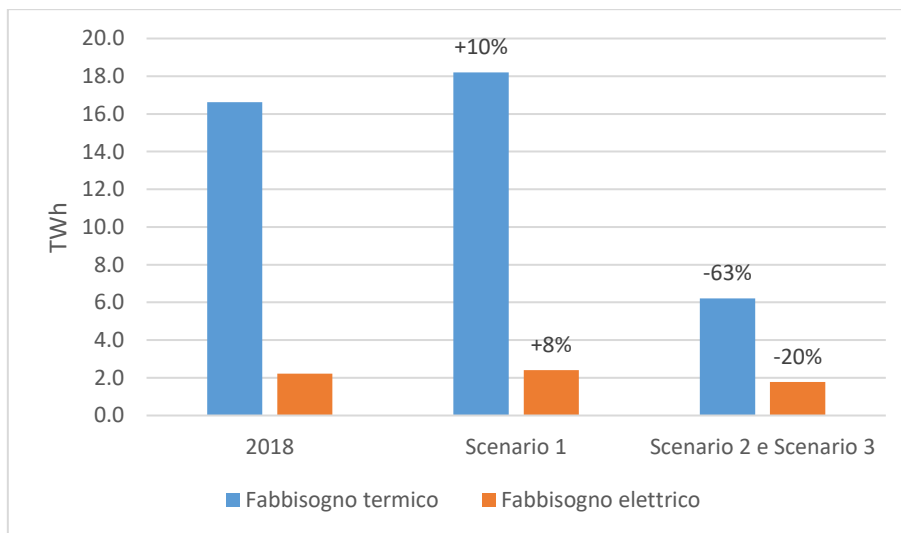


Figura 2.11 – Fabbisogno termico ed elettrico relativi agli scenari illustrati.

La Figura 2.12 riassume il potenziale di abbattimento delle emissioni (esclusi gli impianti di cattura). Come emerge dal grafico, utilizzando l'idrogeno per soddisfare il fabbisogno termico (Scenario 1) è possibile ridurre le emissioni solo del 39%. Per dimezzarle è possibile adottare le strategie volte alla riduzione della domanda, in particolare la produzione di low carbon cements (Scenario 2). Per ottenere una sostanziale riduzione è possibile combinare insieme fra loro molte soluzioni (Scenario 3), anche se in ogni caso in questo settore industriale l'adozione di impianti per la cattura dell'anidride carbonica è fondamentale per raggiungere la completa decarbonizzazione.

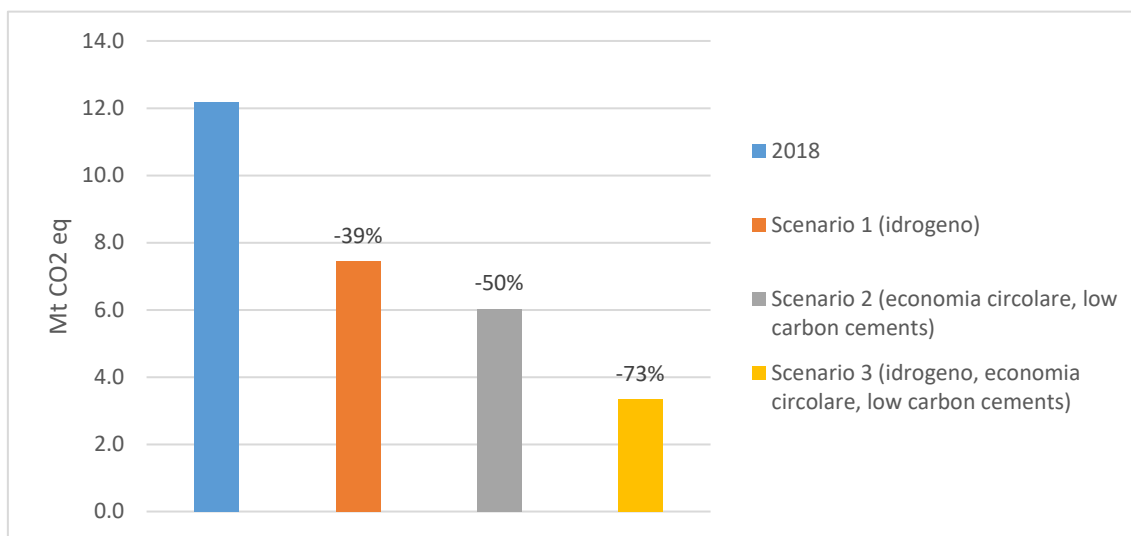


Figura 2.12 - Potenziale di riduzione delle emissioni relativo agli scenari presentati.

2.2 Vetro

Il vetro è un materiale costituito principalmente da derivati del silicio, di larghissimo impiego in molteplici applicazioni. I prodotti in vetro possono essere suddivisi in tre categorie:

- Vetro piano (19% della produzione nazionale in massa nel 2018);
- Vetro cavo (79%);
- Lana e filati di vetro (2%) [44].

La produzione europea di vetro è diminuita del 3% dal 2007 al 2018 (da 37.5 Mt nel 2007 a 36.5 Mt nel 2018), mentre nel medesimo periodo la produzione nazionale è aumentata del 2%, passando dal 5.3 Mt nel 2007 a 5.4 Mt nel 2018 ([44], [45] e [46]). Nel 2018 l'Italia ha contribuito al 15% della produzione europea e nel medesimo anno a livello nazionale sono state importate 2.2 Mt di vetro e ne sono state esportate 1.5 Mt [44]. Questo settore dà lavoro a circa 30000 persone e nel 2018 ha registrato un fatturato pari a 5152 milioni di euro ([10] e [16]). I dati forniti da ISPRA riportano che nel 2018 in Italia gli stabilimenti dove viene prodotto il vetro hanno emesso 2.7 Mt di CO₂ eq; la localizzazione geografica di tali emissioni è rappresentata in Figura 2.13.

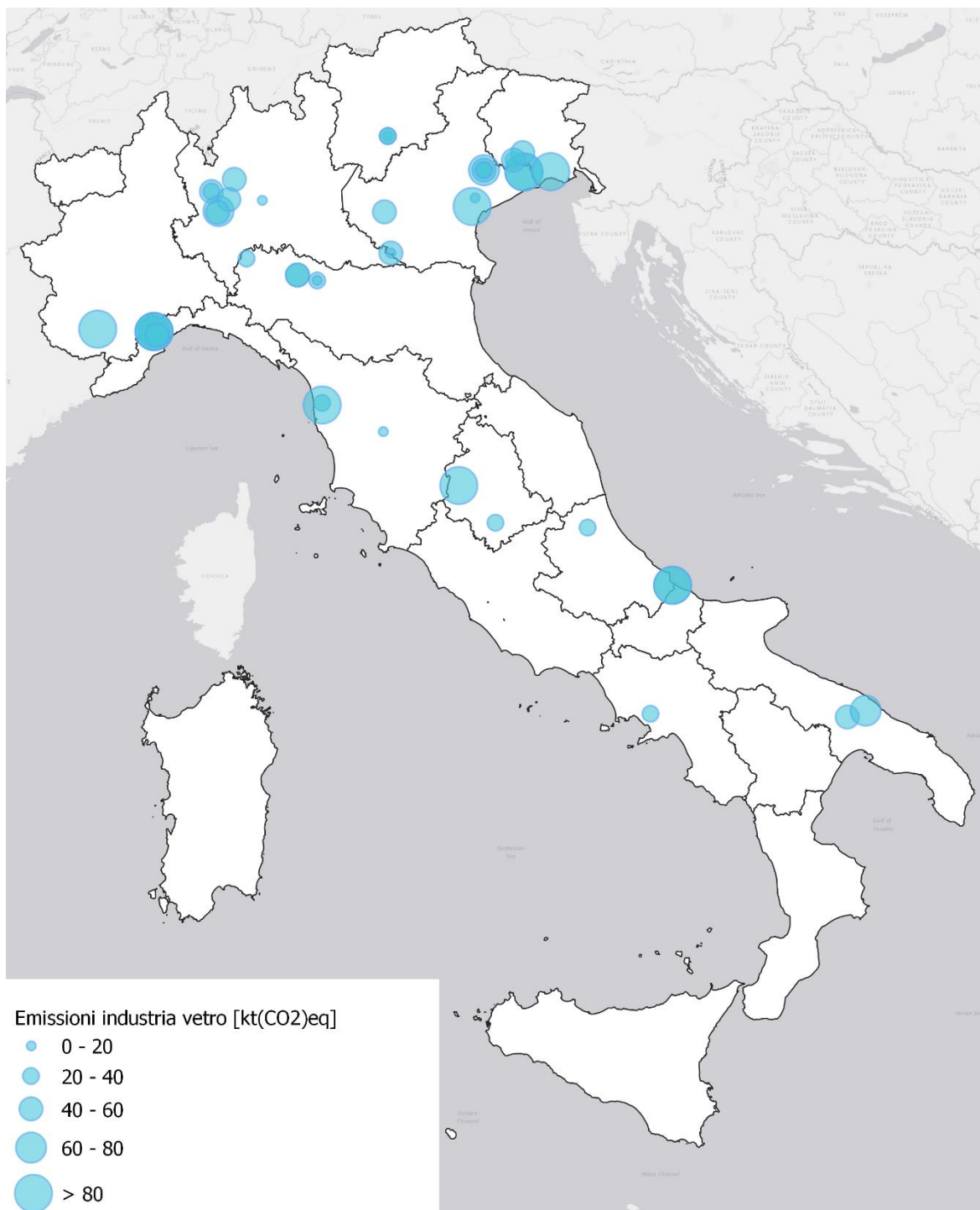


Figura 2.13 - Localizzazione geografica dei siti di emissione. Elaborazione grafica basata sui dati forniti da ISPRA.

2.2.1 Processo produttivo attuale

Il processo produttivo del vetro può essere suddiviso in quattro fasi:

1. Preparazione della carica e miscelazione. Durante questa fase le materie prime (principalmente costituite da sabbia) vengono frantumate, dosate e miscelate.

2. Fusione e affinazione. La carica viene fusa in una fornace dove viene mantenuta una temperatura di 1575°C. In Europa i forni industriali sono alimentati principalmente con olio combustibile o gas naturale. Questa fase richiede il 75% dell'energia termica complessivamente utilizzata durante tutto il processo produttivo [13].
3. Formatura. Questa fase avviene sempre nel forno utilizzato per la fusione, ma la temperatura è inferiore e varia a seconda della tipologia di prodotto finale da realizzare (1100°C per il vetro piano e tra i 1000°C e i 1200°C per il vetro cavo). Per produrre il vetro cavo possono essere impiegate la tecnica di colata e stampaggio oppure quella di soffiatura, mentre per produrre i vetri piani si utilizza il processo Pilkington²².
4. Lavorazioni finali, come trattamenti superficiali, trattamenti di fluorurazione interna²³, ricottura e taglio. La ricottura serve per aumentare la resistenza meccanica del vetro e avviene in forni alimentati a gas naturale oppure elettrificati. Durante questo processo il vetro viene portato a una temperatura di 550°C e viene poi raffreddato lentamente.

2.2.1.1 Produzione, richiesta energetica ed emissioni

Secondo le elaborazioni riportate in Tabella 2.11, che partono dalla produzione di vetro in Italia nel 2018 e combinano il dato con le emissioni derivanti da questo settore industriale, in media in Italia per produrre una tonnellata di vetro vengono emessi circa 498 kg di CO₂ eq. In Figura 2.14 vengono riassunti i calcoli svolti per stimare le emissioni specifiche e i fabbisogni energetici delle singole fasi del processo produttivo; la Figura 2.15 rappresenta i fabbisogni energetici mediante un Sankey diagram.

²² Durante questo processo la massa vetrosa viene fusa all'interno di una fornace e viene poi fatta passare all'interno di un bagno di stagno. Il vetro galleggia sullo stagno e si distribuisce al di sopra di esso. Si forma così una lastra di vetro, il cui spessore è compreso fra 0.4 mm e 25 mm. Questi diversi spessori si ottengono facendo variare la velocità con cui il vetro viene estratto dal bagno di stagno.

²³ Per fluorurazione si intende la ricopertura delle superfici delle lenti degli strumenti ottici con uno strato di fluoruro o di criolite per ridurre le riflessioni.

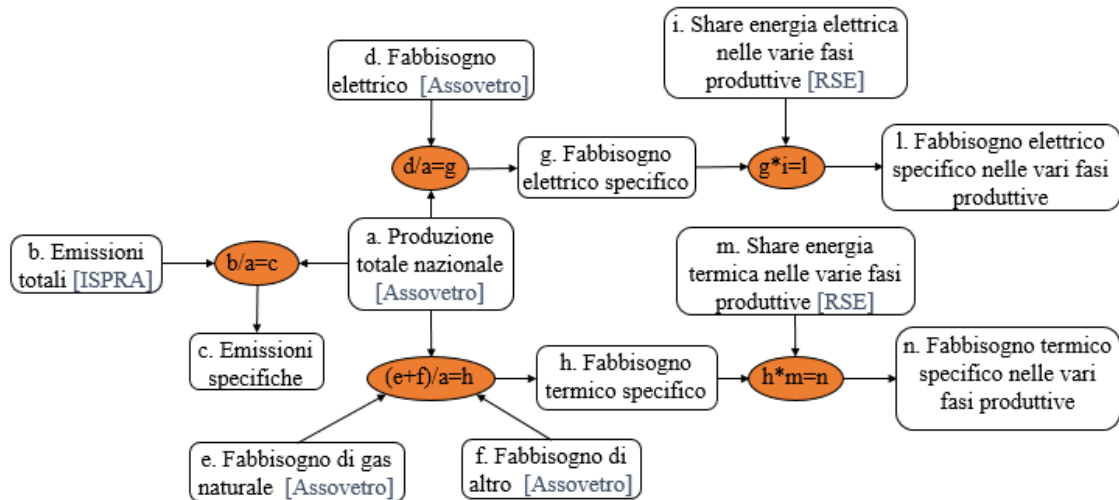


Figura 2.14 - Schema dei calcoli svolti per la stima delle emissioni specifiche e dei fabbisogni energetici delle varie fasi del processo produttivo.

Tabella 2.11 – Produzione, emissioni e fabbisogno energetico relativi alla produzione di vetro nel 2018 in Italia.

id			u.d.m	Fonte	
a	Produzione vetro	5.4	Mt	ASSOVETRO [44]	
b	Emissioni CO₂ eq²⁴	2.7	Mt		
c	Emissioni specifiche CO₂ eq	0.5	t CO ₂ eq/t vetro	c=b/a	
d	Fabbisogno di energia elettrica ²⁵	3	TWh	ASSOVETRO [47]	
e	Fabbisogno di gas naturale	7.2	(89%)		TWh
f	Fabbisogno di altro (olio combustibile, gasolio)²⁶	0.9	(11%)		TWh
g	Fabbisogno elettrico specifico	560.2	kWh/t	g=d/a	
h	Fabbisogno termico specifico	1485.1	kWh/t	h=(e+f)/a	

²⁴ Dato fornito da ISPRA su elaborazioni EU-ETS.

²⁵ Nella relazione [29] di TERNA è riportato un fabbisogno di energia elettrica aggregato per ceramica e vetro pari a 4.5 TWh.

²⁶ Dal database JRC-IDEES [28] emerge invece che nel 2015 il calore è stato generato per il 99.8% con gas naturale e per lo 0.2% con diesel. La fonte principale da cui provengono i dati di JRC-IDEES è il bilancio di energia fornito da EUROSTAT. Tuttavia EUROSTAT fornisce i dati in forma aggregata per tutto il settore dei minerali non metallici. I valori relativi alla sola produzione di vetro sono delle stime fatte da JRC-IDEES sulla base delle statistiche strutturali sulle imprese di EUROSTAT, delle statistiche sul volume della produzione industriale (in particolare quelle di USGS), di documenti BREF e di fonti nazionali.

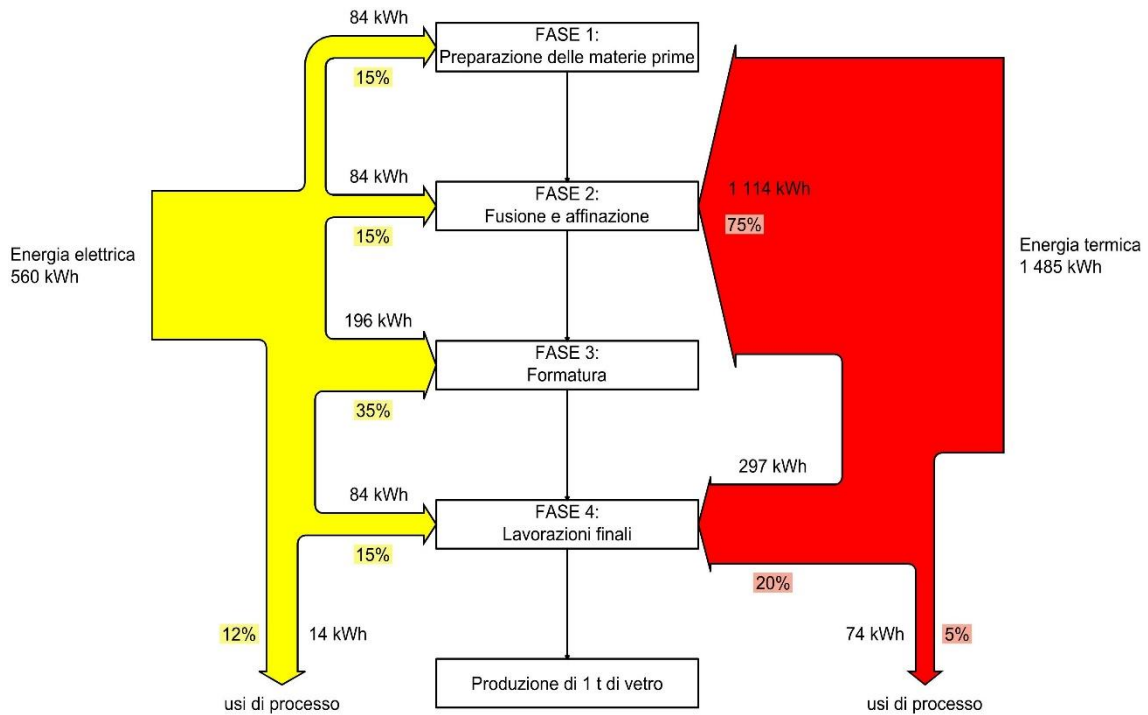


Figura 2.15 – Sankey diagram relativo alla processo produttivo del vetro. Elaborazione grafica basata su informazioni provenienti da RSE [10], per quanto riguarda gli share di energia elettrica e termica assorbiti dalle varie fasi del processo produttivo, ASSOVETRO [44] e [47], per la stima del fabbisogno elettrico e termico specifico.

2.2.2 Soluzioni di decarbonizzazione

Le soluzioni per la decarbonizzazione delle vetrerie possono essere raggruppate nelle seguenti categorie:

- Efficienza energetica;
- Fonti energetiche alternative;
- Riduzione della domanda;
- Cattura dell'anidride carbonica.

Le varie tecnologie possono essere combinate fra loro, ma nel seguito ciascuna categoria è analizzata individualmente.

2.2.2.1 Efficienza energetica

Per migliorare l'efficienza energetica del processo produttivo del vetro è possibile adottare i recuperatori di calore; sono inoltre disponibili nuove tecnologie di rilevamento guasti per monitorare la fase di colatura.

Migliori tecnologie disponibili

Le migliori tecnologie già oggi disponibili sono i recuperatori di calore, per il preriscaldamento dei rottami di vetro, e l'utilizzo di materiali ceramici per l'isolamento delle fornaci.

Materiali ceramici di elevata qualità possono essere usati per l'isolamento termico dei forni. Sono in grado di resistere alle condizioni estreme di temperatura e all'attacco chimico a cui sono sottoposti. Nei forni industriali che operano oltre i 1000° vengono impiegati materassini in fibra ceramica.

I **recuperatori di calore** permettono di recuperare il calore dei gas combusti provenienti dalle fornaci e di utilizzarlo per preriscaldare i rottami di vetro. In questo modo è possibile ridurre dal 10% al 15% il fabbisogno termico del forno di fusione e del 7% le emissioni ([13] e [48]). Questo sistema ha un TRL pari a 8 e ha un costo inferiore ai 50 €/t di capacità produttiva annua [13]. Bisogna però tenere in considerazione che la quantità di calore recuperabile è progressivamente destinata a diminuire a causa dell'elettificazione delle fornaci e al miglioramento dell'isolamento dei forni.

Nuove tecnologie di rilevamento guasti

In seguito alla fase di colatura il vetro viene raffreddato. Può capitare che il materiale abbia dei difetti e sia quindi necessario fonderlo di nuovo: a ogni colatura circa il 15% ÷ 20% del vetro deve essere rifiuto [13]. Sono disponibili delle tecnologie in grado di monitorare la qualità del vetro e rilevarne eventuali difetti. Queste soluzioni sono basate sull'impiego della spettroscopia²⁷ e sono implementabili alle linee produttive già in uso, ma il loro TRL è solo pari a 2/3 [13].

2.2.2.2 Fonti energetiche alternative

Per la generazione del calore necessario durante il processo produttivo è possibile utilizzare il **biometano**. L'utilizzo del biometano nelle fornaci delle vetrerie ha un TRL pari a 9 e permette di ridurre del 75% le emissioni non neutre di anidride carbonica, in quanto la fornace assorbe il 75% dell'input di energia termica [13].

Le fornaci alimentate con olio combustibile o gas naturale possono essere sostituite con **forni elettrificati**. Con l'elettificazione dei forni si ottiene una riduzione del 75% delle emissioni [13]. Il TRL di questa tecnologia è di 6/7 e il suo costo è compreso fra 100 € e 500 €/t di capacità produttiva annua [13]. La relazione [13] riporta che le fornaci elettrificate sono energeticamente più efficienti in quanto viene disperso meno calore e di conseguenza è possibile ottenere un risparmio di energia pari al 56%.

²⁷ Per spettroscopia si intende la misurazione e lo studio di uno spettro elettromagnetico.

2.2.2.3 Riduzione della domanda

Il **riciclo** del vetro è una pratica già largamente diffusa perché questo materiale non ha problemi di degrado durante i relativi processi. La fusione dei rifiuti di vetro per la produzione di nuovi oggetti richiede il 15% di energia in meno e le emissioni derivanti dai combustibili utilizzati per la generazione del calore necessario per fondere il vetro possono essere ridotte del 41% [13]. Già nel 2011 in Italia il 68% dei contenitori in vetro venivano riciclati [10]. Il TRL del riciclaggio del vetro è pari a 9 [13].

2.2.2.4 Cattura della CO₂

Nelle vetrerie è possibile utilizzare l'**ossicombustione** per migliorare l'efficienza del processo di combustione del gas naturale e del biometano. In questo modo è possibile utilizzare meno combustibile a parità di calore generato e ciò permette di ridurre le emissioni del 17%÷20% [13]. Il TRL di questa tecnologia è pari a 7 [13]. Abbinando l'ossicombustione agli impianti di cattura è possibile arrivare a una riduzione delle emissioni del 75%; il TRL di questa tecnologia, impiegata in abbinamento alla produzione di vetro, è compreso fra 5 e 8 [13].

La Tabella 2.12 riassume le opzioni disponibili per la decarbonizzazione del processo produttivo del vetro.

Tabella 2.12 – Riepilogo delle principali tecnologie e strategie alternative per la decarbonizzazione delle industrie vetrarie. (Fonte [13]).

Opzione	Opzione di riferimento attuale	TRL	Categoria di intervento	Risparmio energetico	Riduzione delle emissioni	Entrata prevista sul mercato
Materiali ceramici per l'isolamento dei forni	Fornaci a gas naturale		Efficienza energetica			Già presente
Recuperatori di calore	Fornaci a gas naturale	8	Efficienza energetica	10% (Forno fusorio)	7%	Già presente
Nuove tecnologie di rilevamento guasti		2/3	Efficienza energetica	15%		
Biometano	Fornaci a gas naturale	9	Fonti energetiche alternative		75%	Già presente
Elettificazione	Fornaci a gas naturale	6/7	Fonti energetiche alternative	56%	75%	2020/2030
Riciclaggio	Preparazione e fusione di nuove materie prime	9	Riduzione della domanda	15%	41%	Già presente
Cattura + ossicombustione	Fornaci a gas naturale	5÷8	Cattura della CO ₂		75%	

2.2.3 Scenari

Per l'industria vetraria italiana sono stati elaborati tre scenari di decarbonizzazione, nei quali vengono combinate alcune delle soluzioni presentate nei paragrafi precedenti. Si assume che entro il 2050 tutta l'elettricità sarà a emissioni zero. Nello Scenario 1 si considera una produzione nazionale di vetro al 2050 pari a 6 Mt. Inoltre si ipotizza che tutte le aziende del settore adotteranno i recuperatori di calore nei propri stabilimenti. Nello Scenario 2 si ipotizza che verranno messe in pratica le strategie volte alla riduzione della domanda e che queste comporteranno una riduzione della produzione del 3% rispetto al 2018. Si assume inoltre che gli stabilimenti con una produzione inferiore alle 120 kt annue adotteranno le fornaci elettrificate, mentre quelli con una produzione superiore installeranno i recuperatori di calore. Nello Scenario 3 si ipotizza che verranno adottate le strategie volte alla riduzione della domanda e che tutti gli stabilimenti adotteranno le nuove tecnologie di rilevamento guasti e le fornaci elettrificate. In Tabella 2.13 si riassumono tutte queste assunzioni.

Tabella 2.13 – Ipotesi relative agli scenari di decarbonizzazione.

Scenario	Recuperatori di calore	Nuove tecnologie di rilevamento guasti	Fornaci elettrificate	Riduzione della domanda	Cattura delle emissioni
1	sì	no	no	no	sì
2	sì	no	sì	sì	sì
3	no	sì	sì	sì	sì

2.2.3.1 Scenario 1

In questo scenario si ipotizza che la produzione di vetro arriverà a 6 Mt nel 2050, in accordo con i dati forniti da ISPRA. Si ipotizza inoltre che entro il 2050 tutti gli stabilimenti adotteranno i recuperatori di calore. Tale soluzione permette di ridurre del 7% le emissioni e del 10% il consumo di combustibili del forno fusorio ([13] e [48]). La Tabella 2.14 riporta una stima del fabbisogno elettrico, del consumo di combustibili e della riduzione delle emissioni ottenibile con i recuperatori di calore. In questo scenario aumenteranno sia i fabbisogni energetici sia le emissioni, nonostante si ipotizza che verranno adottati i recuperatori di calore. Questo è dovuto al fatto che si prevede un aumento della produzione dell'11%. Per le 2.8 Mt di CO₂ eq sarà necessaria l'adozione di impianti di cattura. Il fabbisogno termico potrà essere soddisfatto mediante l'utilizzo di gas naturale sintetico, biometano oppure anche di idrogeno, come riportato nell'articolo [50]. Dato che i recuperatori di calore hanno un costo di circa 50 €/t di capacità annua, si stima che in questo scenario sarà necessario un investimento di 308 M€.

Tabella 2.14 – Stima del fabbisogno elettrico e termico e delle emissioni relativi allo Scenario 1.

	2018	2050	u.d.m
Fabbisogno elettrico	3	3.4	TWh
Consumo di combustibili	8.1	8.3	TWh
Δ Fabbisogno elettrico	+11%		
Δ Consumo di combustibili	+3%		
	2018	2050	u.d.m
Emissioni CO₂ eq	2.7	2.8	Mt
Δ Emissioni CO₂ eq	+3%		
HP: Efficienza di cattura del 75%			
			u.d.m
Emissioni catturate	2.1		Mt
Emissioni rimanenti	0.7		Mt

2.2.3.2 Scenario 2

In questo scenario si ipotizza che verranno adottate le strategie di economia circolare, che permetteranno di ridurre la produzione di vetro del 3% rispetto al 2018. Tale dato viene fornito dal report [43] per l'Unione Europea, ma, in mancanza di informazioni più precise a livello nazionale, viene ritenuto valido anche per l'Italia. Si prevede quindi che nel 2050 verranno prodotte 5.3 Mt di vetro. Attualmente i forni elettrificati hanno una bassa capacità produttiva (circa di 100 t/g), di conseguenza in questo scenario si ipotizza che solo gli stabilimenti più piccoli adotteranno l'elettrificazione. In particolare si assume che entro il 2050 tutti gli stabilimenti con una produttività attuale inferiore alle 120 kt annue adotteranno le fornaci elettrificate. Dato che una capacità di 100 t/g equivale a una produzione annuale di 36.5 kt, gli stabilimenti con un livello di produttività compreso fra 36.5 kt e 120 kt dovranno installare più fornaci elettrificate. Si ipotizza che gli stabilimenti più grandi adotteranno solamente i recuperatori di calore. L'elettrificazione dei forni permette di ridurre del 75% le emissioni e del 56% i consumi energetici della fornace [13]. In Tabella 2.15 si riporta una stima del consumo di combustibili, del fabbisogno elettrico e la riduzione delle emissioni relative allo Scenario 2. Il consumo di combustibili deriverà dagli stabilimenti che adotteranno i recuperatori di calori e anche da quelli che elettrificheranno le fornaci, in quanto le lavorazioni finali e gli usi di processo richiedono complessivamente circa 371 kWh/t di vetro prodotta. Il fabbisogno termico potrà essere soddisfatto mediante l'utilizzo di gas naturale sintetico, biometano o idrogeno. Per abbattere le 1.7 Mt di emissioni rimanenti sarà necessario utilizzare gli impianti di cattura. Dato che i forni elettrificati richiedono un investimento medio di 300 €/t di capacità produttiva installata, in questo scenario si prevede un investimento complessivo di 835 M€ (tale investimento comprende sia quello per i recuperatori di calore sia quello per l'elettrificazione delle fornaci) [13].

Tabella 2.15 – Stima del fabbisogno termico ed elettrico e della riduzione delle emissioni relativi allo Scenario 2.

	2018	2050	u.d.m
Fabbisogno elettrico	3	4.1	TWh
Consumo di combustibili	8.1	5	TWh
Δ Fabbisogno elettrico	34%		
Δ Consumo di combustibili	-39%		
	2018	2050	u.d.m
Emissioni CO₂ eq	2.7	1.7	Mt
Δ Emissioni CO₂ eq	-38%		
HP: Efficienza di cattura del 75%			
	u.d.m		
Emissioni catturate	1.3	Mt	
Emissioni rimanenti	0.4	Mt	

2.2.3.3 Scenario 3

Nello Scenario 3 si ipotizza che entro il 2050 tutti gli stabilimenti adotteranno le nuove tecnologie di rilevamento guasti e le fornaci elettrificate. Solo le nuove tecnologie di rilevamento guasti permettono di ridurre del 15% il fabbisogno termico [13]. La Tabella 2.16 riporta una stima del fabbisogno elettrico, del consumo di combustibili e il potenziale di riduzione delle emissioni relativo alle Scenario 3. Il fabbisogno termico potrà essere soddisfatto mediante l'utilizzo di gas naturale sintetico, biometano o idrogeno. Per le 0.6 Mt di emissioni rimanenti sarà necessario adottare impianti di cattura. Solo per l'elettrificazione delle fornaci si stima un investimento di 1583 M€.

Tabella 2.16 – Variazione del fabbisogno elettrico e termico e stima del potenziale di riduzione delle emissioni relative allo Scenario 3.

	2018	2050	u.d.m
Fabbisogno elettrico	3	5.2	TWh
Consumo di combustibili	8.1	2	TWh
Δ Fabbisogno elettrico	69%		
Δ Consumo di combustibili	-76%		
	2018	2050	u.d.m
Emissioni CO₂ eq	2.7	0.64	Mt
Δ Emissioni CO₂ eq	-76%		
HP: Efficienza di cattura del 75%			
	u.d.m		
Emissioni catturate	0.48	Mt	
Emissioni rimanenti	0.16	Mt	

2.2.3.4 Confronto

La Figura 2.16 mostra il consumo di combustibili e il fabbisogno elettrico degli scenari elaborati. La semplice adozione dei recuperatori di calore non è sufficiente e infatti nello Scenario 1 si ha un aumento dei fabbisogni energetici, a causa dell'incremento di produzione. Nello Scenario 2 si ha una riduzione quasi del 40% del consumo di combustibili grazie alla parziale adozione dei recuperatori di calore, delle strategie dell'economia circolare e all'elettificazione degli stabilimenti di piccole dimensioni. Quest'ultima soluzione contribuisce in particolar modo a far aumentare il fabbisogno elettrico. Nello Scenario 3 l'adozione delle nuove tecnologie di rilevamento guasti, dell'elettificazione e delle soluzioni per la riduzione della domanda permettono di ridurre quasi dell'80% il consumo di combustibili, a fronte di un aumento del 69% del fabbisogno elettrico.

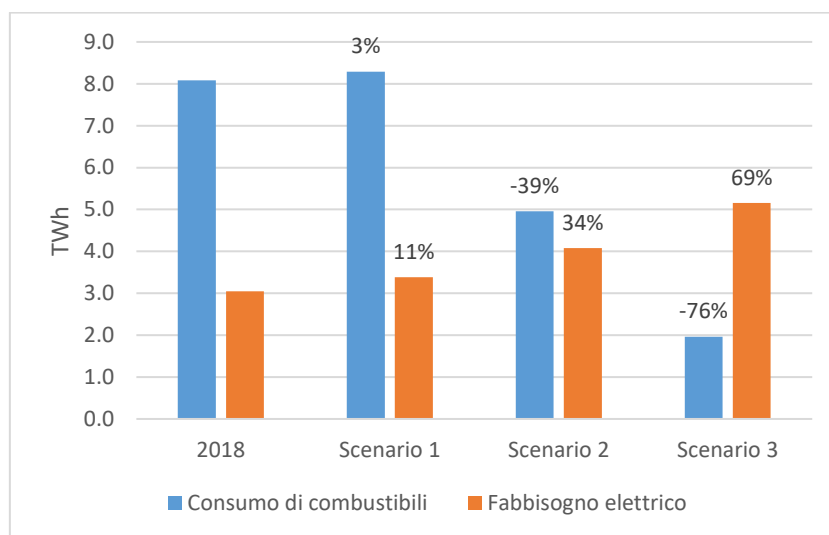


Figura 2.16 – Fabbisogno termico ed elettrico relativi agli scenari illustrati.

La Figura 2.17 illustra il potenziale di abbattimento delle emissioni (senza considerare gli impianti di cattura). Come emerge da tale figura, la semplice adozione dei recuperatori di calore non permette di ridurre le emissioni (Scenario 1). Lo Scenario 2 è uno scenario intermedio, dove viene raggiunta una diminuzione del 38% delle emissioni. Nello Scenario 3, grazie alla combinazione di tutte le soluzioni sopra riportate, è possibile arrivare a eliminare quasi l'80% delle emissioni.

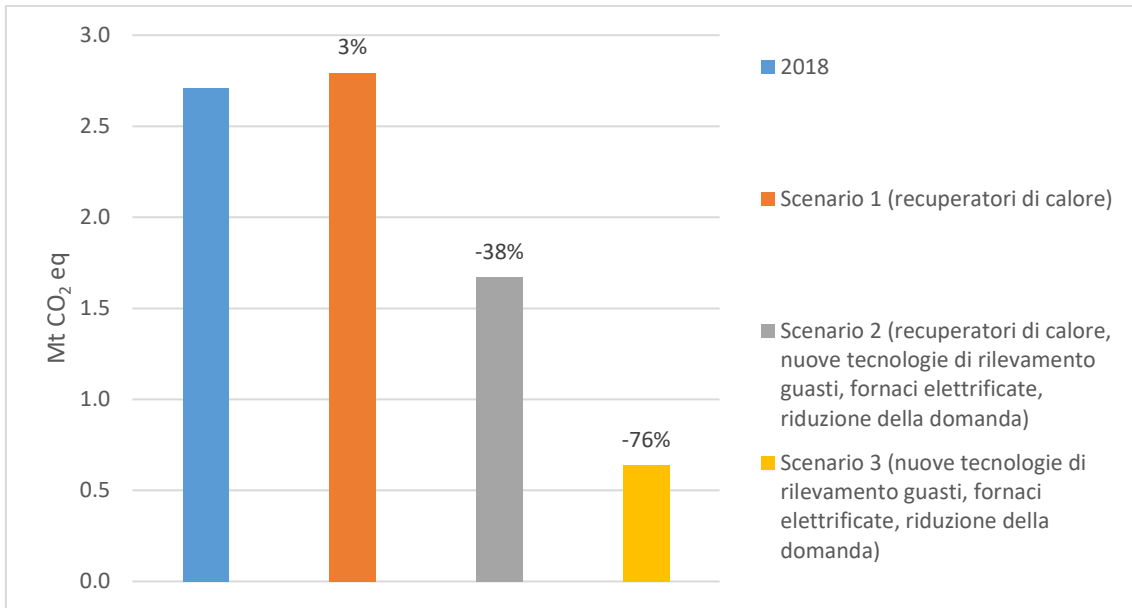


Figura 2.17 – Potenziale di riduzione delle emissioni relativo agli scenari presentati.

I recuperatori di calore hanno un costo di circa 50 €/t di capacità annua, mentre i forni elettrificati richiedono un investimento medio di 300 €/t [13]. Di conseguenza allo Scenario 1 è associato un investimento di 302 M€, allo Scenario 2 di 835 M€, mentre nello Scenario 3, solo per l'elettrificazione delle fornaci, si stima un investimento di 1583 M€ (Figura 2.18).

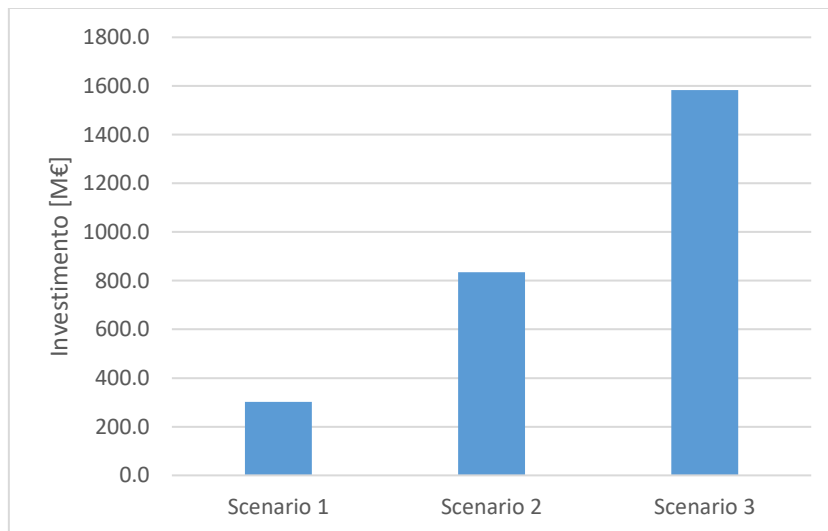


Figura 2.18 – Stima degli investimenti associati agli scenari presentati.

2.3 Ceramica

La ceramica è un materiale non metallico inorganico, con il quale si producono diversi oggetti, classificabili nelle seguenti categorie:

- Piastrelle di ceramica;
- Ceramica sanitaria;
- Stoviglieria;
- Materiali refrattari.

Nel 2019 in Italia sono stati prodotti più di 400 milioni di metri quadrati di piastrelle in ceramica, 4 milioni di pezzi di ceramica sanitaria, quasi 12 kt di stoviglieria e 359 kt di materiali refrattari. Nel medesimo anno il fatturato è stato pari a 5903 milioni di euro e questo settore industriale ha dato lavoro a più di 24000 persone ([16] e [51]). Dai dati forniti da ISPRA in Italia nel 2018 risulta che le emissioni legate alla produzione di ceramica sono state pari a 3 Mt; la localizzazione geografica di tali emissioni è riportata in Figura 2.19.

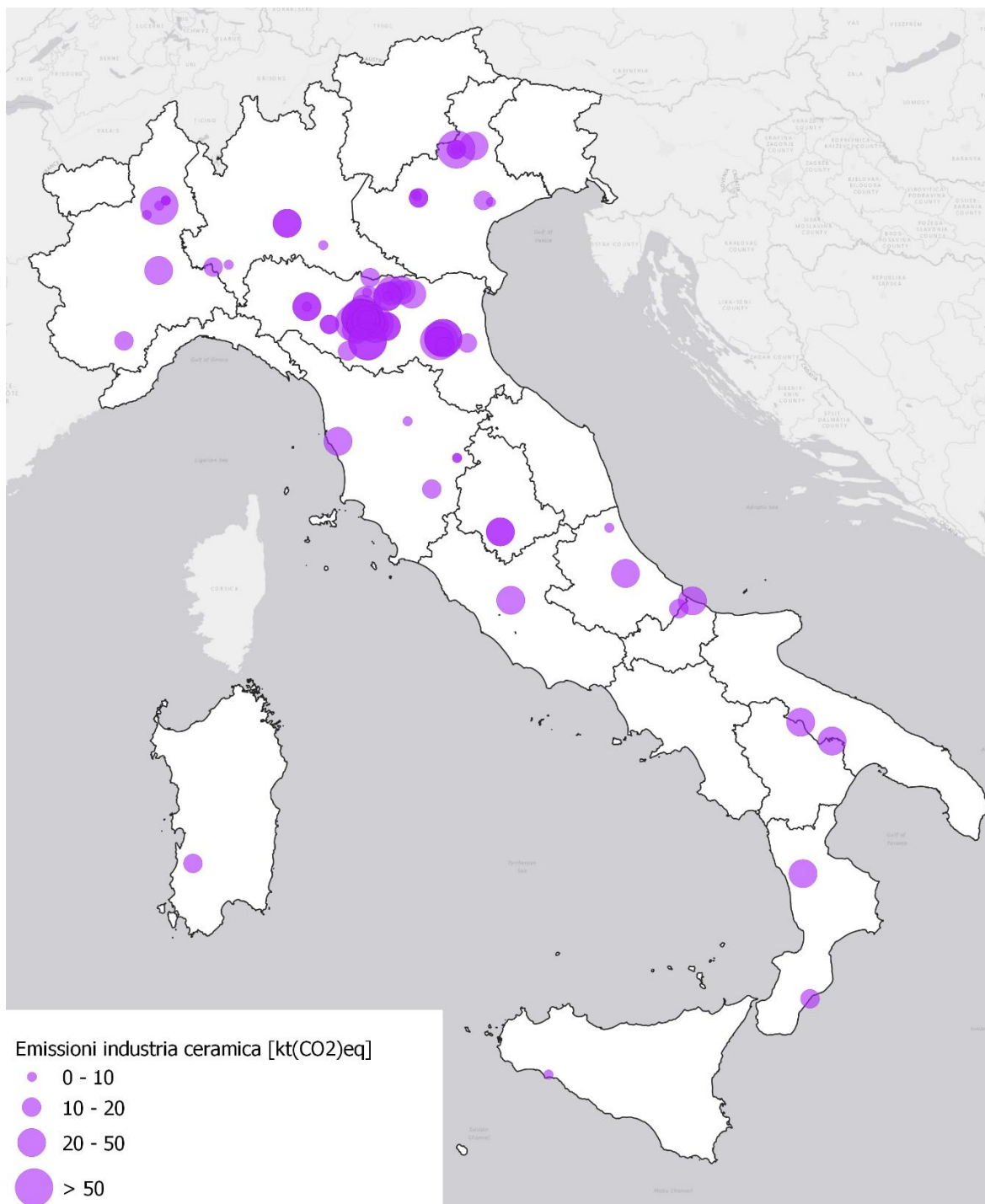


Figura 2.19 - Localizzazione geografica dei siti di emissione. Elaborazione grafica basata sui dati forniti da ISPRA.

2.3.1 Processo produttivo attuale

Il processo di produzione della ceramica può essere suddiviso in cinque fasi (schematizzate in Figura 2.20):

1. Preparazione delle materie prime. Questo step prevede la frantumazione, il dosaggio e la miscelazione della carica.
2. Modellazione. Durante questa fase il prodotto finale prende forma mediante metodi a secco o a umido;
3. Essiccazione. Questo processo serve per rimuovere l'umidità presente nei manufatti e può durare anche diversi giorni. In alcuni casi dopo l'essiccazione vengono effettuati degli ulteriori trattamenti, come la smaltatura, l'ingobbiatura²⁸ o la metallizzazione;
4. Cottura. I prodotti ceramici vengono posti nei forni, dove si raggiungono temperature che variano a seconda della composizione dei materiali e dello specifico oggetto che si vuole ottenere:
 - Piastrelle: 900°C ÷ 1250°C;
 - Ceramica sanitaria: 1250°C;
 - Stoviglieria: 950°C ÷ 1280°C;
 - Materiali refrattari: 1250°C ÷ 1800°C.

Le fornaci sono tipicamente alimentate a gas naturale e anche questa fase può durare diversi giorni.

5. Trattamenti finali, come test per il controllo della qualità, molatura e segatura.

²⁸ L'ingobbio è una tecnica di copertura e decorazione per terracotta e ceramica.

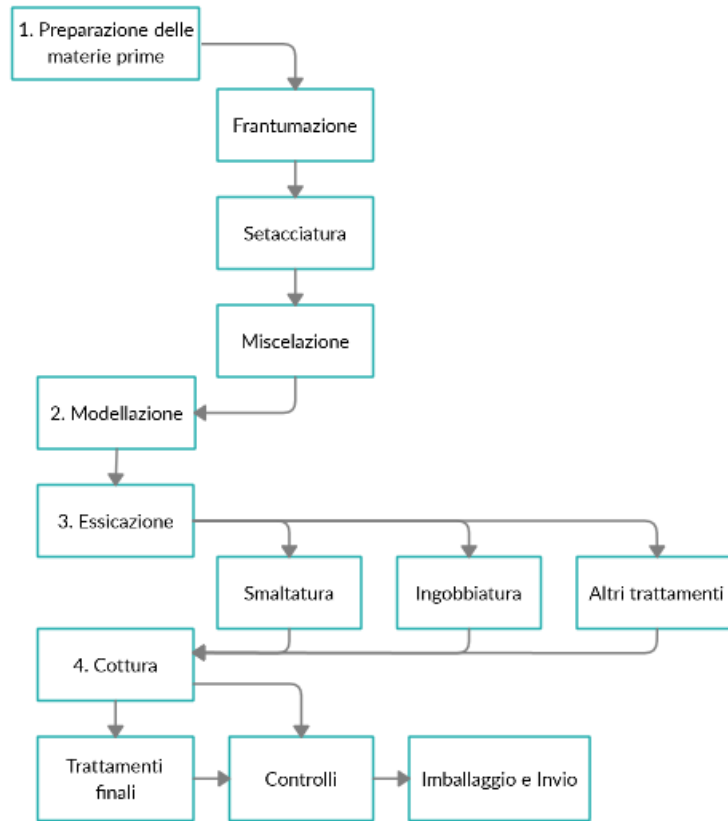


Figura 2.20 – Schematizzazione del processo produttivo della ceramica.

2.3.1.1 Produzione, richiesta energetica ed emissioni

In Tabella 2.17 si riporta la produzione stimata, le emissioni e il fabbisogno termico delle aziende italiane produttrici di ceramica. Essendo note le emissioni totali nel 2018 e considerando l’emission intensity fornito dal report [13] riferito alla produzione di una tonnellata di ceramica, è stato possibile stimare la produzione nel 2018. I fabbisogni elettrici e termici specifici del 2016 (ultimi dati noti), pubblicati dal Centro Ceramico di Bologna [52], vengono assunti invariati nel 2018 e vengono utilizzati per stimare i fabbisogni elettrici e termici nel 2018. In Figura 2.21 sono schematizzati i calcoli svolti per stimare la produzione e i fabbisogni energetici delle varie fasi del processo produttivo; tali fabbisogni vengono rappresentati in Figura 2.22 con Sankey diagram.

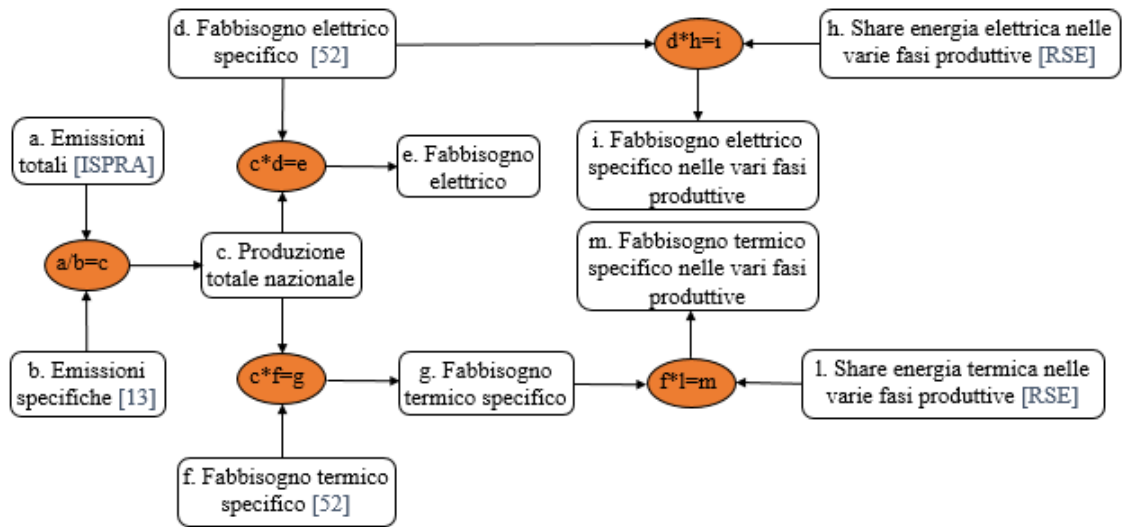


Figura 2.21 - Schema dei calcoli svolti per la stima della produzione e dei fabbisogni energetici delle varie fasi del processo produttivo.

Tabella 2.17 – Produzione, emissioni e consumi energetici relative alla produzione di ceramica in Italia nel 2018.

id			u.d.m	Anno	Fonte
a	Emissioni CO ₂ eq ²⁹	3	Mt	2018	
b	Emissioni specifiche CO ₂ eq	0.3	t CO ₂ eq/t ceramica		[13]
c	Produzione ceramica	10.2	Mt		c = a/b
d	Fabbisogno elettrico specifico	211	kWh/t	2016	CENTRO CERAMICO [52]
e	Fabbisogno elettrico	2.1	TWh	2018	e = c*d/1000
f	Fabbisogno termico specifico	1810	kWh/t	2016	CENTRO CERAMICO [52]
g	Fabbisogno termico	13.9	TWh	2018	g = c*f/1000

²⁹ Dato fornito da ISPRA su elaborazioni EU-ETS.

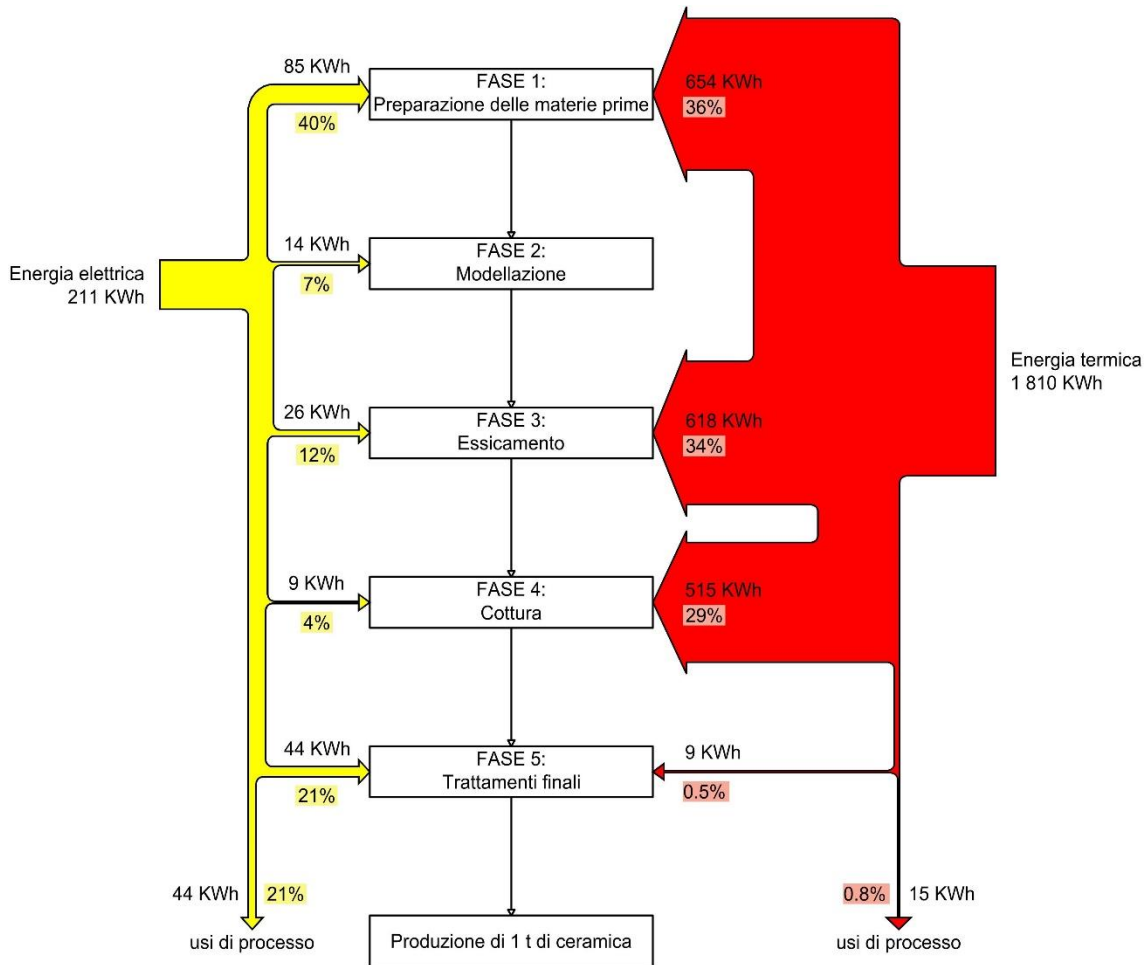


Figura 2.22 – Sankey diagram relativo al processo di produzione della ceramica. Elaborazione grafica basata su informazioni provenienti da RSE [10], per quanto riguarda lo share percentuale di energia richiesta dalle varie fasi del processo produttivo, e CENTRO CERAMICO [52], per quanto riguarda i fabbisogni specifici complessivi, elettrico e termico.

2.3.2 Soluzioni di decarbonizzazione

Le alternative per la decarbonizzazione delle industrie produttrici di ceramica possono essere suddivise nelle seguenti categorie:

- Migliori tecnologie disponibili;
- Nuovi processi produttivi;
- Fonti energetiche alternative;
- Riduzione della domanda;
- Cattura dell’anidride carbonica.

Ogni categoria è analizzata individualmente nei prossimi paragrafi.

2.3.2.1 Migliori tecnologie disponibili

E' possibile ottimizzare la fase di cottura adottando bruciatori a impulso, recuperatori di calore e materiali isolanti di elevata qualità [13]. Si stima che attraverso la combinazione delle migliori tecnologie attualmente disponibili sia possibile ridurre del 17% il fabbisogno termico [13].

2.3.2.2 Nuovi processi produttivi

Per la fase di essiccamento è stata studiata una soluzione innovativa, detta **essiccamento a vuoto**. Con questa tecnologia l'acqua contenuta all'interno dei materiali viene fatta evaporare diminuendo la pressione. Rispetto al processo di essiccamento termico tradizionale, quello a vuoto è più veloce e delicato. Nel settore della ceramica 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 produttivo. 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].

2.3.2.3 Fonti energetiche alternative

I forni per l'essiccamento e per la cottura sono principalmente alimentati con gas naturale, ma è possibile sostituirlo con il **biometano**. Per effettuare questo passaggio non sono necessari investimenti elevati.

Esistono delle tecnologie per l'ottimizzazione dei forni di essiccamento che si basano sullo scambio termico radiativo e sulla minimizzazione della dispersione del calore verso l'ambiente esterno. A seconda dello spessore del manufatto è possibile utilizzare la radiazione a raggi infrarossi o le microonde, riducendo così fino al 50% i consumi di energia durante l'essiccamento [13].

2.3.2.4 Riduzione della domanda

E' possibile adottare soluzioni che permettono di recuperare i materiali di scarto e alcune industrie sono già in grado di produrre ceramiche costituite per il 70% da queste sostanze [13]. In Italia Confindustria Ceramica stima che ogni anno 600 kt di materie prime non vengano estratte grazie al recupero del 99.5% degli scarti di produzione [53]. Il **riciclo della ceramica** ha dei costi di implementazione molto bassi e ha un TRL pari a 6/7 [13].

2.3.2.5 Cattura della CO₂

Nel processo produttivo della ceramica le emissioni derivano dalla combustione per la generazione del calore. In questo caso con la combustione tradizionale si produce un flusso di off-gas con una bassa concentrazione di anidride carbonica, cosa che rende un impianto di cattura post-combustione inefficiente. Per il settore industriale in analisi gli impianti di cattura più adatti sono quelli che prevedono la **pre-combustione** oppure la post-combustione abbinata all'**ossicombustione**. Sfruttando queste tecnologie è possibile ridurre del 79% le emissioni [13], ma la loro diffusione è ostacolata da fattori economici. Il TRL di queste soluzioni, abbinata alla produzione di ceramica, è compreso fra 5 e 8 [13].

La Tabella 2.18 riassume le opzioni disponibili per la decarbonizzazione del processo di produzione della ceramica.

Tabella 2.18 – Riepilogo delle tecnologie e strategie alternative per la decarbonizzazione delle industrie produttrici di ceramica. (Fonte [13]).

Opzione	Opzione di riferimento attuale	TRL	Categoria di intervento	Risparmio energetico	Riduzione delle emissioni
Bruciatori a impulso	Forni di essiccazione tradizionali		Migliori tecnologie disponibili	17% ³⁰	
Recuperatori di calore	Forni di essiccazione tradizionali		Migliori tecnologie disponibili		
Materiali isolanti di elevata qualità	Forni di essiccazione tradizionali		Migliori tecnologie disponibili		
Essiccazione a vuoto	Forni di essiccazione tradizionali	6/7	Nuovi processi produttivi		
Biometano	Gas naturale		Fonti energetiche alternative		
Riciclaggio	Materie prime tradizionali	6/7	Riduzione della domanda		
Cattura pre-combustione	Processo produttivo convenzionale	5÷8	Cattura della CO ₂		79%
Cattura + ossicombustione	Processo produttivo convenzionale		Cattura della CO ₂		79%

³⁰ Risparmio energetico ottenibile con l'adozione simultanea di bruciatori a impulso, recuperatori di calore e materiali isolanti di elevata qualità.

2.3.3 Scenari

Per il settore industriale in analisi sono stati elaborati due scenari di decarbonizzazione, nei quali vengono combinate alcune delle soluzioni presentate nei paragrafi precedenti. Si assume che entro il 2050 tutta l'elettricità sarà a emissioni zero e che la produzione di ceramica aumenterà del 35% rispetto al 2018, in linea con i dati forniti da ISPRA. Nello Scenario 1 si ipotizza che entro il 2050 tutti gli stabilimenti adotteranno solamente le migliori tecnologie disponibili, mentre nello Scenario 2 si ipotizza che, oltre a queste tecnologie, gli stabilimenti utilizzeranno biometano per generare il calore necessario durante il processo produttivo. In Tabella 2.19 vengono riassunte tutte queste assunzioni.

Tabella 2.19 – Ipotesi alla base degli scenari presentati per il settore ceramico.

Scenario	Migliori tecnologie disponibili	Biometano	Cattura delle emissioni
1	sì	no	sì
2	sì	sì	no

2.3.3.1 Scenario 1

Si ipotizza che nel 2050 la produzione di ceramica sarà pari a 13.7 Mt, in linea con i dati forniti da ISPRA. In questo scenario si ipotizza che tutti gli stabilimenti adotteranno le migliori tecnologie attualmente già disponibili, cioè i bruciatori a impulso, i recuperatori di calore e i materiali isolanti di elevata qualità. La combinazione di queste tecnologie permette di ridurre del 17% sia il fabbisogno termico specifico che le emissioni specifiche [13]. Complessivamente sia i fabbisogni energetici sia le emissioni aumentano, a causa dell'incremento di produzione. Per le 3.3 Mt di emissioni rimanenti sarà necessaria l'adozione di impianti di cattura.

Tabella 2.20 – Fabbisogno elettrico e termico e riduzione delle emissioni previsti nello Scenario 1.

	2018	2050	u.d.m.
Fabbisogno elettrico	2.1	2.9	TWh
Fabbisogno termico	13.9	15.6	TWh
Δ Fabbisogno elettrico	+35%		
Δ Fabbisogno termico	+12%		
	2018	2050	u.d.m.
Emissioni CO₂ eq	3	3.3	Mt
Δ Emissioni CO₂ eq	+12%		
HP: Efficienza di cattura del 79%			
	u.d.m.		
Emissioni catturate	2.6	Mt	
Emissioni rimanenti	0.7	Mt	

2.3.3.2 Scenario 2

Anche in questo scenario si ipotizza che la produzione aumenterà del 35% rispetto al 2018, raggiungendo le 13.7 Mt nel 2050. Si assume che, oltre alle migliori tecnologie disponibili, entro il 2050 tutti gli stabilimenti italiani utilizzeranno il biometano per la generazione del calore necessario durante il processo produttivo. Rispetto allo Scenario 1 il fabbisogno termico ed elettrico non variano, ma nello Scenario 2 vengono abbattute completamente le emissioni. In Tabella 2.21 viene riportata la riduzione del fabbisogno termico e delle emissioni relativa allo Scenario 2.

Tabella 2.21 – Riduzione del fabbisogno termico e delle emissioni relativa allo Scenario 2.

	2018	2050	u.d.m.
Fabbisogno elettrico	2.1	2.9	TWh
Fabbisogno termico	13.9	15.6	TWh
Δ Fabbisogno elettrico	+35%		
Δ Fabbisogno termico	+12%		
	2018	2050	u.d.m.
Emissioni CO₂ eq	3	0	Mt
Δ Emissioni CO₂ eq	-100%		

2.3.3.3 Confronto

La Figura 2.23 illustra i fabbisogni termici ed elettrici, identici per i due scenari presentati. L'aumento di produzione tende a far aumentare il fabbisogno termico, ma ciò viene in parte compensato dall'adozione delle migliori tecnologie disponibili. Il fabbisogno elettrico aumenta del 35% a causa dell'incremento nella produzione.

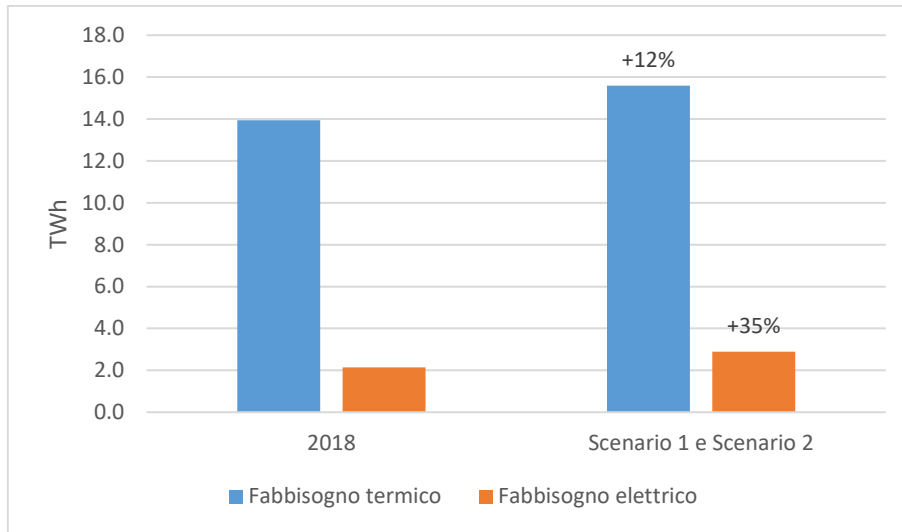


Figura 2.23 – Fabbisogni termici ed elettrici relativi agli scenari presentati.

La Figura 2.24 illustra la variazione delle emissioni (senza considerare gli impianti per la cattura dell’anidride carbonica). Con la sola adozione delle migliori tecnologie disponibili (Scenario 1) le emissioni sono comunque destinate ad aumentare, a causa dell’aumento della produzione. Utilizzando invece il biometano come combustibile è possibile abbattere le emissioni.

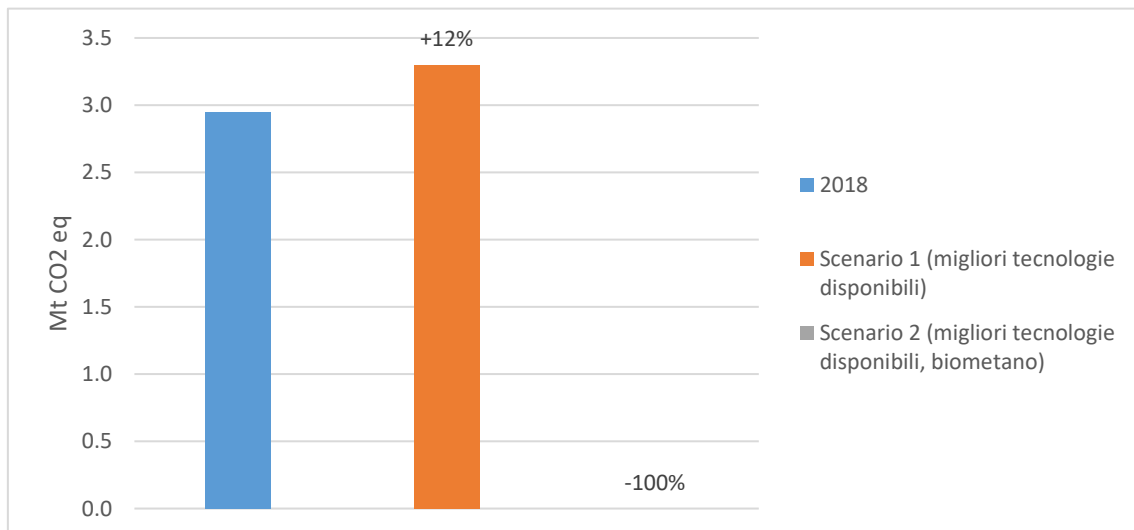


Figura 2.24 – Riduzione delle emissioni relativa agli scenari presentati.

Capitolo 3

Settore chimico

Nell'Unione Europea le due industrie chimiche maggiormente responsabili delle emissioni di anidride carbonica sono quelle produttrici di etilene (C_2H_4) e di ammoniaca (NH_3) [54]. Nel 2018 in Italia l'industria chimica ha emesso 14.8 Mt di CO_2 eq³¹, corrispondenti al 17% delle emissioni industriali (EUROSTAT [6]). La localizzazione geografica di queste emissioni è rappresentata in Figura 3.1.

Nel 2016 in Italia questo settore industriale ha realizzato un valore della produzione prossimo ai 52 miliardi di euro e ha dato lavoro a circa 114800 addetti ([55] e [56]). I database consultati forniscono le emissioni del settore chimico in forma aggregata, di conseguenza non è stato possibile distinguere quali siano i processi produttivi che maggiormente contribuiscono alle emissioni. Pertanto sono stati analizzati quei processi che vengono maggiormente trattati in letteratura, cioè quello relativo alla produzione dell'ammoniaca (Capitolo 3.1), dell'etilene (Capitolo 3.2), del metanolo (Capitolo 3.3) e della plastica (Capitolo 3.4).

Ammoniaca e metanolo, così come molte altre sostanze chimiche, hanno come input l'idrogeno, che può essere prodotto tramite la reazione di Steam Reforming (SR) del gas naturale, tramite la gassificazione del carbone oppure mediante l'elettrolisi dell'acqua. A livello mondiale la produzione di idrogeno per la sintesi di ammoniaca e metanolo è basata per il 65% sul gas naturale e per il 30% sul carbone [54]. Il prezzo del gas naturale e del carbone nelle varie regioni del mondo è ciò che maggiormente determina l'utilizzo di una o dell'altra fonte fossile: ad esempio in Cina l'idrogeno viene principalmente prodotto tramite gassificazione del carbone [54].

³¹ Il database EU ETS [7] riporta in forma aggregata tutte le emissioni derivanti dalla combustione. Le emissioni di processo vengono fornite in forma aggregata per tutti i prodotti chimici di base e nel 2018 in Italia sono state pari a 3.2 Mt [7].

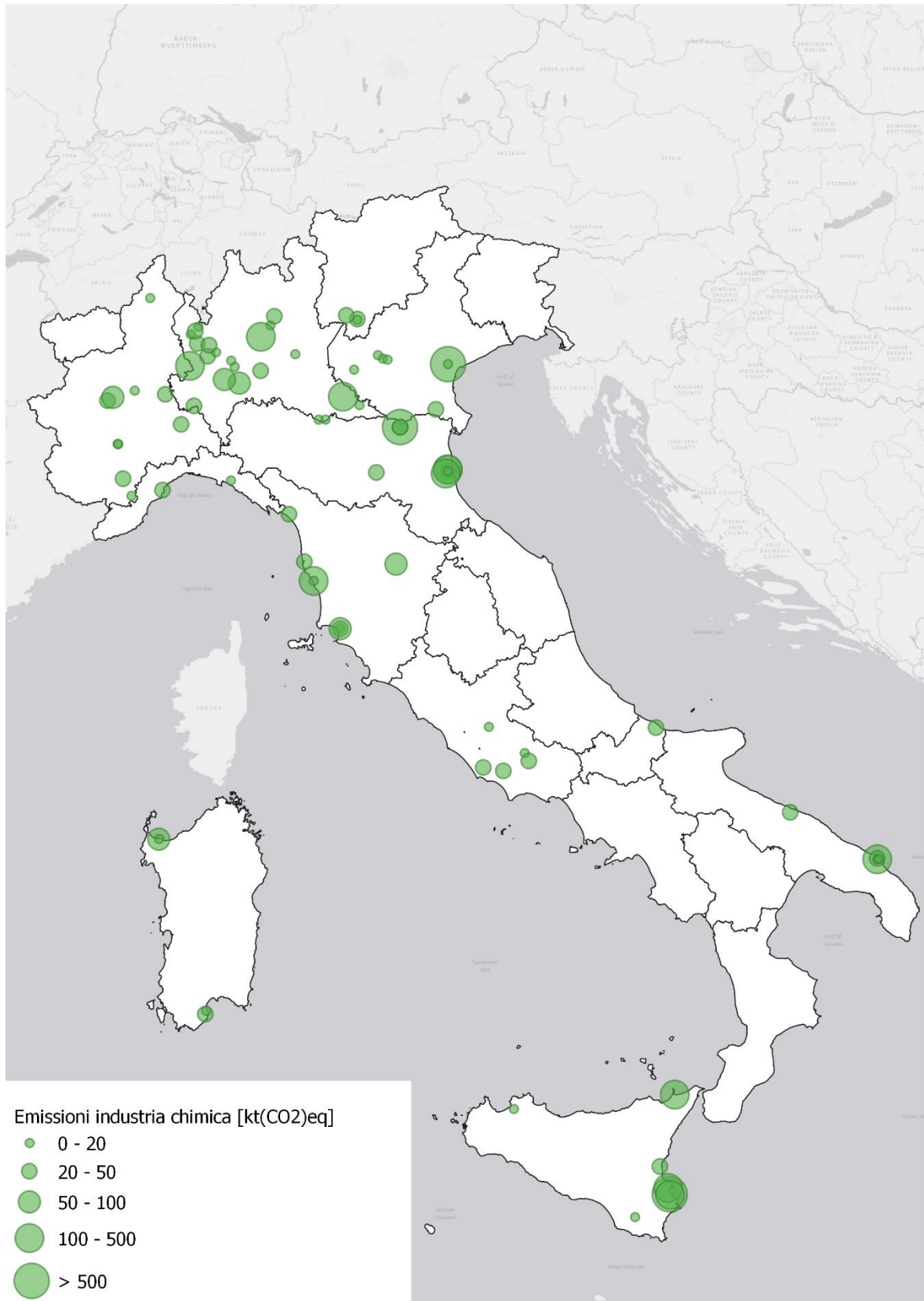


Figura 3.1 - Localizzazione geografica dei siti di emissione. Elaborazione grafica basata sui dati forniti da ISPRA.

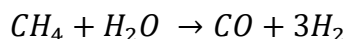
3.1 Ammoniaca

L'ammoniaca è un composto dell'azoto di formula chimica NH_3 , che viene utilizzata principalmente per la produzione dei fertilizzanti (l'82% dell'ammoniaca prodotta a livello mondiale viene destinata alla produzione di queste sostanze) [13]. Il restante 18% viene utilizzato per la produzione di esplosivi, fibre sintetiche e detersivi ([13] e [54]). Nel 2018 sono state prodotte 230 Mt di ammoniaca a livello mondiale [57]. In media in Europa vengono prodotte circa 17 Mt di NH_3 ogni anno [12]. Le industrie europee produttrici di ammoniaca e di fertilizzanti hanno un giro d'affari di 11 miliardi di euro l'anno e danno lavoro a circa 78500 addetti [12]. In Europa sono presenti più di 40 stabilimenti produttivi, con una capacità media di 500kt l'anno ciascuno [12].

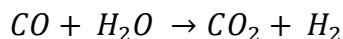
In media nell'Unione Europea per la produzione di una tonnellata di ammoniaca vengono emesse 1.8 Mt di CO_2 eq [12]. La CO_2 si forma sia durante il processo di sintesi (52% delle emissioni) sia a causa dell'utilizzo dei combustibili fossili (48% delle emissioni) [58]. In aggiunta a tali emissioni andrebbero considerate anche quelle derivanti dall'uso dei fertilizzanti, in quanto queste sostanze contengono protossido d'azoto, un gas a effetto serra con GWP³² 100 anni pari a 310 [59].

3.1.1 Processo produttivo attuale

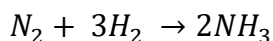
L'ammoniaca viene sintetizzata attraverso il processo Haber – Bosch, che impiega come reagenti l'azoto e l'idrogeno. Più della metà dell'idrogeno prodotto industrialmente a livello mondiale viene utilizzato per sintetizzare l'ammoniaca e viene principalmente prodotto a partire dal gas naturale tramite la reazione di Steam Reforming [12]:



Questa reazione è endotermica e consiste nel riscaldamento del metano insieme al vapore d'acqua in un ambiente privo di ossigeno. Industrialmente si fa avvenire questa reazione in reattori tubolari a una temperatura compresa fra i 700°C e i 1100°C [13]. Il processo viene ottimizzato tramite la reazione di Water Gas Shift:



La reazione esotermica per la sintesi dell'ammoniaca è la seguente:



Questa avviene a una temperatura compresa fra 400°C e 500°C [13]. L'ammoniaca prodotta viene poi raccolta in una camera di raffreddamento e viene fatta condensare. La Figura 3.2 riporta una schematizzazione del processo produttivo.

³² Il potenziale di riscaldamento globale (GWP, Global Warming Potential) è un indicatore che serve per esprimere l'effetto serra di vari gas, confrontandoli con il biossido di carbonio, al quale si assegna un GWP pari a 1. Ogni valore di Global Warming Potential è calcolato in riferimento a uno specifico intervallo di tempo (20, 100 o 500 anni).

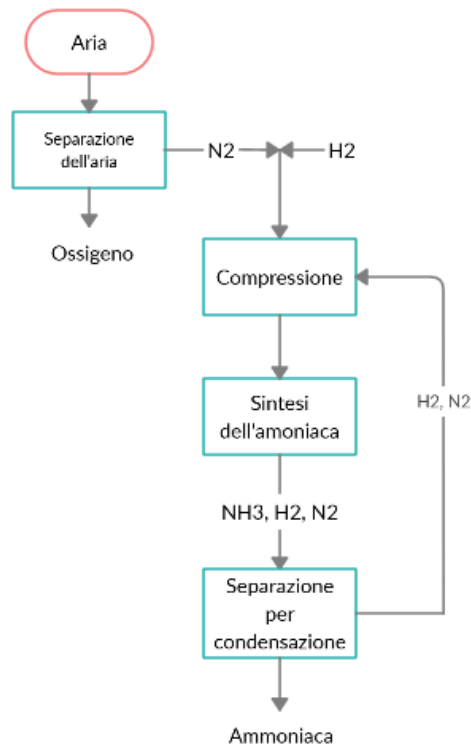


Figura 3.2 –Processo produttivo dell’ammoniaca.

3.1.1.1 Produzione, richiesta energetica ed emissioni

Lo stabilimento *YARA* di Ferrara è l’unico presente in Italia dove viene prodotta ammoniaca [97]; in letteratura è stata trovata la potenzialità di questo impianto in termini di tonnellate al giorno. Da tale dato è stata calcolata la produzione annuale di ammoniaca e, note le emissioni specifiche dal report [12], è stato possibile stimare le emissioni totali. Le relazioni [12] e [13] riportano il fabbisogno termico ed elettrico specifico ed è quindi stato possibile stimare i fabbisogni totali. In Figura 3.3 vengono schematizzati i calcoli svolti per stimare la produzione, le emissioni e i fabbisogni energetici; i risultati sono riportati in Tabella 3.1.

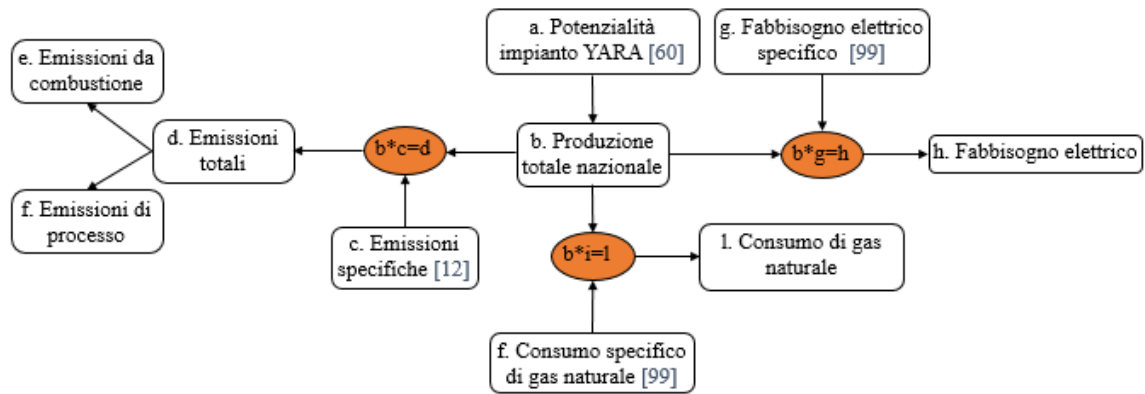


Figura 3.3 - Schema dei calcoli svolti per la stima della produzione, delle emissioni e dei fabbisogni energetici.

Tabella 3.1 – Stima della produzione, delle emissioni e dei fabbisogni energetici relativi al processo di produzione dell’ammoniaca nel 2018.

id			u.d.m.	Fonte	
a	Potenzialità impianto Yara Ferrara	1550	t/g	[60]	
b	Stima produzione	0.6	Mt	$b = a*365$	
c	Emissioni specifiche	1.8	t CO ₂ eq/t ammoniaca	[12]	
d	Emissioni CO ₂ eq	1	Mt	$d = b*c$	
e	Emissioni di processo	0.5	(52%)	Mt	[58]
f	Emissioni da combustione	0.5	(48%)	Mt	[58]
g	Fabbisogno elettrico specifico	0.1	MWh/t	[99]	
h	Fabbisogno elettrico	0.1	TWh	$h = b*g$	
i	Consumo specifico di gas naturale ³⁴	9.7	MWh/t	[99]	
l	Consumo di gas naturale	5.5	TWh	$l = b*i$	

3.1.2 Soluzioni di decarbonizzazione

La transizione verso la completa decarbonizzazione di questo settore industriale è possibile attraverso l’introduzione di nuove opzioni:

- Migliori tecnologie disponibili;
- Nuovi processi produttivi;
- Fonti energetiche alternative;
- Riduzione della domanda;
- Cattura del biossido di carbonio.

³⁴ Tale valore include sia il gas naturale utilizzato come materia prima nella reazione di steam reforming che quello utilizzato come combustibile. In particolare il 58% del gas naturale viene utilizzato come materia prima (5.7 MWh/t ammoniaca prodotta), mentre il restante 42% viene utilizzato come combustibile (4 MWh/t ammoniaca prodotta).

Ogni categoria viene presentata singolarmente nei prossimi paragrafi. Molte delle alternative proposte sono focalizzate sulla produzione dell'idrogeno e pertanto sono valide in generale anche per la produzione di idrogeno come combustibile o come materia prima in altri processi industriali.

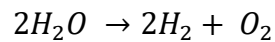
3.1.2.1 Migliori tecnologie disponibili

Per ottimizzare il processo Haber-Bosch i reattori vengono costruiti con materiali isolanti di elevata qualità e vengono dotati di recuperatori di calore. Attualmente gli stabilimenti europei consumano in media 9.7 MWh di gas naturale/t di ammoniaca, mentre con questi miglioramenti tecnologici è possibile produrre la stessa quantità di NH₃ utilizzando 8.8 MWh di gas naturale [13].

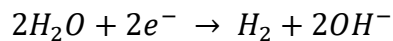
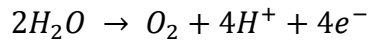
3.1.2.2 Nuovi processi produttivi

In alternativa allo steam reforming del metano è possibile gassificare la **biomassa**. Questa soluzione ha un TRL pari a 6 [15]. La gassificazione della biomassa è un processo molto costoso e l'utilizzo di questa sostanza è prioritario in altri settori [15].

L'idrogeno necessario per la sintesi dell'ammoniaca può essere prodotto mediante l'**elettrolisi dell'acqua**. Attraverso questo processo è possibile separare l'idrogeno dall'ossigeno utilizzando l'elettricità:



L'elettrolisi viene effettuata all'interno di una cella elettrolitica, rappresentata in Figura 3.4. La cella elettrolitica è un recipiente contenente la soluzione elettrolitica (comunemente detta elettrolita), in cui sono immersi due elettrodi di metallo. Gli elettrodi sono collegati a un generatore di corrente e l'elettrodo collegato al polo positivo viene chiamato catodo, mentre quello collegato al polo negativo viene detto anodo. All'anodo e al catodo avvengono rispettivamente le seguenti reazioni:



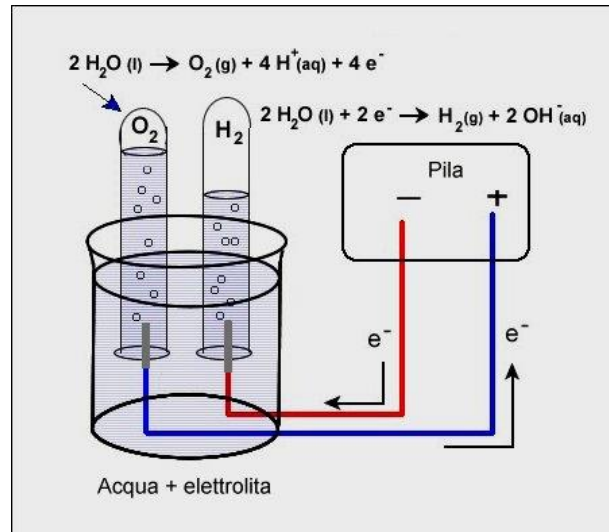


Figura 3.4 – Schematizzazione di una cella elettrolitica. (Fonte [92]).

Le tecnologie più diffuse industrialmente per effettuare l'elettrolisi sono l'elettrolisi alcalina, l'elettrolisi con celle combustibili Proton Membrane Exchange (PEM) e l'elettrolisi mediante water splitting fotocatalitico.

L'**elettrolisi alcalina** e l'**elettrolisi con le PEM fuel cells** sono vicine alla commercializzazione e il loro TRL è compreso fra 7 e 9 [13]. Queste soluzioni permettono di ridurre del 75% le emissioni per la produzione di ammoniaca rispetto all'utilizzo dello steam reforming del metano [13]. Il 25% delle emissioni rimanenti derivano dalla generazione del calore necessario durante la reazione di sintesi dell'ammoniaca. Se il reattore di sintesi viene elettrificato è possibile abbattere completamente le emissioni; in questo caso sono necessari 9.1 MWh di energia elettrica per la produzione di una tonnellata di ammoniaca [12].

E' in corso di sviluppo un sistema che permette di effettuare l'elettrolisi dell'acqua attraverso l'utilizzo di **materiali fotocatalitici**. Questi materiali, una volta immersi in acqua e investiti dalla luce solare, elettrolizzano l'acqua, dando origine a due flussi gassosi di idrogeno e di ossigeno. Per ora questo sistema è stato testato solo in laboratorio e ha un TRL pari a 2/3 [13]. I costi di questa tecnologia non sono ancora stati stimati. Questi materiali richiedono una sorgente di luce solare per l'elettrolisi dell'acqua, cosa che li rende dipendenti dal tempo atmosferico. Inoltre è richiesto anche uno step aggiuntivo per la separazione dell'idrogeno e dell'ossigeno.

In alternativa al processo Haber-Bosch, è possibile utilizzare **fuel cells con membrana elettrolitica solida** per la produzione dell'ammoniaca. Questo sistema richiede un flusso di idrogeno gassoso all'anodo e uno di azoto gassoso al catodo. Mediante l'applicazione di una differenza di potenziale si forzano gli atomi di idrogeno ad attraversare la membrana elettrolitica e a migrare verso gli atomi di azoto, con i quali si combinano secondo la stessa reazione chimica del processo Haber-Bosch. Questo sistema è ancora

in fase di studio e ha un TRL di 6/7 [13]. Secondo alcuni esperti [98] questa soluzione permette di aumentare la conversione della reazione³⁵ e di ridurre i consumi energetici.

I principali limiti alla produzione di ammoniaca a emissioni nette pari a zero sono di tipo economico piuttosto che tecnico. Questi derivano dalla necessità di dover rinnovare gli stabilimenti attualmente in uso, di avere a disposizione elettricità a un prezzo competitivo e infrastrutture per trasportare e stoccare l'idrogeno. I costi di produzione dell'idrogeno tramite elettrolisi dell'acqua sono superiori rispetto a quelli che si hanno per la sua sintesi tramite SR, ma gli investimenti iniziali richiesti sono inferiori rispetto al sistema di steam reforming integrato con impianti per la cattura e lo stoccaggio [54].

3.1.2.3 Riduzione della domanda

Per ridurre la domanda di ammoniaca si può agire sulla domanda di fertilizzanti. Utilizzando additivi e ottimizzando i metodi di applicazione dei fertilizzanti per migliorarne l'assorbimento è possibile ridurre la domanda di ammoniaca. Nel 2015 in Europa sono stati utilizzati circa 64 kg di fertilizzanti minerali per ogni ettaro di terreno coltivato e ciò corrisponde a una media di 21 kg di fertilizzanti/t di cibo prodotto [12]. Si stima inoltre che circa 90 Mt di alimenti vengano sprecati ogni anno in Europa [12]. Anche la riduzione degli sprechi alimentari permetterebbe dunque di ridurre la domanda di ammoniaca.

Inoltre è possibile sostituire i fertilizzanti minerali con quelli organici. Queste sono delle sostanze di origine vegetale o animale già largamente utilizzate nell'agricoltura europea. Oltre alla diminuzione delle emissioni di anidride carbonica, la riduzione dell'utilizzo di fertilizzanti minerali comporta molti altri benefici come il miglioramento della qualità dell'aria e dell'acqua, la conseguente diminuzione di patologie nell'uomo e dei problemi legati all'eutrofizzazione degli ambienti acquatici. I principali limiti che ne ostacolano l'adozione sono di tipo logistico e legati alla non programmabilità della produzione.

3.1.2.4 Cattura della CO₂

Le reazioni di steam reforming e di sintesi dell'ammoniaca sono endotermiche e il calore necessario può essere generato utilizzando i combustibili fossili. Le emissioni di anidride carbonica possono essere catturate mediante impianti post-combustione ad assorbimento chimico o fisico oppure con impianti basati sull'adsorbimento fisico. I TRL riportati nei prossimi paragrafi sono riferiti all'impiego della tecnologia in abbinamento a impianti per la produzione di ammoniaca.

³⁵ La conversione indica il rapporto tra la quantità di reagente consumata e la quantità di reagente inizialmente presente nell'ambiente di reazione.

La cattura post-combustione tramite **assorbimento chimico** è un processo che impiega un solvente a base di ammine e che permette di ottenere efficienze di cattura comprese tra il 55% e il 90% [12]. Il TRL di questa tecnologia è pari a 11 [15]³⁶.

Nel caso di post-combustione con **assorbimento fisico** viene utilizzato un solvente liquido e con questo sistema non avviene alcuna reazione chimica. Il suo TRL è pari a 9 [15]³⁷.

Nel caso di cattura post-combustione tramite **adsorbimento fisico** le molecole di CO₂ vengono trattenute dalla superficie di un materiale selettivo adsorbente e il processo di desorbimento può avvenire tramite Pressure Swing Adsorption, Vacuum Swing Adsorption oppure tramite Vacuum Pressure Swing Adsorption. Questa tecnologia viene già impiegata in altri settori, ma al momento non ci sono applicazioni nelle industrie produttrici di ammoniaca. Il suo TRL è pari a 5 [15].

Il report *Industrial Transformation 2050* [12] stima un costo aggiuntivo di 39€/t di anidride carbonica catturata o, analogamente, 64€/t di NH₃ prodotta. I prezzi del gas naturale e dell'elettricità sono le due variabili che maggiormente influenzano i costi di produzione dell'ammoniaca. Con un prezzo dell'energia elettrica di 13€÷42€/MWh l'elettrolisi risulta il metodo economicamente più conveniente, assumendo un prezzo del gas naturale compreso fra 10€ e 27€/MWh [54].

La Tabella 3.2 riassume le opzioni disponibili per la decarbonizzazione del processo produttivo dell'ammoniaca.

³⁶ Molti stabilimenti produttori di fertilizzanti utilizzano il processo di cattura tramite il solvente *Mitsubishi KS-1*. Esempi di questi stabilimenti sono quello della *Petronas Fertiliser Kedah* in Malesia e quello dell'*Indian Farmers Fertilizer Cooperative* in India.

³⁷ Nel 2019 *Wabash Valley Resources* ha presentato il piano per la conversione di un suo impianto di gassificazione in uno stabilimento per la produzione di ammoniaca integrato con un sistema di Carbon Capture and Storage tramite *Rectisol*. Si stima una capacità di cattura di 1.5÷1.75 Mt di biossido di carbonio all'anno [15]. *Sinopec* sta dotando un suo impianto produttivo di un sistema CCS basato sull'assorbimento fisico con solvente *Rectisol*.

Tabella 3.2 – Riepilogo delle tecnologie e strategie alternative per la decarbonizzazione delle industrie produttrici di NH₃.

Opzione	Opzione di riferimento attuale	TRL	Categoria di intervento	Risparmio energetico	Riduzione delle emissioni	Entrata prevista sul mercato
Materiali isolanti di elevata qualità	Steam reforming del metano		Migliori tecnologie disponibili	9% ([13]) ³⁸		
Recuperatori di calore	Steam reforming del metano		Migliori tecnologie disponibili			
Gassificazione della biomassa	Steam reforming del metano	6 ([15])	Nuovi processi produttivi			
Elettrolisi alcalina	Steam reforming del metano	7-9 ([13])	Nuovi processi produttivi		75% ([13])	Già presente ([13])
Elettrolisi con PEM fuel cell	Steam reforming del metano	7/8 ([13])	Nuovi processi produttivi		75% ([13])	Già presente ([13])
Materiali fotocatalitici	Steam reforming del metano	2/3 ([15])	Nuovi processi produttivi			
Fuel cell con membrana elettrolitica solida	Steam reforming del metano	6/7 ([13])	Nuovi processi produttivi			2025 ([13])
Fertilizzanti organici	Fertilizzanti minerali		Riduzione della domanda			Già presenti ([12])
Cattura con assorbimento chimico	Steam reforming del metano	11 ([15])	Cattura della CO ₂		55%÷90% ([12])	
Cattura con assorbimento fisico		9 ([15]))	Cattura della CO ₂			

³⁸ Risparmio energetico ottenibile mediante l'utilizzo contemporaneo dei materiali isolanti di elevata qualità e dei recuperatori di calore.

Capitolo 3

Opzione	Opzione di riferimento attuale	TRL	Categoria di intervento	Risparmio energetico	Riduzione delle emissioni	Entrata prevista sul mercato
Cattura con adsorbimento fisico		5 ([15])	Cattura della CO ₂			

3.1.3 Scenari

Per l'ammoniaca sono stati elaborati due scenari di decarbonizzazione. Ipotesi comune a entrambi gli scenari è che entro il 2050 tutta l'elettricità sarà a zero emissioni. Nello Scenario 1 si ipotizza che nel 2050 la produzione di ammoniaca aumenterà del 33% rispetto al 2018 e che gli stabilimenti chimici adotteranno solo le migliori tecnologie disponibili. Nello Scenario 2 si ipotizza invece che verranno implementate le strategie per la riduzione della domanda e che l'idrogeno necessario per la sintesi dell'ammoniaca verrà prodotto tramite elettrolisi dell'acqua. La Tabella 3.3 riassume queste ipotesi.

Tabella 3.3 – Ipotesi relative agli scenari di decarbonizzazione.

Scenario	Migliori tecnologie disponibili	Nuovi processi produttivi	Riduzione della domanda	Cattura emissioni di processo	Cattura emissioni da combustione
1	sì	no	no	sì	sì
2	no	elettrolisi	sì	no	no

3.1.3.1 Scenario 1

Si ipotizza che in Italia la produzione di ammoniaca aumenterà del 33% rispetto al 2018, arrivando a 0.8 Mt nel 2050, in linea con i dati forniti da ISPRA. Si assume inoltre che verranno adottate le migliori tecnologie disponibili, cioè i recuperatori di calore e i materiali isolanti di elevata qualità. La Tabella 3.4 riporta una stima del fabbisogno elettrico e del consumo di gas naturale e la variazione delle emissioni relativi allo Scenario 1. La sola adozione delle migliori tecnologie ad oggi disponibili non è sufficiente per la riduzione delle emissioni e infatti nel 2050 si prevede un aumento del 27%. Per le 1.3 Mt di emissioni rimanenti sarà necessario adottare impianti per la cattura della CO₂.

Tabella 3.4 – Stima del fabbisogno elettrico e termico e del potenziale di riduzione delle emissioni relative allo Scenario 1.

	2018	2050	u.d.m.
Fabbisogno elettrico	0.08	0.1	TWh
Consumo di gas naturale	5.5	6.7	TWh
Δ Fabbisogno elettrico	33%		
Δ Consumo di gas naturale	22%		
	2018	2050	u.d.m.
Emissioni CO₂	1	1.3	Mt
Δ Emissioni CO₂	27%		
HP: Efficienza di cattura del 73%			
	u.d.m.		

Emissioni catturate	0.9	Mt
Emissioni rimanenti	0.4	Mt

3.1.3.2 Scenario 2

In questo scenario si ipotizza che la produzione di ammoniaca diminuirà del 30% grazie alle strategie volte alla riduzione della domanda, arrivando a 0.4 Mt nel 2050. Si ipotizza che entro il 2050 l'idrogeno necessario per la sintesi dell'ammoniaca verrà prodotto solo mediante elettrolisi alcalina o con PEM fuel cells. Si assume inoltre che il calore necessario durante il processo produttivo verrà generato con l'elettricità. Di conseguenza saranno necessari 9.1 MWh di energia elettrica per la sintesi di una tonnellata di ammoniaca, come riportato dalla relazione *Industrial Transformation 2050* [12]. A ciò corrisponderà un fabbisogno elettrico di 3.6 TWh di elettricità nel 2050. In Tabella 3.5 si riporta la variazione del fabbisogno elettrico e il potenziale di riduzione delle emissioni relativi a questo scenario.

Tabella 3.5 – Stima del fabbisogno elettrico e termico e della riduzione delle emissioni relative allo Scenario 2.

	2018	2050	u.d.m
Fabbisogno elettrico	0.08	3.6	TWh
Consumo di gas naturale	5.5	-	TWh
Δ Fabbisogno elettrico	+4486%		
Δ Consumo di gas naturale	-100%		
	2018	2050	u.d.m
Emissioni CO₂ eq	1	0	Mt
Δ Emissioni CO₂ eq	-100%		

3.1.3.3 Confronto

La Figura 3.5 mostra il fabbisogno elettrico e il consumo di gas naturale relativi agli scenari elaborati. Nello Scenario 1 sia il fabbisogno elettrico sia il consumo di gas naturale aumentano, a causa dell'aumento di produzione. Nello Scenario 2 il consumo di gas naturale viene annullato grazie alle strategie volte alla riduzione della domanda e alla produzione dell'idrogeno tramite elettrolisi dell'acqua. Ciò comporta un fabbisogno elettrico di 3.6 TWh.

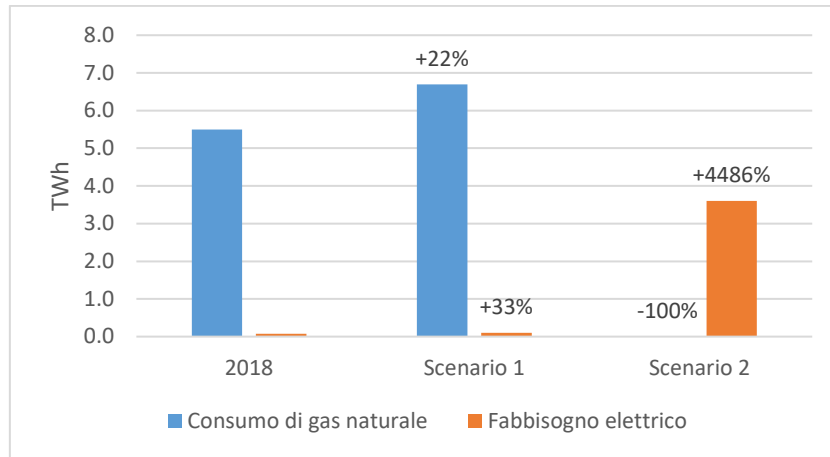


Figura 3.5 - Fabbisogni termici ed elettrici relativi agli scenari presentati.

La Figura 3.6 illustra il potenziale di abbattimento delle emissioni (senza considerare gli impianti di cattura). Come si può vedere dalla figura, la sola adozione delle migliori tecnologie disponibili (Scenario 1) non permette di ridurre le emissioni, mentre, grazie all'elettificazione, è possibile abbattele completamente (Scenario 2).

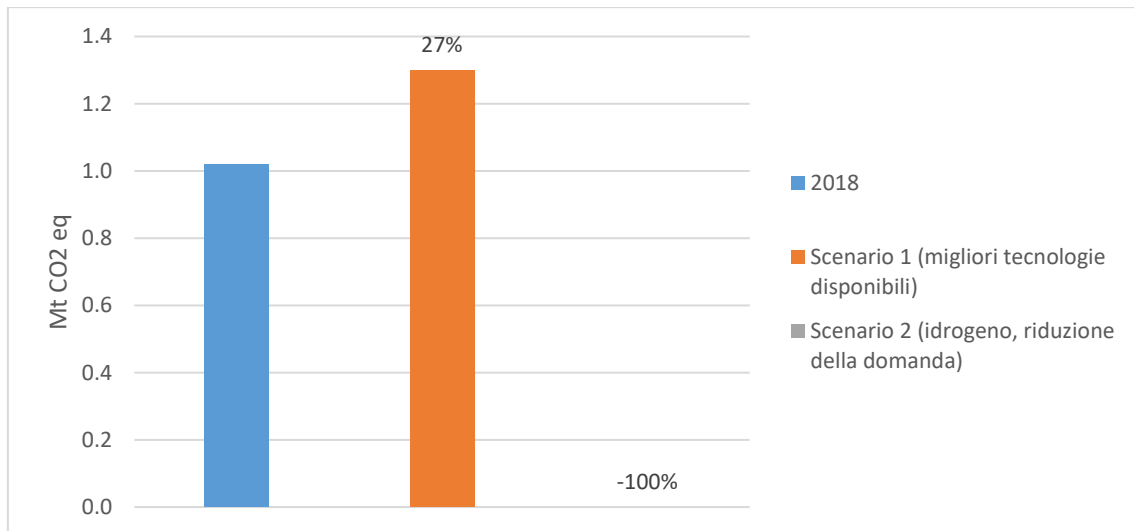


Figura 3.6 – Potenziali di riduzione delle emissioni relativi agli scenari presentati.

3.2 Etilene

L'etilene è un idrocarburo insaturo, dunque molto reattivo, che può essere impiegato in vari processi industriali. Ad esempio è la materia prima utilizzata per la sintesi di composti organici, dell'ossido di etilene e di molteplici tipologie di plastiche. Essendo un idrocarburo può anche essere bruciato per la generazione di energia termica. La

produzione europea di etilene è diminuita del 2% negli ultimi dieci anni, passando da 18.8 Mt nel 2009 a 18.4 Mt nel 2019 [62].

3.2.1 Processo produttivo attuale

Il processo produttivo dell'etilene si basa sullo steam cracking degli idrocarburi e può essere suddiviso in tre fasi:

1. Steam cracking e quenching. La carica idrocarburica viene alimentata all'interno di una fornace, dove avviene lo steam cracking, cioè il riscaldamento controllato degli idrocarburi in assenza di ossigeno. Dato che durante questa fase tende a formarsi il coke, in alimentazione viene aggiunto del vapore acqueo come diluente. Nel forno la miscela di idrocarburi e vapor d'acqua raggiunge una temperatura compresa fra 700°C e 950°C e con questo processo è possibile spezzare i legami fra gli atomi di carbonio e quelli di idrogeno. In questo modo si ottengono idrocarburi leggeri e insaturi. In seguito avviene il quenching, cioè il raffreddamento rapido volto a evitare l'innesco di reazioni secondarie indesiderate.
2. Compressione ed essiccazione, per rimuovere le impurità.
3. Separazione. Dopo un lavaggio il gas compresso viene frazionato attraverso una serie di colonne di distillazione e reattori di idrogenazione per la separazione dei gas acidi. Alla fine l'etilene viene separato dall'etano, dall'acetilene e dal propilene.

La Figura 3.7 riporta in modo schematico il processo di sintesi dell'etilene.

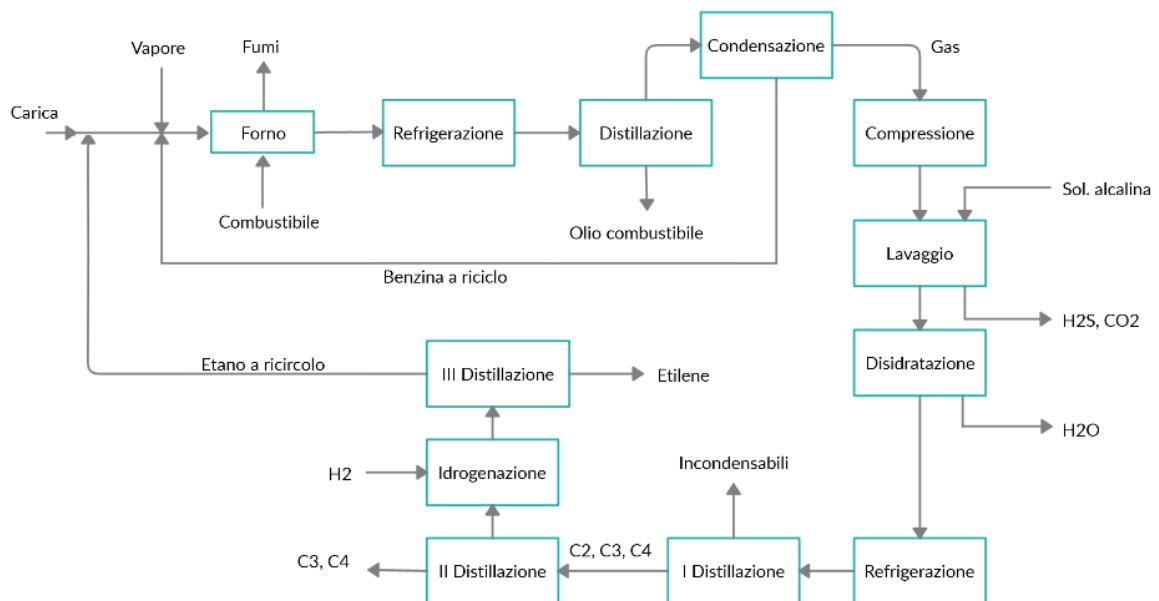


Figura 3.7 – Schematizzazione del processo produttivo dell'etilene.

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 (HVC: High Value Chemicals). La Figura 3.8 riporta le sostanze utilizzate per la produzione di etilene a livello mondiale negli anni 2010 e 2015 e una stima per l'anno 2020.

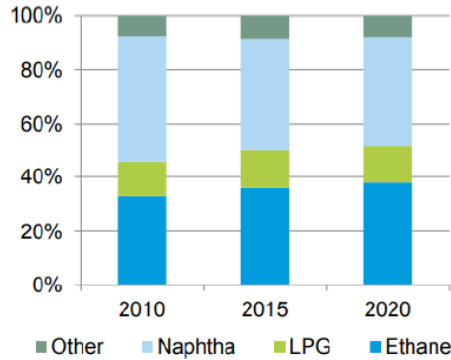


Figura 3.8 – Idrocarburi utilizzati per la produzione di etilene a livello mondiale. (Fonte [13]).

L'utilizzo della nafta per la sintesi dell'etilene comporta l'emissione di 0.8 t di CO₂/t di etilene prodotta [13].

3.2.1.1 Produzione, richiesta energetica ed emissioni

Non sono noti dati specifici riguardanti la produzione di etilene in Italia, di conseguenza è stata considerata una stima della produzione per il 2020 fornita da ISPRA. Il report [13] fornisce l'emission intensity relativo alla sintesi di etilene dalla nafta e, in mancanza di informazioni più specifiche, è stato utilizzato questo dato per stimare le emissioni totali nel 2020. Per una stima del fabbisogno elettrico e termico totali sono stati utilizzati i fabbisogni specifici trovati in letteratura ([13] e [63]). In Figura 3.9 viene riportata una schematizzazione dei calcoli svolti per stimare le emissioni e i fabbisogni energetici; in Tabella 3.6 vengono riportati i risultati ottenuti. La Figura 3.10 rappresenta il fabbisogno termico delle varie fasi del processo produttivo mediante un Sankey diagram.

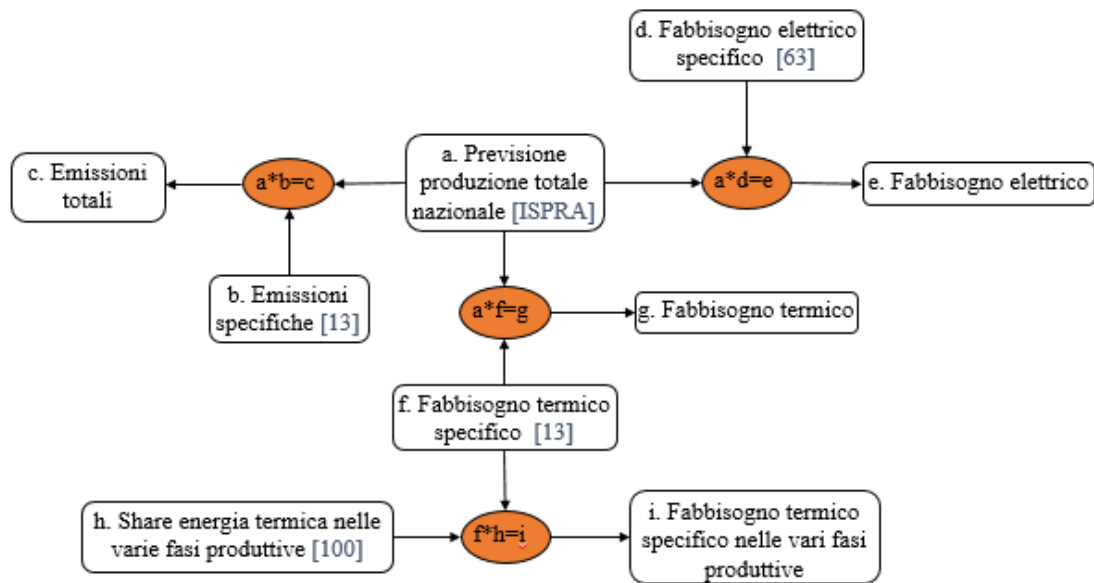


Figura 3.9 - Schema dei calcoli svolti per la stima delle emissioni e dei fabbisogni energetici.

Tabella 3.6 – Stima della produzione, delle emissioni e dei fabbisogni energetici relativi alla produzione di etilene in Italia nel 2020.

id			u.d.m.	Anno	Fonte
a	Previsione produzione ³⁹	1.22	Mt	2020	
b	Emissioni specifiche CO ₂	0.8	t CO ₂ /t etilene		[13]
c	Stima delle emissioni CO ₂	0.9	Mt	2020	c=a*b
d	Fabbisogno elettrico specifico	0.1	MWh/t	2003	[63]
e	Fabbisogno elettrico	0.1	TWh	2020	e=a*d
f	Fabbisogno termico specifico	3.4	MWh/t		[13]
g	Fabbisogno termico	4.1	TWh	2020	g=a*f

³⁹ Dato fornito da ISPRA.

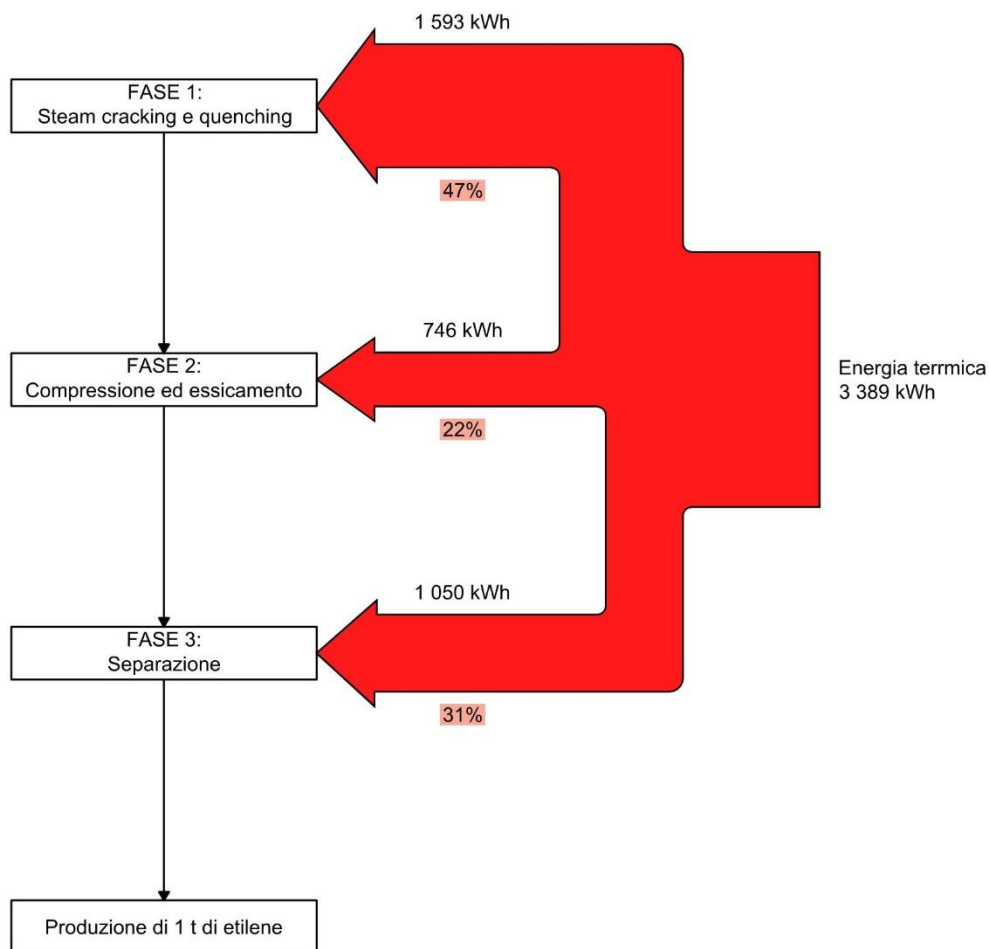


Figura 3.10 - Sankey diagram relativo al processo di produzione dell'etilene. Elaborazione grafica basata su informazioni provenienti dal report [13], per quanto riguarda il fabbisogno termico specifico, e dal report [100], per quanto riguarda lo share percentuale di energia termica richiesta dalle varie fasi del processo produttivo. Non sono state trovate informazioni riguardanti lo share percentuale di energia elettrica.

3.2.2 Soluzioni di decarbonizzazione

Le opzioni per la decarbonizzazione di questo settore industriale possono essere raggruppate in quattro categorie:

- Migliori tecnologie disponibili;
- Nuovi processi produttivi;
- Fonti energetiche alternative;
- Impianti per la cattura dell'anidride carbonica.

Ogni categoria è analizzata individualmente nei prossimi paragrafi.

3.2.2.1 Migliori tecnologie disponibili

Le tecnologie attualmente disponibili per il miglioramento del processo produttivo dell'etilene prevedono:

- l'integrazione di turbine a gas;
- il recupero del calore a bassa temperatura;
- l'utilizzo di materiali isolanti di elevata qualità per la costruzione dei forni.

E' possibile utilizzare i gas combusti per la generazione di energia elettrica, integrandoli con delle turbine a gas. In alternativa il calore contenuto negli off-gas può essere recuperato tramite impianti di teleriscaldamento. Inoltre le fornaci possono essere isolate con materiali di elevata qualità in modo da limitare le dispersioni termiche. In Europa vengono utilizzati in media 3.4 MWh di energia per la produzione di una tonnellata di etilene [13], ma si stima che mediante la combinazione di queste tecnologie sia possibile ridurre i consumi energetici a 3.3 MWh/t di etilene [13].

Il processo di steam cracking può essere migliorato attraverso nuove tecnologie di **catalisi**, come la pirolisi catalitica e l'ossidazione parziale catalitica. Lo steam cracking catalizzato avviene a temperature inferiori e con una maggiore velocità di reazione; ciò permette di ridurre del 20% il fabbisogno termico e le emissioni [13]. Il TRL di questi processi produttivi catalizzati è pari a 8 e il primo impianto commerciale con steam cracking catalitico è già entrato in funzione in Cina [13]. Il materiale catalitico non si consuma durante la reazione, ma è possibile che si disattivi a causa del deposito di coke sulla sua superficie. E' quindi necessario rigenerarlo per combustione del deposito. L'utilizzo dei catalizzatori richiede che le colonne di cracking siano modificate per poter inserire queste sostanze.

Le tecniche più diffuse per effettuare il processo di distillazione sono la separazione criogenica, la separazione per assorbimento e per adsorbimento, ma queste tecnologie richiedono in input un'elevata quantità di calore (1.1 MWh/t etilene prodotta). Utilizzando invece le **membrane selettive** è possibile ridurre il fabbisogno termico del processo produttivo del 5% [13]. Il TRL di questa tecnologia è pari a 6/7 e i suoi costi non sono stati ancora stimati [13]. Questa tecnologia è facilmente integrabile con gli impianti già esistenti.

3.2.2.2 Nuovi processi produttivi

I nuovi processi sviluppati per la produzione dell'etilene sono basati su:

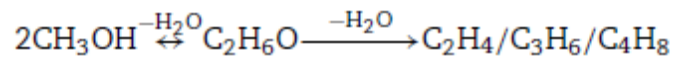
- Deidratazione dell'etanolo o del bioetanolo;
- Sintesi dal metanolo;
- Fotosintesi artificiale.

L'etilene può essere prodotto per **deidratazione dell'etanolo** (C_2H_6O). Questo processo produttivo richiede delle temperature inferiori e come input termico può anche essere

utilizzato il calore di scarto proveniente da altre applicazioni. Questo processo non è attualmente utilizzato perché economicamente svantaggioso, in quanto il prezzo dell'etanolo è elevato.

Tramite lo stesso processo l'etilene può essere sintetizzato anche a partire dal **bioetanolo**, che viene ricavato dalla biomassa zuccherina tramite fermentazione, dalla biomassa amidacea tramite idrolisi⁴⁰, oppure dalla biomassa lignocellulosica tramite gassificazione. Queste tecnologie sono già disponibili sul mercato, anche se il processo di gassificazione della biomassa lignocellulosica è ancora poco sviluppato⁴¹.

L'etilene può essere sintetizzato a partire dal **metanolo** tramite il processo Methanol-to-olefins (Capitolo 3.3). In Europa il metanolo viene principalmente prodotto tramite lo steam reforming del gas naturale, ma è possibile produrre metanolo a emissioni nette pari a zero utilizzando idrogeno ricavato dall'elettrolisi dell'acqua [13]. La trasformazione del metanolo in olefine è un processo catalitico complesso. Inizialmente avviene una reazione chimica reversibile durante la quale il metanolo viene disidratato, in seguito alla quale si ottiene etere dimetilico (C₂H₆O). Questa sostanza viene poi convertita in olefine, come etilene, propilene e butene, secondo la seguente reazione chimica:



Questa reazione avviene a una temperatura compresa fra i 350°C e i 500°C, a una pressione di 2-3bar e in presenza di un catalizzatore [101]. Questo modo di produrre l'etilene è energeticamente efficiente e ha un TRL di 8/9 [13]. Questo processo permette di ridurre del 47% il fabbisogno termico rispetto alla sintesi dell'etilene dalla nafta [13].

La **fotosintesi artificiale** è un processo chimico che riproduce la fotosintesi naturale e che permette di produrre prodotti chimici ad alto valore aggiunto (High Value Chemicals: HVC) e idrogeno. L'idrogeno può poi essere utilizzato per la sintesi del metanolo e a sua volta dell'etilene. La fotosintesi artificiale richiede come input la luce solare e anidride carbonica. Lo svantaggio risiede nel fatto che i cicli produttivi sono lenti e direttamente dipendenti dalla disponibilità di luce solare. Inoltre questa tecnologia non permette di sfruttare gli impianti già esistenti per la sintesi dell'etilene. Il TRL di questa tecnologia è pari a 2/3 [13].

⁴⁰ Con il termine idrolisi si intende un insieme di reazioni chimiche durante le quali le molecole sono scisse in due o più parti per effetto dell'acqua.

⁴¹ L'*ETP Clean Energy Technology Guide* [15] riporta che in molti paesi sono già diffusi vari stabilimenti che producono etilene a partire dal bioetanolo. I due impianti più grandi sono quello della *Braskem* e quello della *India Glycols*. Lo stabilimento della *Braskem* è entrato in funzione in Brasile nel 2010 e produce 0.2 Mt all'anno di etilene utilizzando come materia prima la canna da zucchero [15]. L'impianto dell'*India Glycols* è stato aperto nel 1989 e sintetizza circa 0.18 Mt all'anno di etilene a partire dalla melassa [15]. Nel 2014 *Axens*, *Total* e *IFP Energies Nouvelles* hanno lanciato sul mercato *Atol*, una tecnologia per la produzione di etilene a partire dalla deidratazione del bioetanolo. Questo sistema può parzialmente o totalmente sostituire la sintesi di etilene da idrocarburi di origine fossile in quanto il bioetanolo viene prodotto a partire da biocarburanti.

3.2.2.3 Fonti energetiche alternative

Uno degli input necessari durante il processo di steam cracking è il vapore acqueo. L'acqua viene generalmente riscaldata in un boiler alimentato con gas naturale, ma questo può essere sostituito con una **caldaia elettrica**. Questa soluzione ha dei costi di implementazione molto bassi e il suo TRL è pari a 8 [13].

3.2.2.4 Cattura della CO₂

Gli impianti di cattura permettono di eliminare fino al 90% delle emissioni di anidride carbonica [13]. 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 prodotta [13]. Si stima che il TRL di questi impianti sia compreso fra 5 e 8 [13].

La Tabella 3.7 riassume le opzioni disponibili per la decarbonizzazione del processo produttivo dell'etilene.

Capitolo 3

Tabella 3.7 – Riepilogo delle tecnologie e strategie alternative per la decarbonizzazione delle industrie produttrici di etilene. (Fonte [13]).

Opzione	Opzione di riferimento attuale	TRL	Categoria di intervento	Riduzione delle emissioni	Risparmio energetico	Entrata prevista sul mercato
Recuperatori di calore	Steam cracking di idrocarburi		Migliori tecnologie disponibili		1% ⁴²	
Turbine a gas	Steam cracking di idrocarburi		Migliori tecnologie disponibili			
Materiali isolanti di elevata qualità	Steam cracking di idrocarburi		Migliori tecnologie disponibili			
Steam cracking catalitico	Steam cracking di idrocarburi	8	Migliori tecnologie disponibili	20%	20%	Già presente
Membrane selettive	Steam cracking di idrocarburi	6/7	Migliori tecnologie disponibili		5%	2025
Deidratazione dell'etanolo	Steam cracking di idrocarburi	9	Nuovi processi produttivi			
Sintesi dal metanolo	Steam cracking di idrocarburi	8/9	Nuovi processi produttivi	47%	47%	
Fotosintesi artificiale	Steam cracking di idrocarburi	2/3	Nuovi processi produttivi			
Caldaie elettriche	Caldaie a gas naturale	8	Fonti energetiche alternative			
Cattura post-combustione	Steam cracking di idrocarburi	5÷8	Cattura della CO ₂	90%		2030

⁴² Risparmio energetico ottenibile mediante l'adozione contemporanea dei recuperatori di calore, delle turbine a gas e dei materiali isolanti di elevata qualità.

3.2.3 Scenari

Per l'etilene sono stati elaborati tre scenari di decarbonizzazione, nei quali vengono combinate insieme alcune delle soluzioni spiegate precedentemente. Ipotesi comuni a tutti gli scenari è che entro il 2050 tutta l'elettricità sarà a zero emissioni e che la produzione di etilene aumenterà dello 0.5% rispetto al 2020, arrivando a 1.23 Mt nel 2050 (dato fornito da ISPRA). Nello Scenario 1 si ipotizza che tutti gli stabilimenti chimici dove viene prodotto etilene adotteranno le migliori tecnologie disponibili e lo steam cracking catalizzato. Nello Scenario 2 si ipotizza che, oltre a queste soluzioni, verranno utilizzate anche le membrane selettive. Nello Scenario 3 si assume che tutto l'etilene verrà sintetizzato a partire dal metanolo. La Tabella 3.8 riassume tutte queste ipotesi.

Tabella 3.8 – Ipotesi relative agli scenari di decarbonizzazione.

Scenario	Migliori tecnologie disponibili	Steam cracking catalitico	Membrane selettive	Sintesi dal metanolo	Cattura delle emissioni
1	sì	sì	no	no	sì
2	sì	sì	sì	no	sì
3	no	no	no	sì	sì

3.2.3.1 Scenario 1

In questo scenario si ipotizza che entro il 2050 tutti gli stabilimenti chimici dove viene prodotto l'etilene adotteranno le migliori tecnologie disponibili, cioè i recuperatori di calore, le turbine a gas e i materiali isolanti di elevata qualità. Combinando insieme queste soluzioni sarà possibile ridurre del 2% il fabbisogno termico [13]. Utilizzando anche i catalizzatori per la fase di steam cracking sarà possibile ottenere un'ulteriore riduzione del 20% [13]. Complessivamente il fabbisogno termico e le emissioni diminuiranno del 21%. La Tabella 3.9 riassume i risultati ottenuti in questo scenario. Per le 0.74 Mt di emissioni rimanenti si prevede l'impiego di impianti di cattura.

Tabella 3.9 – Variazione del fabbisogno elettrico e termico e potenziale di riduzione delle emissioni relativi allo Scenario 1.

	2018	2050	u.d.m.
Fabbisogno elettrico	0.1019	0.1025	TWh
Fabbisogno termico	4.1	3.3	TWh
Δ Fabbisogno elettrico	+0.5%		
Δ Fabbisogno termico	-21%		
	2018	2050	u.d.m.
Emissioni CO₂	0.9	0.74	Mt
Δ Emissioni CO₂	-21%		
HP: Efficienza di cattura del 90%			
			u.d.m.

Emissioni catturate	0.66	Mt
Emissioni rimanenti	0.07	Mt

3.2.3.2 Scenario 2

Nello Scenario 2 si ipotizza che, oltre alle soluzioni previste nello Scenario 1, verranno adottate anche le membrane selettive nella fase di distillazione. Questa soluzione permetterà un'ulteriore riduzione del 5% del fabbisogno termico e delle emissioni, arrivando così a una riduzione complessiva del 25% [13]. La Tabella 3.10 riassume i risultati ottenuti in questo scenario. Per le 0.7 Mt di emissioni rimanenti sarà necessaria l'adozione di impianti per la cattura della CO₂.

Tabella 3.10 – Variazione del fabbisogno elettrico e termico e potenziale di riduzione delle emissioni relativi allo Scenario 2.

	2018	2050	u.d.m.
Fabbisogno elettrico	0.1019	0.1025	TWh
Fabbisogno termico	4.1	3.1	TWh
Δ Fabbisogno elettrico	+1%		
Δ Fabbisogno termico	-25%		
	2018	2050	u.d.m.
Emissioni CO₂	0.9	0.7	Mt
Δ Emissioni CO₂	-25%		
HP: Efficienza di cattura del 90%			
			u.d.m.
Emissioni catturate	0.6		Mt
Emissioni rimanenti	0.1		Mt

3.2.3.3 Scenario 3

Nello Scenario 3 si ipotizza che entro il 2050 tutto l'etilene verrà prodotto utilizzando metanolo a zero emissioni. Questa soluzione permetterà di ridurre del 47% il fabbisogno termico e le emissioni. In Tabella 3.11 vengono riportati i risultati relativi a questo scenario. Per le 0.5 Mt rimanenti sarà necessaria l'adozione di impianti di cattura.

Tabella 3.11 - Variazione del fabbisogno elettrico e termico e potenziale di riduzione delle emissioni relativi allo Scenario 3.

	2018	2050	u.d.m.
Fabbisogno elettrico	0.1019	0.1025	TWh
Fabbisogno termico	4.1	2.2	TWh
Δ Fabbisogno elettrico	+1%		

Δ Fabbisogno termico	-47%		
	2018	2050	u.d.m.
Emissioni CO₂	0.9	0.5	Mt
Δ Emissioni CO₂	-47%		
HP: Efficienza di cattura del 90%			
			u.d.m.
Emissioni catturate	0.45		Mt
Emissioni rimanenti	0.05		Mt

3.2.3.4 Confronto

La Figura 3.11 illustra la variazione del fabbisogno termico ed elettrico relativa agli scenari analizzati. Grazie all'adozione delle migliori tecnologie disponibili e dei catalizzatori per la fase di steam cracking è possibile ridurre del 21% il fabbisogno termico (Scenario 1), mentre utilizzando anche le membrane selettive per la distillazione è possibile ridurlo fino al 25% (Scenario 2). Sintetizzando invece l'etilene dal metanolo il fabbisogno termico viene quasi dimezzato (Scenario 3). Il fabbisogno elettrico rimane costante in tutti gli scenari.

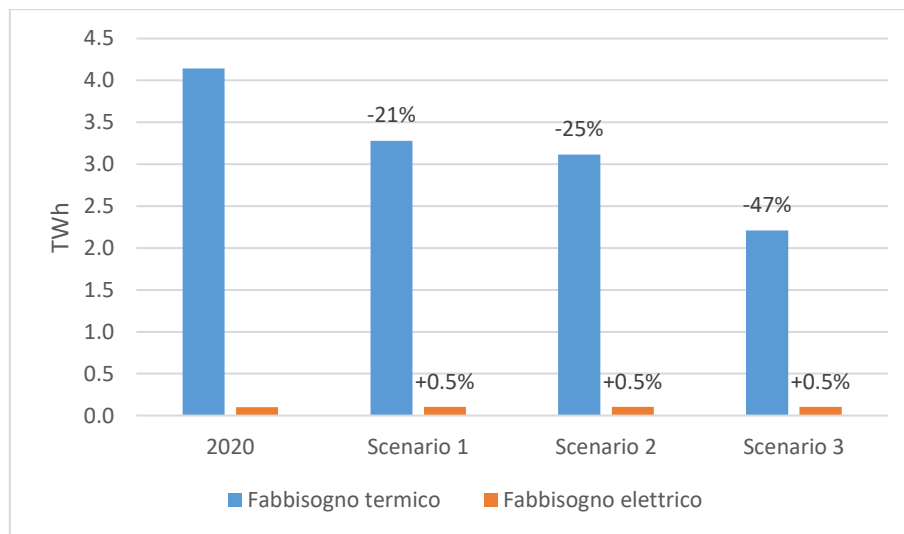


Figura 3.11 – Variazione del fabbisogno termico ed elettrico relativa agli scenari presentati.

La Figura 3.12 illustra il potenziale di riduzione delle emissioni, che segue lo stesso trend di decrescita del fabbisogno termico (impianti per la cattura esclusi).

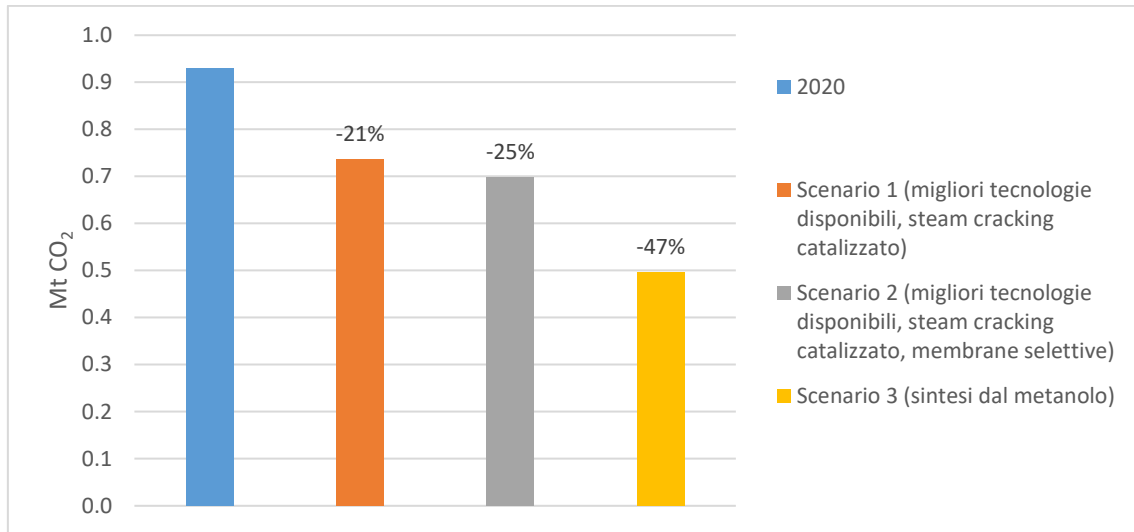


Figura 3.12 – Potenziale di riduzione delle emissioni relativo agli scenari presentati.

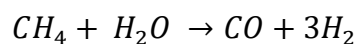
3.3 Metanolo

Il metanolo (CH₃OH o MeOH) viene impiegato in numerose applicazioni industriali per la sintesi di composti chimici e solventi. Il metanolo viene inoltre utilizzato nel processo Methanol-to-gasoline, un sistema per la produzione della benzina a partire dal gas naturale o dal carbone. Questo processo si è rivelato vantaggioso per quei paesi del mondo che hanno abbondanti riserve di carbone e di gas naturale, ma con pochi giacimenti petroliferi. Sono stati sviluppati anche i processi Methanol-to-olefins e Methanol-to-aromatics, che permettono rispettivamente di convertire il metanolo in olefine e in composti aromatici. Il sistema Methanol-to-olefins è già diffuso su scala commerciale in Cina e ha permesso la produzione di 9 Mt di HVC nel 2018 [54]. La tecnologia Methanol-to-aromatics è invece ancora in fase di dimostrazione.

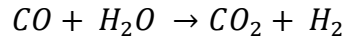
Nel 2018 a livello mondiale sono state prodotte 140 Mt di metanolo [64]. Per la produzione di una tonnellata di metanolo vengono emesse dalle 0.8 alle 3.1 tonnellate di anidride carbonica [54].

3.3.1 Processo produttivo attuale

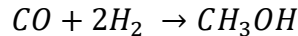
Il metanolo viene oggi sintetizzato principalmente a partire dal gas naturale, ma è possibile produrlo anche tramite la gassificazione del carbone [54]. Utilizzando il gas naturale, alla pressione di 10÷20 bar e alla temperatura di circa 850°C il metano e il vapore acqueo si combinano secondo la reazione di Steam Reforming:



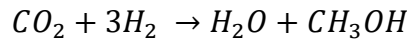
Durante questa reazione viene impiegato un catalizzatore a base di nichel. In seguito avviene la reazione di Water Gas Shift per la conversione del monossido di carbonio in anidride carbonica e idrogeno:



Il monossido di carbonio e l'idrogeno reagiscono in un secondo reattore catalitico, dove viene prodotto il metanolo, secondo la reazione:



Questa reazione avviene a una temperatura di 250°C e a una pressione compresa fra 50 e 101 bar. La reazione di SR del metano produce tre moli di idrogeno per ogni mole di monossido di carbonio, mentre la reazione di sintesi del metanolo consuma solo due moli di H₂. E' possibile utilizzare l'idrogeno in eccesso facendo avvenire all'interno del reattore di sintesi anche la seguente reazione:



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 [65].

3.3.2 Soluzioni di decarbonizzazione

Le alternative per la decarbonizzazione di questo settore chimico sono:

- Fonti energetiche alternative;
- Nuove materie prime;
- Installazione di impianti per la cattura del biossido di carbonio.

Ogni categoria viene presentata singolarmente nei prossimi paragrafi.

3.3.2.1 Fonti energetiche alternative

L'idrogeno richiesto durante la sintesi del metanolo può essere prodotto tramite **elettrolisi dell'acqua**. Il TRL di questa tecnologia è pari a 7 e viene già sfruttata in molti impianti pilota [15]. In paesi dove l'elettricità da fonti rinnovabili ha un prezzo basso l'elettrolisi può diventare economicamente competitiva con i processi basati sul gas naturale o sul carbone⁴³.

⁴³ Nel 2009 in Giappone è entrato in funzionamento un impianto della *Mitsui Chemicals* che sfrutta l'elettrolisi dell'acqua per la produzione di 100t all'anno di metanolo [15]. *Siemens* ha avviato il progetto

3.3.2.2 Nuove materie prime

Petrolio, carbone e gas naturale possono essere sostituiti con la **biomassa** per la sintesi del metanolo. E' possibile utilizzare qualsiasi tipo di biomassa, come legno, trucioli, erba, residui delle lavorazioni agricole, sottoprodotti e scarti derivanti dall'allevamento, piante acquatiche e rifiuti organici. Il TRL di questa opzione è pari a 8 [15]. L'utilizzo di biomassa richiede una grande disponibilità di terreno per la coltivazione delle piante e spesso l'impiego di questa risorsa è prioritario in altri settori⁴⁴.

E' anche possibile produrre metanolo mediante la gassificazione di **rifiuti**⁴⁵.

3.3.2.3 Cattura e stoccaggio della CO₂

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. Il TRL di queste tecnologie è riferito al loro utilizzo in impianti dove viene sintetizzato il metanolo.

Il biossido di carbonio può essere catturato post-combustione mediante **assorbimento chimico** con solventi a base di ammine. L'anidride carbonica viene rilasciata quando la temperatura è compresa fra 120°C e 150°C e il solvente viene rigenerato per essere utilizzato di nuovo. Secondo l'*ETP Clean Energy Technology Guide* [15] gli impianti di cattura e stoccaggio non sono ancora stati abbinati agli stabilimenti dove viene prodotto metanolo, quindi il loro TRL è pari a 5⁴⁶.

E' possibile effettuare la cattura post-combustione anche attraverso impianti basati sull'**assorbimento fisico** con solventi come *Selexol* e *Rectisol*. Con questo metodo non avviene alcuna reazione chimica e il TRL di questa tecnologia è pari a 7 [15].

La cattura post-combustione tramite **adsorbimento fisico** prevede l'impiego di materiali adsorbenti selettivi. Il rilascio della CO₂ può poi avvenire mediante Pressure Swing

GreenHydroChem presso un suo stabilimento in Germania. Qui vengono impiegati elettrolizzatori con una capacità complessiva di 50 MW per la produzione di idrogeno tramite energia rinnovabile, destinato alla sintesi di metanolo e di altri prodotti chimici [15]. In Patagonia la *Siemens* sta sviluppando un programma per la produzione di metanolo su vasta scala tramite l'utilizzo di energia eolica.

⁴⁴ Nel 2012 *VärmlandsMetanol AB* e *ThyssenKrupp Industrial Solutions* hanno annunciato la costruzione del più grande impianto dimostrativo al mondo per la gassificazione della biomassa al fine di sintetizzare metanolo. Questo stabilimento ha sede in Svezia e il processo produttivo utilizza impianti simili a quelli impiegati per la sintesi di metanolo a partire dal carbone. Nei Paesi Bassi il metanolo viene prodotto anche a partire da biogas da *BioMCN*.

⁴⁵ Questo sistema viene sfruttato da *Enerkem*, che gestisce uno stabilimento produttivo e un centro di innovazione in Canada.

⁴⁶ L'assorbimento chimico viene sfruttato in impianti di Carbon Capture and Utilization e il suo TRL è di 9 [15].

Adsorption, Vacuum Swing Adsorption oppure tramite Vacuum Pressure Swing Adsorption e il TRL di questa tecnologia è pari a 8 [15].

Ciò che maggiormente influenza la scelta delle tecnologie da adottare sono i prezzi del gas naturale e dell'elettricità. Quando il prezzo dell'energia elettrica è di 8€÷55€/MWh è favorita la produzione di metanolo tramite elettrolisi dell'acqua (assumendo il costo del gas naturale compreso fra 10€ e 27€ per MWh) [54].

La Tabella 3.12 riassume le opzioni disponibili per la decarbonizzazione del processo di produzione del metanolo. In mancanza di dati specifici sulla produzione italiana di metanolo non è stato possibile elaborare degli scenari di decarbonizzazione.

Tabella 3.12 – Riepilogo delle principali tecnologie e strategie alternative per la decarbonizzazione delle industrie produttrici di metanolo (Fonte [15]).

Opzione	Opzione di riferimento attuale	TRL	Categoria di intervento
Elettrolisi dell'acqua	Steam reforming del gas naturale	7	Fonti energetiche alternative
Biomassa	Steam reforming del gas naturale	8	Nuove materie prime
Rifiuti	Steam reforming del gas naturale		Nuove materie prime
Cattura con assorbimento chimico	Steam reforming del gas naturale	5	Cattura della CO ₂
Cattura con assorbimento fisico	Steam reforming del gas naturale	7	Cattura della CO ₂
Cattura con adsorbimento fisico	Steam reforming del gas naturale	8	Cattura della CO ₂

3.4 Plastica

La plastica è un materiale organico a elevato peso molecolare, cioè è costituito da molecole polimeriche con una catena molto lunga. I polimeri più comunemente utilizzati sono prodotti attraverso lo steam cracking della nafta e dell'etano; in Europa la nafta è la sostanza più utilizzata [12].

I polimeri possono essere suddivisi in termoindurenti e in termoplastici. In particolari condizioni di temperatura e/o in presenza di determinate sostanze, nei polimeri termoindurenti avviene la reazione di reticolazione, cioè si creano dei forti legami fra le catene polimeriche. Questi legami sono definitivi e ciò rende difficile il riciclaggio di questa tipologia di materiali. I polimeri termoplastici diventano malleabili quando vengono riscaldati; cessata l'azione del calore ritornano allo stato solido e conservano la

forma ricevuta. Questa trasformazione è reversibile e in linea teorica può essere ripetuta più volte. In realtà però ogni volta che si ripete l'operazione di riscaldamento e formatura la qualità del materiale tende un po' a degradarsi.

I cinque tipi di plastica più diffusi sono il polietilene (PE), il polipropilene (PP), il polistirene (PS), il polivinilcloruro (PVC) e il polietilene tereftalato (PET) [12]. Questi sono tutti polimeri termoplastici e nel 2017 hanno rappresentato il 75% della plastica utilizzata in Europa [12] (Figura 3.13). Gli usi più comuni del PE sono come isolante per i cavi elettrici e per la fabbricazione di borse e buste di plastica. Il polipropilene viene utilizzato per la produzione di molti oggetti di uso comune, come zerbini, scolapasta e cruscotti delle automobili. Il polistirene viene utilizzato per la fabbricazione di posate e piatti di plastica. Il PVC è largamente impiegato nel settore delle costruzioni per la fabbricazione di grondaie e tubi per l'acqua potabile. Con il PET vengono prodotti tubi, bottiglie e imballaggi.

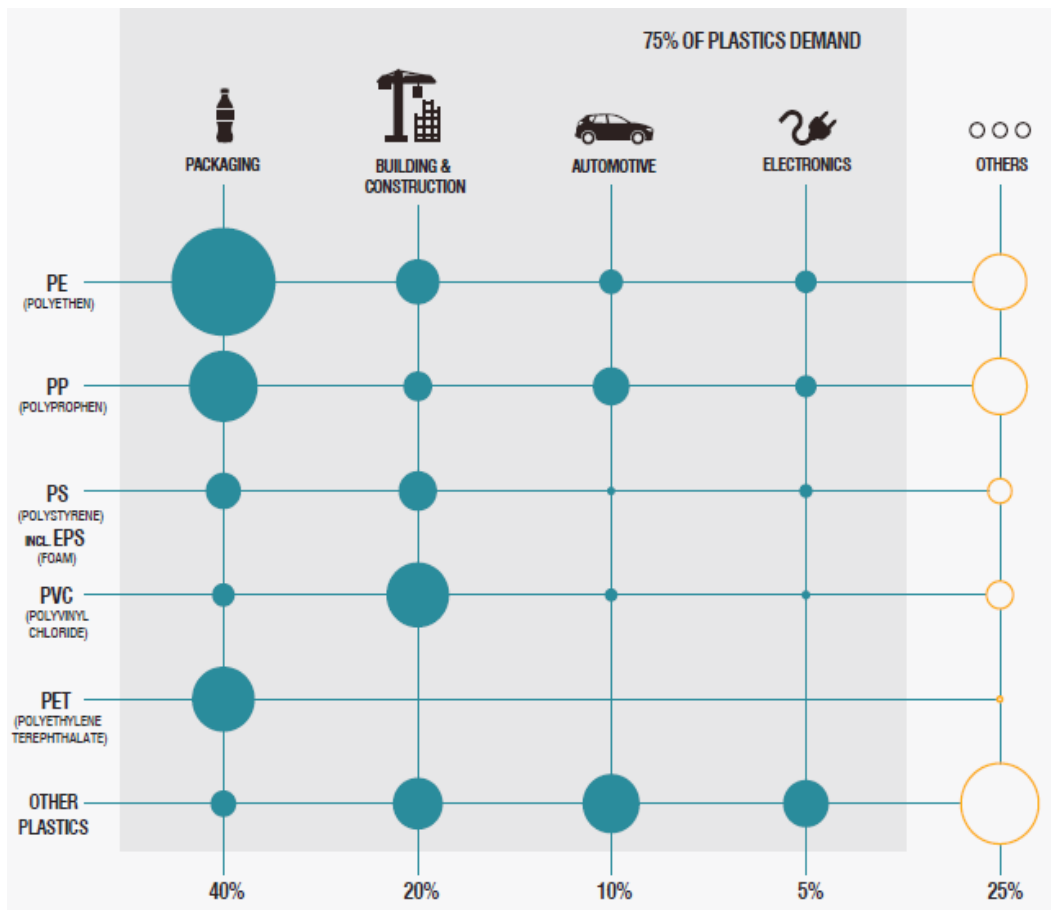


Figura 3.13 – Tipi di plastica e relativo consumo in Europa nel 2017. (Fonte [12]).

Dal 2008 al 2018 la produzione mondiale di plastica è aumentata del 47% (passando da 245 Mt nel 2008 a 359 Mt nel 2018), mentre la produzione europea è aumentata solo del 3% (da 60 Mt nel 2008 a 61.8 Mt nel 2018) [66]. Nel 2018 in Italia sono state prodotte

6.1 Mt di materie plastiche, pari al 10% della produzione europea [16]. Nel medesimo anno il fatturato relativo è stato pari a 8106 milioni di euro [16].

Circa il 40% dei materiali plastici vengono impiegati nella produzione di imballaggi; questi oggetti hanno una vita utile molto breve e costituiscono il 60% dei rifiuti di plastica prodotti nell'Unione Europea [12]. Un ulteriore 30% della plastica viene utilizzato nel settore edilizio e dei trasporti [12], mentre il restante 30% viene utilizzato per la fabbricazione di prodotti elettronici, agricoli e medicali [12]. Circa il 40% della plastica è di tipo "usa e getta" e ha una vita utile di circa 10 anni [12]. Ogni anno in Europa devono essere smaltiti circa 40 Mt di rifiuti di plastica [12]. 9 Mt vengono riciclate meccanicamente e ciò consente di produrre circa 4 Mt di plastica secondaria [12].

3.4.1 Processo produttivo attuale

Il processo di produzione della plastica parte dallo steam cracking degli idrocarburi, che avviene a temperature comprese fra 850°C e 1100°C. Durante questo processo le lunghe catene delle molecole idrocarburiche si spezzano in catene più piccole e si ottengono i monomeri, ossia gli elementi costitutivi dei materiali plastici. In seguito avviene la polimerizzazione, ossia una reazione chimica durante la quale i monomeri si uniscono tra loro formando i polimeri. Vengono poi aggiunti additivi e coloranti, per dare alla plastica le caratteristiche desiderate. La pasta che si forma viene trasformata in granuli e polveri, che vengono poi sottoposti a ulteriori trattamenti, a seconda del tipo di materiale plastico e di oggetto da creare. Tali processi secondari vengono effettuati in stabilimenti locali di piccole e medie dimensioni.

3.4.1.1 Produzione, richiesta energetica ed emissioni

In Europa la plastica viene prodotta utilizzando principalmente petrolio e gas naturale, che vengono impiegati sia come combustibile sia come materia prima [12]. Le industrie europee produttrici di plastica rilasciano ogni anno circa 132 Mt di biossido di carbonio in atmosfera [9]. Dal report *Industrial Transformation 2050* [12] emerge che per la produzione di 1 kg di materiale plastico vengono emessi 1.5 kg di CO₂, di cui 0.9 kg derivano dal processo di steam cracking e 0.6 dalle fasi di polimerizzazione e di miscelazione con additivi e coloranti. Nota la produzione nazionale nel 2018 e l'emission intensity riportato dalla relazione [12], sono state stimate le emissioni totali (Figura 3.14). I risultati ottenuti vengono riportati in Tabella 3.13.

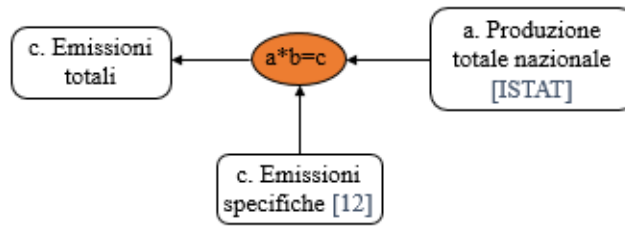


Figura 3.14 – Schema dei calcoli svolti per la stima delle emissioni.

Tabella 3.13 – Stima della produzione e delle emissioni relative alla produzione di plastica in Italia nel 2018.

id			u.d.m.	Fonte
a	Produzione	6.1	Mt	ISTAT [16]
b	Emissioni specifiche	1.5	t CO ₂ /t plastica	[12]
c	Emissioni CO₂	9.2	Mt	c=a*b

3.4.2 Soluzioni di decarbonizzazione

Le opzioni disponibili per la decarbonizzazione della produzione della plastica possono essere raggruppate nelle seguenti tipologie:

- Fonti energetiche alternative;
- Riduzione della domanda.

Ogni categoria viene presentata singolarmente nei prossimi paragrafi.

3.4.2.1 Fonti energetiche alternative

Durante il processo produttivo l'energia termica viene generata utilizzando principalmente sottoprodotti industriali e/o gas naturale [12]. E' però possibile utilizzare l'**elettricità** per la produzione del calore necessario durante il processo di steam cracking. Gli ostacoli maggiori alla diffusione dell'elettrificazione sono di tipo economico, in quanto sono richiesti investimenti elevati e la disponibilità di energia elettrica a un prezzo competitivo.

3.4.2.2 Riduzione della domanda

Secondo alcuni esperti è possibile ridurre il contenuto di plastica negli imballaggi del 20% o più senza comprometterne la funzionalità [12]. Si stima inoltre che il 25% della plastica utilizzata per gli imballaggi possa essere sostituita con materiali alternativi naturali, senza compromettere le performance di questi oggetti [12]. Le strategie

dell'economia circolare prevedono anche la diffusione di nuovi modelli di business basati sulla condivisione, come ad esempio il *car sharing*. Secondo alcuni studi attraverso l'ampia diffusione del *car sharing* sarebbe possibile più che dimezzare l'utilizzo della plastica nel settore automobilistico [12]. Nel seguito vengono presentate le nuove materie prime che possono essere utilizzate per produrre la plastica e le tecniche di riciclaggio di questo materiale.

Nuove materie prime

Un'opzione per la decarbonizzazione di questo settore industriale è il passaggio dall'utilizzo di materie prime di origine fossile a sostanze naturali per la sintesi di bioetanolo, biometanolo, biogas e bionafta [12]. Attualmente sono già disponibili molti processi innovativi per la produzione di plastica a partire dalla biomassa, come la digestione anaerobica e la gassificazione della biomassa [12]. Durante questi processi viene prodotto metanolo, che è poi convertito in olefine tramite il processo *Methanol-to-olefins*. La disponibilità di biomassa sostenibile è limitata e inoltre questa è una risorsa molto richiesta anche in molti altri settori. E' quindi necessario limitare l'utilizzo di biomassa per la fabbricazione di plastica e impiegarla solo come una soluzione strategica all'interno di un sistema fondato sul miglioramento dell'efficienza dei materiali plastici e sull'economia circolare.

La plastica inoltre può essere sostituita con materiali di origine naturale, come i biocompositi. Si stima che nel settore delle costruzioni, dei trasporti e dei componenti elettronici sia possibile sostituire almeno il 5% della plastica con questi materiali [12]. I biocompositi sono dei materiali formati da una matrice polimerica rinforzata con fibre naturali. La matrice serve per tenere insieme le fibre e per proteggerle dalla degradazione ambientale e dai danni meccanici. I biocompositi si stanno diffondendo sempre più in quanto sono materiali leggeri ed economici; inoltre possono essere utilizzati da soli oppure combinati con i materiali tradizionali. Le fibre naturali presentano però degli svantaggi rispetto ai materiali polimerici tradizionali, in quanto hanno una scarsa resistenza all'umidità e alle temperature di lavorazione e hanno la tendenza a formare aggregati durante il processo produttivo. Inoltre le caratteristiche delle fibre naturali dipendono dalla qualità del raccolto, dall'età della pianta, dalle tecniche di estrazione e dalle condizioni ambientali della località di provenienza.

Riciclo

E' possibile riciclare la plastica meccanicamente oppure chimicamente. Il **riciclo meccanico** prevede che i materiali plastici vengano raccolti, tritati, fusi e riprocessati in nuovi prodotti di plastica. Ciò porta a una significativa riduzione delle emissioni: per il riciclo di una tonnellata di plastica vengono emesse in media 0.5 t di biossido di carbonio, nettamente inferiori alle 1.5 t emesse per la produzione di 1 t di plastica vergine [12].

Le tecnologie di **riciclo chimico** permettono di scomporre la plastica in monomeri e oligomeri⁴⁸. Il riciclo chimico è una valida alternativa per quei materiali che non possono essere riciclati meccanicamente e consente inoltre di produrre plastica di elevata qualità. Questo tipo di riciclo non ha ancora raggiunto la piena maturità tecnologica, ma attualmente molte aziende europee lo stanno studiando. Questa tipologia di riciclo include diverse tecnologie, tra cui:

- la gassificazione dei rifiuti;
- la pirolisi;
- l'idrogenazione;
- la depolimerizzazione chimica;
- la solvolisi;
- la decontaminazione termica.

Queste soluzioni permettono di ridurre anche del 75% le emissioni [12] e richiedono un input di energia elettrica che varia da 1 MWh/t a 7 MWh/t [12].

Attraverso la **gassificazione dei rifiuti** di plastica si ottiene un syngas che può essere utilizzato per la produzione di metanolo. Tramite il processo Methanol-to-olefins è poi possibile produrre nuova plastica.

La **pirolisi** è un trattamento che permette di scomporre i materiali plastici in molecole semplici e di ottenere una miscela di idrocarburi simile alla nafta. Questa sostanza subisce poi il processo di steam cracking, dal quale si ricavano prodotti chimici ad alto valore aggiunto (HVC), che vengono utilizzati per la fabbricazione della plastica. Il TRL del riciclaggio chimico mediante pirolisi è pari a 9⁴⁹ [15].

L'**idrogenazione** permette di trasformare i polimeri in idrocarburi liquidi, dai quali si può ricavare polietilene, polipropilene, PVC e gomma sintetica. In questo processo viene utilizzata acqua in condizioni supercritiche per rompere i legami fra gli atomi di carbonio.

Con la **depolimerizzazione chimica** è possibile scomporre la plastica in monomeri e oligomeri, utilizzando una quantità di calore inferiore rispetto alla pirolisi.⁵⁰ Questa

⁴⁸ Con il termine oligomero si intende un numero finito e ridotto di unità monomeriche.

⁴⁹ Nel 2020 *Versalis* ha presentato il progetto *Hoop*, che prevede la costruzione di uno stabilimento a Mantova per il riciclo chimico di 6 Kt di plastica all'anno tramite pirolisi [15]. *LyondellBasell* sta costruendo un impianto pilota in Italia per testare una tecnica di riciclo basata sulla pirolisi detta *MoReTec*.

⁵⁰ *Loop Industries* sta sviluppando una tecnica di depolimerizzazione che richiede calore a bassa temperatura per la conversione del PET in monomeri. Un primo impianto è stato costruito in Canada. *BP* ha sviluppato una nuova tecnica di riciclo mediante depolimerizzazione chiamata *BP Infinia*. Questa tecnologia permette di riutilizzare i materiali in PET opaco per la produzione di nuova plastica. *Carbios* ha sviluppato un processo di depolimerizzazione degli imballaggi di PET basato sull'impiego di enzimi e nel 2019 sono state prodotte le prime bottiglie utilizzando questa tecnologia.

tecnologia ha raggiunto diversi gradi di maturità a seconda del materiale da riciclare; in particolare il TRI è pari a 8 per il PET e a 9 per il polistirene [15].

La **solvolisi** è un trattamento che prevede l'utilizzo di solventi per separare i polimeri dagli additivi, dai contaminanti e dai coloranti. Il TRI di questa tecnologia è pari a 8 per il polipropilene e a 7 per il PET [15]⁵¹.

Un'altra tecnica di riciclaggio chimico, che si applica al caso del PET, è la **decontaminazione termica** in un reattore sotto vuoto con iniezione di azoto. Il PET viene riscaldato e mediante il vuoto è possibile rimuovere l'umidità, mentre l'azoto serve per togliere i pigmenti di colorante. Il materiale viene poi caricato in una centrifuga e portato allo stato solido tramite il processo di policondensazione, per poi essere estruso in nuovi oggetti di plastica. Il TRI di questo sistema è pari a 9 [15]⁵².

Il report *The Circular Economy* [9] stima che in Europa solo il 30% dei rifiuti di plastica vengano raccolti ogni anno per essere destinati al riciclo; in Italia il 43% della plastica raccolta viene destinata al riciclo, mentre un altro 40% finisce nei termovalorizzatori e il rimanente 17% in discarica [68]. Il riciclo comporta perdite e degradazione della qualità dei materiali. In particolare vi sono tre fattori che ostacolano la produzione di plastica secondaria di elevata qualità:

- Flussi di rifiuti misti e contaminati. E' necessario che la plastica venga separata dagli altri materiali e che i vari tipi di plastica vengano suddivisi in flussi diversi. Questo viene spesso ostacolato dal design dei prodotti e dal sistema di raccolta dei rifiuti.
- Additivi, coloranti e stabilizzanti. Queste sostanze sono difficilmente rimovibili e rendono possibile il riciclo solo in prodotti di bassa qualità.
- Contaminazione. La plastica può essere contaminata dalle sostanze che conteneva o dai materiali con cui è stata in contatto, come ad esempio i rifiuti sanitari.

Si stima che a livello europeo sia possibile almeno triplicare la quantità di plastica riciclata [12]. E' però necessaria una progettazione degli oggetti che tenga in considerazione il loro fine vita e ne renda semplice il riciclaggio. E' inoltre necessario ridurre le perdite che avvengono durante lo stesso processo di riciclaggio.

La Tabella 3.14 riassume le opzioni disponibili per la decarbonizzazione del processo di produzione della plastica.

⁵¹ *PureCycle Technologies* ha sviluppato un progetto per il riciclaggio di materiale in polipropilene tramite solvolisi e prevede di aprire il primo impianto commerciale in Ohio nel 2021. *Worn Again Technologies* sta progettando un impianto per la separazione, l'estrazione e la decontaminazione di polimeri di PET da tessuti, bottiglie e imballaggi in plastica. Questa tecnologia sfrutta un solvente che richiede elevate temperature per il funzionamento.

⁵² *EREMA* ha sviluppato le tecnologie *Vacunite* e *Vacurema* per la decontaminazione termica, che possono essere utilizzate in combinazione fra loro. Queste due soluzioni sono già disponibili a livello commerciale.

Tabella 3.14 – Riepilogo delle tecnologie e strategie alternative per la decarbonizzazione delle industrie produttrici di plastica (Fonte [15]).

Opzione	Opzione di riferimento attuale	TRL	Categoria di intervento
Steam cracking elettrificato	Steam cracking alimentato con combustibili fossili		Fonti energetiche alternative
Biocompositi	Materiali plastici		Riduzione della domanda
Modelli di business basati sulla condivisione	Produzione di plastica primaria		Riduzione della domanda
Biomassa	Materie prime di origine fossile		Riduzione della domanda
Riciclaggio meccanico	Produzione di plastica primaria		Riduzione della domanda
Gassificazione	Produzione di plastica primaria		Riduzione della domanda
Pirolisi	Produzione di plastica primaria	9	Riduzione della domanda
Idrogenazione	Produzione di plastica primaria		Riduzione della domanda
Depolimerizzazione chimica	Produzione di plastica primaria	PET: 8 - PS: 9	Riduzione della domanda
Solvólisi	Produzione di plastica primaria	PP: 8 - PET: 7	Riduzione della domanda
Decontaminazione termica	Produzione di plastica primaria	9	Riduzione della domanda

3.4.3 Scenari

Per la plastica sono stati definiti due scenari di decarbonizzazione, nei quali sono state prese in considerazione solo le emissioni, in quanto in letteratura non sono state trovate informazioni relative ai fabbisogni termici ed elettrici. Ipotesi comune a entrambi gli scenari è che entro il 2050 tutta l'elettricità sarà a emissioni zero e che tutti gli stabilimenti dove viene prodotta la plastica in forma primaria elettrificheranno la fase di steam cracking. Nello Scenario 1 si ipotizza che la produzione diminuirà dell'8%, mentre nello Scenario 2 si prevede una diminuzione del 19% grazie all'implementazione delle soluzioni volte alla riduzione della domanda. Tutte queste ipotesi sono riassunte in Tabella 3.15.

Tabella 3.15 – Ipotesi alla base degli scenari elaborati per la plastica.

Scenario	Steam cracking elettrificato	Riduzione della domanda	Cattura delle emissioni
1	sì	no	sì
2	sì	sì	sì

3.4.3.1 Scenario 1

Le stime sulla produzione futura, fornite da ISPRA prevedono una diminuzione del 15% della produzione di polipropilene e dell'1% di quella di polistirene. Dato che nello scenario viene fatta una previsione per le materie plastiche in generale, si considera un valore medio e si ipotizza dunque che entro il 2050 la produzione di plastica diminuirà dell'8%, arrivando a 5.6 Mt. Si ipotizza inoltre che tutti gli stabilimenti produttivi elettrificheranno la fase di steam cracking. Ciò permetterà di ridurre le emissioni a 3.4 Mt nel 2050, per le quali sarà necessaria l'adozione di impianti per la cattura della CO₂ (Tabella 3.16).

Tabella 3.16 – Potenziale di abbattimento delle emissioni relativo allo Scenario 1.

	2018	2050	u.d.m.
Emissioni CO₂	9.2	3.4	Mt
Δ Emissioni CO₂	-63%		
HP: Efficienza di cattura del 90%			
			u.d.m.
Emissioni catturate	3.1		Mt
Emissioni rimanenti	0.3		Mt

3.4.3.2 Scenario 2

In questo scenario si prevede una diminuzione della produzione del 19% rispetto al 2018, in linea con quanto previsto dal report [12]. Si stima quindi che nel 2050 verranno

prodotte 5 Mt di plastica in forma primaria. Anche in questo scenario si ipotizza che tutti gli stabilimenti elettrifichino la fase di steam cracking. In questo modo si ottiene una riduzione del 68% delle emissioni, con 3 Mt di CO₂ rimanenti al 2050, per le quali sarà necessaria l'adozione di impianti di cattura. La Tabella 3.17 riassume i risultati ottenuti in questo scenario.

Tabella 3.17 – Potenziale di riduzione delle emissioni relativo allo Scenario 2.

	2018	2050	u.d.m.
Emissioni CO₂	9.2	3	Mt
Δ Emissioni CO₂	-68%		
HP: Efficienza di cattura del 90%			
			u.d.m.
Emissioni catturate		2.7	Mt
Emissioni rimanenti		0.3	Mt

3.4.3.2 Confronto

La Figura 3.15 illustra la riduzione delle emissioni ottenuta negli scenari analizzati (senza considerare l'adozione degli impianti di cattura). Grazie all'elettificazione della fase di steam cracking è possibile ottenere una riduzione del 63% delle emissioni, mentre, implementando anche le strategie dell'economia circolare, è possibile ridurle del 68%.

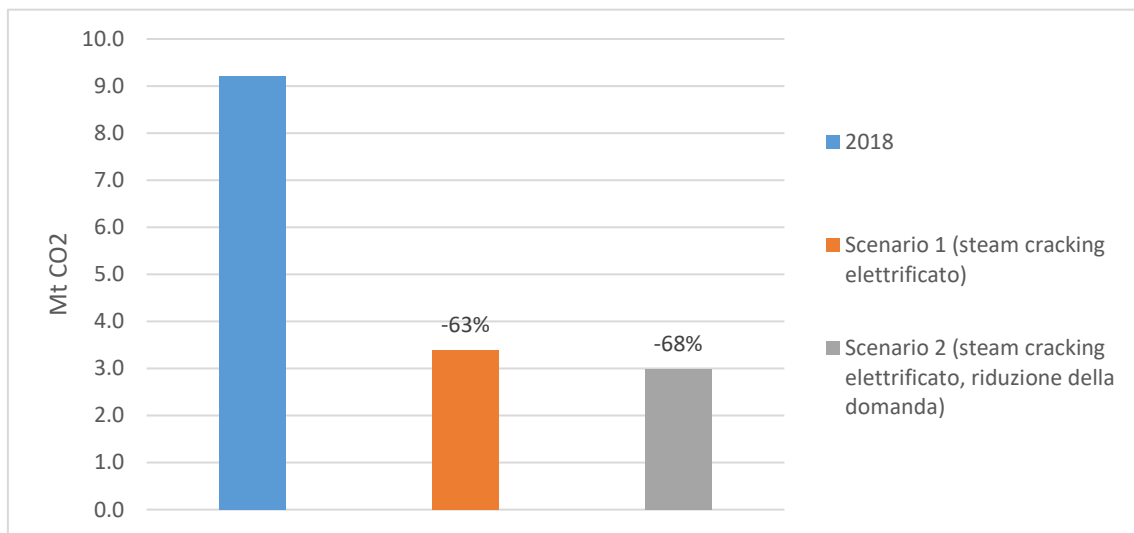


Figura 3.15 – Potenziale di riduzione delle emissioni relativo agli scenari presentati.

Capitolo 4

Settore siderurgico

L'acciaio è una lega composta principalmente da ferro e carbonio, quest'ultimo in percentuale non superiore al 2.06%. La produzione è in crescita a livello globale, ma tendenzialmente costante o in calo in Europa (si veda Figura 4.1). La Cina è il principale produttore di acciaio, seguita poi dal Giappone e dall'India [13]. La Germania è il primo produttore europeo (25% della produzione europea), mentre l'Italia è il secondo (15%) [69]. Dal 2010 al 2018 la capacità produttiva di acciaio dell'Italia è diminuita del 5%, passando da 25.7 Mt a 24.5 Mt all'anno. Nel 2018 in Italia le importazioni sono state pari a 29.1 Mt e le esportazioni a 18.7 Mt [70]. Questo settore industriale dà lavoro a più di 33000 persone e nel 2018 ha fatturato 42.5 miliardi di euro ([69] e [71]). Nel medesimo anno a livello nazionale le emissioni di CO₂ eq sono state pari a 11.5 Mt⁵³; la localizzazione delle emissioni è rappresentata in Figura 4.2.

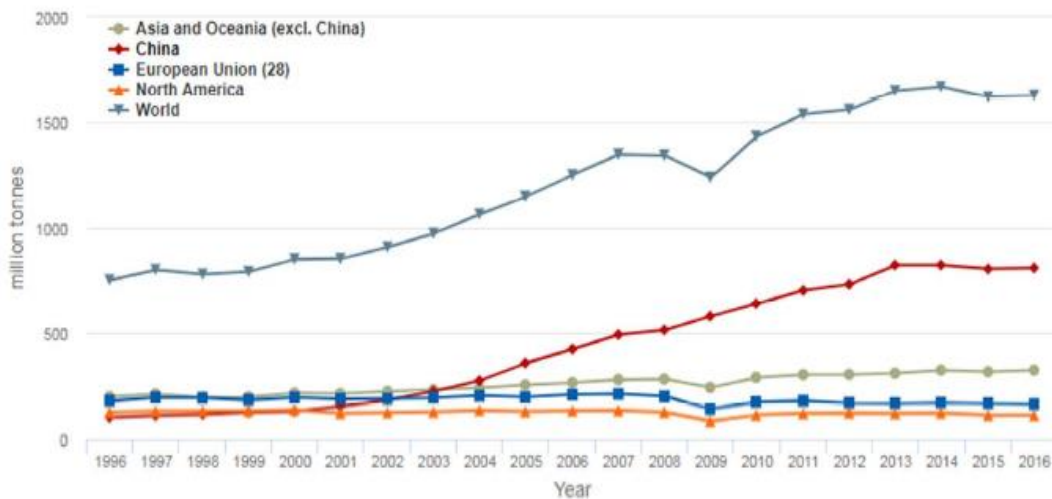


Figura 4.1 – Produzione di acciaio mondiale e per aree geografiche dal 1996 al 2016. (Fonte [13]).

⁵³ Dato fornito da ISPRA su elaborazione EU ETS. Il database EUROSTAT [6] riporta che nel 2018 in Italia il settore siderurgico ha emesso 11.5 Mt di CO₂, in linea con i dati forniti da ISPRA.

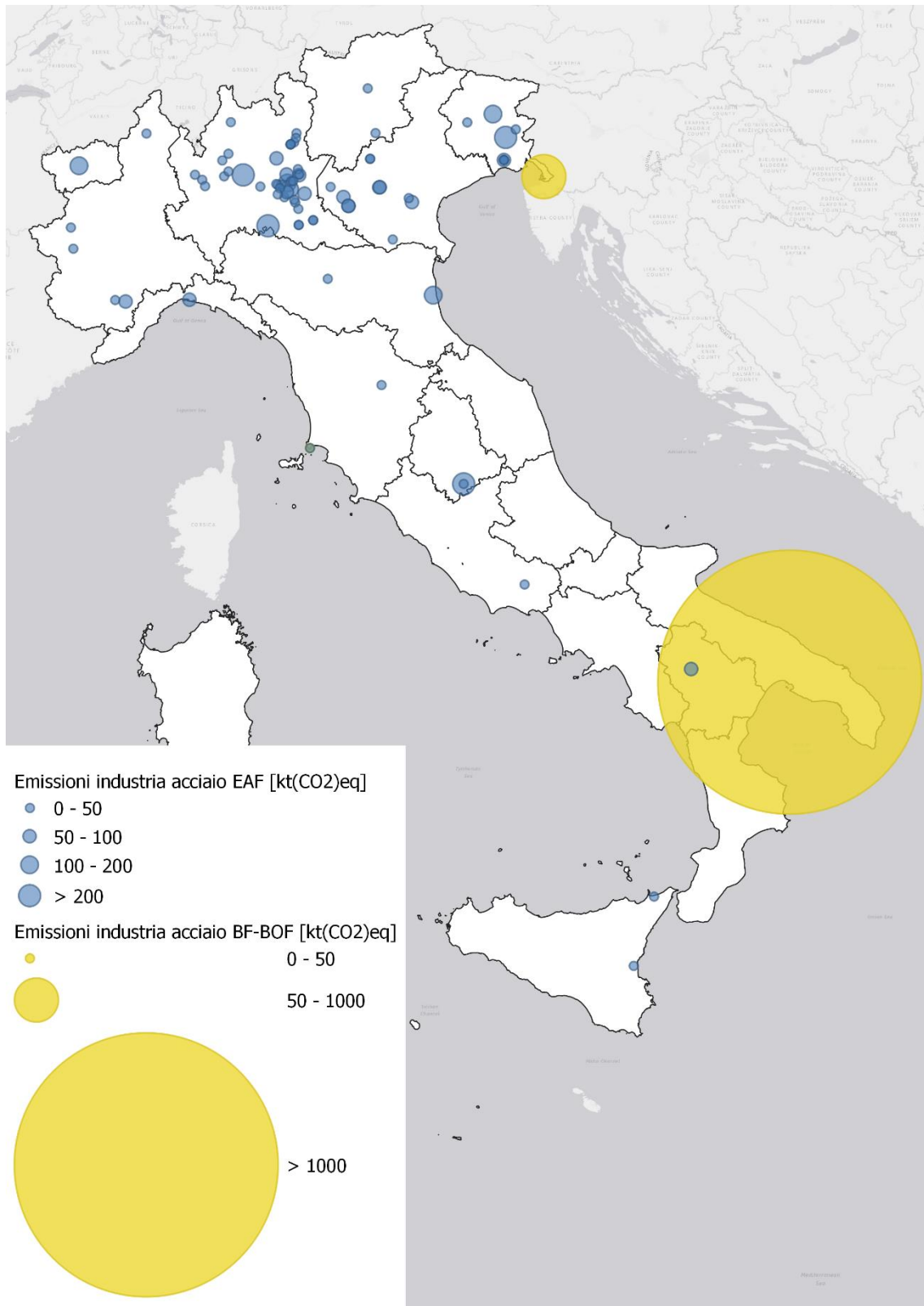


Figura 4.2 - Localizzazione geografica dei siti di emissione. Elaborazione grafica basata sui dati forniti da ISPRA.

Dal report *Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonisation of Industry* [13] emerge che l'acciaio viene impiegato principalmente nel settore edile, automobilistico e dell'ingegneria meccanica. Altri importanti consumatori sono i produttori di articoli per la casa, tubi ed elettrodomestici, che congiuntamente rappresentano il 27% del mercato dell'acciaio [13] (Figura 4.3).

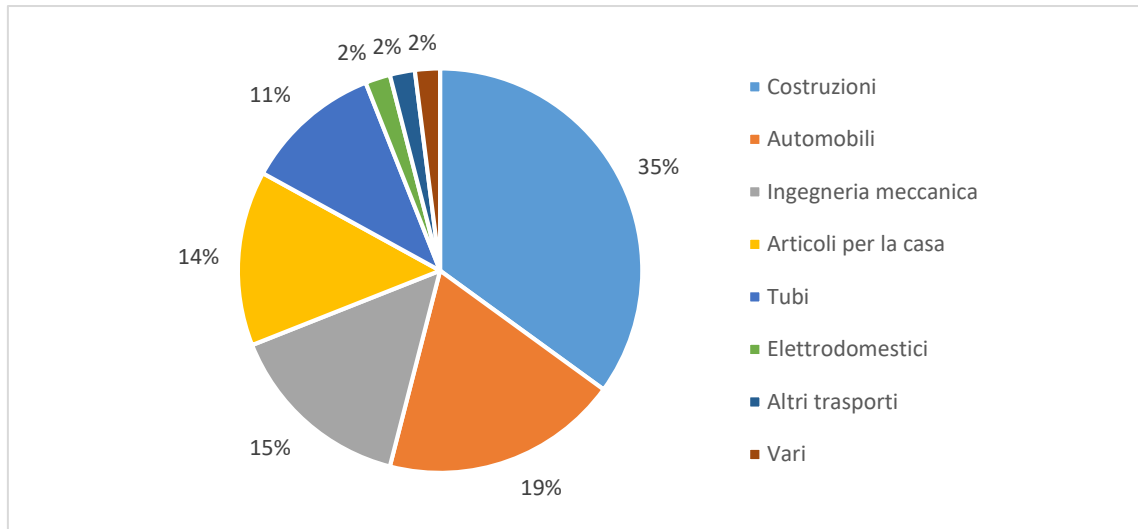


Figura 4.3 – Utilizzo dell'acciaio in Europa (media dal 2012 al 2016). (Fonte [13]).

4.1 Processo produttivo attuale

Esistono diverse tecniche di produzione di questo materiale e anche molteplici tipologie di acciai. L'acciaio viene prodotto principalmente in tre modi:

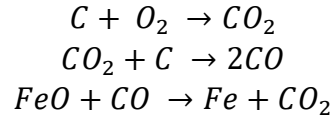
- Processo Linz-Donawitz, anche noto come processo BOF (Basic Oxygen Furnaces). Questo sistema è quello più utilizzato a livello mondiale;
- Processo di riduzione diretta (DRI, Direct Reduction Iron). Questo sistema ha già raggiunto la maturità commerciale, anche se non è molto diffuso;
- Produzione di acciaio secondario nelle fornaci elettrificate [13].

Il processo Linz-Donawitz è costituito da tre fasi:

1. Preparazione delle materie prime (minerali ferrosi e carbone). Durante questa fase i minerali di ferro vengono inviati agli impianti di sinterizzazione e pellettizzazione. Durante la sinterizzazione la polvere di materiale viene riscaldata fino a un'elevata temperatura, in modo tale che i grani di polvere si saldino tra loro. Il processo di pellettizzazione consiste nel mescolare la polvere di minerale con acqua, calce e un agglomerante all'interno di tamburi rotanti. Qui si ha la formazione di sfere irregolari con un diametro di 10 mm ÷ 25 mm. Il carbone viene invece sottoposto al processo di pirolisi, da cui si ottiene il coke. Il minerale ferroso viene poi mescolato con la polvere di coke e riscaldato fino alla

temperatura di 1000°C ÷ 1300°C. Questa miscela si trasforma in un agglomerato o per fusione dei granelli di silice in esso contenuti o per ricristallizzazione.

2. Produzione della ghisa. I minerali ferrosi, il coke e gli additivi vengono caricati nell'altoforno (BF, Blast Furnace) e dell'aria calda viene immessa nella parte bassa. Questa reagisce con il coke e si ha il processo di riduzione:

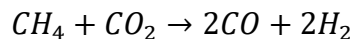


In questo modo l'ossigeno viene separato dal ferro presente nei minerali e il ferro fuso si meschia con il carbonio contenuto nel coke, dando origine alla ghisa. Non tutto il CO viene ossidato a CO₂ e i gas che escono dall'altoforno sono quindi ricchi di CO. Questi gas vengono utilizzati per preriscaldare le materie prime e vengono poi trattati per essere utilizzati come combustibile.

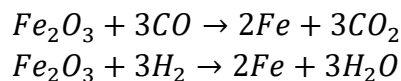
3. Produzione dell'acciaio. La ghisa viene immessa nel convertitore LD (BOF, Basic Oxygen Furnace) e viene affinata mediante un getto di ossigeno e additivi. Un quinto della carica è costituita da rottami di acciaio. L'ossigeno si lega al carbonio presente nella ghisa e si forma anidride carbonica: in questo modo è possibile ridurre il contenuto di carbonio e produrre l'acciaio. La temperatura raggiunge i 1700°C e durante questo processo viene regolato anche il contenuto di altri elementi chimici. L'acciaio liquido viene colato sotto forma di bramme, billette e blumi.

Nel processo integrato il carbonio ha molteplici funzioni: è uno degli ingredienti per la produzione dell'acciaio, è l'elemento riducente nelle Blast Furnaces e viene utilizzato come fonte energetica per la generazione di calore. Ciò comporta emissioni di anidride carbonica da molteplici fonti e rende particolarmente difficile la decarbonizzazione di questo sistema produttivo.

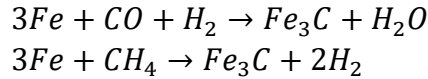
Con il processo di riduzione diretta è possibile ottenere dal minerale un prodotto ferroso non carburato⁵⁴, o poco carburato, senza il passaggio del metallo allo stato liquido. Tale processo avviene a una temperatura compresa fra gli 800°C e i 1050°C, inferiore a quella di liquefazione. Attualmente il processo più diffuso è quello basato sulla tecnologia MIDREX, che utilizza una miscela di monossido di carbonio e idrogeno come agente riducente [93]. Queste due sostanze vengono ottenute facendo reagire il gas naturale con l'anidride carbonica secondo la reazione:



Il gas riducente viene preriscaldato e immesso in un forno a una temperatura compresa fra i 750°C e i 900°C. Nel forno viene caricato anche il minerale ferroso e le reazioni utili che avvengono sono quelle di riduzione degli ossidi e di eventuale carburazione:



⁵⁴ La carburazione è l'operazione mediante la quale si introduce carbonio in una lega metallica grazie al riscaldamento del materiale. Il ferro carburato ha formula chimica Fe₃C.



Il prodotto che si ottiene viene chiamato spugna di ferro, perché presenta una struttura metallica porosa; questo rottame sintetico viene poi alimentato nelle acciaierie ad arco elettrico. Per il processo DRI non sono necessari gli impianti di cokeria e di agglomerazione, che sono quelli che hanno il maggior impatto ambientale nel processo a ciclo integrato. Tuttavia la produzione con riduzione diretta è generalmente antieconomica in quanto questi sono impianti di piccole-medie dimensioni. In alternativa al gas naturale può essere utilizzato syngas ottenuto dalla gassificazione del carbone. Nel 2017 nel mondo sono state prodotte 87 Mt di acciaio mediante il processo DRI, l'82% mediante l'utilizzo di gas naturale e il 18% mediante carbone [13].

La produzione di acciaio secondario in fornaci elettrificate prevede la fusione dei rottami ferrosi in un forno ad arco elettrico (comunemente noto come EAF, *Electric Arc Furnace*). L'arco elettrico scocca fra tre elettrodi e la carica metallica e le temperature arrivano anche a 2000°C, di conseguenza questi forni consumano una grande quantità di energia elettrica.

In Europa sono presenti 56 altiforni BF, 54 BOF e 152 Electric Arc Furnaces [72]. La Figura 4.4 riporta in modo schematico la produzione dell'acciaio mediante processo LD, mentre la Figura 4.5 illustra il processo EAF. Sul territorio nazionale sono presenti 3 stabilimenti BF, 2 impianti BOF e 37 fornaci ad arco elettrico [69].



Figura 4.4 – Schema semplificato del processo BF-BOF. (Fonte [73]).

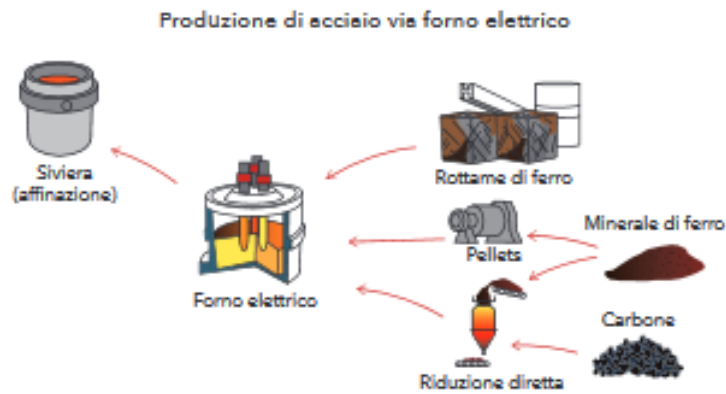


Figura 4.5 – Schema semplificato del processo EAF. (Fonte [73]).

4.1.1 Produzione, richiesta energetica ed emissioni

In Italia nel 2018 sono state prodotte 24.5 Mt di acciaio, l'81.6% delle quali in forni ad arco elettrico e il restante 18.4% mediante il processo Linz-Donawitz. La Tabella 4.1 riporta i dati consuntivi o stimati relativi alla produzione, alle emissioni e ai fabbisogni energetici nel 2018. In letteratura non sono state trovate informazioni relative al fabbisogno termico ed elettrico delle acciaierie italiane nel 2018. Tali valori sono stati stimati come segue e come schematizzati in Figura 4.6. Essendo nota la produzione di acciaio BF-BOF e i fabbisogni energetici nel 2015 (ultimi dati disponibili) sono stati calcolati i fabbisogni energetici specifici nel 2015. Assumendo questi ultimi invariati nel 2018, è stato possibile stimare il fabbisogno termico ed elettrico nel 2018. La Figura 4.7 illustra i fabbisogni energetici delle singole fasi del processo produttivo, derivati dai precedenti calcoli.

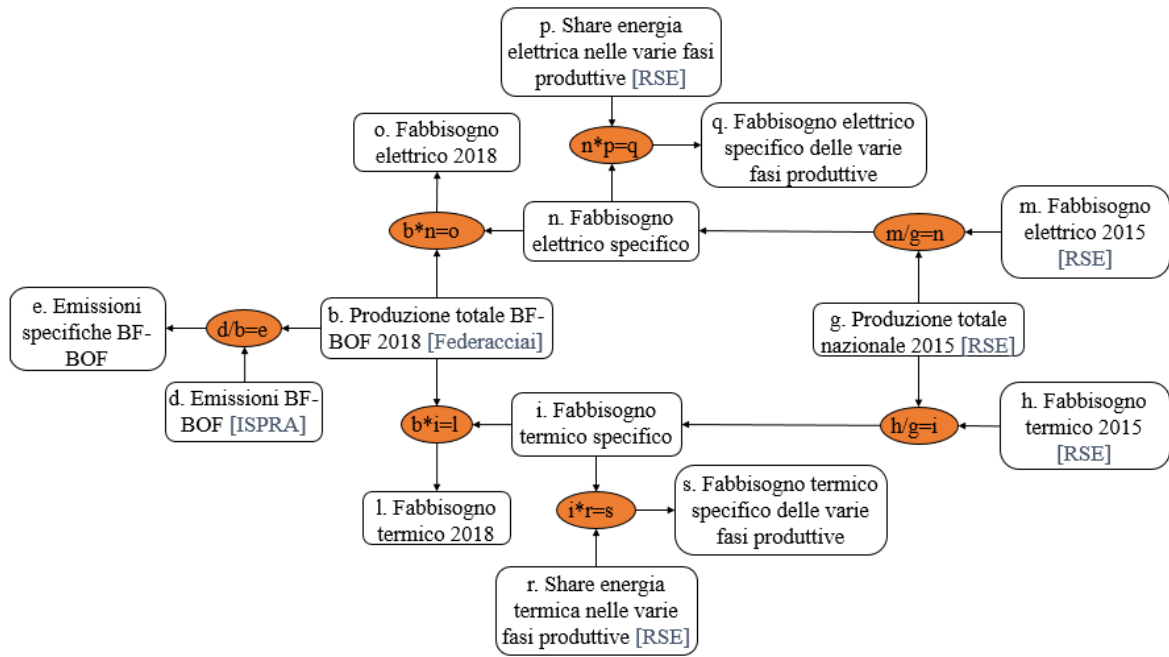


Figura 4.6 - Schema dei calcoli svolti per la stima delle emissioni specifiche e dei fabbisogni energetici specifici delle singole fasi del processo produttivo.

Tabella 4.1 - Produzione, emissioni e stima del fabbisogno energetico relativi alla produzione di acciaio mediante ciclo integrato in Italia nel 2018.

id	BF-BOF		u.d.m.	Anno	Fonte
a	Produzione acciaio tot	24.5	Mt	2018	FEDERACCAI [69]
b	Produzione acciaio BF-BOF	4.5 (18%)	Mt	2018	FEDERACCAI [69]
c	Emissioni CO ₂ eq tot ⁵⁵	11.5	Mt	2018	
d	Emissioni CO ₂ eq BF-BOF ⁵⁶	7	Mt	2018	
e	Emissioni specifiche CO ₂ eq BF-BOF	1.5	t CO ₂ eq/t acciaio	2018	e = d/b
f	Produzione acciaio tot	22	Mt	2015	RSE [10]
g	Produzione acciaio BF-BOF	6.2 (28%)	Mt	2015	RSE [10]
h	Fabbisogno termico ⁵⁷	37.1	TWh	2015	RSE [10]

⁵⁵ Dato fornito da ISPRA su elaborazioni EU-ETS.

⁵⁶ Dato fornito da ISPRA su elaborazioni EU-ETS.

⁵⁷ Il database JRC-IDEES [28] riporta invece un fabbisogno termico pari a 27 TWh nel 2015. Tale fabbisogno è stato soddisfatto utilizzando coke per il 50%, gas naturale per il 18%, combustibili solidi per il 17%, gas di sintesi per il 9%, vapore da recupero termico per il 3% e oli combustibili residui per il restante 3%. La fonte principale da cui provengono i dati del JRC-IDEES è il bilancio di energia di EUROSTAT, fornito in forma aggregata per tutto il settore siderurgico. I valori relativi alla sola produzione di acciaio da ciclo integrato sono delle stime fatte per il JRC-IDEES sulla base delle statistiche strutturali sulle imprese di EUROSTAT, delle statistiche sul volume della produzione industriale (in particolare quelle di USGS), di documenti BREF e di fonti nazionali.

id	BF-BOF		u.d.m.	Anno	Fonte
i	Fabbisogno termico specifico	6	TWh/Mt	2015	$i = h/g$
l	Fabbisogno termico	27.2	TWh	2018	$l = b*i$
m	Fabbisogno elettrico ⁵⁸	2.6	TWh	2015	RSE [10]
n	Fabbisogno elettrico specifico	0.4	TWh/Mt	2015	$n = m/g$
o	Fabbisogno elettrico	1.9	TWh	2018	$o = b*n$

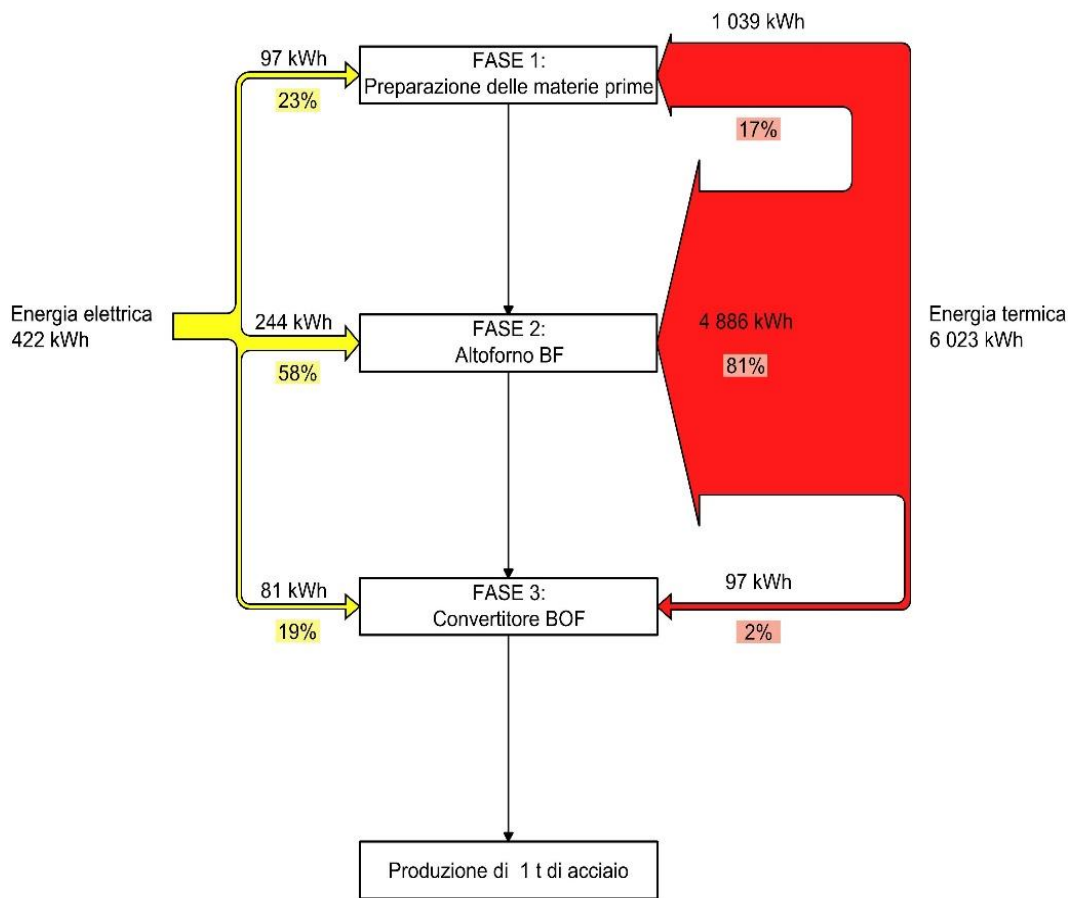


Figura 4.7 – Sankey diagram relativo al processo di produzione dell'acciaio con ciclo integrato. Elaborazione grafica basata su informazioni provenienti da RSE [10], per lo share di energia termica ed elettrica della varie fasi del processo produttivo, e FEDERACCIAI [69].

I medesimi calcoli fatti per la produzione da ciclo integrato sono stati svolti per quanto riguarda la produzione nelle Electric Arc Furnaces. Anche in questo caso i fabbisogni energetici sono stati stimati a partire dagli ultimi dati noti relativi all'anno 2015. In Figura 4.8 vengono schematizzati i calcoli svolti per una stima delle emissioni specifiche e dei fabbisogni energetici; i risultati ottenuti sono riportati in

⁵⁸ Il database JRC-IDEES [28] riporta un fabbisogno elettrico pari a 2.4 TWh nel 2015.

Tabella 4.2. La Figura 4.9 illustra il fabbisogni termico ed elettrico mediante un Sankey diagram.

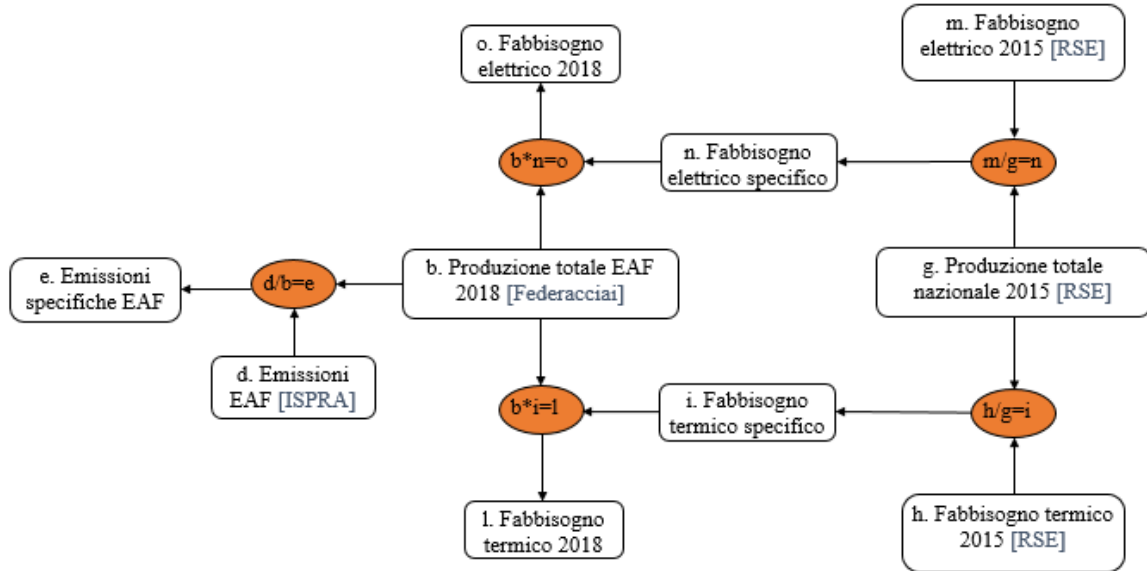


Figura 4.8 - Schema dei calcoli svolti per la stima delle emissioni specifiche e dei fabbisogni energetici specifici delle singole fasi del processo produttivo.

Tabella 4.2 - Produzione, emissioni e fabbisogni energetici relative alla produzione di acciaio nei forni ad arco elettrico in Italia nel 2018.

id	<u>EAF</u>		u.d.m	Anno	Fonte	
a	Produzione acciaio tot	24.5	Mt	2018	FEDERACCIAI [69]	
b	Produzione acciaio EAF	20	(82%)	Mt	2018	FEDERACCIAI [69]
c	Emissioni CO₂ eq	11.5	Mt	2018	EU ETS [7]	
d	Emissioni CO₂ eq EAF	4.5	Mt	2018	d=c-emissioni BF-BOF	
e	Emissioni specifiche CO₂ eq EAF⁵⁹	0.2	t CO ₂ eq/t acciaio	2018	e=d/b	
f	Produzione acciaio tot	22	Mt	2015	RSE [10]	
g	Produzione acciaio EAF	15.8	(72%)	Mt	2015	RSE [10]
h	Fabbisogno termico⁶⁰	3.4	TWh	2015	RSE [10]	
i	Fabbisogno termico specifico	0.2	TWh/Mt	2015	i=h/g	
l	Fabbisogno termico	4.3	TWh	2018	l=b*i	
m	Fabbisogno elettrico⁶¹	8.7	TWh	2015	RSE [10]	

⁵⁹ La relazione [12] riporta un'emission intensity pari a 0.3 t di CO₂/t acciaio prodotto nelle Electric Arc Furnaces.

⁶⁰ Il database JRC-IDEES [28] riporta invece un fabbisogno termico pari a 10.4 TWh nel 2015. Anche in questo caso valgono le medesime osservazioni espote per la produzione delle BF-BOF.

⁶¹ Il database JRC-IDEES [28] riporta invece un fabbisogno elettrico pari a 15.1 TWh nel 2015.

n	Fabbisogno elettrico specifico	0.5	TWh/Mt	2015	$n=m/g$
o	Fabbisogno elettrico	11	TWh	2018	$o=b*n$



Figura 4.9 – Sankey diagram relativo al processo di produzione dell'acciaio nelle EAF. Elaborazione grafica basata su dati provenienti da RSE [10], per quanto riguarda gli assorbimenti di energia elettrica e termica della produzione di acciaio EAF.

4.2 Soluzioni di decarbonizzazione

Le soluzioni per la decarbonizzazione delle acciaierie possono essere raggruppate nelle seguenti categorie:

- Efficienza energetica;
- Nuovi processi produttivi;
- Utilizzo di fonti energetiche alternative;
- Riduzione della domanda;
- Utilizzo di impianti per la cattura della CO₂.

Ogni categoria è analizzata individualmente nei prossimi paragrafi.

4.2.1 Efficienza energetica

La tecnologia **Top Gas Recycling** si basa sul riciclo del gas generato nella Blast Furnace, in modo tale da sostituire in parte il coke in alimentazione. Prima del riciclo dal flusso gassoso viene rimosso il biossido di carbonio attraverso un sistema di cattura. Con questo sistema è possibile ridurre del 15% il fabbisogno termico e complessivamente del 25% le emissioni [13]. L'entrata sul mercato di questa tecnologia è prevista non prima del 2025 e il suo TRL è pari a 7 [13].

Migliori tecnologie disponibili

Già oggi sono disponibili varie tecnologie per migliorare i processi industriali che avvengono nelle Blast Furnaces, nelle Basic Oxygen Furnaces e nelle Electric Arc Furnaces.

Le migliori tecnologie disponibili per le **Blast Furnaces** sono:

- Il Coke Dry Quenching;
- Le Top gas Recovery Turbines;
- I recuperatori di calore.

Il processo di pirolisi del carbone avviene a temperature elevate e solitamente il coke viene raffreddato velocemente utilizzando dell'acqua, ma in questo modo il calore viene perso. Il Coke Dry Quenching (CDQ) prevede il raffreddamento del coke mediante l'impiego di un gas inerte, in modo tale da poter effettuare il recupero del calore. Inoltre il Coke Dry Quenching non richiede il consumo di acqua.

Secondo il report *Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonisation of Industry* [13] è possibile integrare le Blast Furnaces con turbine a gas per la generazione di energia elettrica. Queste turbine sono note con il nome di Top gas Recovery Turbines (TRT) e nel 2015 nell'Unione Europea 19 altiforni BF erano già dotati di questo sistema [13]. Sono inoltre disponibili degli impianti che permettono di recuperare il calore dei gas caldi in uscita dall'altoforno BF per preriscaldare l'aria immessa nella parte bassa. Ciò viene realizzato mediante l'impiego di scambiatori di calore esterni o di bruciatori a recupero; attualmente in EU sono presenti 18 stabilimenti che sfruttano questa tecnologia [13].

In uscita dalle **Basic Oxygen Furnaces** si ha un flusso di off-gas a elevata temperatura: il calore contenuto in questo flusso gassoso può essere recuperato per preriscaldare i rottami di ferro che vengono caricati nel convertitore LD. Nel 2012 nell'Unione Europea erano già presenti 22 impianti BOF dotati di impianti per il recupero del calore [13].

E' possibile utilizzare l'ossicombustione nelle **Electric Arc Furnaces** per riscaldare i punti più freddi dei forni e ottenere così una fusione uniforme dell'acciaio. Nel 2012 in EU 136 acciaierie erano dotate di bruciatori a ossicombustione [13]. Inoltre nelle fornaci ad arco elettrico vengono prodotti dei gas caldi che possono essere utilizzati per preriscaldare i rottami d'acciaio: nel 2012 nell'Unione Europea gli impianti per il preriscaldamento dei rottami erano installati in 99 stabilimenti EAF [13].

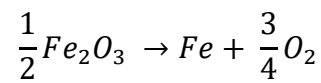
E' anche possibile utilizzare i gas caldi prodotti nelle EAF per alimentare impianti di cogenerazione. Queste soluzioni sono già disponibili a livello commerciale, ma la loro diffusione è limitata dalle difficili condizioni ambientali presenti Electric Arc Furnaces (temperature elevate e presenza di sostanze chimiche acide).

4.2.2 Nuovi processi produttivi

Durante il processo di riduzione diretta a gas naturale, l'idrogeno contenuto nel gas riducente contribuisce a ridurre il 50% del ferro, mentre il restante 50% è ridotto dal monossido di carbonio, dal quale poi si forma la CO₂. Per la **riduzione diretta** dei minerali ferrosi è possibile utilizzare l'**idrogeno**. L'idrogeno può essere prodotto mediante celle a combustibile di tipo Proton Electron Membrane e con questo sistema sono necessari 3-4 MWh di elettricità per la produzione di 1t di acciaio[12]. Se l'elettricità

viene prodotta mediante fonti energetiche rinnovabili, la riduzione diretta basata sull'idrogeno permette di ridurre dal 95% al 100% le emissioni ([12] e [13]). La riduzione diretta tramite idrogeno richiede un sostanziale cambiamento degli impianti utilizzati nelle acciaierie e la possibilità di stoccare grandi quantità di idrogeno. Secondo *Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonisation of Industry* [13] si prevede che la riduzione diretta con idrogeno, oggi non ancora diffusa a livello commerciale, entrerà sul mercato tra il 2030 e il 2035. Il TRL di questa tecnologia è oggi pari a 7 [13].

Tramite il progetto *Siderwin* è stata sviluppata la **riduzione diretta dei minerali ferrosi mediante processi elettrochimici**. Questa tecnologia viene chiamata *Ulcowin* e prevede la sostituzione del carbone con l'elettricità per la scissione degli ossidi di ferro in ossigeno e ferro metallico, secondo la seguente reazione:



Questo sistema presenta molti vantaggi, come:

- La riduzione del 95% delle emissioni di CO₂;
- La riduzione del 40% dei consumi energetici;
- La possibilità di produrre acciaio utilizzando sottoprodotti della metallurgia non ferrosa;
- La possibilità di utilizzare energia rinnovabile [13];
- Eliminazione del coke;
- Eliminazione degli impianti di pellettizzazione e di sinterizzazione.

Un fattore limitante di questa tecnologia è la grande quantità di spazio occupato dagli elettrolizzatori. Si stima che questa tipologia di riduzione dei minerali ferrosi sia più efficiente rispetto a quella basata sull'idrogeno, in quanto viene omessa l'elettrolisi dell'acqua per la produzione di H₂. L'entrata sul mercato di questa tecnologia è prevista nel 2040 e il TRL è oggi pari a 4 [13]⁶².

In alternativa alla produzione di acciaio da ciclo integrato è stata sviluppata la *smelting reduction*. Questa tecnologia è basata sulla combinazione della riduzione diretta e del processo di fusione per produrre ghisa liquida. I minerali ferrosi vengono prima ridotti a sponge iron in un reattore a due stadi e vengono poi fusi con il carbone e l'ossigeno. Sono stati sviluppati due metodi per effettuare la *smelting reduction*: i processi COREX e FINEX.

Per il processo **COREX** non sono necessari il coke e gli impianti di sinterizzazione e di pellettizzazione. Il carbone viene impiegato direttamente per la riduzione dei minerali ferrosi e durante questo processo vengono utilizzati due reattori: un gassificatore e un riduttore. Nel primo reattore il carbone viene gassificato, in modo tale da produrre un gas

⁶² *Siderwin* è stato finanziato dall'Unione Europea ed è poi stato portato avanti da *ArcelorMittal*. La compagnia ha lavorato 12 anni per lo sviluppo di questa tecnologia, portando il suo TRL da 1 a 4 attraverso l'avvio di cinque differenti impianti pilota [77].

riducente costituito principalmente da monossido di carbonio e idrogeno. Questo flusso gassoso viene inviato nel secondo reattore, dove viene caricato anche il minerale ferroso. Quest'ultimo viene ridotto ed entra poi nel fusore, dove si produce la ghisa fusa. Il processo COREX ha molti vantaggi:

- Eliminazione del coke;
- Riduzione del consumo di combustibili del 18%;
- Riduzione del consumo di ossigeno del 13%;
- Riduzione delle emissioni di gas a effetto serra del 20%;
- Riduzione delle emissioni di NO_x del 30%;
- Eliminazione della produzione di VOC⁶³;
- Riduzione significativa delle emissioni di SO_x;
- Riduzione degli investimenti e dei costi operativi;
- Riduzione della produzione di scorie del 18%;
- Maggiore flessibilità per quanto riguarda la qualità della carica alimentata [13].

Si stima che per l'implementazione del processo COREX sia necessario un investimento di 195 € per tonnellata di capacità produttiva annua [74]. Il processo COREX viene ad oggi utilizzato in stabilimenti del Sud Africa, dell'India e della Cina ed è stata proposta la sua applicazione anche all'acciaieria di Taranto.

La tecnologia **FINEX** impiega il minerale di ferro e il carbone sotto forma di polvere. Anche in questo caso il carbone viene gassificato per produrre un gas riducente. Il reattore di riduzione è però sostituito da quattro letti fluidi in serie, nei quali vengono immessi il gas riducente e il minerale ferroso. Dal basso esce il ferro ridotto, che entra poi nel fusore, dal quale escono la ghisa fusa e le impurezze. I vantaggi di questo processo sono:

- Eliminazione degli impianti di sinterizzazione e pellettizzazione;
- Eliminazione del coke;
- Riduzione del 20% del costo capitale rispetto alle Blast Furnaces;
- Riduzione del 15% dei costi di produzione;
- Riduzione dei consumi energetici;
- Riduzione delle emissioni di gas a effetto serra;
- Produzione di un gas combustibile che può essere utilizzato in altri processi metallurgici o per la generazione di energia elettrica [13]⁶⁴.

⁶³ I VOC (*Volatile Organic Compounds*) sono composti chimici di vario genere caratterizzati da un'elevata volatilità. I VOC possono essere causa di una vasta gamma di effetti negativi sulla salute umana, come asma bronchiale, infarto del miocardio, tumore ai polmoni.

⁶⁴ Sebbene la tecnologia FINEX sia già disponibile a livello commerciale, per ora è installata solo in uno stabilimento della *POSCO*, in Corea del Sud.

4.2.3 Fonti energetiche alternative

I combustibili fossili utilizzati nelle Blast Furnaces possono essere in parte sostituiti con l'idrogeno e con la biomassa. E' inoltre possibile utilizzare l'idrogeno anche per la riduzione diretta dei minerali ferrosi.

Parte del coke utilizzato nelle Blast Furnaces può essere sostituito dall'**idrogeno**. Il TRL di questa tecnologia è pari a 7 [15]. Per essere sostenibile l'idrogeno deve essere prodotto il più possibile localmente e utilizzando energia rinnovabile. Ciò significa che nei territori limitrofi alle acciaierie devono esserci le risorse necessarie per produrlo (eolico, biogas, fotovoltaico). Questi fattori territoriali e i relativi costi limitano l'utilizzo dell'idrogeno nelle BF [75]⁶⁵.

La **biomassa** può essere convertita in una sostanza molto simile al carbone mediante la torrefazione. Il biocarbone così prodotto può essere utilizzato nelle Blast Furnaces per sostituire in parte il carbone fossile. Il TRL di questa tecnologia è pari a 7 e si stima che abbia un'importanza moderata, in quanto la disponibilità di biomassa è limitata ([15] e [76])⁶⁶.

4.2.4 Riduzione della domanda

Come per altri materiali, riducendo gli sprechi e aumentando la vita utile dei prodotti è possibile ridurre la domanda di acciaio. Questo risultato può essere raggiunto attraverso un'attenta progettazione degli oggetti, fabbricando semilavorati che siano già molto simili agli oggetti finali e utilizzando tecniche produttive come ad esempio le stampanti 3D e la metallurgia delle polveri. La tecnologia delle stampanti 3D ha un TRL pari a 7 e si stima che la sua importanza per la decarbonizzazione sia moderata [15]. Con metallurgia delle polveri si indica una sequenza di operazioni che permette di ottenere un materiale indivisibile attraverso la compattazione di un materiale pulverulento metallico.

E' possibile diminuire la domanda di acciaio da parte del settore edilizio riducendo gli sprechi di materiale durante la costruzione degli edifici, diminuendo la quantità di acciaio utilizzato e usando leghe altoresistenziali [12]. Queste sono leghe caratterizzate da un'elevata resistenza alla fatica e all'impatto e si stima che mediante l'utilizzo di questi materiali sia possibile diminuire del 30%-40% il consumo di acciaio nel settore edilizio [9]. E' inoltre possibile aumentare la vita utile degli edifici e incrementare lo sfruttamento degli spazi attraverso modelli di business basati sulla condivisione.

Questi modelli di business possono essere applicati anche nel settore dei trasporti: un esempio è il car sharing. Secondo alcuni studi attraverso questa strategia sarebbe possibile

⁶⁵ All'inizio del 2019 *ThyssenKrupp* ha avviato dei test per valutare la sostituzione parziale del carbone con l'idrogeno in un altoforno BF in Germania.

⁶⁶ In Belgio con il progetto *Torero* si sta testando l'utilizzo di biocarbone presso uno stabilimento dell'*ArcelorMittal*.

ridurre del 50% ÷ 70% le auto in circolazione e quindi la domanda di acciaio proveniente dal settore trasporti [12].

Riciclo

In Europa in media l'84% dell'acciaio viene raccolto per essere riciclato, la percentuale più alta rispetto a quella di qualsiasi altro materiale [12]. Ciò è dovuto principalmente a una questione economica: secondo il report *Industrial Transformation 2050* [12] le 131 Mt di rottami che vengono prodotte ogni anno in Europa hanno un valore di circa 30 miliardi di euro.

Spesso varie tipologie di rottami vengono mischiate tra loro e ciò è un problema per la produzione di acciaio secondario di elevata qualità [9]. Ad oggi infatti l'acciaio secondario viene principalmente utilizzato per la produzione di oggetti di bassa qualità. Una migliore separazione delle varie tipologie di leghe permette di ridurre fino al 30% il fabbisogno elettrico delle Electric Arc Furnaces [9].

Un aspetto importante che riguarda il degrado dell'acciaio è la contaminazione con il rame. Un contenuto di rame dello 0.15% o anche inferiore rende l'acciaio inutilizzabile per la fabbricazione di molti prodotti. Inoltre il rame e altre impurità fanno aumentare anche fino al 40% il fabbisogno elettrico per la produzione di acciaio secondario [9]. Il rame contamina l'acciaio principalmente durante i processi di riciclaggio e non può più essere rimosso. Attualmente il contenuto medio di rame nei rottami prodotti dai paesi OECD è circa pari a 0.2% ÷ 0.25% [9].

4.2.5 Cattura della CO₂

Gli impianti di cattura possono essere abbinati agli impianti a ciclo integrato, alla riduzione tramite gas naturale e ai sistemi che utilizzano la tecnologia di *smelting reduction*. Il TRL delle soluzioni presentate nel seguito è riferito al loro utilizzo nel settore siderurgico.

L'integrazione di impianti di cattura post-combustione e di soluzioni per il riciclo degli off-gas a impianti **BF-BOF** a carbone permette di ridurre le emissioni dell'80% e questi impianti hanno un'importanza molto alta per la decarbonizzazione [3]. Il TRL di questa tecnologia è pari a 5, ma la sua installazione non è semplice dato che nelle BF-BOF le sorgenti di biossido di carbonio sono molteplici [3]. Negli anni sono stati fatti pochi progressi per favorirne l'adozione e ad oggi in Italia non esistono impianti siderurgici dotati di impianti di cattura.

E' inoltre possibile integrare i sistemi di cattura agli impianti **DRI a gas naturale o a carbone**. La cattura può essere di tipo post-combustione mediante assorbimento chimico o adsorbimento fisico. Nel caso di assorbimento chimico il TRL è pari a 9 e si stima che la sua importanza per la decarbonizzazione sia molto elevata [15]. Il TRL dell'adsorbimento fisico è pari a 5 [15]. In questo caso le molecole di CO₂ si fissano sulla superficie di un materiale selettivo e il processo di desorbimento avviene mediante

Pressure Swing Adsorption, Vacuum Swing Adsorption o Vacuum Pressure Swing Adsorption⁶⁷.

Durante la **smelting reduction** viene utilizzato l'ossigeno come comburente e ciò ne facilita l'integrazione con un impianto di cattura post-combustione in quanto gli off-gas contengono un'elevata quantità di anidride carbonica. La smelting reduction abbinata agli impianti di cattura e stoccaggio della CO₂ ha un TRL pari a 5 e si stima che abbia un'importanza molto alta per la decarbonizzazione [15]. Per ora sono stati costruiti solo stabilimenti di medie dimensioni. L'adozione della smelting reduction integrata con impianti di cattura richiede un profondo cambiamento degli stabilimenti produttivi e lo sviluppo di sistemi per il trasporto e lo stoccaggio di grandi quantità di anidride carbonica.

La Figura 4.10 illustra il potenziale di riduzione delle emissioni delle principali tecnologie disponibili per la decarbonizzazione. Nella Figura 4.10 sono presenti solo quelle tecnologie per cui si sono trovate informazioni riguardanti il potenziale di abbattimento delle emissioni. La Tabella 4.3 riassume le opzioni disponibili per la decarbonizzazione del settore siderurgico.

⁶⁷ Nel 2017 nel centro di ricerca *Mefos* è stato inaugurato un modulo per la separazione del biossido di carbonio mediante adsorbimento fisico. Questo processo è noto con il nome di *SEWGS – Sorption Enhanced Water Gas Shift*.

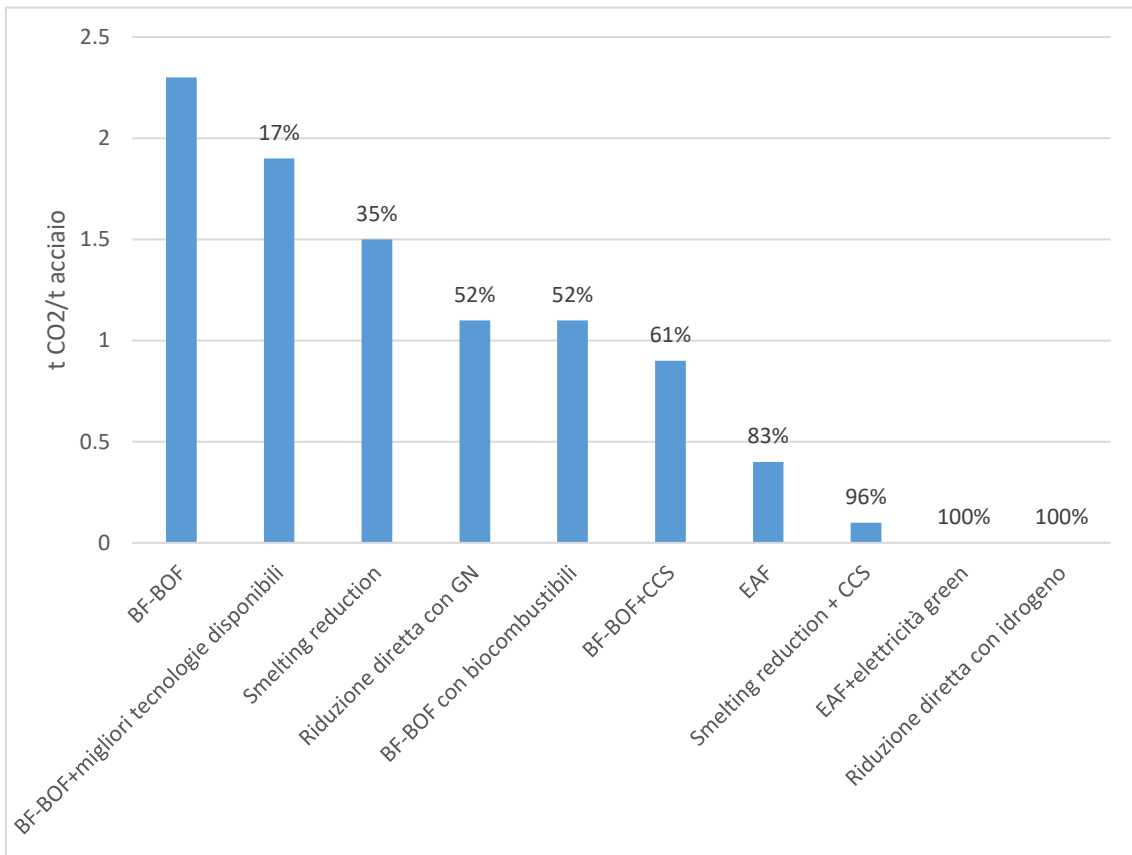


Figura 4.10 – Potenziale di riduzione delle emissioni di CO2 di alcune delle tecnologie per la decarbonizzazione del settore industriale in esame. (Fonti [9] e [12]).

Capitolo 4

Tabella 4.3 – Riepilogo delle tecnologie e strategie alternative per la decarbonizzazione delle acciaierie.

Opzione	Opzione di riferimento attuale	TRL	Categoria di intervento	Risparmio energetico	Riduzione delle emissioni	Entrata prevista sul mercato
Riduzione diretta a gas naturale	BF-BOF		Processo produttivo attuale		35% ([12])	Già presente
EAF	BF-BOF		Processo produttivo attuale		83% ([12])	Già presente
Top Gas Recycling	Blast Furnace	7 ([13])	Efficienza energetica	15% ([13])	25% ([13])	2025 ([13])
Coke Dry Quenching	Blast Furnace		Efficienza energetica			Già presente ([13])
Top gas Recovery Turbine (TRT)	Blast Furnace		Efficienza energetica			Già presente ([13])
Recuperatori di calore nelle BF	Blast Furnace		Efficienza energetica			Già presente ([13])
Recuperatori di calore nelle BOF	Basic Oxygen Furnace		Efficienza energetica			Già presente ([13])
Ossidazione nelle EAF	EAF		Efficienza energetica			Già presente ([13])
Riduzione diretta a idrogeno	BF-BOF	7 ([13])	Nuovi processi produttivi		100% ([12] e [13])	2030÷2035 ([13])
Elettrolisi dei minerali ferrosi	BF-BOF	4 ([13])	Nuovi processi produttivi	40% ([13])	95% ([13])	2040 ([13])
COREX	BF-BOF		Nuovi processi produttivi		20% ([13])	

Opzione	Opzione di riferimento attuale	TRL	Categoria di intervento	Risparmio energetico	Riduzione delle emissioni	Entrata prevista sul mercato
BF a idrogeno	BF a carbone	7 ([15])	Fonti energetiche alternative			
BF a biomassa	BF a carbone	7 ([15])	Fonti energetiche alternative			
Stampanti 3D		7 ([13])	Riduzione della domanda			
BF-BOF + Cattura della CO ₂	BF-BOF	5 ([3])	Cattura della CO ₂		80% ([3])	
DRI a gas naturale o a carbone + cattura con assorbimento chimico	DRI a gas naturale o a carbone	9 ([15])	Cattura della CO ₂			
DRI a gas naturale o a carbone + cattura con adsorbimento fisico	DRI a gas naturale o a carbone	5 ([15])	Cattura della CO ₂			

4.3 Scenari

Per il settore siderurgico sono stati elaborati tre scenari di decarbonizzazione, in cui vengono combinate fra loro alcune delle soluzioni presentate nei paragrafi precedenti. In tutti gli scenari si assume che entro il 2050 tutta l'elettricità verrà prodotta da fonti rinnovabili. Nello Scenario 1 si ipotizza che nel 2050 verranno prodotte 23.4 Mt di acciaio, il 19% della quali tramite riduzione diretta a gas naturale e il restante 81% nelle Electric Arc Furnaces. Nello Scenario 2 e 3 si ipotizza invece che verranno prodotte 20.1 Mt, il 90% delle quali sarà acciaio secondario prodotto nelle EAF. Il restante 10% verrà prodotto tramite processo COREX nello Scenario 2 e tramite riduzione diretta a idrogeno nello Scenario 3. In Tabella 4.4 si riassumono tutte queste ipotesi.

Tabella 4.4 - Ipotesi relative agli scenari di decarbonizzazione.

Scenari	EAF	Riduz. diretta gas naturale	COREX	Riduz. diretta idrogeno	Riduz. domanda	Cattura emiss. processo	Cattura emiss. Combust.
1	81%	19%	no	no	no	sì	sì
2	90%	no	10%	no	sì	sì	sì
3	90%	no	no	10%	sì	no	no

4.3.1 Scenario 1

In questo scenario si ipotizza che non verranno implementate le strategie dell'economia circolare volte alla riduzione della domanda. Nonostante ciò si ipotizza comunque che la produzione di acciaio diminuirà del 6%, arrivando a 23.4 Mt nel 2050, in linea con le previsioni fornite da ISPRA. Tale stima non tiene conto della crisi innescata dalla pandemia da COVID19. Si ipotizza che la produzione di acciaio primario rimarrà costante rispetto al 2018 e si assume quindi che verranno prodotte 4.5 Mt di acciaio tramite riduzione diretta a gas naturale. Le restanti 18.9 Mt verranno prodotte nelle fornaci ad arco elettrico. La riduzione diretta a gas naturale permette di ridurre del 35% le emissioni rispetto alla produzione da ciclo integrato [12]. La Tabella 4.5 riassume la produzione, i fabbisogni energetici e le emissioni previsti nello Scenario 1 suddivisi per acciaio primario e secondario, mentre la Tabella 4.6 contiene i risultati complessivi relativi a questo scenario. Con la combinazione delle soluzioni presentate i fabbisogni energetici subiscono una lieve diminuzione, mentre le emissioni vengono più che dimezzate. Per le 4.5 Mt di CO₂ eq rimanenti sarà necessario adottare impianti di cattura.

Tabella 4.5 – Produzione, fabbisogni energetici ed emissioni previsti al 2050 nello Scenario 1 per produzione tramite riduzione diretta a gas naturale ed EAF.

<u>Riduzione diretta a gas naturale</u>		u.d.m
Produzione	4.5	Mt
Fabbisogno elettrico	1.9	TWh

Riduzione diretta a gas naturale		u.d.m
Fabbisogno termico	27.2	TWh
Emissioni CO₂ eq	4.5	Mt
EAF		u.d.m
Produzione	18.9	Mt
Fabbisogno elettrico	10.4	TWh
Fabbisogno termico	4	TWh
Emissioni CO₂ eq	0	Mt

Tabella 4.6 – Stima del fabbisogno elettrico e termico e del potenziale di riduzione delle emissioni relativi allo Scenario 1.

	2018	2050	u.d.m
Fabbisogno elettrico	12.9	12.3	TWh
Fabbisogno termico	31.4	31.2	TWh
Δ Fabbisogno elettrico	-5%		
Δ Fabbisogno termico	-1%		
	2018	2050	u.d.m
Emissioni CO₂ eq	11.6	4.5	Mt
Δ Emissioni CO₂ eq	-61%		
HP: Efficienza di cattura dell'80%			
			u.d.m
Emissioni catturate	3.6		Mt
Emissioni rimanenti	0.9		Mt

4.3.2 Scenario 2

In questo scenario si ipotizza che la produzione di acciaio calerà del 18% grazie alle strategie di riduzione della domanda, arrivando a 20.1 Mt nel 2050, in linea con quanto previsto dal report [12] per l'Unione Europea. Si ipotizza inoltre che il 10% dell'acciaio verrà prodotto tramite processo COREX, mentre il restante 90% verrà prodotto nelle EAF. La tecnologia COREX permette di ridurre del 18% il fabbisogno termico e del 20% le emissioni rispetto alla produzione BF-BOF [13]. La Tabella 4.7 riassume la produzione, i fabbisogni energetici e le emissioni previsti nello Scenario 2, suddivisi per acciaio primario e secondario, mentre la Tabella 4.8 contiene i risultati complessivi relativi a questo scenario. Con le soluzioni presentate è possibile ridurre del 16% il fabbisogno elettrico e del 56% quello termico. Le emissioni vengono ridotte quasi dell'80% e per le 2.5 Mt rimanenti sarà necessario adottare impianti per la cattura della CO₂. Dato che la tecnologia COREX ha un costo pari a 195 €/t di capacità annua installata, si prevede un investimento di 392 milioni di euro.

Tabella 4.7 – Produzione, fabbisogni energetici ed emissioni previsti al 2050 nello Scenario 2 per la produzione COREX ed EAF.

COREX		u.d.m
Produzione	2	Mt
Fabbisogno elettrico	0.9	TWh
Fabbisogno termico	9.9	TWh
Emissioni CO₂ eq	2.5	Mt
EAF		u.d.m
Produzione	18.1	Mt
Fabbisogno elettrico	9.9	TWh
Fabbisogno termico	3.9	TWh
Emissioni CO₂ eq	0	Mt

Tabella 4.8 – Stima del fabbisogno elettrico e termico e del potenziale di riduzione delle emissioni relativi allo Scenario 2.

	2018	2050	u.d.m
Fabbisogno elettrico	12.9	10.8	TWh
Fabbisogno termico	31.4	13.8	TWh
Δ Fabbisogno elettrico	-16%		
Δ Fabbisogno termico	-56%		
	2018	2050	u.d.m
Emissioni CO₂ eq	11.6	2.5	Mt
Δ Emissioni CO₂ eq	-79%		
HP: Efficienza di cattura dell'80%			
			u.d.m
Emissioni catturate	2		Mt
Emissioni rimanenti	0.5		Mt

4.3.3 Scenario 3

Come per lo Scenario 2, anche in questo scenario si ipotizza che la produzione di acciaio calerà del 18% [12]. Si ipotizza inoltre che il 10% dell'acciaio verrà prodotto tramite la riduzione diretta a idrogeno, mentre il restante 90% verrà prodotto nelle EAF. La tecnologia di riduzione diretta a idrogeno richiede 3.5 MWh di energia elettrica per la produzione di una tonnellata di acciaio [12]. La riduzione diretta a idrogeno e le fornaci ad arco elettrico permetteranno di abbattere completamente le emissioni. La Tabella 4.9 riassume la produzione, i fabbisogni energetici e le emissioni previsti nello Scenario 3, suddivisi per acciaio primario e secondario, mentre la Tabella 4.10 contiene i risultati complessivi relativi a questo scenario. Con le soluzioni presentate sarà possibile ridurre dell'88% il fabbisogno termico, a fronte di un aumento del 32% di quello elettrico.

Tabella 4.9 – Produzione, fabbisogni energetici ed emissioni previsti al 2050 nello Scenario 2 per la produzione con riduzione diretta a idrogeno ed EAF.

Riduzione diretta a idrogeno		u.d.m
Produzione	2	Mt
Fabbisogno elettrico	7	TWh
Fabbisogno termico	0	TWh
Emissioni CO₂ eq	0	Mt
EAF		u.d.m
Produzione	18.1	Mt
Fabbisogno elettrico	9.9	TWh
Fabbisogno termico	3.9	TWh
Emissioni CO₂ eq	0	Mt

Tabella 4.10 – Stima del fabbisogno elettrico e termico e del potenziale di riduzione delle emissioni relativi allo Scenario 3.

	2018	2050	u.d.m
Fabbisogno elettrico	12.9	17	TWh
Fabbisogno termico	31.4	3.9	TWh
Δ Fabbisogno elettrico	+32%		
Δ Fabbisogno termico	-88%		
	2018	2050	u.d.m
Emissioni CO₂ eq	11.6	0	Mt
Δ Emissioni CO₂ eq	-100%		

4.3.4. Confronto

La Figura 4.11 mostra i fabbisogni termici ed elettrici relativi agli scenari elaborati. Nello Scenario 1 i fabbisogni non subiscono sostanziali variazioni rispetto al 2018, mentre nello Scenario 2 il fabbisogno termico viene più che dimezzato, grazie alla maggiore produzione di acciaio secondario, all'adozione del processo COREX e alle strategie dell'economia circolare. In questo scenario il fabbisogno elettrico subisce una diminuzione del 16%. Nello Scenario 3 il fabbisogno termico viene ridotto quasi del 90%, in quanto l'elettricità diventa la fonte energetica principale anche per la produzione di acciaio primario. La combinazione delle soluzioni adottate nello Scenario 3 comporta un aumento del 32% del fabbisogno elettrico.

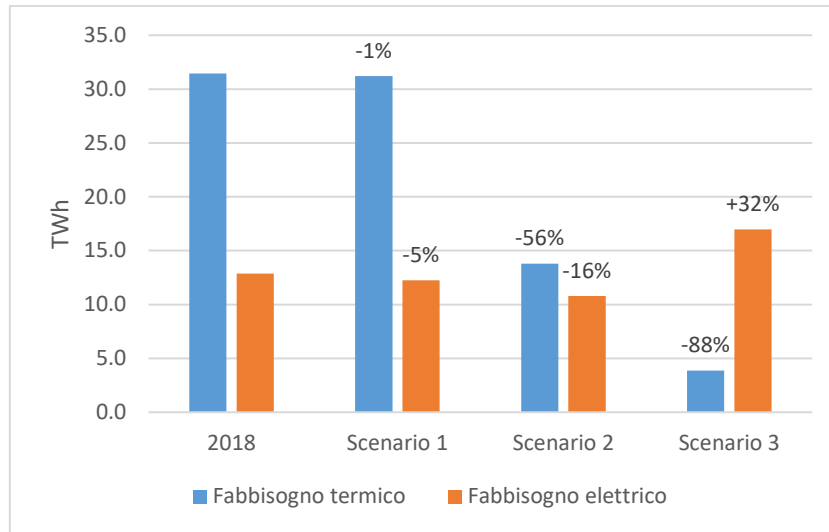


Figura 4.11 – Fabbisogni termici ed elettrici relativo agli scenari presentati.

La Figura 4.12 mostra il potenziale di riduzione delle emissioni, senza considerare gli impianti per la cattura della CO₂. Producendo il 19% dell'acciaio primario mediante la riduzione diretta a gas naturale (Scenario 1) è possibile ridurre del 61% le emissioni. Adottando le strategie per la riduzione della domanda e producendo il 10% dell'acciaio con la tecnologia COREX (Scenario 2) è possibile ridurre quasi dell'80% le emissioni, mentre adottando la riduzione diretta a idrogeno si può arrivare alla completa decarbonizzazione.

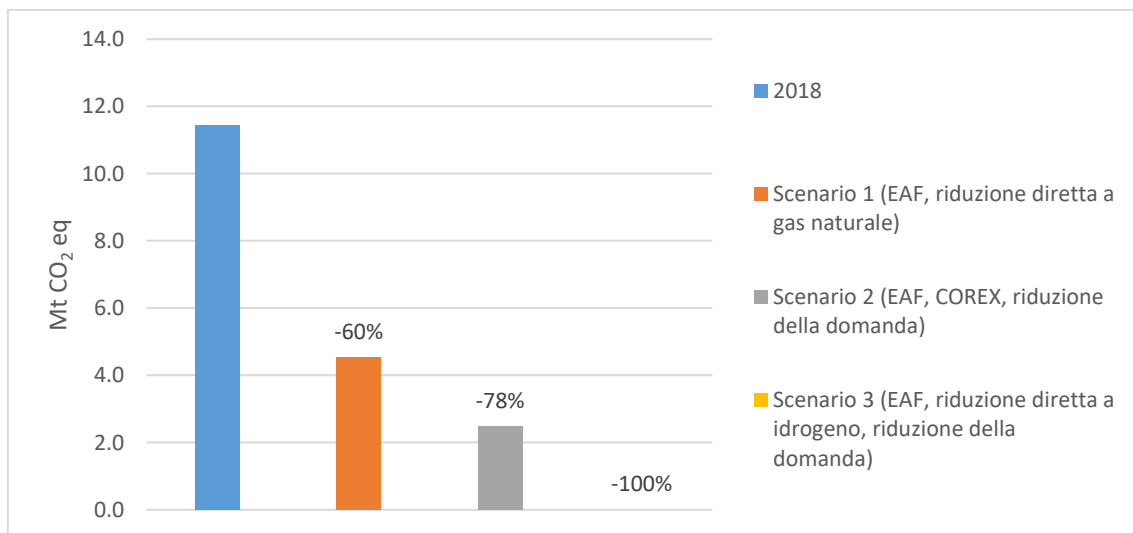


Figura 4.12 – Potenziale di riduzione delle emissioni relativo agli scenari presentati.

Dato l'implementazione del processo COREX ha un costo di 195 €/t di capacità annuale, nello Scenario 2 si prevede un investimento di 478 milioni di euro [74]. Per gli altri scenari non sono stati trovati dati per elaborare stime di costo.

Capitolo 5

Settore della carta

La carta è un materiale composto soprattutto da materie prime di origine vegetali, alle quali vengono aggiunti collanti, cariche minerali, coloranti e additivi. E' possibile distinguere quattro tipologie di carte e cartoni: carta per la scrittura, carta per la pulizia e l'igiene, carta per gli imballaggi e carte speciali.

I principali produttori di carta sono Cina, Stati Uniti e Giappone [94]. Nel 2018 l'Italia è stato il quarto produttore di carta in Europa, dopo Germania, Svezia e Finlandia [95]. A livello nazionale nel 2018 sono state prodotte 9.1 Mt di carta, corrispondenti al 10% della produzione europea ([82] e [96]). Questo settore industriale dà lavoro a circa 19300 addetti e nel 2017 ha fatturato 7.4 miliardi di euro [83]. Nel 2018 le emissioni delle cartiere italiane sono state pari a 4 Mt di CO₂ eq; tale dato è fornito da ISPRA su elaborazione EU ETS⁶⁸.

⁶⁸ Dal 2013 in poi gli impianti di cogenerazione ricevono solo un'allocazione delle emissioni derivanti dal calore prodotto e non più per la produzione di energia elettrica, secondo la direttiva 2009/29/EC. Si ricorda che nel sistema EU ETS rientrano le installazioni che emettono più di 25 kt di CO₂ eq all'anno.

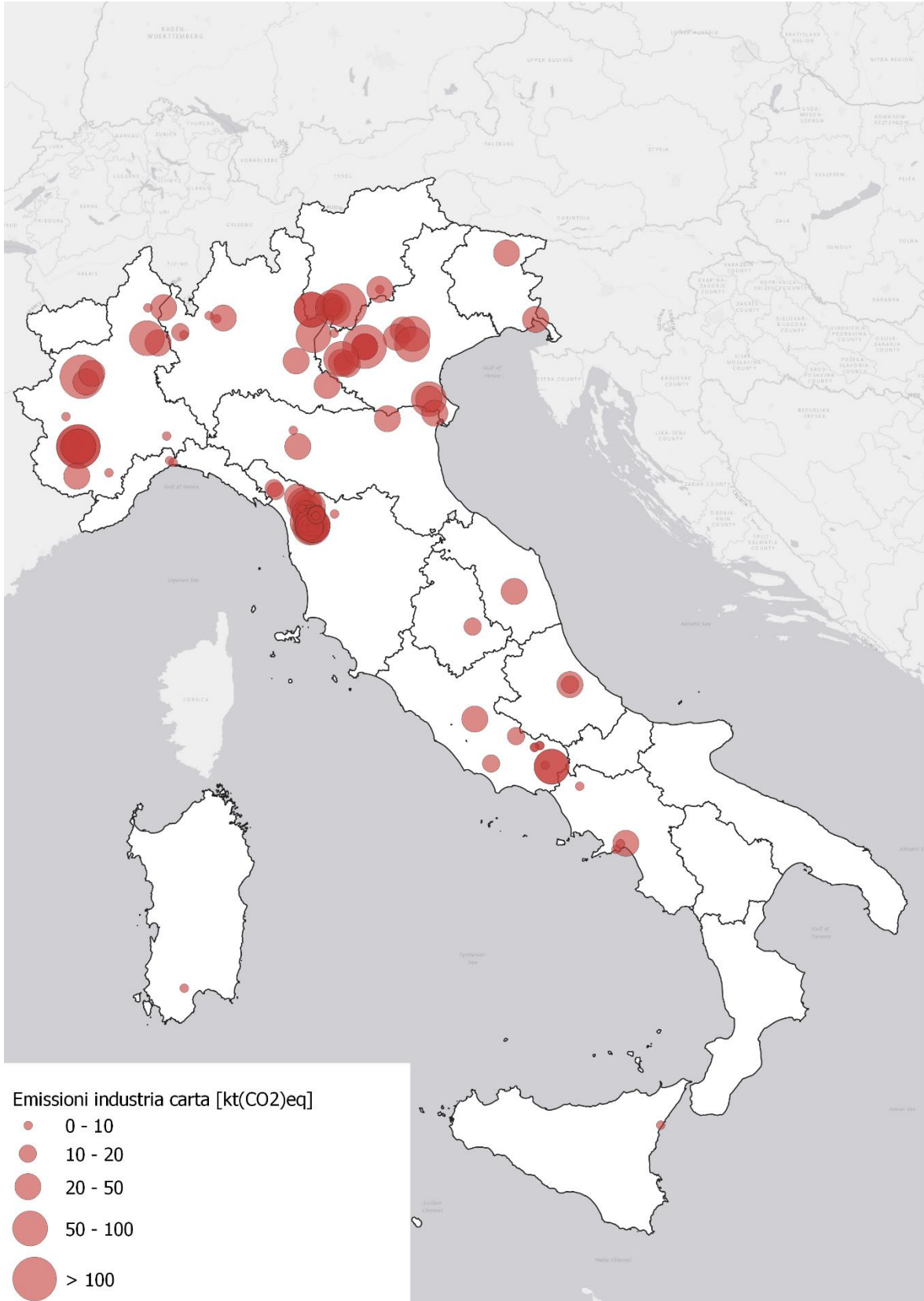


Figura 5.1 - Localizzazione geografica dei siti di emissione. Elaborazione grafica basata sui dati forniti da ISPRA.

5.1 Processo produttivo attuale

Le fasi del processo produttivo della carta sono:

1. Estrazione della cellulosa dal legno;
2. Sbiancamento;
3. Formazione del foglio e pressatura;
4. Essiccamento;
5. Trattamenti superficiali.

La composizione media del legno è data da:

- 45% di cellulosa;
- 30% di emicellulosa;
- 20% di lignina;
- 5% di terpeni⁶⁹, resine e acidi grassi.

La cellulosa e la emicellulosa sono le fibre del legno, mentre la lignina è la sostanza che tiene unite queste fibre. La cellulosa può essere estratta dal legno attraverso processi meccanici o chimici. Durante il processo meccanico il legno viene macinato e raffinato per la produzione di cellulosa fibrosa, mentre il processo chimico prevede l'impiego di sostanze a base di solfiti o solfati per la separazione della lignina dalle fibre di legno. La lignina viene poi bruciata per la generazione dell'energia termica necessaria durante il processo produttivo della carta. La cellulosa viene miscelata insieme all'acqua e la pasta viene sbiancata con il biossido di fluoro. Le fasi di formazione del foglio, pressatura ed essiccamento avvengono tutte sulla macchina continua, così chiamata in quanto la carta viene prodotta senza interruzioni. I fogli vengono fabbricati sfruttando il principio della feltrazione, per effetto del quale è possibile unire tra loro le fibre cellulosiche sospese in acqua. L'acqua viene poi eliminata attraverso il drenaggio, la pressatura e l'essiccamento. Con l'essiccamento l'acqua contenuta viene rimossa per evaporazione, facendo passare i fogli attraverso una serie di cilindri riscaldati con del vapore. Affinché il nastro di carta non subisca shock termici, i cilindri sono riscaldati a temperature crescenti dai 60°C ai 160°C. I cilindri essiccatori ruotano all'interno delle cappe di asciugatura, ovvero cavità dove viene insufflata aria calda secca, per rimuovere l'acqua che evapora dai fogli. La carta viene poi sottoposta a differenti trattamenti superficiali a seconda del prodotto finale che si vuole ottenere. Il processo produttivo della carta appena descritto è schematizzato in Figura 5.2.

⁶⁹ I terpeni sono un gruppo di molecole aromatiche presenti in diverse piante, e alimenti. Il loro ruolo primario è proteggere le piante da batteri, funghi e parassiti.

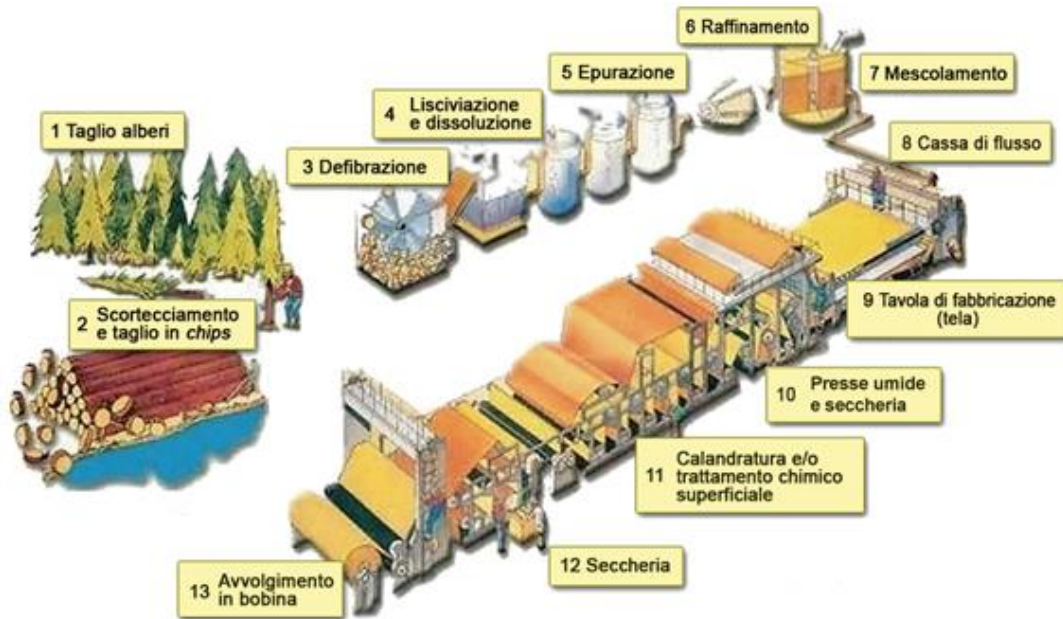


Figura 5.2 – Schematizzazione del processo produttivo della carta. (Fonte [84]).

5.1.1 Produzione, richiesta energetica ed emissioni

In Tabella 5.1 si riportano i dati relativi alla produzione di carta in Italia e le relative emissioni. Conoscendo la produzione di carta e le emissioni nel 2014 in Italia, sono state stimate le emissioni specifiche. Essendo nota la produzione di carta nel 2018 è stato possibile stimare le emissioni totali nel 2018. Noti i fabbisogno energetici totali e la produzione nel 2018 sono stati stimati i fabbisogni energetici specifici. I calcoli svolti per stimare le emissioni e i fabbisogni energetici specifici sono schematizzati in Figura 5.3. Non sono state trovate informazioni riguardanti i fabbisogni energetici delle singole fasi del processo produttivo.

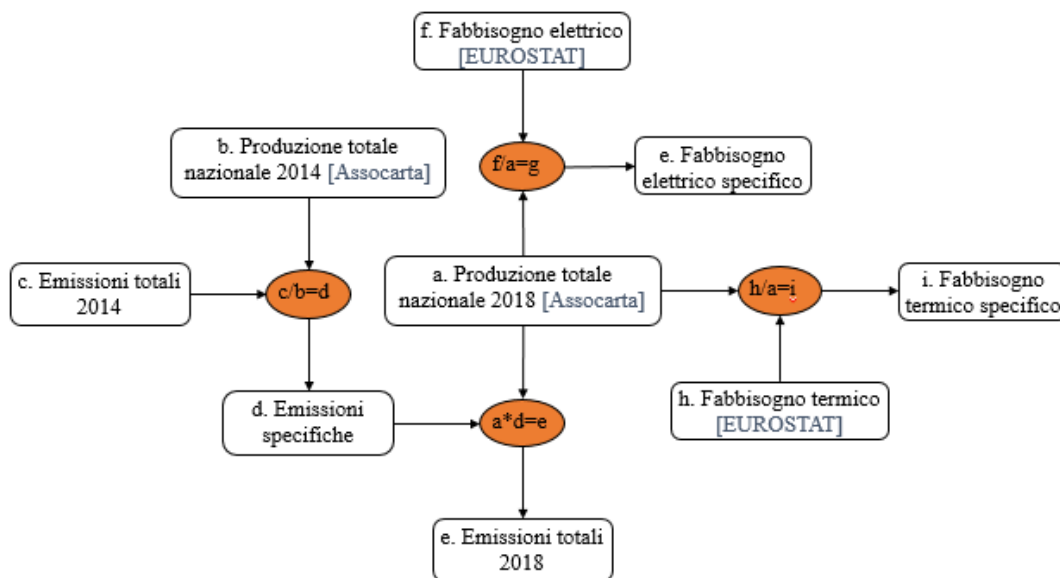


Figura 5.3 - Schema dei calcoli svolti per la stima delle emissioni specifiche e dei fabbisogni energetici specifici.

Tabella 5.1 – Produzione, emissioni e stima del fabbisogno energetico delle aziende produttrici di carta. Italia, 2018.

id			u.d.m.	Anno	Fonte
a	Produzione carta	9.1	Mt	2018	ASSOCARTA [85]
b	Produzione carta	8.6	Mt	2014	ASSOCARTA [87]
c	Emissioni CO ₂ eq ⁷⁰	4.9	Mt	2014	ASSOCARTA [87]
d	Emissioni specifiche CO ₂ eq	0.6	t CO ₂ eq/t carta		d=c/b
e	Emissioni CO ₂ eq	5.1	Mt	2018	e=a*d
f	Fabbisogno elettrico ⁷¹	8.5	TWh		EUROSTAT [86]
g	Fabbisogno elettrico specifico	0.9	TWh/Mt		g=f/a
h	Fabbisogno termico	15.5	TWh		EUROSTAT [86]
i	Fabbisogno termico specifico ⁷²	1.7	TWh/Mt		i=h/a

⁷⁰ Emissioni registrate in accordo con la direttiva 2009/29/EC.

⁷¹ Nel report [29] di TERNA è riportato un fabbisogno di energia elettrica per l'industria cartaria pari a 8.5 TWh.

⁷² Il database JRC-IDEES [28] riporta un fabbisogno termico pari a 18.7 TWh in Italia nel 2015. Considerando che in quell'anno la produzione di carta è stata pari a 8.8 Mt, si ottiene un fabbisogno termico specifico di 2.1 TWh/Mt. La fonte principale da cui provengono questi dati JRC-IDEES è il bilancio di energia di EUROSTAT, che viene integrato con delle stime fatte da JRC-IDEES sulla base delle statistiche strutturali sulle imprese di EUROSTAT, delle statistiche sul volume della produzione industriale (in particolare quelle di USGS), di documenti BREF e di fonti nazionali.

5.2 Soluzioni di decarbonizzazione

Per la decarbonizzazione del settore industriale in analisi sono disponibili le seguenti opzioni:

- Efficienza energetica;
- Fonti energetiche alternative;
- Riduzione della domanda.

Ogni categoria viene presentata singolarmente nei prossimi paragrafi. Questo settore industriale è avvantaggiato nel processo di decarbonizzazione perché le cartiere hanno accesso diretto alla biomassa e non si hanno emissioni di processo.

5.2.1 Efficienza energetica

In letteratura sono presenti varie **tecnologie** per il miglioramento dell'efficienza energetica della fase **di essiccamento** [13]. Esempi di queste nuove tecnologie sono l'essiccamento per *impingement* ad aria o a vapore, l'asciugatura su nastro di condensazione e l'asciugatura per impulso. Nel caso di essiccamento per impingement ad aria viene utilizzato dell'aria calda a elevata velocità per asciugare il foglio di carta. Questo metodo è caratterizzato da una velocità di essiccamento elevata e può essere utilizzato da solo o in combinazione con i tradizionali cilindri riscaldati. Ciò permette di avere una sezione di essiccamento più piccola. 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 [88]. 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 permettano di ridurre del 12% il fabbisogno di combustibili e che richiedano degli investimenti iniziali modesti. Queste soluzioni hanno un TRL compreso fra 5 e 7 ma portano alla produzione di carta di bassa qualità, fattore che ne ostacola la diffusione su vasta scala [13]⁷³.

I **pre-trattamenti con enzimi** dei chips di legno permettono di ridurre l'energia meccanica necessaria durante la fase di preparazione delle materie prime. Queste soluzioni permettono di ridurre dal 10% al 40% i consumi di elettricità relativi alla fase di preparazione delle materie prime e hanno un TRL compreso fra 6 e 8 [13].

I **Deep Eutectic Solvents** (DES) sono una classe di solventi naturali che permettono di separare lignina, emicellulosa e cellulosa a bassa temperatura e a pressione atmosferica. Questi solventi possono essere utilizzati anche per estrarre la cellulosa dagli scarti delle

⁷³ Ci sono due stabilimenti che producono carta a livello commerciale sfruttando l'asciugatura su nastro di condensazione; uno si trova in Finlandia e l'altro il Corea del Sud. Nel 2013 l'associazione *CEPI* ha presentato il progetto *Two Team Project*, che prevede l'utilizzo di CO₂ allo stato supercritico per l'essiccamento della carta. Per ora questo sistema è stato testato solo in laboratorio [13].

lavorazioni delle cartiere e di eliminare l'inchiostro e i contaminanti dalla carta. Mediante il loro impiego è possibile ridurre del 40% la domanda di energia primaria rispetto ai tradizionali processi di preparazione delle materie prime, mentre la riduzione delle emissioni di anidride carbonica dipende dal processo di produzione della cellulosa che vanno a sostituire (estrazione chimica della cellulosa, estrazione meccanica o riciclaggio) [13]. I Deep Eutectic Solvents sono solo stati utilizzati per prove in laboratorio, quindi il loro TRL è pari a 3 [13]. Si stima che questa alternativa possa entrare sul mercato tra il 2030 e il 2035 [13]. E' stato inoltre provato che i processi che si basano su questi solventi possono essere svolti con dei costi operativi simili a quelli dei tradizionali impianti produttivi⁷⁴.

5.2.2 Fonti energetiche alternative

E' possibile sostituire i combustibili fossili utilizzati nella produzione della carta con fonti energetiche sostenibili. Questo passaggio sta già avvenendo in favore della biomassa, ma è comunque possibile incrementarne ulteriormente l'utilizzo. La Figura 5.4 illustra i vettori energetici utilizzati dalle cartiere europee con un utilizzo prevalente di gas naturale e biomassa, oltrechè di elettricità.

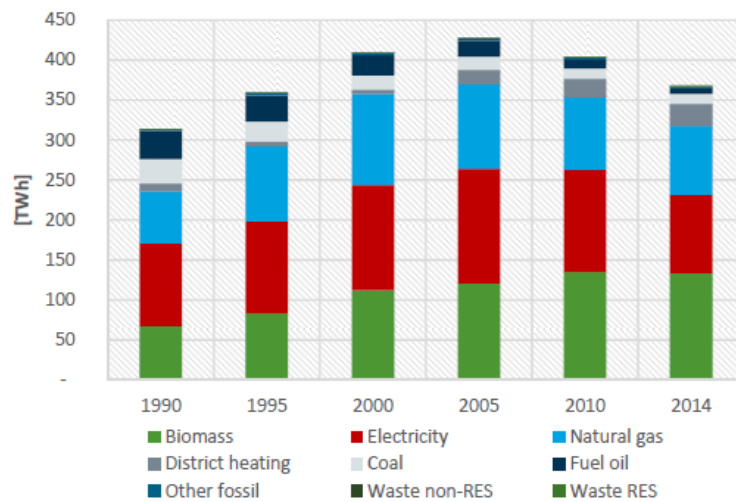


Figura 5.4 – Consumi energetici delle cartiere in Europa. (Fonte [13]).

La relazione [10] riporta che al 2014 in Italia l'utilizzo come combustibile della biomassa e dei fanghi (sottoprodotti di processo) era ancora trascurabile, al contrario di quanto

⁷⁴ *PROVIDES* è un progetto di ricerca sui DES, che coinvolge 27 tra industrie cartiere, università e istituti di ricerca. La prima fase del progetto ha portato allo sviluppo di oltre cento *Deep Eutectic Solvents*.

avveniva in altri paesi europei; questo anche se i fanghi contengono una grande quantità di biomassa e sono già state sviluppate soluzioni che permettano di utilizzarli.

Il black liquor è un sottoprodotto che si forma durante l'estrazione chimica della cellulosa e con il processo di **Black Liquor Gasification** (BLG) è possibile gassificare questa sostanza in un reattore pressurizzato. Si genera così un gas di sintesi contenente principalmente idrogeno, monossido di carbonio e metano. Questo syngas ha un potere calorifico inferiore di $4.9 \div 5.3 \text{ MJ/Nm}^3$ e può essere bruciato in un sistema di turbina a gas per la generazione di energia elettrica. Dal report *Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonisation of Industry* [13] emerge che la tecnologia BLG permette di ridurre dell'87% la domanda di energia elettrica. Il TRL della Black Liquor Gasification è pari a 9 [13]. L'investimento richiesto è compreso fra 300 € e 500 € per tonnellata di capacità annua installata.

E' possibile utilizzare **caldaie elettrificate** per la generazione del calore necessario durante il processo produttivo, tuttavia gli elevati prezzi dell'energia elettrica ostacolano la diffusione su vasta scala di questa strategia, sebbene il suo TRL sia già pari a 9 [13].

Nelle cartiere è possibile adottare le **pompe di calore** per la produzione dell'energia termica necessaria durante il processo produttivo. Le pompe di calore industriali possono fornire energia termica fino a 100°C , con una differenza di temperatura tra la fonte e il pozzo termico di 50°C [3]. Sono quindi adatte al recupero del calore di scarto. La relazione *Ossigeno per la crescita* [3] riporta che le pompe di calore industriali hanno già raggiunto la maturità tecnologica e il loro TRL è pari a 9. Si stima che il tempo di ritorno dell'investimento sia compreso fra 1.5 e 6 anni [3].

5.2.3 Riduzione della domanda

Nuove materie prime

Sono in fase di studio dei progetti che impiegano nuove materie prime per la produzione della carta, come ad esempio paglia, erba e scarti del settore agricolo. Questi nuovi materiali permettono di ridurre il consumo di energia, sostanze chimiche, acqua e legno. Il TRL di questa strategia è pari a 8 [3].

Riciclo

La media europea del tasso di riciclaggio della carta è pari al 72.3% [3], mentre in Italia nel 2019 il tasso di riciclo è stato pari al 80.8% [89]. La qualità delle fibre riciclate può essere migliorata 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 riciclaggio.

Il sistema attuale di riciclo della carta è molto frammentato e genera una grande quantità di materiale di scarto. In Europa circa il 20% delle materie in input al riciclaggio non vengono utilizzate e diventano un nuovo rifiuto [13]. Questi materiali sono costituiti principalmente da additivi chimici e da inchiostro e contengono solo una piccola quota di

fibre. Sono in corso di sviluppo soluzioni che permettono di riciclare la carta utilizzando tutti i sottoprodotti e non solo le fibre. Queste tecnologie sono chiamate *Urban Refinery* e il loro TRL è pari a 5 [13].

La Tabella 5.2 riassume le opzioni disponibili per la decarbonizzazione del settore industriale in esame.

Tabella 5.2 – Riepilogo delle principali tecnologie e strategie alternative per la decarbonizzazione delle cartiere.

Opzione	Opzione di riferimento attuale	TRL	Categoria di intervento	Risparmio energetico	Entrata prevista sul mercato
Nuove tecniche di essiccamento	Cartiere convenzionali	5÷7 ([13])	Efficienza energetica	12% ([13])	
Pre-trattamenti enzimatici	Processo meccanico convenzionale	6÷8 ([13])	Efficienza energetica	25% ([13])	2025 ([13])
Deep Eutetic Solvents	Processo meccanico/chimico convenzionale	3 ([13] e [15])	Efficienza energetica	40% ([13])	2030÷2035 ([13])
Biomassa	Combustibili convenzionali		Fonti energetiche alternative		Già presente ([13])
Elettrificazione	Combustibili convenzionali	9 ([13])	Fonti energetiche alternative		
Pompe di calore	Combustibili convenzionali	9 ([3])	Fonti energetiche alternative		Già presente ([3])
Black Liquor Gasification	Processo chimico convenzionale	9 ([13])	Fonti energetiche alternative		2030÷2035 ([13])
Urban Refinery	Cartiere convenzionali	5 ([13])	Riduzione della domanda		

5.3 Scenari

Per il settore della carta sono stati elaborati due scenari di decarbonizzazione, in cui vengono combinate fra loro alcune delle soluzioni riportate nei paragrafi precedenti. Ipotesi comuni a entrambi gli scenari sono che la produzione aumenterà del 5% rispetto al 2018 e che entro il 2050 tutta l'energia elettrica sarà a emissioni zero. Nello Scenario 1 si ipotizza che tutte le cartiere italiane adotteranno le nuove tecnologie di essiccamento. Nello Scenario 2 si assume che, oltre a queste tecnologie, entro il 2050 tutti gli stabilimenti verranno elettrificati. Queste ipotesi sono riassunte in Tabella 5.3.

Tabella 5.3 - Ipotesi alla base degli scenari di decarbonizzazione.

Scenario	Nuove tecnologie di essiccamento	Elettrificazione	Cattura delle emissioni
1	sì	no	sì
2	sì	sì	no

5.3.1 Scenario 1

Si ipotizza che la produzione arriverà a 9.5 Mt nel 2050, in linea con i dati forniti da ISPRA. Si assume inoltre che entro il 2050 tutte le industrie nazionali produttrici di carta adotteranno le nuove tecniche per ottimizzare il processo di essiccamento. Queste tecnologie permettono di ridurre del 12% il consumo di combustibile e quindi anche le emissioni [13]. Considerando anche l'aumento della domanda, queste soluzioni permetteranno di ridurre complessivamente dell'8% sia il consumo di combustibili che le emissioni. In Tabella 5.4 si riporta la variazione dei fabbisogni energetici e la riduzione delle emissioni ottenuta nello Scenario 1. Per abbattere le 4.7 Mt di CO₂ eq sarà necessario adottare impianti di cattura.

Tabella 5.4 – Variazione del fabbisogno elettrico e termico e riduzione delle emissioni previsti nello Scenario 1.

	2018	2050	u.d.m
Fabbisogno elettrico	8.5	8.9	TWh
Consumo di combustibili	15.5	14.3	TWh
Δ Fabbisogno elettrico	5%		
Δ Consumo di combustibili	-8%		
	2018	2050	u.d.m
Emissioni CO₂ eq	5.1	4.7	Mt
Δ Emissioni CO₂ eq	-8%		

5.3.2 Scenario 2

Anche in questo scenario si ipotizza che entro il 2050 la produzione aumenterà del 5%. Si assume inoltre che, oltre alle nuove tecnologie di essiccamento, gli stabilimenti dove viene prodotta la carta verranno elettrificati. In questo modo vengono abbattute completamente le emissioni. Il consumo di combustibili si ridurrà del 100%, a fronte di un aumento del fabbisogno elettrico, che quasi triplica. La Tabella 5.5 riassume i risultati ottenuti.

Tabella 5.5 – Stima dei fabbisogni elettrici e termici, della domanda di energia elettrica alla rete e della riduzione delle emissioni relativa allo Scenario 2.

	2018	2050	u.d.m
Fabbisogno elettrico	8.5	23.2	TWh
Consumo di combustibili	15.5	0	TWh
Δ Fabbisogno elettrico	174%		
Δ Consumo di combustibili	-100%		
	2018	2050	u.d.m
Emissioni CO₂ eq	5.1	0	Mt
Δ Emissioni CO₂ eq	-100%		

5.3.4 Confronto

La Figura 5.5 illustra il consumo di combustibili e il fabbisogno elettrico negli scenari presentati. Con la sola adozione delle nuove tecnologie di essiccamento non si hanno significative variazioni rispetto al 2018 (Scenario 1). L'elettrificazione invece permette di annullare il consumo di combustibili, a fronte di un aumento del 174% del fabbisogno elettrico.

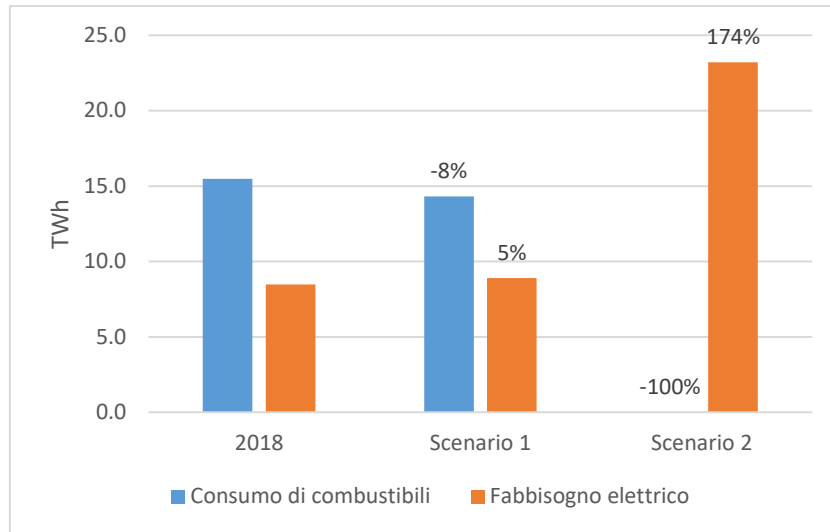


Figura 5.5 – Fabbisogno elettrico e termico relativo agli scenari presentati.

La Figura 5.6 mostra il potenziale di riduzione delle emissioni. Nello Scenario 1 le emissioni vengono ridotte solo dell'8%, mentre nello Scenario 2 si ottiene la completa decarbonizzazione del settore industriale in analisi.

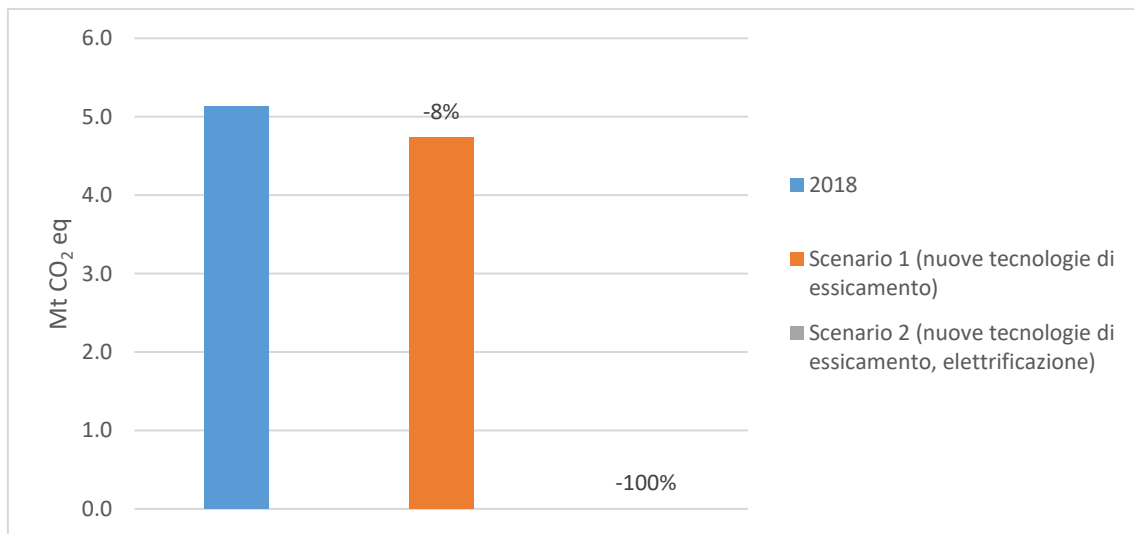


Figura 5.6 – Potenziale di riduzione delle emissioni relativo agli scenari presentati.

Capitolo 6

Conclusioni

Questo lavoro di tesi ha avuto come obiettivo l'individuazione delle tecnologie e delle soluzioni disponibili per la decarbonizzazione di alcuni settori dell'industria nazionale. Ciò ha permesso di elaborare degli scenari al 2050 e dai risultati ottenuti emerge che per la transizione saranno importanti interventi di efficienza energetica, in linea con il principio europeo dell'*energy efficiency first*. L'industria italiana ha già visto un importante incremento dell'efficienza energetica (si stima che nel 2018 i fabbisogni energetici delle industrie italiane sarebbero stati il 26% più alti senza gli interventi di efficienza energetica effettuati negli ultimi 10 anni [3]), tuttavia c'è ancora un grande potenziale non sfruttato, soprattutto nelle piccole e medie imprese. Ad esempio nel processo produttivo della ceramica l'adozione dei bruciatori a impulso, dei recuperatori di calore e dei materiali isolanti di elevata qualità permetterebbe di ridurre del 17% sia il fabbisogno termico che le emissioni. Oppure, nel caso dell'etilene, la combinazione di recuperatori di calore, turbine a gas, materiali isolanti e catalizzatori permetterebbe di ridurre del 21% sia il fabbisogno termico sia le emissioni. Con le migliori tecnologie disponibili sarà possibile non solo ridurre le emissioni, ma anche rendere l'industria più competitiva e generare nuovi posti di lavoro.

Nel percorso di transizione dovranno essere promosse strategie di economia circolare, volte a ridurre la domanda di prodotti finali. Ad esempio si stima che entro il 2050 sarà possibile ridurre del 20% la domanda di cemento grazie all'ottimizzazione delle tecniche costruttive, al riciclo e alla diffusione del calcestruzzo armato con fibre di carbonio. Si prevede inoltre che sarà possibile ridurre del 30% la domanda di ammoniaca grazie al miglioramento dei metodi di applicazione dei fertilizzanti minerali e grazie alla sostituzione di questi con sostanze di origine naturale. Queste soluzioni sono di fondamentale importanza per la decarbonizzazione anche perché spesso richiedono investimenti minimi o nulli per essere implementate. Inoltre permettono di ottenere anche molti altri benefici, come la creazione di nuovi posti di lavoro e la riduzione dell'inquinamento dell'aria e dell'acqua.

Dalle analisi svolte risulta che nel 2050 rimarrà un fabbisogno termico non elettrificabile compreso tra 29.9 TWh e 97.6 TWh. Tale fabbisogno potrà essere soddisfatto mediante l'utilizzo di idrogeno, biometano e vettori energetici di sintesi. Il fabbisogno elettrico stimato, ad esclusione dell'elettricità necessaria per la produzione di tali combustibili, sarà compreso fra 28 TWh e 54.4 TWh. L'aumento dei consumi di elettricità dell'industria richiederà verosimilmente un potenziamento delle reti di trasmissione e di distribuzione. L'elettricità potrà quindi essere utilizzata per la generazione diretta di calore e per la produzione dell'idrogeno, che verrà impiegato come combustibile e in alcuni casi anche come materia prima. Ad esempio l'idrogeno necessario per la sintesi dell'ammoniaca potrà essere prodotto tramite elettrolisi alcalina o con PEM fuel cells. Utilizzando l'energia elettrica anche per la generazione del calore necessario durante questo processo produttivo è possibile abbattere completamente le emissioni. L'elettricità potrà essere anche utilizzata nel processo produttivo dell'acciaio per alimentare le EAF e per la produzione dell'idrogeno utilizzato per la riduzione diretta. Anche in questo caso grazie all'elettrificazione è possibile ridurre a zero le emissioni.

La decarbonizzazione potrà quindi essere basata su queste tre strategie fondamentali: efficienza energetica, elettrificazione ed economia circolare. Per ottenere il massimo beneficio è indispensabile combinare insieme tra loro varie soluzioni ma, nel caso in cui tutto ciò non sia sufficiente, sarà necessario ricorrere ai sistemi per la cattura della CO₂, soprattutto in quei settori industriali in cui le emissioni di processo sono rilevanti. Un esempio è il settore cementizio, per il quale si prevede che nel 2050 sarà necessario catturare almeno 3.3 Mt di emissioni di processo. Considerando l'industria manifatturiera italiana nel suo complesso, dai risultati ottenuti negli scenari si stima che bisognerà catturare dalle 7.4 alle 28.1 Mt di CO₂ all'anno. Gli impianti di cattura hanno già raggiunto un alto livello di maturità tecnologica, ma non sono ad oggi diffusi su vasta scala. L'adozione di queste soluzioni richiederà la disponibilità di siti di stoccaggio della CO₂, ma anche lo sviluppo di infrastrutture per il trasporto e lo stoccaggio.

Per la definizione degli scenari sono state utilizzate informazioni relative alla produzione, alle emissioni e ai fabbisogni energetici attuali. Una difficoltà riscontrata durante questo lavoro riguarda la raccolta dei dati. In letteratura sono stati trovati pochi dati e scarse informazioni riguardanti i relativi metodi di raccolta ed elaborazione. Inoltre, spesso i valori vengono forniti in forma aggregata; in alcuni casi inoltre sono stati trovati valori incoerenti riguardanti uno stesso dato. Un'altra criticità riscontrata è la mancanza di informazioni riguardanti il potenziale di abbattimento delle emissioni e/o di riduzione dei fabbisogni energetici. Di conseguenza alcune soluzioni non sono state considerate nell'elaborazione degli scenari perché non sono stati trovati dati che permettessero di quantificare la loro importanza per la decarbonizzazione.

Questo lavoro permette una referenziazione spaziale dei punti emissivi residui negli scenari di decarbonizzazione e può essere un punto di partenza per l'individuazione geografica della necessità di stoccaggio della CO₂ e per la localizzazione della domanda di idrogeno per studiare eventuali reti locali di distribuzione di tale vettore energetico. Sviluppi ulteriori di questo lavoro potranno riguardare altri settori industriali importanti a livello nazionale, come quello alimentare e meccanico.

Dai molti report analizzati emerge che, a livello tecnologico, la completa decarbonizzazione dell'industria entro il 2050 sarà possibile. Attualmente sono già disponibili varie tecnologie che possono essere utilizzate per avviare la transizione. In futuro poi verranno sviluppate nuove soluzioni, che permetteranno di accelerare questo processo. Sarà però necessario confrontare i fabbisogni delle nuove tecnologie con la disponibilità delle risorse, al fine di comprendere quali saranno le soluzioni che meglio si adatteranno al contesto nazionale e che potranno essere economicamente sostenibili.

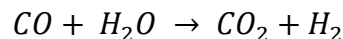
L'industria ha davanti a sé una grande sfida, perché la transizione dovrà avvenire in tempi relativamente brevi se comparati con la vita utile media degli impianti industriali. E' quindi necessario che fin da oggi vengano fatti e favoriti investimenti in tecnologie efficienti e innovative in ottica di lungo termine, che permettano di ridurre le emissioni mantenendo però le industrie competitive ed evitando che gli stabilimenti vengano delocalizzati all'estero. Ciò avverrà in un contesto economico complicato e reso instabile dalla crisi del 2008 e dall'attuale pandemia da COVID19. E' per questo motivo dunque che il supporto politico sarà fondamentale per accelerare il processo di innovazione tecnologica, per favorire gli investimenti, per supportare i nuovi processi produttivi a basse emissioni, per superare gli ostacoli che limitano l'economia circolare e per assicurare alle imprese la disponibilità di grandi quantità di energia elettrica a emissioni zero.

Appendice 1

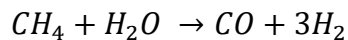
Cattura e stoccaggio della CO₂

Gli impianti CCS, acronimo di Carbon Capture and Storage, vengono utilizzati per catturare e stoccare l'anidride carbonica originata dall'utilizzo di combustibili fossili e da alcuni processi industriali. La cattura della CO₂ può avvenire pre-combustione o post-combustione.

La **cattura pre-combustione** prevede la rimozione del carbonio direttamente dal combustibile attraverso la conversione di quest'ultimo in idrogeno e anidride carbonica. Se il combustibile utilizzato è il carbone si effettua il processo di gassificazione, che consente di produrre un gas di sintesi formato principalmente da idrogeno, monossido di carbonio e idrocarburi leggeri. In seguito con la reazione di *Water Gas Shift* (WGS) è possibile convertire il monossido di carbonio in anidride carbonica e acqua:



Nel caso di gas naturale si effettua prima la reazione di Steam Reforming (SR) del metano e poi quella di WGS per produrre anidride carbonica e idrogeno.

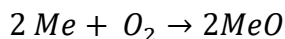


L'idrogeno viene utilizzato per la produzione di energia termica, mentre la CO₂ viene catturata, compressa e stoccata.

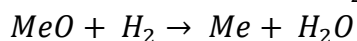
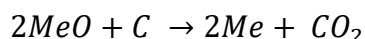
Nel caso di **cattura post-combustione** l'anidride carbonica viene separata dai gas che si originano in seguito al processo di combustione tramite assorbimento chimico, assorbimento fisico o adsorbimento fisico. Il vantaggio di questo sistema è che non sono necessarie particolari modifiche del ciclo produttivo al quale viene integrato.

L'**ossicombustione** è una tecnica di combustione di un carburante in ossigeno puro, anziché in aria, e ciò permette di ottenere off-gas costituiti principalmente anidride carbonica e acqua. Una volta separato il vapore acqueo tramite condensazione, si ottiene un flusso di gas ricco di CO₂. I principali vantaggi di questo sistema sono le elevate efficienze di cattura e la possibilità di retrofit a impianti esistenti. Gli svantaggi sono legati agli elevati costi e ai consumi energetici necessari per la separazione dell'ossigeno dall'aria.

La tecnologia **chemical looping combustion** è un sistema innovativo per effettuare la separazione del biossido di carbonio. In questo caso sono necessari due reattori: uno alimentato ad aria e l'altro con il combustibile. Nel primo reattore viene immessa aria e un metallo; a temperature comprese fra i 700°C e i 900°C il metallo reagisce con l'ossigeno presente nell'aria secondo la seguente reazione:



Il metallo ossidato MeO viene separato dall'azoto e trasportato nel secondo reattore. Qui reagisce con il combustibile a una temperatura di circa 900°C, producendo anidride carbonica e acqua:



Il metallo ridotto viene reimmesso nel reattore ad aria, in modo tale da avere un processo ciclico. I due reattori della chemical looping combustion sono schematizzati in Figura A1.1. Il flusso prodotto nel reattore ad aria può essere rilasciato direttamente in atmosfera, dato che contiene una minima quantità di biossido di carbonio. La chemical looping combustion è vantaggiosa rispetto ad altri impianti CCS perché richiede dei consumi energetici inferiori.

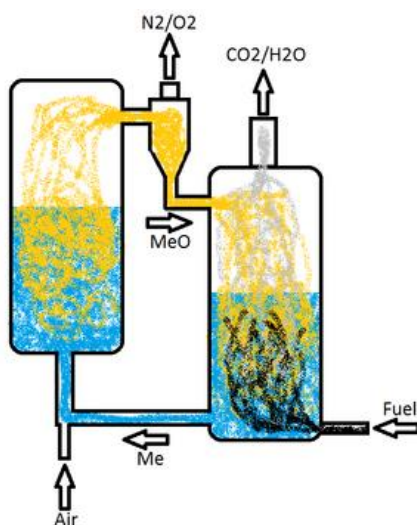


Figura A1.1 – Schematizzazione della chemical looping combustion. (Fonte [90]).

Una volta catturata, la CO₂ deve essere trasportata e stoccata in siti di confinamento, come giacimenti petroliferi o di gas naturale, acquiferi salini, vene carbonifere e oceani. Nel caso di giacimenti il biossido di carbonio viene utilizzato per il recupero avanzato del petrolio, noto come EOR, acronimo di Enhanced Oil Recovery, rappresentato in Figura A1.2 Questa è una tecnica già diffusa in molti paesi e consiste nell'iniezione di anidride

carbonica nei giacimenti in modo tale da aumentare la pressione e facilitare l'estrazione del greggio. Lo stoccaggio della CO₂ è una parte critica del processo, perché ad oggi vi sono ancora molti dubbi sulla sicurezza dello stoccaggio nel sottosuolo.

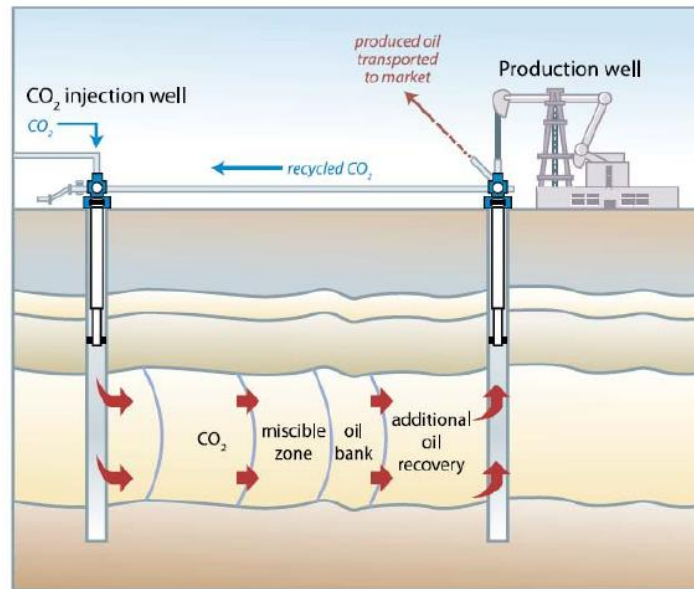


Figura A1.2 – Principio di funzionamento dell'Enhanced Oil Recovery. (Fonte [40]).

La Figura A1.3 illustra i siti di stoccaggio individuati in Italia. In alternativa l'anidride carbonica può essere utilizzata in vari settori industriali, come ad esempio quello chimico e alimentare.

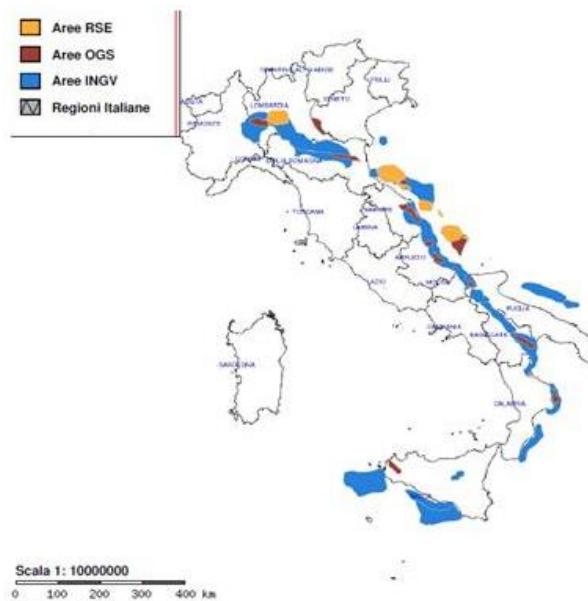


Figura A1.3 – Siti di stoccaggio individuati in Italia. (Fonte [102]).

Appendice 2

Technology Readiness Level

L'acronimo TRL – *Technology Readiness Level* – indica una metodologia per la valutazione del grado di maturità di una tecnologia. Il TRL è stato sviluppato dalla NASA nel 1974 e ad oggi è utilizzato da vari istituti di ricerca ed enti in tutto il mondo. Questo metodo può essere applicato a una qualsiasi tecnologia per valutarne il grado di maturità su una scala di valori che va da 1 a 9. L'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA) ha esteso la scala del TRL aggiungendo altri due livelli. TRL pari a 10 per indicare una tecnologia che ha già raggiunto la commercializzazione ma che richiede ulteriore lavoro per essere integrata all'interno del sistema energetico e della catena del valore. TRL pari a 11 per quelle soluzioni che sono stati sviluppati anche sotto questo punto di vista. La Figura A2.1 riporta tutta la scala del TRL.

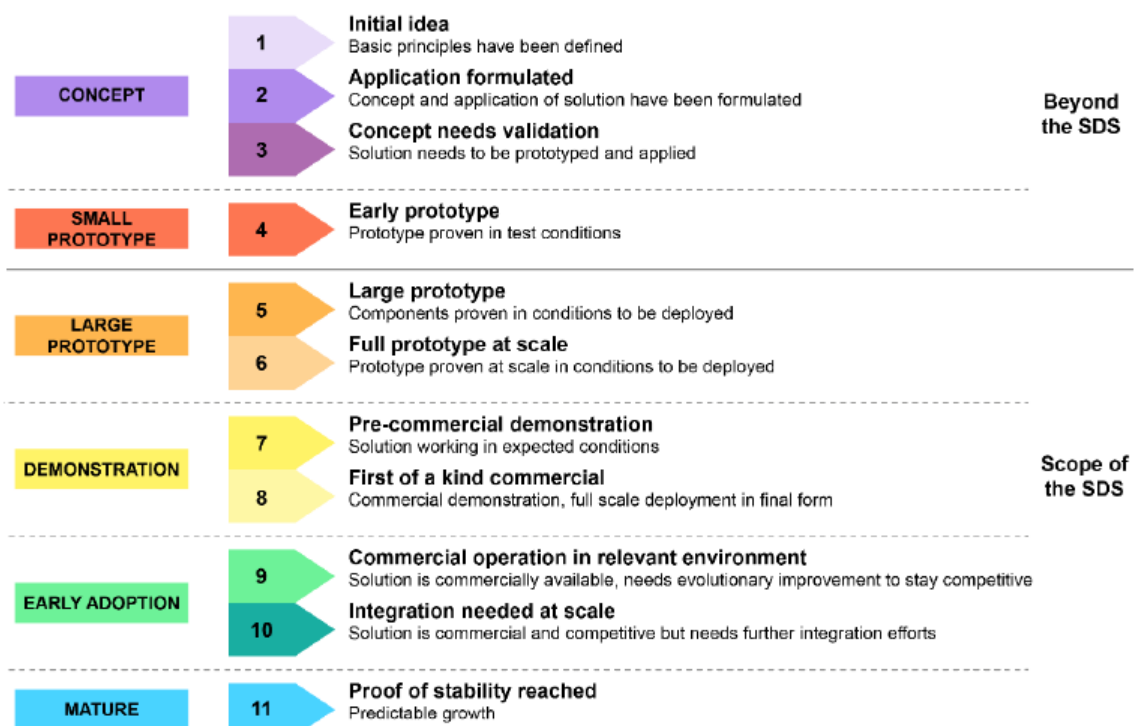


Figura A2.1 – Scala del TRL proposta da IEA. (Fonte [91]).

Bibliografia e sitografia

- [1] “Accordo di Parigi”, *Commissione Europa*.
https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_it
- [2] “Produzione e importazione di energia”, *EUROSTAT*, 2019.
https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_production_and_imports/it
- [3] “Ossigeno per la crescita – La decarbonizzazione al centro della strategia economica Post – COVID”, *REF – E*, 2020.
- [4] “Occupazione regolare, irregolare e popolazione”, *ISTAT*. <http://dati.istat.it/>
- [5] “Risultati economici delle imprese”, *ISTAT*.
- [6] “Greenhouse Gas Emissions by Source Sector”, *EUROSTAT*, 2020.
- [7] “EU Emissions Trading System (ETS) data viewer”, *EEA*.
<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/emissions-trading-viewer-1>
- [8] Favier, A; De Wolf, C; Scrivener, K; Habert, G; “A sustainable future for the European Cement and Concrete Industry - Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050”, *ETH Zürich*, 2018.
- [9] “The Circular Economy – A Powerful Force for Climate Mitigation”, *Material Economics*, 2018.
- [10] Bazzocchi, F; Borgarello, M; Gobbi, M.E; Nsangwe Businge, C; Realini, A; Zagano, C; Maggiore, S; “L’efficienza energetica nell’industria: potenzialità di risparmio energetico e impatto sulle performance e sulla competitività delle imprese”, *RSE*, 2018.
- [11] “Dimmi cosa produci”, *RSE*. <http://212.237.5.82/dimmi-cosa-produci/#!/welcome>
- [12] “Industrial Transformation 2050 - Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry”, *Material Economics*, 2019.
- [13] Chan, Y; Petithunguenin, L; Fleiter, T; Herbst, A; Arens, M; Stevenson, P; “Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonisation of Industry – Part 1: Technology Analysis”, *Fraunhofer ISI*, 2019.
- [14] “Clean Energy Innovation”, *IEA*, 2020.
- [15] “ETP Clean Energy Technology Guide”, *IEA*, 2020.
<https://www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide>
- [16] “Produzione industriale in quantità e valore”, *ISTAT*. <http://dati.istat.it/>
- [17] EN 197-1 - Cemento - Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni. 6 ottobre 2011
- [18] “LIME”, *USGS*, 2005.
- [19] “LIME”, *USGS*, 2015.
- [20] “Rapporto di filiera 2019”, *Federbenton*.
- [21] “Produzione cemento”, *Malta per riparazioni*,
<http://maltaperriparazioni.blogspot.com/2015/10/produzione-cemento.html>
- [22] “Cemento composito”, *CemItaly*. <https://www.cemitaly.it/it/cemento-composito>
- [23] “Tipo III”, *Buzzi Unicem*. <https://www.buzziunicem.it/tipo-iii>
- [24] “Piano Nazionale Integrato per l’Energia e il Clima”, *Ministero dello Sviluppo Economico*, 2019.

- [25] Baldinucci, P; “Cemento 4.0 – efficienza energetica”, *Colacem*, 2017.
- [26] “Relazione annuale 2016”, *AITEC*, 2017.
- [27] “Guidelines for the misurement and reporting of emission in the UK Emission Trading Scheme”.
- [28] “JRC-IDEES - Integrated Database of the European Energy System (2000-2015)”, *European Commission*, 2018. <https://ec.europa.eu/italy/>
- [29] “Consumi”, *Terna*, 2019.
- [30] “Rapporto di sostenibilità AITEC 2018”, *AITEC*, 2018.
- [31] Tava, M; “Il cemento – Caratteristiche, tipologie, tecnologie di produzione, migliori tecniche disponibili per il controllo degli impatti”, *Provincia Autonoma di Trento*, 2012.
- [32] “Guida Operativa per il Settore di produzione del Cemento”, *Enea*, 2014.
- [33] “Why Choose Dry Process From Manufacturing Cement Methods”, *AGICO GROUP*.
- [34] “Linee guida per l’individuazione e l’utilizzazione delle migliori tecniche disponibili – Produzione di cemento”, 2004.
- [35] L.F. Gaete-Garretòn; Y.P. Vargas-Hermàndez; C.V. Velasquez-Lambert; “Application of ultrasound in comminution”, *ScienceDirect*, 2020.
- [36] “Mining”, *Selfrag*. <http://www.selfrag.com/applications/mining/>
- [37] UNI EN 206-1:2006 – Calcestruzzo – Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità. 23 marzo 2006.
- [38] UNI 11104:2004 - Calcestruzzo – Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità. Istruzioni complementari per l’applicazione della EN 206-1. 1 marzo 2004.
- [39] “Classi di esposizione e durabilità”, *Calcestruzzi erbesi*. <http://www.calcestruzzierbesi.it/faq-abc-del-calcestruzzo/>
- [40] Da slide del corso di Sistemi Energetici Avanzati tenuto dal Professor Paolo Chiesa nell’anno 2018.
- [41] Rodriguez, N; Murillo, R; Abanades, C; “CO2 Capture from Cement Plants Using Oxyfired Precalcination and/or Calcium Looping”, *Environmental Science and Technology*, 2012.
- [42] “Low Emission Intensity Lime and Cement”, *Project-LEILAC*. <https://www.project-leilac.eu/>
- [43] Chan, Y; Petithunguenin, L; Fleiter, T; Herbst, A; Arens, M; Stevenson, P; “Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonisation of Industry – Part 2: Technology Analysis”, *Fraunhofer ISI*, 2019.
- [44] “Dati di settore”, *Assovetro*. <https://www.assovetro.it/dati-di-settore/>
- [45] “FWC Sector Competitiveness Studies – Competitiveness of the Glass Sector”, *Ecorys*, 2008.
- [46] “Statistical Report 2018-2019”, *Glass Alliance Europe*, 2019.
- [47] “Rapporto di sostenibilità 2020”, *Assovetro*.
- [48] “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”, *Assoesco*, 2017.

- [49] “Biometano in Italia, tante potenzialità e tante resistenze”, *Qualenergia*, 2020. <https://www.qualenergia.it/articoli/biometano-in-italia-tante-potenzialita-e-tante-resistenze/>
- [50] Faber; “Sustainable Industries in a hydrogen-based economy”, *GlassWorldwide*, 2019.
- [51] “I Settori”, *Confindustria Ceramica*. <http://www.confindustriaceramica.it/site/home/i-settori.html>
- [52] Mazzanti, B; “Economia circolare ed efficienza energetica: binomio e sfida per il settore ceramico”, *Centro ceramico*, 2018.
- [53] “Il prodotto e il processo ceramico per l’Economia Circolare”, *Confindustria Ceramica*, 2019. <http://www.confindustriaceramica.it/site/home/aree-e-servizi/ambiente/articolo9019.html>
- [54] Birol, F; “The Future of Hydrogen – Seizing today’s opportunities”, *IEA*, 2019.
- [55] “Italy. 2020 Common Reporting Format (CRF) Table”, *UNFCCC*, 2020. <https://unfccc.int/documents/223564>
- [56] “Caratteristiche, ruolo e sfide dell’industria chimica”, *Federchimica*, 2017.
- [57] “Production Capacity of ammonia worldwide in 2018 and 2030”, *Statista*, 2019. <https://www.statista.com/statistics/1065865/ammonia-production-capacity-globally/>
- [58] “Technical Support Document for the Ammonia Production Sector: Proposed Rule for Mandatory Reporting of Greenhouse Gases”, *Office of Air and Radiation U.S. Environmental Protection Agency*, 2009.
- [59] “Global Warming Potentials (IPCC Second Assessment Report)”, *United Nations Climate Change*.
- [60] “All. B. 18 (Relazione tecnica processi produttivi)”, *Yara Italia S.p.A.*
- [61] “Ecoinvent 3.7 dataset documentation”, *Ecoinvent*. <https://www.ecoinvent.org/>
- [62] “Ethylene production, consumption and trade balance”, *Petrochemicals Europe*. <https://www.petrochemistry.eu/about-petrochemistry/petrochemicals-facts-and-figures/european-market-overview/>
- [63] Patel, M; “Cumulative energy demand (CED) and cumulative CO(2) emissions for products of the organic chemical industry”, 2003.
- [64] Garside, M; “Production capacity of methanol worldwide in 2018 and 2030”, *Statista*, 2019. <https://www.statista.com/statistics/1065891/global-methanol-production-capacity/>
- [65] Gabrielli, P; Gazzani; Mazzotti, M; “The Role of Carbon Capture and Utilization, Carbon Capture and Storage and Biomass to Enable a Net-Zero-CO₂ Emissions Chemical Industry”, *I&EC research*, 2020.
- [66] Garside, M; “Production of plastics worldwide from 1950 to 2018 (in million metric tons)”, *Statista*, 2020. <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>
- [67] “Emissions of CO₂ from production of plastic and fiber packaging in Europe in 2016 with a forecast for 2030 and 2050 (in metric tons CO₂)”, *Statista*, 2019. <https://www.statista.com/statistics/1046052/emissions-intensity-of-plastic-and-fiber-packaging-production-in-europe/>

- [68] Zerbi, D; “In Italia solo il 43% della plastica raccolta viene riciclato”, *Lifegate*, 2019.
- [69] “La siderurgia italiana in cifre 2018”, *Federacciai*.
- [70] “Italia: l’import sfiora i 30 milioni di tonnellate – Nel 2018 i dati sul commercio estero testimoniano l’incremento di import ed export di acciaio. Aumenta il deficit”, *ESS*, 2019.
- [71] “L’industria siderurgica italiana 2018”, *Federacciai*.
- [72] “Low Emission Intensity Lime and Cement”, *Project-LEILAC*.
<https://www.project-leilac.eu/>
- [73] “Rapporto di sostenibilità 2019”, *Federacciai*.
- [74] “COREX Process”, *Industrial Efficiency Technology Database*.
<http://www.iipinetwork.org/wp-content/Ietd/content/corex-process.html>
- [75] Raimondi, G; “Acciaio a zero emissioni: l’ipotesi dell’idrogeno”, *Rienergia*, 2020.
- [76] “Azione per il clima”, *ArcelorMittal*, 2019. <https://corporate.arcelormittal.com/>
- [77] “Development of new methodologies for industrial CO₂-free steel production by electrowinning”, *Siderwin*. <https://www.siderwin-spire.eu/>
- [78] Torricelli, M; “Tata Steel:”Hisarna presto operative” – Si avvia al termine la lunga fase di test “di una tecnologia completamente nuova per la produzione di acciaio”, *Siderweb*, 2019.
- [79] Bormioli, F; “Il progetto Hisarna promette tecnologie pulite per la produzione dell’acciaio UE”, *ItaliaOggi*, 2015.
- [80] “ULCORED Process”, *Steel 360*, 2019.
- [81] “Framework programme 9: a mission for carbon-neutral steel & towards an EU masterplan for a low-carbon, competitive European steel value chain”, *Eurofer*.
- [82] “L’Italia è il quarto produttore di carta in Europa”, *Assocarta*, 2019.
www.assocarta.it
- [83] “L’industria cartaria in cifre 2017”, *Assocarta*.
- [84] “Carta”, *Wikipedia*. <https://it.wikipedia.org/wiki/Carta#Fabbricazione>
- [85] “L’industria cartaria nel 2019”, *Assocarta*.
- [86] “Simplified Energy Balances”, *EUROSTAT*, 2020.
<https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>
- [87] “Rapporto ambientale dell’industria cartaria italiana – dati 2013-2014”, *Assocarta*, 2016.
- [88] Martin, N; Anglani, N; Einstein, D; Khrushch, M; Worrel, E; Price, L,K; “Opportunities to Improve Energy Efficiency and Reduce Greenhouse Gas Emissions in the U.S. Pulp and Paper Industry”, *Berkeley Lab*, 2000.
- [89] “Pack in carta e cartone protagonisti dell’economia circolare”, *Comieco*, 2019.
- [90] “Chemical Looping”, *Wikipedia*. www.openei.org/wiki/Chemical_Looping
- [91] Birol, F; “Energy Technology Perspective 2020 – Special Report on Clean Energy Innovation”, *IEA*, 2020.
- [92] “Come fare un’elettrolisi dell’acqua speciale”, *Esperimentanda*.
<https://www.esperimentanda.com/come-fare-un-elettrolisi-dell-acqua-speciale-divertente/>
- [93] “MIDREX process”. <https://www.midrex.com/technology/midrex-process/>

- [94] Colleen, A; “I Migliori Paesi Produttori di Carta e Cellulosa nel Mondo”, *ripleybelieves*, 2020. <https://it.ripleybelieves.com/top-pulp-and-paper-producing-countries-in-world-3888>
- [95] “Carta: crollo della produzione (-5.4%) – Allarme costi materie prime per le cartiere italiane”, *Converter*, 2019.
- [96] “Key Statistics 2018”, *CEPI*, 2019. <https://www.cepi.org/cepi-annual-statistics-2018-limited-assurance-report-deloitte/>
- [97] “Chimica e innovazione”, *Ecoscienza*, 2016.
- [98] Amar, I; Lan, R; Petit, C; Tao, S; “Solid-state electrochemical synthesis of ammonia: a review”, *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2011.
- [99] Rafiqul, I; Weber, C; Lehmann, B; Voss, A; “Energy efficiency improvements in ammonia production – perspectives and uncertainties”, *Elsevier*, 2002.
- [100] Worrel, E; Phylipsen, D; Einstein, D; Martin, N; “Energy Use and Energy Intensity of the U.S. Chemical Industry”, *University of California*, 2000.
- [101] Diamia, A, C; Bildea, C, S; “Energy efficient methanol-to-olefins process”, *Elsevier*, 2017.
- [102] Sito Web GEOwebGIS, *RSE*.