

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria per l'ambiente e il territorio**

Tesi di Laurea Magistrale

**Mitigazione della crisi climatica: il ruolo del
Green Steel come strategia per ridurre le
emissioni di CO₂**



**Politecnico
di Torino**

Relatrice

prof.sa Deborah Panepinto

Candidato

Marco Ferrari

Luglio 2026

Indice

1. Introduzione e inquadramento del problema	pag. 1
1.1 Obiettivi della tesi	pag. 2
2. Tecnologie per la decarbonizzazione della siderurgia	pag. 3
2.1 Produzione di acciaio ed emissioni	pag. 3
2.2 Idrogeno nella siderurgia	pag. 8
2.2.1 Blending H ₂ – CH ₄	pag. 11
2.2.2 Utilizzo di H ₂ con bruciatori per forni di preriscaldamento	pag. 15
2.2.3 Vantaggi e limiti	pag. 18
2.3 CCUS e Cattura CO ₂	pag. 19
2.4 Sicurezza e criticità dell'idrogeno	pag. 21
2.4.1 La sicurezza nella produzione dell'idrogeno green	pag. 22
2.4.2 La sicurezza nel trasporto dell'idrogeno	pag. 23
2.4.3 La sicurezza nello stoccaggio dell'idrogeno	pag. 23
2.4.4 Per non dimenticare: gravi incidenti avvenuti in passato	pag. 24
3. Politiche, mercato e definizione di acciaio green	pag. 27
3.1 ETS e prezzo della CO ₂	pag. 27
3.2 CBAM	pag. 28
3.3 Come definire acciaio “green”	pag. 32
3.3.1 L'Industrial Accelerator Act (IAA) europeo	pag. 33
3.3.2 LESS (Low Emission Steel Standard)	pag. 34
3.3.3 ResponsibleSteel International Production Standard	pag. 36
3.3.4 Steel Climate Standard (GSCC)	pag. 39
3.3.5 Industrial Deep Decarbonization Initiative (IDDI)	pag. 41
3.3.6 Low Carbon Emission Steel Evaluation Method	pag. 42
3.3.7 Steel Commitment by First Movers Coalition	pag. 43
3.3.8 Low-Emissions Steel Definition by IEA	pag. 44
3.3.9 Preliminary Concept Proposal by Federacciai	pag. 45
4. Limiti, soluzioni e scenari futuri	pag. 49
4.1 Il ruolo del riciclo	pag. 49
4.1.1 Utilizzo di rottame e impatto sulle emissioni di gas serra	pag. 50
4.1.2 Ridistribuzione del rottame e suo impatto sulle emissioni	pag. 52
4.1.3 Iniziative per la promozione del riciclo dell'acciaio	pag. 53
4.2 Caso studio: prove sperimentali di cattura CO ₂	pag. 57
4.2.1 La tecnologia utilizzata per le prove di cattura della CO ₂	pag. 57
4.2.2 Prove sperimentali di cattura CO ₂	pag. 60
4.3 Il simulatore En-ROADS e il baseline scenario	pag. 63
4.3.1 L'idrogeno per la transizione energetica	pag. 64
4.3.2 Raggiungere lo scenario WB2	pag. 66
4.3.3 Impatti concreti dello scenario WB2 rispetto a baseline scenario	pag. 77
4.4 Discussione finale	pag. 83

Riferimenti bibliografi

Ringraziamenti

*Dedicato ai miei tre meravigliosi bimbi:
Isabella Maria, Cristiano, Carolina.*

“Dobbiamo iniziare a studiare.
Dobbiamo comprendere i fatti fondamentali.
Dobbiamo imparare a leggere tra le righe.”

“Non importa quanto la situazione potrà diventare cupa,
di arrendersi non si parlerà mai.
Perché ogni minima frazione di grado e ogni tonnellata
di anidride carbonica saranno sempre importanti.
Non sarà mai troppo tardi per salvare il più possibile”.

“Abbiamo l’indicibile e immensa opportunità di vivere
nell’epoca più decisiva della storia del genere umano.
Possiamo ancora impedire la catastrofe
e iniziare a curare le ferite che abbiamo inflitto.
Ma non illudetevi: nessuno lo farà per noi.
Dipende da noi, qui e ora. Da voi e da me.”

Greta Thunberg

1. Introduzione e inquadramento del problema

Il raggiungimento dell'obiettivo zero emissioni nette al 2050 (NZE/2050), nel rispetto degli accordi di Parigi del 2015 per contenere l'aumento delle temperature medie globali entro i 2°C rispetto ai livelli pre-industriali, impone profondi cambiamenti nel modo in cui produciamo acciaio.

A livello globale, le produzioni di ferro e acciaio sono responsabili del 7.2% delle emissioni di gas ad effetto serra (3.5 miliardi di tonnellate di CO₂ equivalenti, figura 1.1). Questo dato, per avere un termine di paragone, è sovrapponibile al totale delle emissioni di tutta l'Unione Europea nel 2023.

Le emissioni del settore siderurgico, che per via della difficoltà di decarbonizzazione del processo produttivo è inserito tra quelli “*Hard to abate*”, sono dovute per il 71% da impianti a ciclo integrato (che utilizzano l'altoforno, BF blast furnace) e al 29% a impianti che invece utilizzano il forno elettrico o la riduzione diretta (EAF, electric arc furnace, DRP, direct reduction plant).

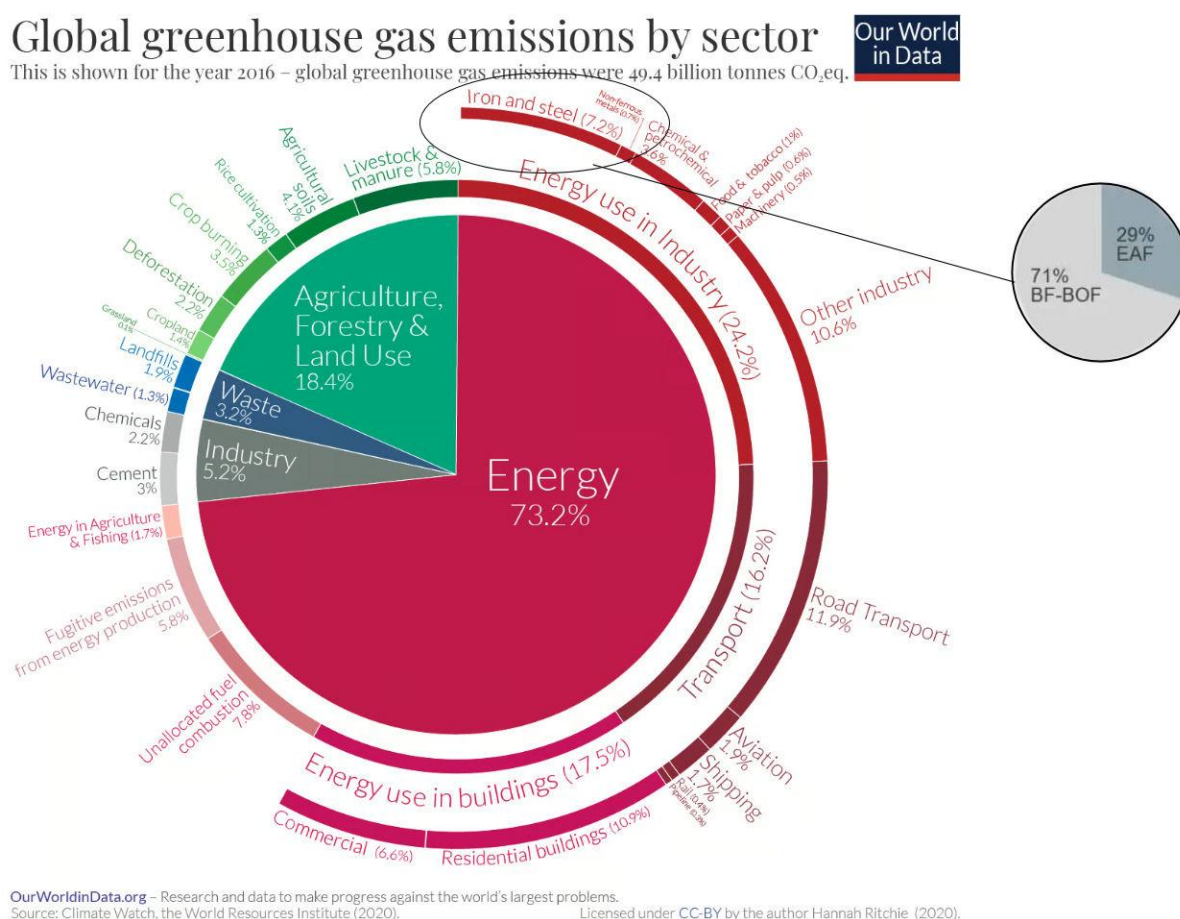


Figura 1.1: Emissioni globali di gas ad effetto serra, suddivise per settore

Secondo l'Agenzia Internazionale per l'Energia (IEA), al 2050 gli impianti di produzione dell'acciaio (soprattutto quelli a ciclo integrato, responsabili del quantitativo maggiore di emissioni di CO₂ per ogni tonnellata di acciaio prodotta) dovranno essere dotati di un sistema di cattura e utilizzo dell'anidride carbonica (CCUS).

Una quota pari a circa il 27% dell'acciaio dovrà essere prodotto con l'utilizzo di idrogeno come agente riducente, abbassando così al 5% il quantitativo di acciaio che continuerà ad essere prodotto utilizzando i sistemi ad oggi convenzionali (figura 1.2).

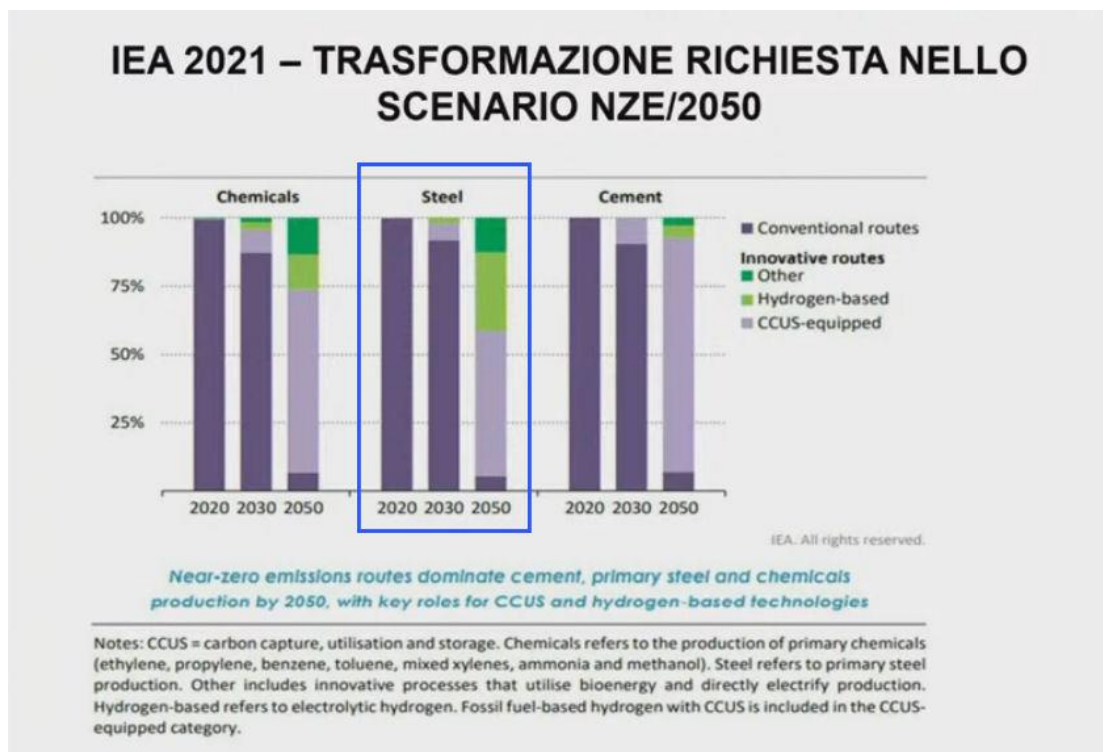


Figura 1.2: trasformazione richiesta dalla IEA nello scenario NZE/2050

Il concetto di “acciaio verde” non è definibile in modo assoluto, ma ricade all’interno di uno spettro relativo al suo maggiore o minore impatto emissivo. Non è ancora stato definito, a livello europeo o internazionale, uno standard per identificare in maniera chiara e univoca quali prodotti possano rientrare in questa definizione e quali no. Nel capitolo 3 approfondiremo vari aspetti.

Ciò implica il proliferare di annunci di prodotti ‘verdi’, ‘green’, ‘climate friendly’, ‘low’ o ‘zero carbon’ che, tuttavia, non fanno riferimento a standard condivisi. Questa situazione implica confusione all’interno del mercato e il rischio sempre più concreto di pratiche di *greenwashing*.

1.1 Obiettivi della tesi

- ✓ Evidenziare come la decarbonizzazione del settore siderurgico sia di fondamentale importanza nel contesto della transizione verso la neutralità carbonica al 2050.
- ✓ Mettere a fuoco i recenti sviluppi normativi ed i meccanismi di tassazione messi a punto dalla Commissione Europea per favorire la produzione di acciaio a basse emissioni.
- ✓ Configurare uno scenario climatico compatibile con l’accordo di Parigi del 2015.
- ✓ Permettere di capire ai miei tre figli, se avranno piacere di leggere questo libro quando saranno diventati grandi, che il loro papà sta studiando per fare qualcosa che possa contribuire a proteggere il loro futuro.

2. Tecnologie per la decarbonizzazione della siderurgia

2.1 Produzione di acciaio ed emissioni

A livello mondiale, la produzione di acciaio è attualmente di circa 1.8 miliardi di tonnellate per anno e può essere suddivisa in due grandi categorie: acciaio primario e secondario (fig. 2.1).

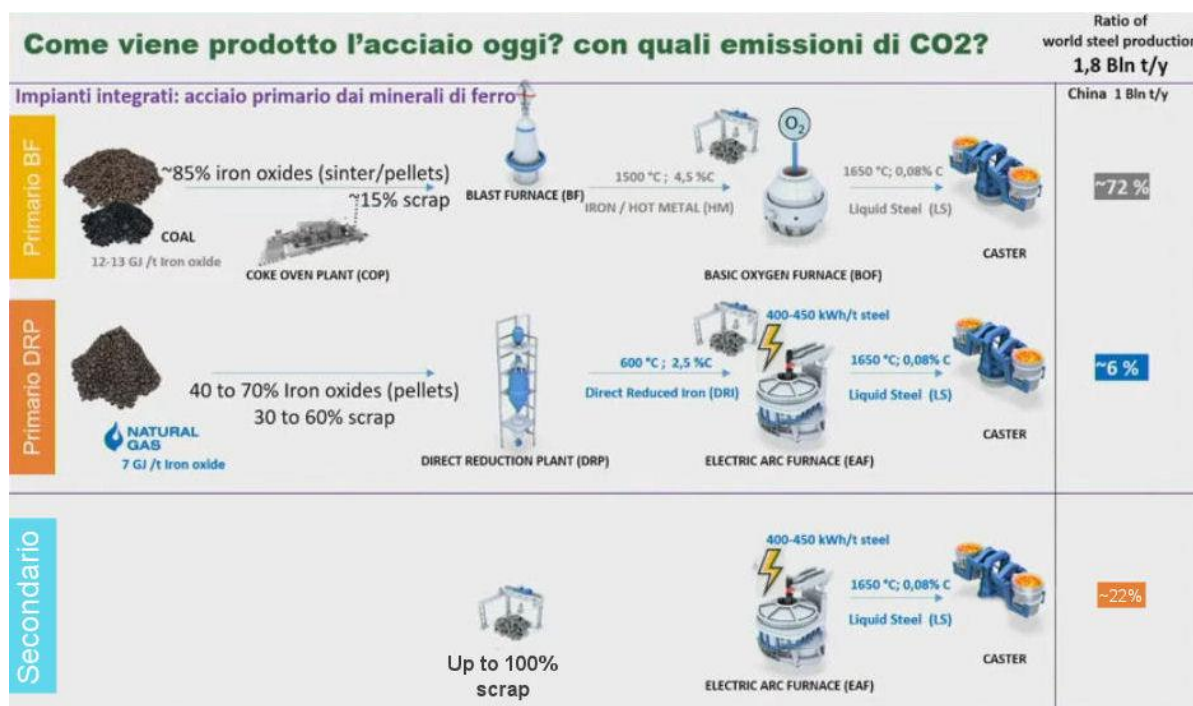


Figura 2.1: tipologie di acciaio prodotto e relative emissioni di CO₂

L'acciaio di tipo "primario", proviene dalla riduzione di minerali di ferro e, se si utilizza il cosiddetto ciclo integrale che comprende altoforno e convertitore ad ossigeno, è responsabile di un importante contributo di emissioni di CO₂, ben 1.8 – 2.3 tonnellate per ogni tonnellata di acciaio prodotto. Se invece si utilizza la riduzione diretta (DRI, tipicamente tramite il processo Midrex o il processo Energiron), che attualmente utilizza il gas naturale come agente riducente e il forno ad arco elettrico (EAF), il quantitativo di emissioni si dimezza. Questa seconda soluzione tecnologica è adatta ad essere convertita all'utilizzo dell'idrogeno in sostituzione del gas naturale, con un impatto molto importante in termini di riduzione delle emissioni di CO₂.

Il DRI alimentato a idrogeno verde riduce infatti le emissioni di CO₂ a un valore pressoché nullo, ma implica un consumo di energia elettrica pari a circa 7 volte superiore rispetto al metodo EAF con DRI alimentato a gas naturale per tonnellata di acciaio prodotta. Nel caso di DRI alimentato a idrogeno verde, il 65% circa del consumo elettrico è legato alla produzione di idrogeno per l'unità DRI.

L'acciaio di tipo "secondario", utilizza il rottame (acciaio riciclato, già utilizzato) come materia prima e in termini di emissioni di CO₂ è decisamente meno impattante, 0.23 tonnellate per ogni tonnellata di acciaio prodotto, considerando emissioni dirette ed indirette. Ad oggi poco più di un quinto dell'acciaio prodotto è acciaio secondario, in quanto la disponibilità di rottame costituisce il "collo di bottiglia".

I forni ad arco elettrico (EAF) sono caratterizzati da emissioni dirette di CO₂ derivanti dall'utilizzo di bruciatori alimentati a gas naturale e dall'utilizzo di carboni di carica (es. antracite) con funzione di agenti riducenti e dall'ossidazione degli elettrodi in grafite. Il livello emissivo è mediamente 70 - 90 kgCO₂/t di acciaio.

La sostituzione dei bruciatori a gas con l'idrogeno verde comporta una riduzione ulteriore delle emissioni del 30% (da qui l'importanza dell'attività di ricerca legata all'ottimizzazione dei parametri di funzionamento per raggiungere il quantitativo minimo di emissioni).

Le emissioni indirette associate al DRI a idrogeno verde dipendono dal fattore di emissione medio della produzione elettrica nazionale. Con un fattore di emissione pari a 300 gCO₂/kWh, si ottengono 1.373 kgCO₂/t di acciaio prodotto. Tuttavia, grazie alla progressiva decarbonizzazione del settore elettrico, le emissioni indirette sono destinate a diminuire.

Occorre citare anche l'acciaio prodotto con il processo di produzione messo a punto dalla Boston Metal, il MOE (Molten Oxide Electrolysis) che sfrutta l'energia elettrica come agente riducente del minerale di ferro: il forte limite del processo risiede nel fatto che è estremamente energivoro: per produrre 1 tonnellata di acciaio occorrono 4 MWh.

Nella tabella 2.1 si riportano i consumi specifici di combustibili fossili ed energia elettrica e le emissioni dirette di CO₂ associati ai principali processi di produzione dell'acciaio, sia da minerale che da riciclo (fattore di emissione del mix elettrico nazionale: 300 g di CO₂/kWh).

Tabella 2.1: Confronto consumi energetici ed emissioni delle varie tecnologie di produzione

Processo produttivo	Consumo di carbone [kg/tACCIAIO]	Consumo di gas naturale [Sm ³ /tACCIAIO]	Consumo di energia elettrica [kWh/tACCIAIO]	Emissioni dirette di CO ₂ [kgCO ₂ /tACCIAIO]	Emissioni indirette e fuggitive di CO ₂ [kgCO ₂ eq/tACCIAIO]
BF-BOF	365,2	32,2	166	1.912 - 2.035	54
DRI-EAF a gas naturale	0	401,9	634	816	243
DRI-EAF a idrogeno	0	0	4.576	3,7	1372.8
EAF con uso gas naturale	0	35	510	70	160
EAF con uso idrogeno	0	0	722	47 - 50	216.6

Le emissioni dirette e indirette di CO₂ della siderurgia italiana sono notevolmente diminuite nel corso degli ultimi decenni, e rappresentano ancora circa il 19% delle emissioni dell'industria manifatturiera. Tra il 1990 e i 2020, l'intensità emissiva rispetto alla produzione, anche in virtù del diverso mix produttivo e della sostanziale riduzione della produzione di acciaio da minerale si è ridotta del 60,4%.

La previsione della World Steel Association in merito a come e quanto acciaio verrà prodotto a livello mondiale nel 2050 per rispetto al 1980, è visibile nella figura 2.2.

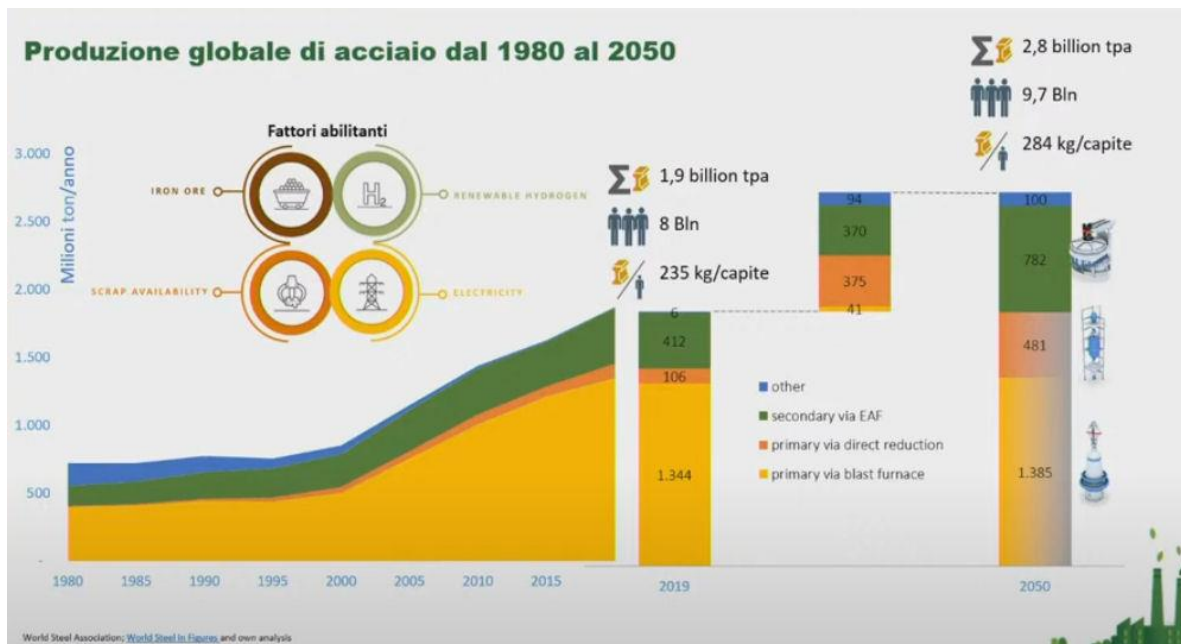


Figura 2.2: Produzione globale di acciaio dal 1980 al 2050 secondo previsione WSA

I fattori abilitanti che consentiranno l'aumento della produzione sia di acciaio primario via DRI che di acciaio secondario sono visibili nella figura 2.3 e riguardano la disponibilità di:

- **Minerale** in quantità e qualità coerenti (la composizione del pellet per DRI, deve avere una % di ferro superiore al 66-67%, in quanto il forno EAF a valle risente negativamente, in termini di costi operativi, se il quantitativo di scoria è elevato)
- **Rottame** in quantità e qualità coerenti (è necessario un raddoppio dei volumi disponibili rispetto agli attuali livelli)
- **Energia elettrica** proveniente da fonti rinnovabili (fotovoltaico, eolico, idroelettrico)
- **Idrogeno verde**, prodotto utilizzando energia elettrica da fonti rinnovabili, non può essere ottenuto in modo competitivo ovunque.



Figura 2.3: fattori abilitanti per la produzione di acciaio tramite DRI e EAF

L'Italia è il secondo produttore d'acciaio in Europa e l'undicesimo al mondo. Nel 2025 nel nostro Paese sono state prodotte 20,7 milioni di tonnellate (Mt) di acciaio, in aumento del 3.6% rispetto all'anno precedente (fonte: Siderweb).

La produzione siderurgica italiana è concentrata principalmente al Nord (Figura 2.4) ed è caratterizzata da un'elevata quota di acciaio prodotta dal riciclo di rottami in forni elettrici ad arco elettrico (Electric Arc Furnace, EAF). Con 18,5 Mt prodotte nel 2025 (l'89% del totale di acciaio grezzo), l'Italia rappresenta il maggior produttore europeo di acciaio da riciclo.



Figura 2.4: distribuzione geografica della produzione di acciaio in Italia per tecnologia

Il restante 11% della produzione nazionale è costituito dall'acciaio primario prodotto a partire da minerale ferroso presso lo stabilimento Acciaierie d'Italia (ex Ilva) di Taranto, l'unico impianto a ciclo integrale a carbone (*Blast Furnace – Basic Oxygen Furnace*, BF – BOF) attivo sul territorio nazionale. La produzione di acciaio grezzo nell'anno 2025 a Taranto si è attestata sui 2.2 milioni di tonnellate. Nel 2012, la produzione nazionale di acciaio da altoforno superava le 9 Mt e rappresentava il 34% del totale.

L'acciaio in Italia trova il suo principale utilizzo nel settore delle costruzioni (36,5%), seguito dalla meccanica (20,2%), dai prodotti in metallo (18,7%), dal settore automobilistico (17,1%), e in altri settori (il rimanente 7,5%).

La produzione di acciaio primario è strategica anche per la stessa produzione di acciaio da forno elettrico dal momento che la ghisa viene utilizzata come parte della carica (sebbene in piccola percentuale) per ovviare alla presenza di alcuni elementi di disturbo che possono essere presenti nel rottame e che andrebbero a compromettere la qualità del prodotto finito.

La trasformazione dei processi produttivi nel settore di produzione acciaio implicano complessità tecniche e importanti investimenti per cui risulta evidente la necessità di un intervento pubblico che sostenga tale trasformazione e che miri alla creazione di mercati dell'acciaio verde. Proprio in ragione dell'impegno pubblico richiesto, è fondamentale distinguere il grado di sostenibilità del prodotto "acciaio verde", in modo da calibrare l'intervento e da evitare distorsioni di prezzo non collegate allo sforzo di decarbonizzazione dei processi produttivi.

Il raggiungimento del target di neutralità climatica al 2050 costringe la siderurgia europea ad abbattere le proprie emissioni di quasi il 90% rispetto ai livelli del 1990 (nel 2023 il settore siderurgico è stato responsabile del 7.4% delle emissioni globali, fig. 2.5).

	2010	2022	2023	Stated Policies (Mt CO ₂)				CAAGR (%) 2023 to:	
				2030	2035	2040	2050	2030	2050
Total CO ₂ *	32 805	37 230	37 723	36 170	33 285	31 185	28 636	-0.6	-1.0
Electricity and heat sectors	12 513	14 943	15 262	13 311	10 968	9 469	7 757	-1.9	-2.5
Other energy sector**	1 441	1 616	1 579	1 545	1 567	1 539	1 490	0.1	-0.2
Final consumption**	18 590	20 410	20 604	21 100	20 601	20 043	19 288	0.3	-0.2
Coal	4 686	4 243	4 302	4 096	3 927	3 760	3 400	-0.7	-0.9
Oil	9 020	9 909	10 108	10 359	9 893	9 421	9 008	0.4	-0.4
Natural gas	2 854	3 559	3 521	3 888	3 552	3 995	3 991	1.4	0.5
Bioenergy and waste	71	123	124	120	116	112	103	-0.5	-0.7
Industry**	8 313	9 183	9 207	9 441	9 532	9 468	9 098	0.4	-0.0
Chemicals**	1 163	1 144	1 343	1 449	1 457	1 421	1 306	1.1	-0.1
Iron and steel**	2 111	2 730	2 800	2 774	2 737	2 686	2 509	-0.1	-0.4
Cement**	1 916	2 408	2 356	2 366	2 417	2 452	2 458	0.1	0.2
Aluminium**	175	248	250	263	266	265	266	0.7	0.2
Transport	6 965	7 944	8 213	8 537	8 198	7 840	7 557	0.6	-0.3
Road	5 181	6 028	6 137	6 221	5 799	5 378	5 027	0.2	-0.7
Passenger cars	2 658	3 083	3 168	3 011	2 668	2 376	2 137	-0.7	-1.4
Heavy-duty trucks	1 518	1 873	1 898	2 136	2 168	2 154	2 190	1.7	0.5
Aviation	746	800	941	1 158	1 266	1 363	1 491	3.0	1.7
Shipping	792	836	856	900	883	854	806	0.7	-0.2
Buildings	2 873	2 842	2 747	2 666	2 468	2 345	2 275	-0.4	-0.7
Residential	1 961	1 974	1 904	1 772	1 611	1 500	1 380	-1.0	-1.2
Services	912	867	842	894	857	846	895	0.9	0.2
Total CO ₂ removals**	-	1	1	21	24	30	50	48	14
Total CO ₂ captured**	16	43	40	122	192	261	395	17	8.8

*Includes industrial process and flaring emissions.

**Includes industrial process emissions.

Figura 2.5: emissioni globali di CO₂ relative all'anno 2023

Per mezzo di soli interventi di efficientamento energetico (Process Integration) non sarà possibile ottenere questo risultato, in quanto per molte acciaierie è richiesta una quasi totale trasformazione tecnologica dei processi.

Le principali soluzioni tecnologiche per ridurre le emissioni, ciascuna delle quali include specifiche soluzioni operative con differente maturità tecnologica (TRL), tempo di implementazione e impatto sulle emissioni, sono le seguenti:

- **Carbon Capture and Utilization (CCU):** cattura e utilizzo della CO₂ generata dai processi di produzione dell'acciaio con intensità emissiva maggiore (altoforno + convertitore a ossigeno)
- **Process Integration (PI):** comprende interventi di ottimizzazione e miglioramento dei cicli di produzione, recuperando e valorizzando sottoprodotti gassosi, utilizzabili come combustibili secondari
- **Carbon Direct Avoid (CDA):** si va ad agire alla radice dei processi, evitando la formazione di CO₂ dovuta all'utilizzo di fonti fossili sostituendoli con alternative low-carbon come idrogeno e utilizzo di energia elettrica da fonti rinnovabili.

2.2 Idrogeno nella siderurgia

A livello internazionale, l'idrogeno è riconosciuto come uno dei pilastri fondamentali per la transizione energetica e la decarbonizzazione dei settori *hard-to-abate*, come la siderurgia.

La sua importanza risiede nella sua duplice funzione: da un lato, può fungere da vettore di energia come combustibile (potere calorifico superiore: 141,8 MJ/kg e potere calorifico inferiore: 120 MJ/kg, maggiore di molti altri combustibili), dall'altro, può essere utilizzato come agente chimico riducente (fig. 2.6),

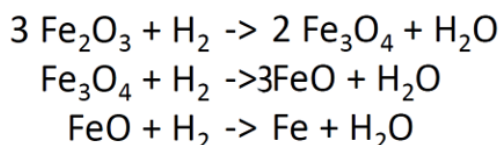


Figura 2.6: utilizzo dell'idrogeno come agente riducente (processo endotermico)

sostituendo il monossido di carbonio nei processi di riduzione del minerale di ferro ed eliminando così la formazione di anidride carbonica nei cicli tradizionali (fig. 2.7).

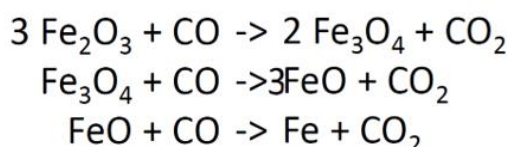


Figura 2.7: utilizzo del monossido di carbonio come agente riducente (processo esotermico)

Inoltre, l'idrogeno è anche utilizzato nei processi *downstream* in miscela con il gas naturale (fig. 2.8).

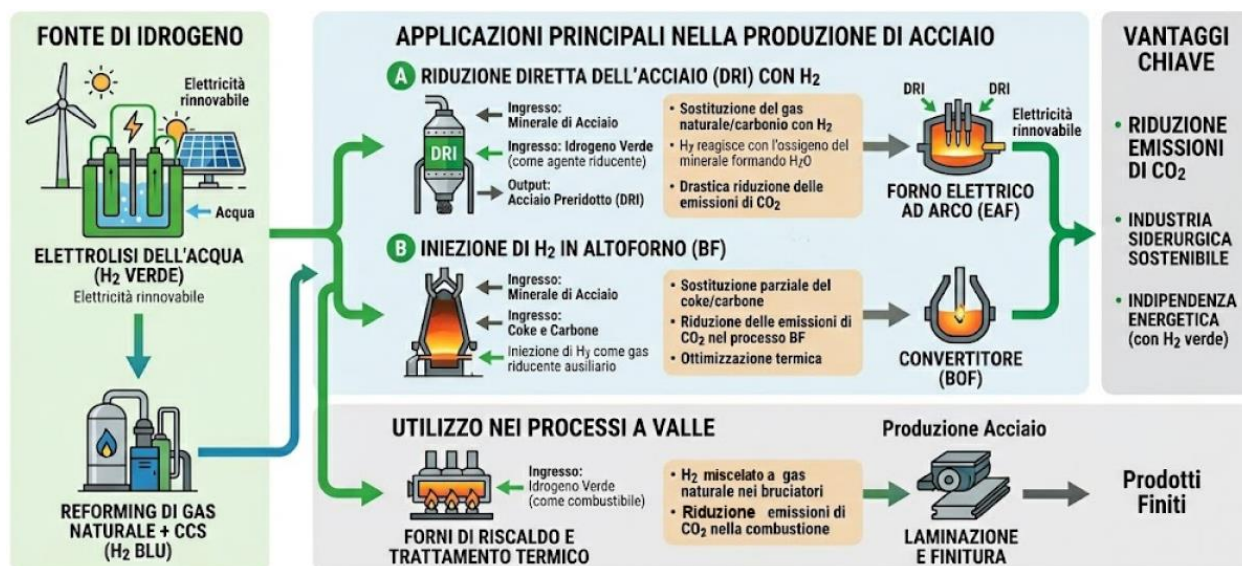


Figura 2.8: Applicazioni dell'idrogeno per decarbonizzare la siderurgia

L'utilizzo dell'idrogeno in questo modo offre la strada migliore per ridurre sostanzialmente le emissioni di anidride carbonica associate alla produzione di acciaio e si presenta come una tecnologia essenziale per raggiungere gli obiettivi del Green Deal europeo sulla neutralità climatica entro il 2050.

Secondo l'IEA, la domanda globale di idrogeno ha quasi raggiunto 100 Mt nel 2024, con un aumento del 2% rispetto al 2023 e in linea con la crescita complessiva della domanda energetica. Questo aumento è stato determinato da un maggiore utilizzo in settori che tradizionalmente consumano idrogeno, come la raffinazione del petrolio e l'industria.

La domanda proveniente da nuove applicazioni ha rappresentato meno dell'1% del totale ed è stata quasi interamente concentrata nella produzione di biocarburanti. L'approvvigionamento di idrogeno ha continuato ad essere dominato dai combustibili fossili, con un utilizzo di 290 miliardi di metri cubi (bcm) di gas naturale e 90 milioni di tonnellate di carbone equivalente (Mtce) nel 2024.

La produzione di idrogeno a basse emissioni (idrogeno verde) è cresciuta del 10% nel 2024 e ha raggiunto la soglia di 1 Mt nel 2025 (un volume di circa 11.126 Nm³), ma rappresenta ancora meno dell'1% della produzione globale (vedi fig. 2.9).

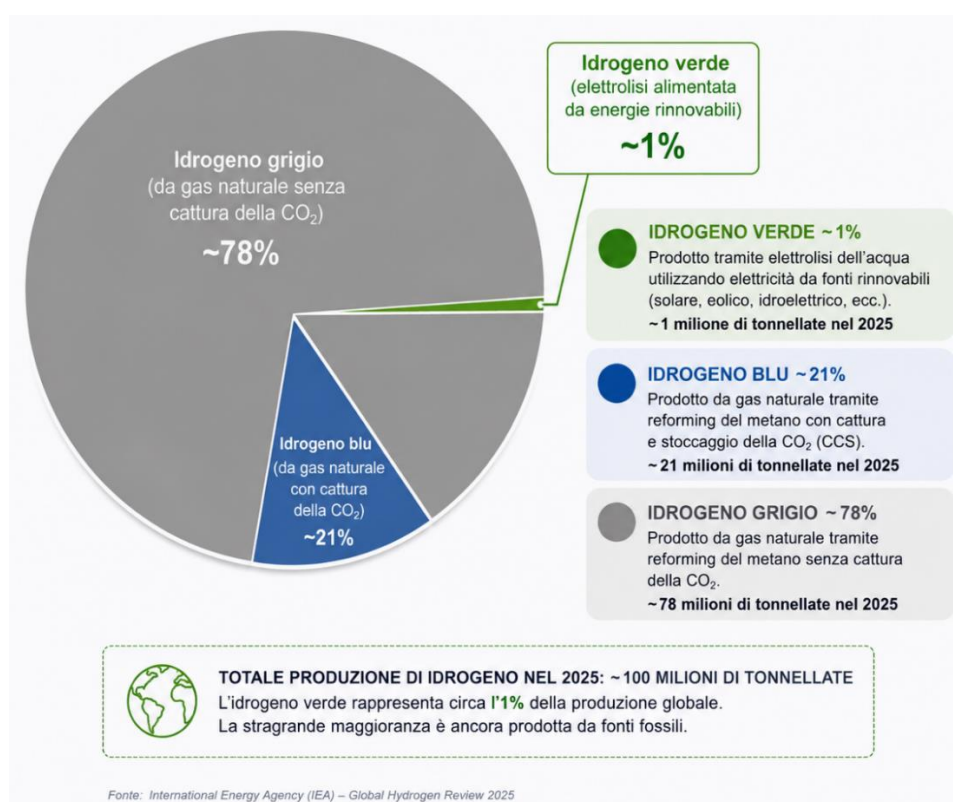


Figura 2.9: Produzione globale di idrogeno nel 2025 suddivisa per metodo di produzione

Per produrre 1 Nm³ di idrogeno verde mediante elettrolisi, occorrono circa 5 KWh di energia elettrica da fonti rinnovabili, mentre per produrre 1 tonnellata di DRI mediante la riduzione diretta del minerale di ferro, occorrono 627 Nm³ di idrogeno.

Arrivare ad una produzione annuale di 1 milione di tonnellate di DRI, richiede l'utilizzo di circa 3.14 TWh di energia (equivalente al consumo elettrico annuale della città di Genova) e la conseguente installazione di elettrolizzatori di potenza non inferiore a 360 MW.

Sebbene l'adozione dell'idrogeno a basse emissioni non stia ancora soddisfacendo le ambizioni fissate negli ultimi anni – frenata dai costi elevati, dalla domanda incerta e dal contesto normativo, nonché dal lento sviluppo delle infrastrutture – vi sono ancora notevoli segnali di crescita. Una recente ondata di ritardi e cancellazioni di progetti ha ridotto le aspettative per la diffusione dell'idrogeno a basse emissioni in questo decennio.

Tuttavia, nelle prime fasi di adozione delle nuove tecnologie, si verificano spesso momenti di forte progresso così come periodi di sviluppo lento, e diversi indicatori suggeriscono che il settore continua a maturare. Ad esempio, sebbene le decisioni finali di investimento (FID) continuino a essere molto indietro rispetto agli annunci, dal 2020, quando erano in funzione solo una manciata di progetti dimostrativi, più di 200 progetti di produzione di idrogeno a basse emissioni hanno visto la luce.

Anche l'innovazione sta procedendo a un ritmo impressionante, con un numero record di tecnologie che hanno registrato progressi significativi nell'ultimo anno, lungo tutta la catena del valore dell'idrogeno.

Tuttavia, dal Global Hydrogen Review (GHR) 2025 emerge che per la prima volta, la potenziale produzione di idrogeno a basse emissioni entro il 2030 basata sui progetti annunciati è diminuita. Cancellazioni e ritardi significano che la produzione che potrebbe essere raggiunta sulla base degli annunci dell'industria entro il 2030 si attesta ora a 37 milioni di tonnellate all'anno (Mtpa), rispetto ai 49 Mtpa entro il 2030 previsti un anno fa dalla pubblicazione GHR 2024.

Affinché l'idrogeno possa davvero diventare una commodity energetica diffusa e contribuire così a decarbonizzare efficacemente i settori economici "hard to abate", la molecola deve poter essere distribuita tra i Paesi dell'Unione Europea, sia commercialmente che fisicamente, e affluire dai grandi centri di produzione che si svilupperanno al di fuori dei confini europei.

Ecco perché le infrastrutture per la produzione, l'import, lo stoccaggio, il trasporto e la distribuzione dell'idrogeno sono essenziali per il futuro scenario dell'economia dell'idrogeno in Europa: impianti di elettrolisi, pipeline, depositi e terminal portuali dovranno essere sviluppati in tempo utile per garantire l'approvvigionamento e la distribuzione del vettore energetico agli utenti finali.

A livello nazionale, le iniziative legate all'idrogeno possono essere categorizzate in tre aree principali:

- ✓ i bandi nazionali e regionali per progetti emessi come parte del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), che prevede diversi topic legati alla realizzazione di infrastrutture per la produzione ed il trasporto di idrogeno
- ✓ i progetti finanziati direttamente tramite IPCEI (Important Projects of Common European Interest), che prevedono specifiche iniziative all'interno delle quali sono stati presentati diversi progetti che richiedono la realizzazione di infrastrutture prototipali e non per la produzione, il trasporto e l'uso dell'idrogeno. Tra questi, il progetto italiano HYDRA
- ✓ una varietà di altre iniziative, nell'ambito della Clean Hydrogen Partnership o di altri programmi di finanziamento, che in Italia stanno dando vita a circa una decina di Hydrogen Valley sparse sul territorio nazionale.

Il punto sul contesto internazionale, europeo e nazionale di riferimento, sulla domanda e sull'offerta dell'idrogeno, nonché sull'uso e sul trasporto dello stesso è stato fatto all'interno del documento Strategia Nazionale Idrogeno al fine di identificare le azioni strategiche, politiche e le misure di supporto per lo sviluppo della filiera idrogeno.

Il documento, così come quelli citati in precedenza, mette in evidenza la necessità di sviluppare infrastrutture adeguate e indica tra le varie azioni da porre in atto:

- ✓ sostenere lo sviluppo di progetti pilota volti allo scaling up;
- ✓ consentire l'utilizzo in blending dell'idrogeno con gas naturale, con la possibilità di trattare anche percentuali crescenti di H₂;
- ✓ aumentare e perseguire gli sforzi di adeguamento dell'infrastruttura di produzione, stoccaggio e distribuzione dell'idrogeno anche oltre il 2026, orizzonte temporale del PNRR;
- ✓ sostenere la filiera industriale per la realizzazione delle tecnologie ad idrogeno;
- ✓ sviluppare test in cui dimostrare la capacità tecnica delle soluzioni tecnologiche;
- ✓ sviluppare un quadro normativo chiaro, agendo anche a livello comunitario.

In aggiunta, il documento pone anche l'attenzione sul ruolo fondamentale della ricerca nello sviluppo del settore idrogeno considerandolo un importante fattore abilitante e un acceleratore della diffusione dell'idrogeno.

In questo contesto, in Italia e in altri paesi, istituti di ricerca pubblici e privati oltre a diverse aziende si stanno muovendo per sviluppare nuove tecnologie per la produzione, lo stoccaggio e l'uso di idrogeno, ottimizzare quelle esistenti al fine di effettuarne uno scaling up, sviluppare metodologie di test che permettano di verificare la compatibilità di materiali e componenti all'uso in H₂, allestendo laboratori ed impianti pilota appositi.

A tal riguardo, è necessario precisare che, nonostante negli ultimi anni si sia registrato un forte interesse per lo sviluppo delle tecnologie per l'idrogeno, la situazione normativa risulta ancora lacunosa soprattutto per quanto riguarda la realizzazione di infrastrutture di sperimentazione.

2.2.1 Blending H₂ / CH₄

In Italia i primi test finalizzati ad utilizzare l'idrogeno in combinazione con il gas naturale utilizzando impianti di distribuzione esistenti, sono stati condotti nella primavera 2019, quando Snam ha introdotto nella propria rete di trasporto un mix composto dal 5% di H₂ miscelato a gas naturale. Il test, allora unico nel suo genere in Europa, si è svolto in provincia di Salerno, e ha riguardato la fornitura di H₂NG per un mese a due realtà industriali della zona: un pastificio e un'azienda di imbottigliamento di acque minerali.

Due anni più tardi ha messo alla prova una miscela contenente il 30% di idrogeno nelle reti del gas di una acciaieria vicino Milano. Nel 2022, invece a Castelfranco Emilia (MO), Hera ha avviato la prima sperimentazione dell'utilizzo dell'idrogeno in una rete di distribuzione gas cittadina.

La letteratura recente suggerisce che il vettore H₂ può esser immesso nella rete del metano fino a circa il 5-10% del volume senza importanti modifiche alle infrastrutture di trasmissione e agli impianti dei consumatori finali. Tuttavia, esistono diversi fattori da considerare man mano che si aumentano le percentuali di "blending".

L'idrogeno possiede infatti proprietà fisiche e chimiche (vedi tabella 2.2) diverse dal gas naturale, che richiedono pressioni di esercizio più elevate per fornire la stessa quantità di energia del CH₄. Senza contare che le piccole dimensioni molecolari dell'idrogeno e la minore energia di accensione rendono più probabile la sua permeazione attraverso i materiali e le guarnizioni delle tubature.

Tabella 2.2: Proprietà delle miscele idrogeno / metano

Hydrogen [Vol.-%]	0	10	25	50	75	90	100
Methane [Vol.-%]	100	90	75	50	25	10	0
Density relative to air [-]	0,56	0,51	0,44	0,31	0,19	0,12	0,07
lower explosion limit (LEL) [Mol.-%]	4,2	4,2	4,2	4			4
upper explosion limit (UEL) [Mol.-%]	16,6	18,2	21,2	29			77
maximum experimental safe gap (MESG) [mm]	1,14	1,1	0,96	0,75	0,52	0,33	0,29
Explosion Group	II A	II A	II A	II B	II B	II C	II C
ignition temperature [°C]	595						560
Temperature class	T1	T1	T1	T1	T1	T1	T1
minimum ignition energy (MIE) [mJ]	0,23		0,10	0,09	0,07		0,02
limiting oxygen concentration (LOC) [Mol.-%] (CO ₂ as inert gas)	13,6	12,4	12,0	10,6			5,1
maximum explosion pressure [bar]	8,1	8,2	8,1	8			8,3

L'idrogeno ha un potere calorifico lordo/netto volumetrico (GCV/NCV) pari a circa 1/3 di quello del gas naturale. Per questo motivo, qualsiasi unità volumetrica di miscela idrogeno/gas naturale avrà un contenuto energetico minore rispetto allo stesso volume di gas naturale puro.

La Figura 2.10 mostra l'andamento dell'indice di Wobbe (WI), numero usato per capire quanta energia fornisce un gas combustibile quando passa attraverso un bruciatore o un ugello, e del GCV (indicato in figura come High Heating Value, HHV) della miscelazione di diverse quantità di idrogeno (in base volumetrica) con un tipico gas naturale distribuito in Europa.

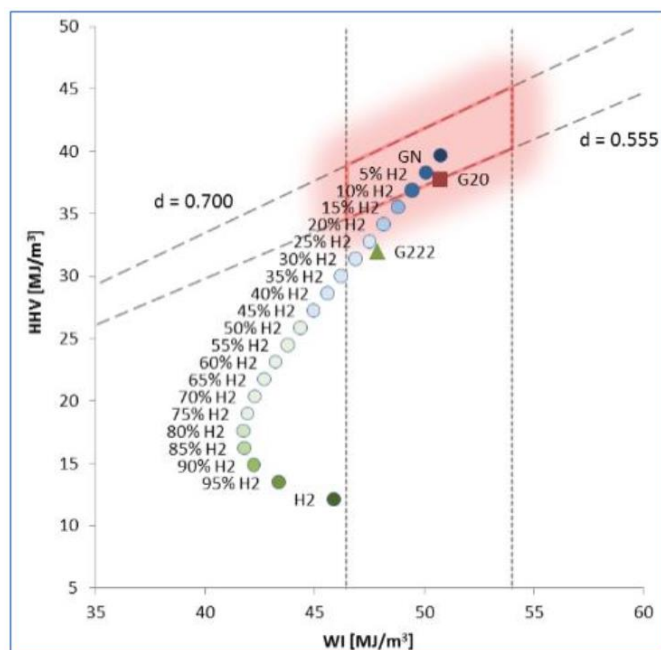


Figura 2.10: Effetto della concentrazione di idrogeno sull'indice di Wobbe (WI) e sul potere calorifico lordo (HHV) del gas naturale

Vi sono anche alcune proprietà di combustione dell'idrogeno che sono diverse da quelle del gas naturale e che devono essere prese in considerazione nell'utilizzo della miscela idrogeno/gas naturale.

Di seguito, le principali:

- **Velocità di fiamma**: la velocità di fiamma dell'idrogeno è di un ordine di grandezza superiore a quella del gas naturale.
- **Fabbisogno di aria di combustione**: l'idrogeno necessita di un quantitativo di aria inferiore rispetto al gas naturale
- **Temperatura adiabatica della fiamma**: questa temperatura è più alta considerando 100% idrogeno e per l'idrogeno in miscela con il gas naturale (Figura 2.11) rispetto al gas naturale. Questo potrebbe avere un impatto sulla produzione di NOx nei processi di combustione se non si adottano misure di mitigazione adeguate.

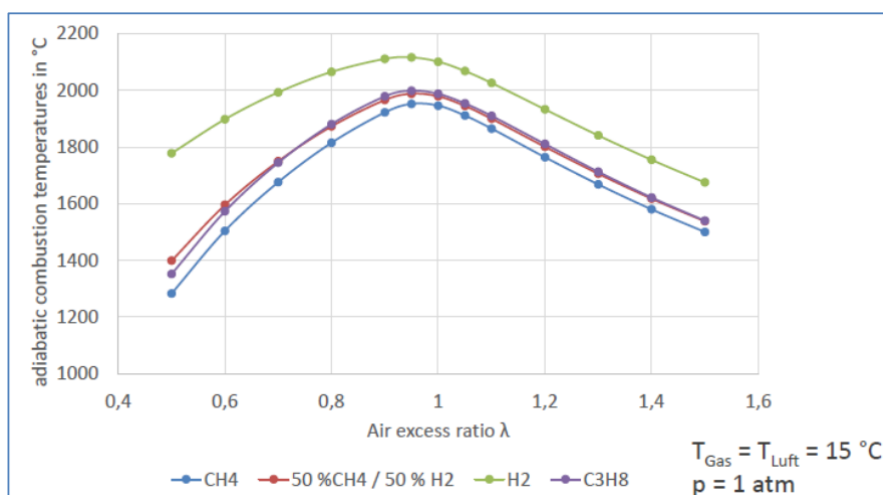


Figura 2.11: Effetto dell'air excess ratio Vs T adiabatica della fiamma per diversi combustibili

A livello europeo, per le attività prenormative, si segnala tra i principali attori MARCOGAZ, una associazione tecnica belga che rappresenta 29 società del settore gas residenti in 20 differenti Paesi che da parecchi anni ha iniziato a lavorare sul tema idrogeno.

I risultati dello studio condotto da MARCOGAZ nel 2023 (figura 2.12), che costituisce un aggiornamento del lavoro precedente pubblicato nel 2019, sono scaturiti dall'esame di oltre 80 riferimenti sulla tolleranza all'idrogeno delle infrastrutture per il gas esistenti e delle applicazioni finali.

In generale, sulla base della valutazione completa condotta, si può presumere che i principali elementi delle infrastrutture per il gas e delle apparecchiature finali dovrebbero essere in grado di gestire miscele H₂-NG con una percentuale di H₂ compresa tra 0 e 10 vol.% senza modifiche.

Tenendo conto che annualmente in Italia transitano nella rete (di lunghezza pari a circa 300.000 km) circa 70 miliardi di m³ di gas naturale, un equivalente del 10% rappresenta ben 7 miliardi di m³ di idrogeno.

Con l'adozione di misure e sostituzioni, la maggior parte degli elementi delle infrastrutture del gas e degli utilizzi finali dovrebbe essere in grado di accettare concentrazioni fino al 30 vol.% di H₂.

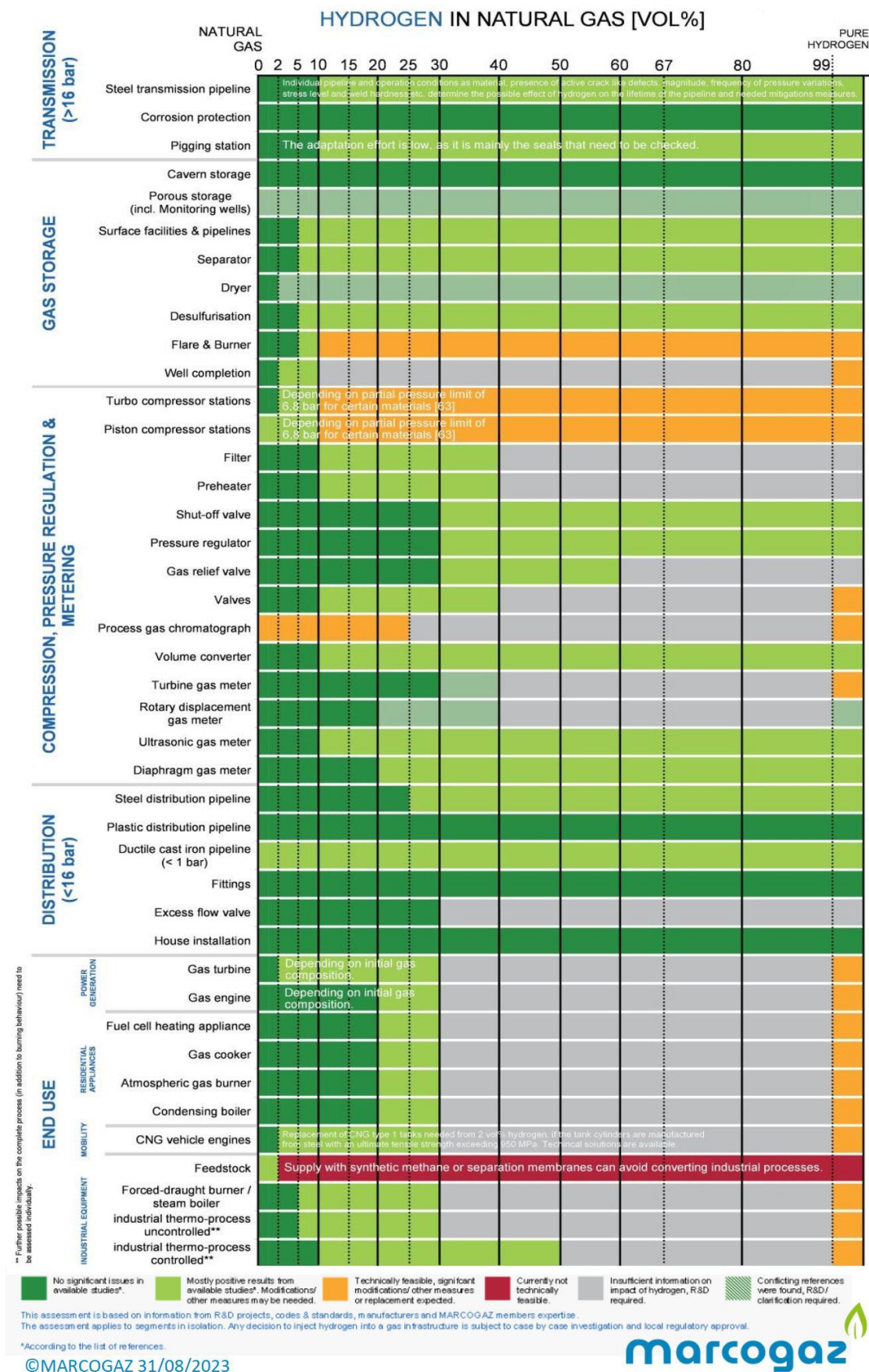


Figura 2.12: Prospetto dei limiti normativi disponibili per l'immissione di H₂ nella rete esistente del gas metano fino all'utente finale

2.2.2 Utilizzo di H_2 con bruciatori per forni di riscaldamento

I forni di riscaldamento continui (vale a dire che lavorano con un flusso del materiale di tipo FIFO, first in, first out, attraverso una porta di infornamento e una di sfornamento), sono equipaggiati con bruciatori di varia potenza e di varia forma in funzione della posizione di installazione:

- Radianti: sulla volta del forno;
- Laterali/Frontali: sulle pareti del forno.

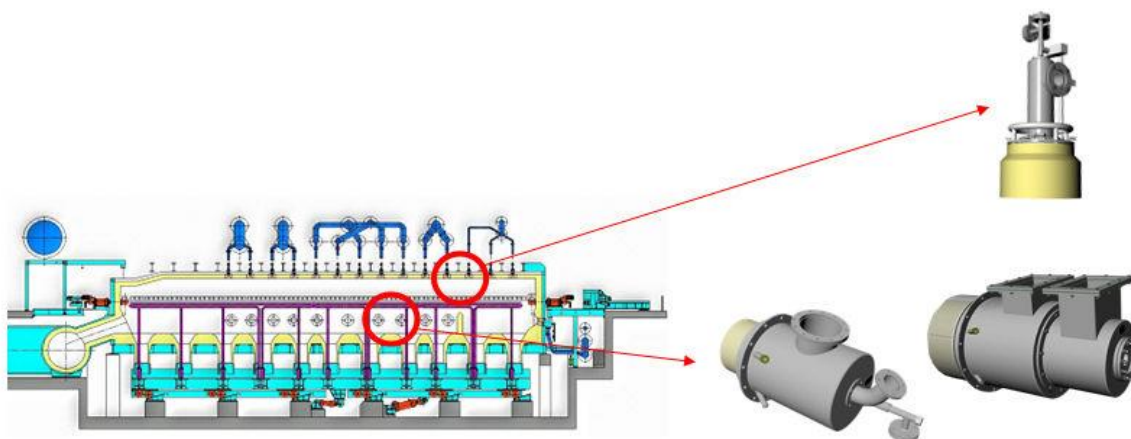


Figura 2.13: Tipologie di bruciatori per forni di riscaldamento continui

Il riscaldamento con bruciatori di tipo radiante è possibile solo per le zone superiori. È caratterizzato da una elevata uniformità termica della camera di combustione poiché il meccanismo di scambio termico prevalente è rappresentato dall'irraggiamento. È comunque una soluzione più costosa rispetto all'impiego di bruciatori installati a parete.

La combustione può avvenire secondo differenti modalità:

- Con fiamma visibile: bruciatori laterali e radianti di tipo tradizionale
- In modalità flameless: bruciatori laterali e radianti a bassissime emissioni di NO_x (ossidi di azoto)
- Con recupero locale sui singoli bruciatori (Rigenerativo): alcuni bruciatori aspirano i fumi caldi attraverso uno scambiatore ceramico interno per un periodo adeguato. Un vantaggio di questa soluzione è che si ottiene una temperatura dell'aria superiore ai $1000^\circ C$, rispetto ai $450-500^\circ C$ della soluzione precedente



Figura 2.14: Bruciatori con fiamma visibile, flameless e rigenerativo

L'erogazione della potenza termica dai bruciatori, necessaria per il riscaldamento della carica, può avvenire nel tempo secondo diverse modalità:

- *Modulata*: La portata di combustibile e di aria comburente in rapporto adeguato, varia nel tempo con continuità all'interno di un campo di funzionamento detto "turn-down". Un campo tipico è 10-100%. In un bruciatore tradizionale, la lunghezza di fiamma varia in base al turn-down, poiché cambia la quantità di moto dei getti di combustibile e comburente. Di conseguenza, l'efficienza del riscaldamento e le emissioni di NO_x sono influenzate. A pieno carico, la fiamma di un bruciatore laterale si sviluppa per tutta la lunghezza prevista dal progetto del diffusore e determina il massimo irraggiamento. Tuttavia, a valori bassi del turn-down, si osserva una minore efficienza della fiamma, che non riesce a raggiungere con sufficiente efficacia l'asse di mezzzeria del forno.
- *On-off*: Nel caso della combustione on-off, si alternano nel tempo periodi di accensione del bruciatore a pieno carico con periodi di spegnimento. Durante l'accensione, il bruciatore fornisce il massimo apporto termico alla carica. Questo tipo di combustione viene principalmente utilizzato nei forni batch per garantire un'uniformità di temperatura alla carica.
- *Sequenziale*: Un passo avanti rispetto alla combustione on-off è rappresentato dalla combustione sequenziale. In questa modalità, l'insieme dei bruciatori in una zona del forno viene acceso secondo una sequenza non necessariamente ripetitiva, in modo da fornire all'area di carico l'apporto termico esattamente dove è necessario e per la durata richiesta. Per ottimizzare l'apporto termico, è possibile accendere i bruciatori anche quando non sono a pieno carico. La combustione sequenziale trova applicazione nei forni continui, soprattutto nei forni a longheroni per bramme, dove sono presenti carichi di diverse dimensioni.

I bruciatori installati nei forni di riscaldamento, oggi funzionano prevalentemente a gas naturale.

Nella pratica industriale attuale, la soluzione più diffusa non è ancora l'utilizzo di idrogeno puro, ma la sua miscelazione con il metano (vedi paragrafo 2.2.1). Questa strategia permette di introdurre progressivamente l'idrogeno senza dover sostituire completamente gli impianti esistenti. Come descritto in precedenza, le miscele metano-idrogeno consentono infatti di ridurre le emissioni dirette di anidride carbonica mantenendo una continuità operativa accettabile per gli impianti siderurgici, che sono caratterizzati da cicli produttivi continui e da esigenze molto severe in termini di affidabilità.

Dal punto di vista della combustione, la velocità di propagazione della fiamma molto più elevata dell'idrogeno rispetto al metano, modifica sensibilmente il comportamento del bruciatore. La fiamma tende a essere più corta, più reattiva e con una maggiore concentrazione energetica. In alcuni casi ciò può migliorare il trasferimento di calore al materiale da trattare, ma può anche creare problemi di uniformità termica all'interno del forno. Nei processi siderurgici questo aspetto è particolarmente delicato, perché la qualità metallurgica del prodotto dipende fortemente dall'omogeneità del riscaldamento.

Un altro aspetto importante riguarda la formazione degli ossidi di azoto, gli NO_x . L'idrogeno non produce CO_2 durante la combustione, ma le temperature di fiamma possono diventare molto elevate e favorire la formazione di NO_x , che sono tra gli inquinanti atmosferici più importanti (reagendo con acqua e ossigeno contribuiscono alla generazione di piogge acide, aumentano la presenza nell'aria di particolato fine $\text{PM}_{2.5}$ e dell'ozono troposferico a bassa quota).

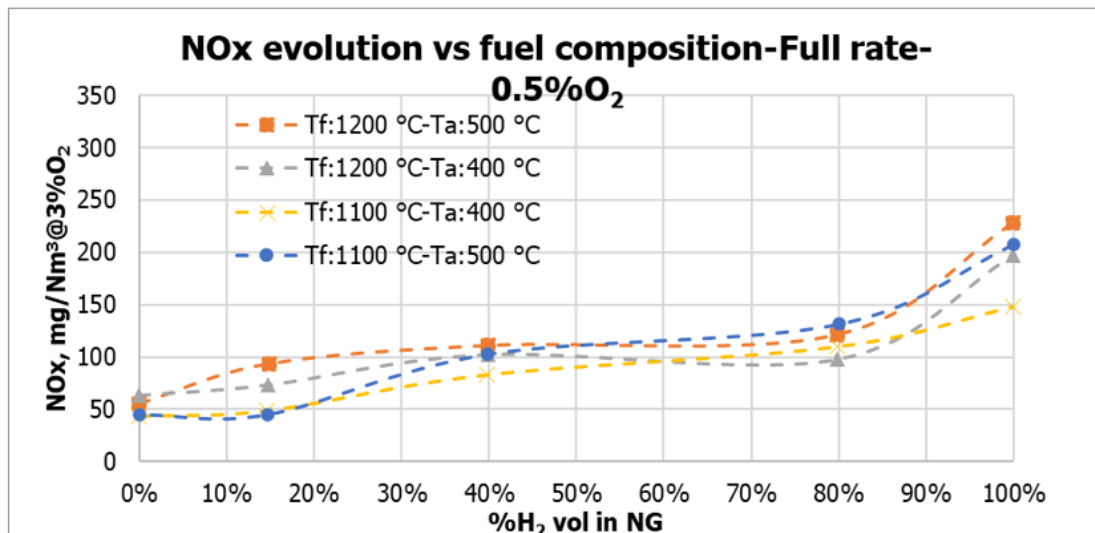


Figura 2.15: Effetto della miscela H₂-CH₄ e delle T sulle emissioni di NO_x

In figura 2.15 è visibile come la differente composizione della miscela di H₂-CH₄ e le temperature dell'aria preriscaldata (Ta) e della camera di combustione (Tf) influenzino la formazione di NO_x: è presente una certa stabilità fino all'80% di idrogeno in miscela, per poi aumentare in modo repentino nella fascia 80%-100% di idrogeno.

Quando si passa dall'uso in blend all'utilizzo di idrogeno puro, occorre gestire con particolare attenzione la stabilità della combustione. L'idrogeno ha un intervallo di infiammabilità molto ampio e può causare fenomeni di flashback, cioè il ritorno della fiamma all'interno del bruciatore o delle linee di alimentazione. Per evitare questo fenomeno è necessario progettare geometrie specifiche, aumentare le velocità di uscita del gas e introdurre sistemi di sicurezza dedicati.

Esiste poi una differenza fondamentale nel modo in cui la fiamma trasferisce energia. Le fiamme del metano sono relativamente luminose e trasferiscono una parte significativa del calore per irraggiamento. L'aumento del contenuto di idrogeno diminuisce la luminosità della fiamma che scompare quando la % H₂ è superiore al 60% (fig. 2.16).

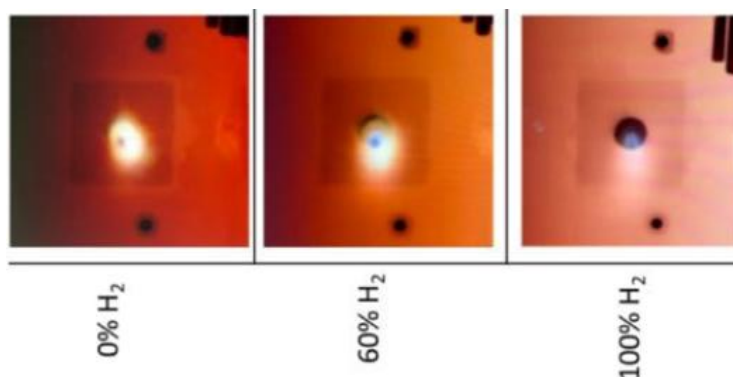


Figura 2.16: Luminosità della fiamma a differenti % di idrogeno. Potenza del bruciatore: 1 MW

Questo significa che, in un forno siderurgico, il comportamento termico complessivo cambia sensibilmente. Per compensare la minore radiazione si tende a utilizzare strategie come il ricircolo dei fumi o configurazioni di combustione particolari capaci di aumentare l'uniformità termica.

Dal punto di vista energetico, inoltre, l'idrogeno possiede un elevato contenuto energetico per unità di massa, ma una densità molto bassa. In termini pratici, questo significa che per fornire la stessa potenza termica del metano occorrono portate volumetriche molto più elevate. Di conseguenza, gli impianti devono spesso essere modificati anche nelle linee di distribuzione, nei sistemi di regolazione e nei ventilatori o compressori.

Nonostante queste difficoltà, numerosi gruppi industriali stanno investendo nello sviluppo di bruciatori "H₂-ready", cioè progettati per funzionare inizialmente con miscele metano-idrogeno e successivamente convertibili all'idrogeno puro.

Nel breve periodo, quindi, il blend metano-idrogeno rappresenta una soluzione pragmatica per abbattere parzialmente le emissioni di CO₂ senza stravolgere gli impianti esistenti. Nel lungo termine, il raggiungimento dell'obiettivo di arrivare a sistemi completamente alimentati con idrogeno verde, sarà condizionato anche dall'efficienza con cui si riuscirà a ridurre la formazione degli NO_x.

2.2.3 Vantaggi e limiti

L'utilizzo dell'idrogeno nella siderurgia presenta aspetti estremamente interessanti dal punto di vista ambientale ed energetico, ma comporta anche numerose criticità tecniche e infrastrutturali che ne rendono complessa l'adozione su larga scala.

Tra i principali vantaggi, vi sono:

- Riduzione delle emissioni di CO₂, massimizzata se prodotto da elettrolisi alimentata con energia elettrica da fonti rinnovabili.
- Rapidità ed efficienza della combustione: l'idrogeno possiede una velocità di propagazione della fiamma molto elevata e questo può migliorare il trasferimento termico nei forni industriali.
- Impiego in sistemi di combustione avanzata: l'idrogeno si presta bene all'impiego in sistemi come la combustione flameless o MILD (Moderate or Intense Low oxygen Dilution), che consentono di migliorare l'uniformità termica del forno, ridurre la formazione di inquinanti, migliorare l'efficienza energetica e aumentare la qualità metallurgica del prodotto.
- Diversificazione energetica: l'introduzione dell'idrogeno rappresenta un elemento importante per la siderurgia europea, ancora fortemente dipendente dal gas naturale e dai combustibili fossili. Utilizzare l'idrogeno è una possibile soluzione per aumentare la sicurezza energetica e ridurre l'esposizione alla volatilità dei mercati del gas.

I limiti e le sfide nell'ambito della sicurezza possono essere raggruppate nelle seguenti categorie:

- Costi elevati: a parità di energia utile, l'idrogeno grigio ha un costo maggiore di circa 2-3 volte rispetto a quello del metano. Considerando idrogeno verde, di circa 4-6 volte in più.
- Manipolazione dell'idrogeno: l'idrogeno è altamente infiammabile e può incendiarsi facilmente. La manipolazione e lo stoccaggio sicuri dell'idrogeno richiedono attrezzature e procedure speciali per prevenire perdite e ridurre al minimo i rischi.
- Infragilimento da idrogeno: l'idrogeno può infragilire i metalli, causando problemi all'integrità strutturale delle attrezzature e delle infrastrutture e rappresentando un rischio per la sicurezza.

- Sicurezza dei trasporti: il trasporto sicuro dell'idrogeno su lunghe distanze può rappresentare una sfida a causa della sua bassa densità energetica e della necessità di contenitori o condutture specializzati.
- Sensibilizzazione e informazione del pubblico: al fine di prevenire incidenti, è importante garantire che sia il pubblico che coloro che lavorano nell'industria dell'idrogeno siano consapevoli dei rischi per la sicurezza associati all'idrogeno e siano formati sulla sua corretta manipolazione.

2.3 CCUS e cattura CO₂

La Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) è una soluzione tecnologica di decarbonizzazione che tende a ridurre le emissioni di CO₂ in atmosfera attraverso le seguenti fasi operative:

- **Cattura**: il processo di cattura può avvenire attraverso diversi processi e impianti in prossimità dell'emettitore industriale. La cattura avviene generalmente per separazione dell'anidride carbonica dai gas di scarico mediante diversi processi chimici o fisici (post-combustione) a cui segue una compressione per abilitare il trasporto; risulta maggiormente efficace se la CO₂ trattata è presente nei fumi di scarico in % elevata.
- **Trasporto**: il trasporto della CO₂ concentrata verso la sua destinazione finale avviene generalmente in forma gassosa tramite l'utilizzo di condotte, oppure in forma liquida via mare con l'utilizzo di navi o via terra mediante treni o autobotti; l'efficienza di questa fase è penalizzata in queste ultime condizioni in quanto per il trasporto viene comunque emessa in atmosfera una certa quantità di CO₂ proveniente dalla combustione per esempio del gasolio.
- **Utilizzo o Stoccaggio**: la CO₂ è quindi iniettata in idonee formazioni geologiche dando luogo ad uno stoccaggio geologico permanente (CCS) oppure è impiegata in processi industriali (CCU) per la produzione di prodotti a base di carbonio. Le due fasi, prendendo come caso di studio una acciaieria con ciclo integrale BF-BOF, sono alternative tra di loro ma possono agire anche in via complementare (vedi fig. 2.17).

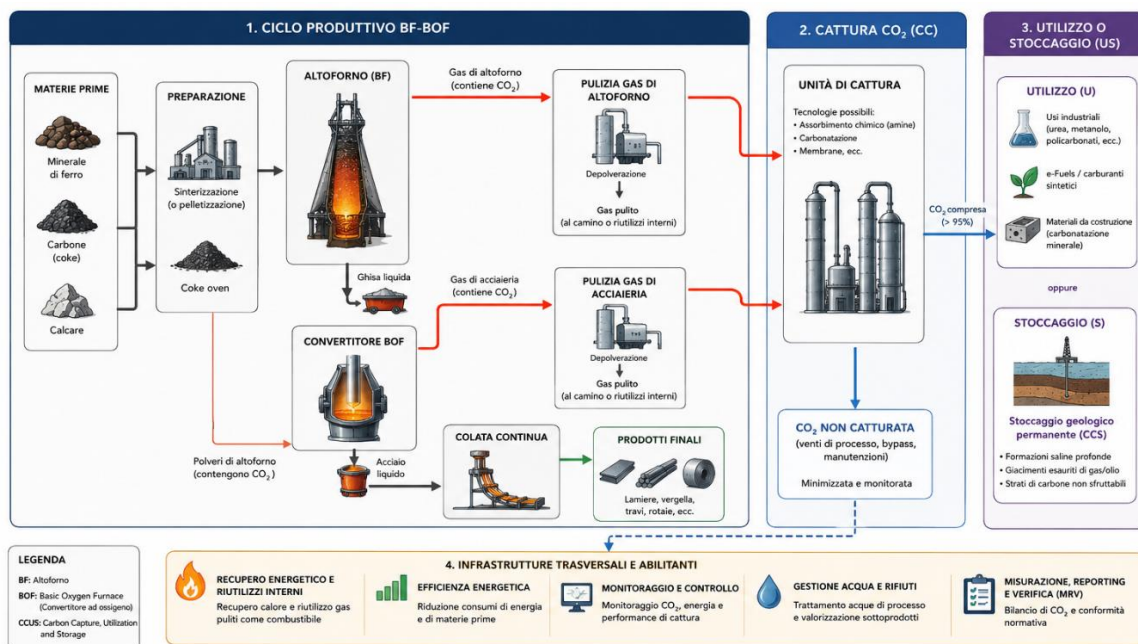


Figura 2.17: Integrazione della CCUS nel ciclo produttivo di una acciaieria BF-BOF

La CO₂ può essere utilizzata in nuovi cicli produttivi, secondo i principi dell'economia circolare, per sostituire il carbonio di origine fossile nei prodotti sintetici, prodotti chimici o carburanti. Soltanto alcune forme di utilizzo nei cicli produttivi, tuttavia danno luogo ad un legame chimico permanente del carbonio, che consente anche da un punto di vista normativo di derogare all'obbligo di restituzione delle quote ETS.

La CO₂ può essere alternativamente destinata ad uno stoccaggio geologico permanente, in questo caso viene iniettata all'interno di formazioni geologiche idonee ad immagazzinarla per un tempo indefinito. L'anidride carbonica va a riempire gli interstizi all'interno dei granuli di roccia nella formazione porosa e rimane intrappolata dalla roccia di copertura, in maniera analoga a come avvenuto nei giacimenti di idrocarburi.

I meccanismi che garantiscono la permanenza dell'anidride carbonica nel giacimento sono quattro, di cui il primo si verifica immediatamente dopo l'iniezione, mentre gli altri si susseguono su orizzonti temporali anche molto lunghi:

- ❖ Confinamento fisico: essendo più leggera dell'acqua, la CO₂ tenderà a risalire nella roccia serbatoio per rimanere intrappolata sotto lo strato di contenimento impermeabile.
- ❖ Confinamento capillare: penetrando nei pori della roccia serbatoio, l'anidride carbonica rimane intrappolata dalla tensione capillare che ne ostacola l'ulteriore spostamento.
- ❖ Solubilizzazione: parte della CO₂ a contatto con l'acqua geologica nel giacimento viene disciolta al suo interno.
- ❖ Mineralizzazione: reagendo lentamente con alcuni minerali presenti nelle rocce, la CO₂ precipita sotto forma di carbonati e si trasforma permanentemente in minerali.

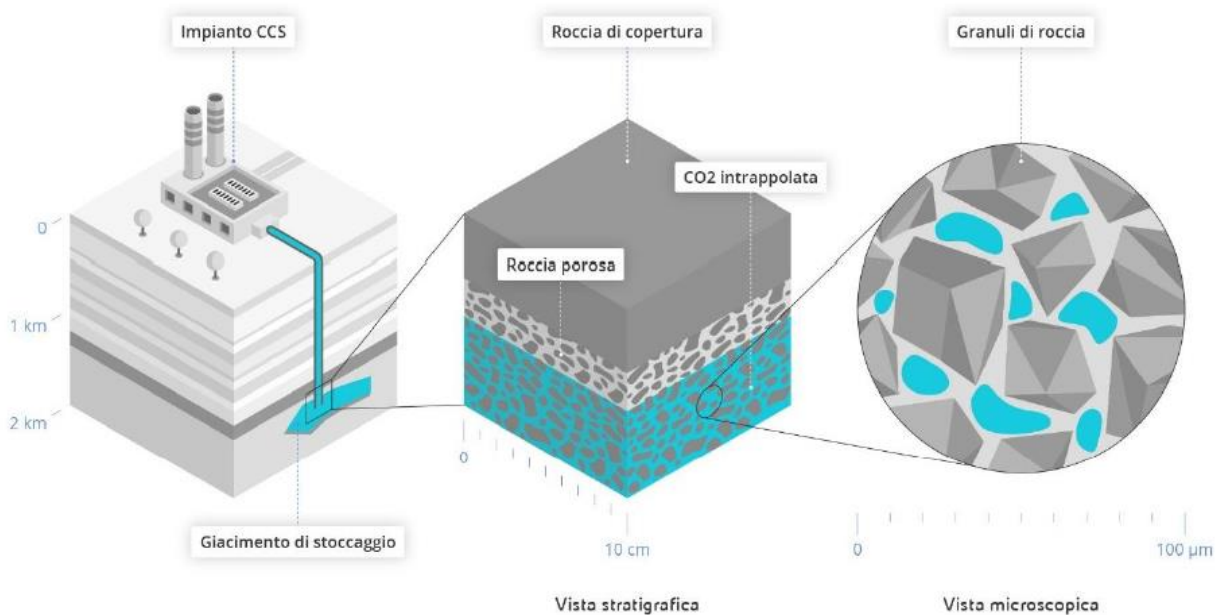


Figura 2.18: Stoccaggio permanente della CO₂ in formazioni geologiche

La CCUS è un processo tecnologico che ha l'obiettivo di evitare l'immissione in atmosfera di una quota di anidride carbonica proveniente da grandi impianti industriali *Hard to Abate*, e dalla produzione di energia elettrica.

Tabella 2.3: Costi medi di cattura, trasporto e stoccaggio della CO₂

Fase del processo	Costo medio stimato (€/ ton CO ₂)
Cattura (da fonti industriali)	€ 60 – 100
Trasporto (condotte o navi)	€ 10 – 25
Stoccaggio (geologico / tombamento)	€ 10 – 20
TOTALE FILIERA	€ 80 – 145

Allo stato attuale dell'arte, non è tuttavia possibile affermare che la CCS sia una soluzione economicamente sostenibile (tabella 2.3) o particolarmente efficiente: uno studio pubblicato nel 2022 dall'Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA) ha rivelato che 10 tra i 13 maggiori impianti CCS al mondo analizzati (che ammontano a circa il 55% della capacità nominale di cattura installata a livello globale) o sono ampiamente sottoperformanti o sono falliti.

Da segnalare inoltre che il Sesto rapporto dell'IPCC nota che tra le opzioni per la decarbonizzazione, la CCS presenta costi tra i più elevati a fronte di contribuzioni piuttosto limitate.

2.4 Sicurezza e criticità dell'idrogeno

L'idrogeno ha proprietà fisiche e chimiche uniche che lo rendono un'opzione interessante per lo stoccaggio, il trasporto e l'utilizzo di energia. Tuttavia, l'idrogeno presenta anche rischi di incendio/esplosione a causa della sua elevata infiammabilità. L'idrogeno è un gas incolore, inodore e insapore che è altamente infiammabile nell'aria e può incendiarsi a concentrazioni anche inferiori al 4%.



Figura 2.19: La piramide dell'idrogeno: sicurezza in produzione, trasporto, stoccaggio e utilizzo

Ha la densità più bassa di tutti i gas ed è quattordici volte più leggero dell'aria. L'idrogeno è presente in natura sotto forma di molecole biatomiche (H_2) e può essere ottenuto da varie fonti quali gas naturale, acqua e biomasse. Ha un basso punto di ebollizione ($-252,8\text{ }^{\circ}\text{C}$) e un basso punto di congelamento ($-259,14\text{ }^{\circ}\text{C}$); pertanto, deve essere conservato e trasportato a temperature molto basse, tipicamente inferiori a $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, per essere mantenuto allo stato liquido.

Inoltre, l'idrogeno può anche evaporare facilmente e formare una miscela infiammabile con l'aria, che può causare esplosioni in caso di accensione. L'idrogeno reagisce con l'ossigeno formando acqua, una reazione che rilascia una quantità significativa di energia.

Di conseguenza, è importante progettare e attuare con attenzione misure di sicurezza quando si lavora con l'idrogeno, al fine di prevenire incidenti e mitigare eventuali potenziali pericoli.

Di seguito un riepilogo delle principali questioni relative alla sicurezza dell'idrogeno:

- Bassa energia di accensione: un ordine di grandezza inferiore rispetto agli idrocarburi;
- Elevata reattività dovuta alle sue particolari proprietà chimiche e fisiche;
- Tendenza all'evaporazione: può causare problemi di sicurezza e perdite economiche;
- Ampi limiti di infiammabilità;
- Transizione da deflagrazione a detonazione: la transizione può verificarsi facilmente ed è spesso osservata nel caso di un sistema su larga scala;
- Elevata velocità di combustione: la velocità di combustione laminare è significativamente superiore a quella di molti altri combustibili;
- L'idrogeno è incolore, inodore e insapore: non è facile aggiungere additivi;
- Elevata reattività con i materiali, che può causare infragilimento degli stessi;
- Bassa densità e diffusività del gas: comportamento particolare in caso di rilascio, può stratificarsi nella parte superiore degli spazi confinati.

2.4.1 La sicurezza nella produzione dell'idrogeno green

La produzione di idrogeno comporta diverse questioni di sicurezza che devono essere affrontate per garantire processi sicuri per i lavoratori e l'ambiente. I metodi tradizionali di produzione dell'idrogeno, come quelli basati sul reforming a vapore del metano, richiedono la manipolazione di gas ad alta pressione e sostanze chimiche pericolose. Ciò può aumentare il rischio di incidenti se non vengono seguiti i protocolli di sicurezza.

D'altra parte, anche i metodi innovativi di produzione dell'idrogeno, come l'elettrolisi, possono presentare problemi di sicurezza, tra cui la manipolazione di apparecchiature ad alta tensione e il potenziale rilascio di gas pericolosi. In questo capitolo ci concentreremo sulle principali questioni relative alla sicurezza della produzione dell'idrogeno green.

- Rilascio di idrogeno: analogamente alla produzione di idrogeno blu, anche la produzione di idrogeno verde comporta la manipolazione di quantità significative di idrogeno, con conseguenti potenziali rischi di rilascio.
- Pericolo elettrico: durante l'elettrolisi vengono utilizzate correnti elettriche elevate, con conseguente rischio di scosse elettriche, cortocircuiti e incendi.
- Esposizione chimica: l'elettrolisi utilizza elettroliti che possono causare esposizione chimica.

- Incidenti tipici: incendio nelle celle elettrolizzatrici di cloro, esplosione di idrogeno, esplosione di idrogeno-ossigeno, perforazione della membrana in una cella PEM-FC (proton exchange membrane fuel cell), deflagrazione di idrogeno-ossigeno con cortocircuito, incendio, esplosione del serbatoio di idrogeno a causa di un malfunzionamento dell'elettrolizzatore.

2.4.2 La sicurezza nel trasporto dell'idrogeno

Il trasporto dell'idrogeno comporta diverse questioni di sicurezza che devono essere affrontate per garantire un processo sicuro per i lavoratori e il pubblico. L'idrogeno gassoso è altamente infiammabile e può facilmente incendiarsi, causando potenziali incidenti ed esplosioni.

Inoltre, il trasporto dell'idrogeno comporta l'uso di contenitori e condutture ad alta pressione, che possono rappresentare un rischio per la sicurezza se non vengono sottoposti a una corretta manutenzione.

L'hythane (o idrometano), una miscela di idrogeno e gas naturale, è un'altra forma di combustibile a idrogeno che viene utilizzata per il trasporto. Sebbene l'hythane presenti un rischio di esplosione inferiore rispetto all'idrogeno puro, pone comunque delle sfide in termini di sicurezza a causa dell'uso di contenitori e tubazioni ad alta pressione.

2.4.3 La sicurezza nello stoccaggio dell'idrogeno

Esistono diversi metodi di stoccaggio dell'idrogeno, tra cui lo stoccaggio di gas compresso, lo stoccaggio di idrogeno liquido e lo stoccaggio allo stato solido. Per aumentare la densità di stoccaggio, l'idrogeno gassoso può essere compresso e immagazzinato in serbatoi ad alta pressione (350-750 bar).

Lo stoccaggio di idrogeno liquido consiste nel raffreddare l'idrogeno gassoso a una temperatura molto bassa ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$) e immagazzinarlo in serbatoi isolati. Inoltre, lo stoccaggio di idrogeno criocompresso (CCH_2) si riferisce allo stoccaggio di H_2 a temperature criogeniche in un contenitore che può essere pressurizzato (nominalmente a 250-350 atm) al contrario degli attuali contenitori criogenici che immagazzinano idrogeno liquido (LH_2) a una pressione vicina a quella ambiente.

Nello stoccaggio allo stato solido, l'idrogeno viene immagazzinato fisicamente o chimicamente in materiali solidi come nanotubi di carbonio o idruri metallici, mentre l'uso di vettori organici liquidi consiste in un ciclo chimico di fasi di idrogenazione e deidrogenazione.

Sia nei sistemi di stoccaggio di sostanze chimiche liquide che in quelli di sostanze chimiche solide, la fase di deidrogenazione richiede calore e le condizioni tipiche di reazione per l'idrogenazione esotermica sono un'alta pressione (da 1 a 5 MPa) e temperature comprese tra 373 e 523 K.

I sistemi sopra citati sono considerati sicuri e pratici perché l'idrogeno può essere stoccato e trasportato sotto forma liquida o solida, eliminando i problemi di sicurezza e stoccaggio associati all'idrogeno gassoso.

Tuttavia, la maggior parte dei materiali utilizzati sono essi stessi infiammabili e/o tossici, il che pone comunque problemi di sicurezza; inoltre, in alcuni casi, il pericolo intrinseco è aggravato dalla presenza di idrogeno a causa degli effetti sinergici ad esso associati nella fase di scarico.

Tutte queste tecnologie combinano condizioni operative severe (alta temperatura e/o alta pressione e/o particelle solide infiammabili) con un gas intrinsecamente pericoloso come l' H_2 , dando luogo a sistemi ad alto rischio.

2.4.4 Per non dimenticare: gravi incidenti avvenuti in passato

Il Joint Research Centre (JRC) della Commissione europea ha sviluppato la banca dati sugli incidenti e gli inconvenienti legati all'idrogeno (HIAD, Hydrogen Incidents and Accidents Database) nell'ambito della rete europea di eccellenza HySafe.

<https://minerva.jrc.ec.europa.eu/en/shorturl/capri/hiadpt>

L'HIAD è un archivio di eventi indesiderati legati all'idrogeno che si sono verificati in passato. I dati sono stati ottenuti da fonti primarie o secondarie (notizie, rapporti di ispezione di istituzioni pubbliche, altre banche dati pubbliche, articoli scientifici, ecc). L'HIAD mantiene, per quanto possibile, un collegamento tracciabile alle fonti originali.

Verranno di seguito descritti alcuni incidenti dalle gravi conseguenze e avvenuti in contesti molto differenti tra di loro, che sono presenti all'interno del database.

- In riferimento alla produzione di idrogeno verde, il 23 maggio 2019, un'esplosione di un serbatoio di idrogeno ha colpito un impianto pilota per l'elettrolisi alcalina dell'acqua a Gangneung, in Korea del Sud, causando la morte di due persone e il ferimento di altre sei. L'indagine ha rivelato che il separatore di idrogeno è esploso a causa di una fuoriuscita di ossigeno a basso carico e di un errore umano. L'accensione è stata causata dall'elettricità statica, poiché non erano presenti collegamenti di messa a terra adeguati (fig. 2.20).



Figura 2.20 – Effetti dell'esplosione di un serbatoio di H_2 a Gangneung, 23 maggio 2019

- Un altro incidente si è verificato il 6 giugno 2019 in Norvegia, non lontano da Oslo, dove una grave perdita (stimata tra 1,5 e 3 kg) di idrogeno dall'impianto di stoccaggio ad alta pressione ha provocato una detonazione in una stazione di rifornimento di idrogeno. La causa è stata individuata in due bulloni allentati che fissavano la guarnizione tra il serbatoio ad alta pressione e la tubazione. La guarnizione ha resistito per oltre 2 anni a una pressione di 900 bar, prima di cedere a causa della fatica indotta dalle oscillazioni di pressione durante il rifornimento. Il serbatoio in questione era quello più vicino al suolo; dopo aver rotto la guarnizione ad alta pressione, l'idrogeno ha rapidamente sfondato la guarnizione a bassa pressione e si è disperso nell'atmosfera, formando una nube esplosiva (fig. 2.21). I bulloni non serrati sono stati attribuiti a un montaggio difettoso da parte del produttore NEL, che se ne è assunto la responsabilità. Sono state adottate nuove procedure, simili a quelle dell'industria aeronautica, per garantire che un errore del genere non si ripetesse.

I danni agli edifici circostanti (a 65 m di distanza) indicano che si è verificata una detonazione.

Due automobilisti sono stati ricoverati in ospedale dopo che i loro airbag si sono aperti a causa dell'onda d'urto, ma non ci sono stati danni diretti alle persone; le lesioni sono state lievi.



Figura 2.21 – Effetti della detonazione della stazione di rifornimento nei pressi di Oslo (Norvegia), 6 giugno 2019

Quest'opera è focalizzata sulla decarbonizzazione della siderurgia, in cui l'idrogeno e la sua gestione in sicurezza sono estremamente importanti. È però altrettanto fondamentale che anche gli impianti di produzione e lavorazione dell'acciaio siano oggetto di manutenzioni ordinarie con frequenze regolari e che i dispositivi di sicurezza per prevenire ed estinguere gli incendi siano operativi e revisionati accuratamente.

Oltre agli incidenti relativi alla produzione/trasporto/stoccaggio/utilizzo dell'idrogeno, non possiamo dimenticare la tragedia sul lavoro avvenuta in una acciaieria di Torino (la Thyssen-Krupp) nella notte tra il 5 e il 6 dicembre 2007, tra le più gravi avvenute in Italia.

La vicenda è stata raccontata dal prof. Stefano Peiretti nel libro “Non voglio morire. Torino 6 dicembre 2007” (Echos Edizioni, fig. 2.22), la cui prefazione è di Antonio Boccuzzi, che fu coinvolto insieme ad altri sette colleghi nel rogo della linea 5 e unico sopravvissuto.



Figura 2.22 – L'opera “Non voglio morire. Torino 6 dicembre 2007” del prof. Stefano Peiretti

A seguito delle gravi ustioni, persero la vita: Antonio Schiavone, di anni 36, Roberto Scola, di anni 32, Angelo Laurino, di anni 43, Bruno Santino, di anni 26, Rocco Marzo, di anni 54, Rosario Rodinò, di anni 26, e Giuseppe Demasi, di anni 26 (figura 2.23).



Figura 2.23 – Le sette vittime del rogo della Thyssen-Krupp, Torino 6 dicembre 2007

Non si è trattato di un semplice incendio, ma di un *flash fire*, alimentato da olio ad alta pressione. La dinamica dettagliata degli eventi è descritta, oltre che nel libro del prof. Peiretti, anche nel podcast di Niccolò Locati “Disastri” all’interno dei due episodi intitolati “6 dicembre 2007 – Thyssen-Krupp di Torino”.

Il processo, che ha avuto luogo a Torino, si è rivelato un turning point, in quanto ha spostato l’attenzione dalla “fatalità” alla “governance della sicurezza”: il fuoco è stato solo l’ultimo anello, ma il fuoco è stato anche il risultato di una serie di inadempienze da parte della direzione dello stabilimento che sono state accertate da un tribunale e condannate da un giudice.

“...perché ciò che è accaduto può ritornare, le coscienze possono nuovamente essere sedotte ed oscurate: anche le nostre”. Primo Levi

3. Politiche, mercato e definizione di acciaio green

3.1 ETS e prezzo della CO₂

Il Sistema europeo di scambio di quote di emissione di gas a effetto serra (European Union Emissions Trading System – EU ETS) è il principale strumento utilizzato dell'Unione europea per raggiungere gli obiettivi di riduzione delle emissioni CO₂ nel settore della produzione elettrica e nei settori industriali *hard to abate*. In Italia, più di 1.200 impianti (rappresentanti il 40% delle emissioni nazionali) sono soggetti alla normativa ETS.

Entrato in vigore nel 2005, è una misura “cap & trade”, cioè pone un tetto alle emissioni complessive dei settori che copre. Restando al di sotto di questo tetto, consente il commercio e lo scambio di quote (figura 3.1).

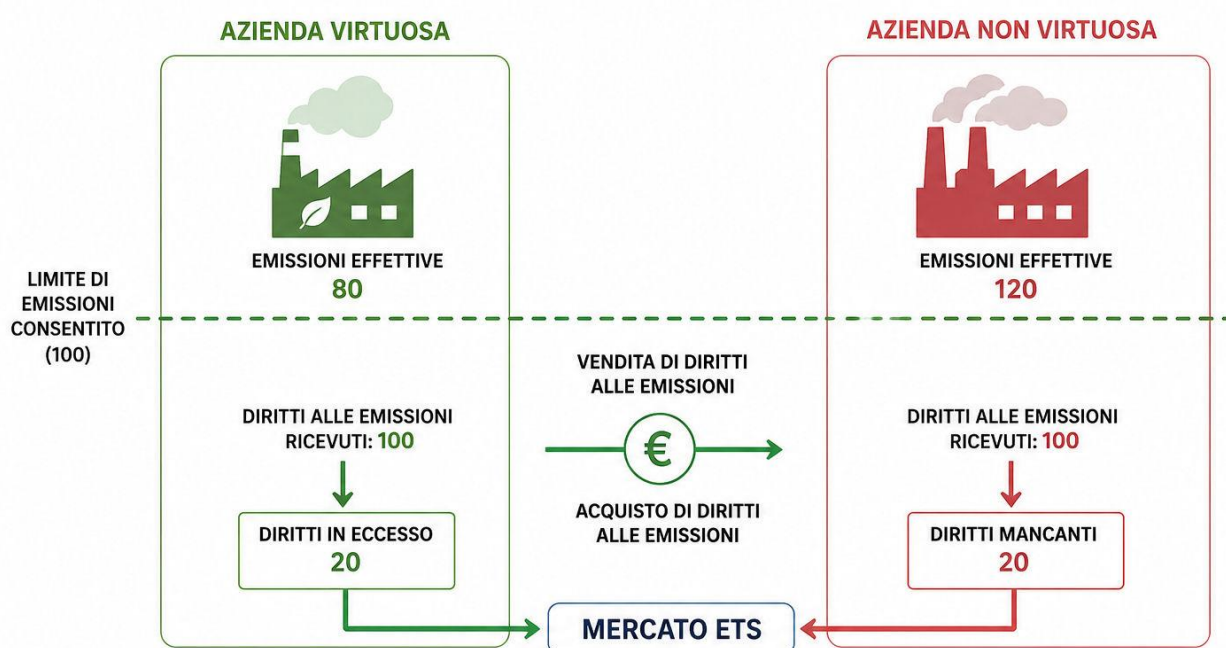


Figura 3.1: Funzionamento schematico del sistema ETS

Gradualmente nella storia dell'ETS c'è stata una armonizzazione della misura a livello europeo: dal primo periodo in cui era essenzialmente una misura nazionale con regole di base europee, si è giunti nel 2013 al completamento del processo di armonizzazione.

L'ETS attribuisce un valore alla tonnellata di CO₂, definendo così le quote di emissione. Le quote devono essere acquistate dai soggetti industriali per un ammontare corrispondente alle loro emissioni annue. Il settore dell'acciaio tutto, compreso lo stabilimento siderurgico di Acciaierie d'Italia a Taranto, sono beneficiari di quote di emissione a titolo gratuito basate sui cosiddetti Benchmark. A partire dal 2026, con l'entrata in vigore del Regolamento CBAM, verranno gradualmente eliminate.

Il calcolo del Benchmark viene effettuato andando a mediare il 10% dei migliori produttori in termini di performance di emissioni di CO₂ per tonnellata di acciaio prodotto (figura 3.2).

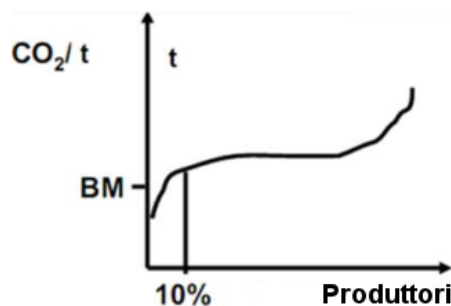


Figura 3.2: Calcolo del valore di Benchmark (BM)

La riduzione e successiva eliminazione delle quote gratuite ETS, per un tradizionale produttore siderurgico, implica un aggravio dei costi operativi, ovvero uno svantaggio competitivo rispetto ad un produttore di acciaio prodotto con metodi a zero-basse emissioni, per il quale l'incidenza del costo della CO₂ sui costi di produzione è più bassa (tipicamente i forni elettrici e, se l'acciaio è prodotto da minerale, il DRI a gas e, ancor di più a idrogeno verde per l'acciaio da minerale).

Questo dovrebbe rappresentare un incentivo per i produttori di acciaio, in particolare con BF BOF a carbone, come l'ex Ilva di Taranto, ad accelerare la trasformazione del proprio processo produttivo, pena il vedere il proprio conto economico gravato di costi difficili da sostenere.

3.2 CBAM

Il meccanismo di adeguamento del carbonio alle frontiere (Carbon Border Adjustment Mechanism – CBAM) dell'Unione Europea è stato introdotto per stabilire un prezzo equo sulla CO₂ emessa durante la produzione di beni importati nell'UE. Il pagamento di un prezzo sulle emissioni incorporate in prodotti importati extra-UE consentirà di equalizzarlo al prezzo di carbonio dei prodotti interni all'UE, salvaguardando gli obiettivi climatici dell'Unione. La sua attuazione è iniziata nel 2026, con una progressiva introduzione e contemporanea riduzione delle emissioni gratuite dal 2026 al 2033. La norma sarà, quindi, pienamente attuativa dal 2034 in poi (figura 3.2).

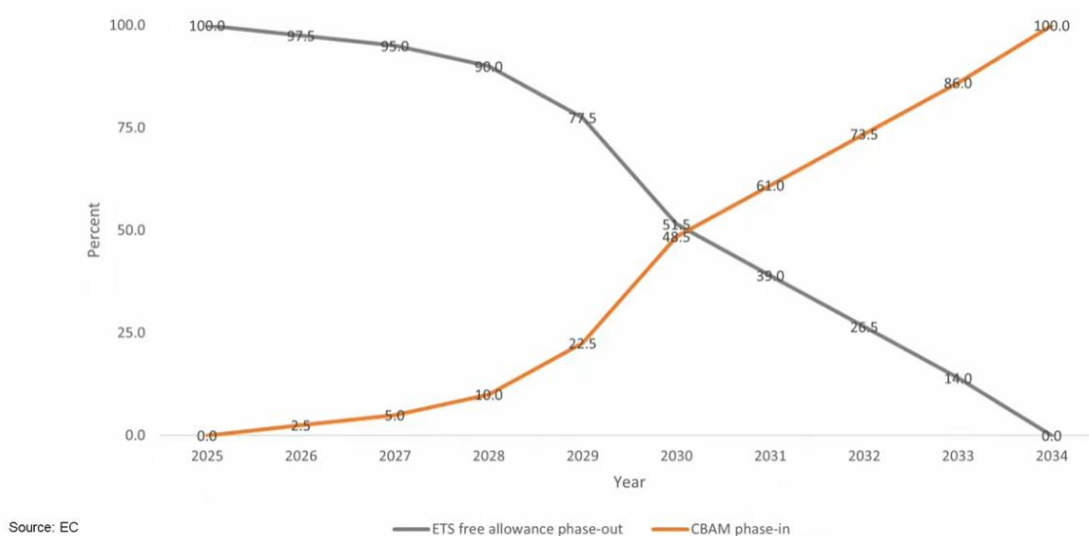


Figura 3.2: Progressiva sostituzione del sistema ETS con CBAM

I settori target di applicazione del CBAM nel periodo iniziale, essendo ritenuti ad alta intensità di carbonio a causa delle elevate emissioni di gas serra associate ai processi di produzione, sono:

- ✓ Cemento
- ✓ Energia elettrica
- ✓ Fertilizzanti
- ✓ Siderurgia
- ✓ Alluminio
- ✓ Idrogeno

Il sistema CBAM si applica anche alle importazioni di prodotti siderurgici extra-UE, in quanto è stato messo a punto per affrontare il fenomeno noto come “rilocalizzazione delle emissioni di carbonio”, che corrisponde al rischio che i costi del carbonio portino le aziende a trasferire le loro operazioni in Paesi con meccanismi di fissazione del prezzo del carbonio meno stringenti.

In questo caso, ad essere disincentivate saranno le imprese utilizzatrici, soprattutto che trasformano e riesportano i prodotti, mentre a beneficiarne saranno i produttori siderurgici verdi, che verranno schermati da una competizione extra-UE non rispettosa dei parametri emissivi.

Resta, tuttavia, la necessità di promozione di una domanda interna di tali prodotti, mediante meccanismi selettivi della domanda, dal momento che non esistono, al momento, meccanismi di valorizzazione di tali produzioni nel commercio internazionale. Per Paesi e produzioni fortemente orientate all’esportazione il CBAM, infatti, non apporta sostanziali vantaggi.

La valutazione in termini di impatto e rilevanza della misura si riferiscono, quindi, al limitato impatto complessivo delle disposizioni, in termini di supporto alla decarbonizzazione e protezione dalla competizione internazionale.

Il prezzo di un certificato CBAM (un certificato in formato elettronico corrispondente a una tonnellata di emissioni di CO₂e incorporate nelle merci, vedi figura 3.3) riflette il prezzo medio d’asta delle quote UE ETS della settimana precedente espresso in euro per tonnellata di CO₂ emessa. I certificati CBAM rappresentano lo strumento che gli importatori utilizzeranno per il prezzo delle emissioni incorporate nelle merci che importano nell’UE.

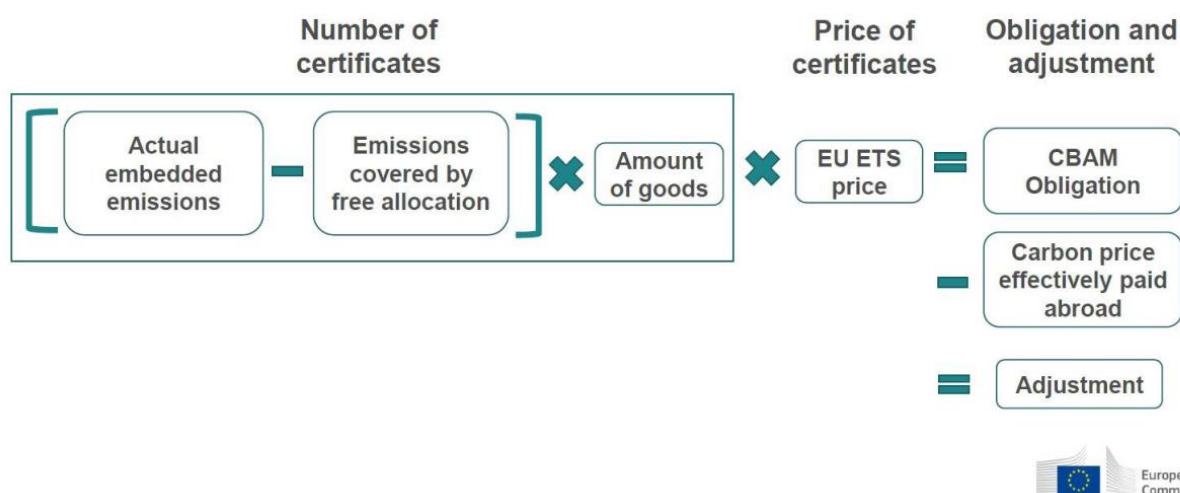


Figura 3.3: Formula di calcolo per certificati CBAM

La classificazione delle emissioni nell'ambito del CBAM segue determinati principi per stabilire il trattamento delle emissioni associate alle merci importate.

Emissioni dirette (Scope 1): le emissioni dirette si riferiscono alle emissioni di gas a effetto serra rilasciate direttamente durante la produzione a livello di impianto. Possono essere prodotte, ad esempio, dalla combustione di carburanti e dal processo di calcinazione. Nell'ambito del CBAM, le emissioni dirette includono anche le emissioni derivanti dalla produzione di riscaldamento o raffreddamento, indipendentemente dal luogo in cui vengono prodotte. A esempio, si quantificano come emissioni dirette le emissioni correlate al vapore prodotto in un impianto e poi trasferito ad un cementificio.

Emissioni indirette (Scope 2): il CBAM richiede che siano monitorate e calcolate le emissioni derivanti dall'energia elettrica consumata durante il processo di produzione, incluse le emissioni di CO₂ provenienti dalla produzione di energia elettrica.

Il CBAM riconosce che diverse categorie di prodotti possano avere vari gradi di intensità delle emissioni. Di conseguenza, il meccanismo consente la differenziazione nel trattamento delle emissioni in base alla specifica categoria di prodotti. Vengono dunque distinte “merci semplici” da “merci complesse” in termini di calcolo di emissioni.

Le merci semplici sono quelle prodotte utilizzando materiali in entrata e combustibili a zero emissioni incorporate, quindi basate interamente sulle emissioni che si verificano durante la loro produzione. Per le merci complesse, è necessario includere le emissioni incorporate dei relativi precursori utilizzati nel processo di produzione.

Il CBAM prevede due metodi per stabilire le emissioni incorporate. Le emissioni effettive si basano su misurazioni o dati specifici derivanti dai processi di produzione. Qualora tali emissioni non possano essere stabilite adeguatamente o per le emissioni indirette, vengono utilizzati i valori predefiniti.

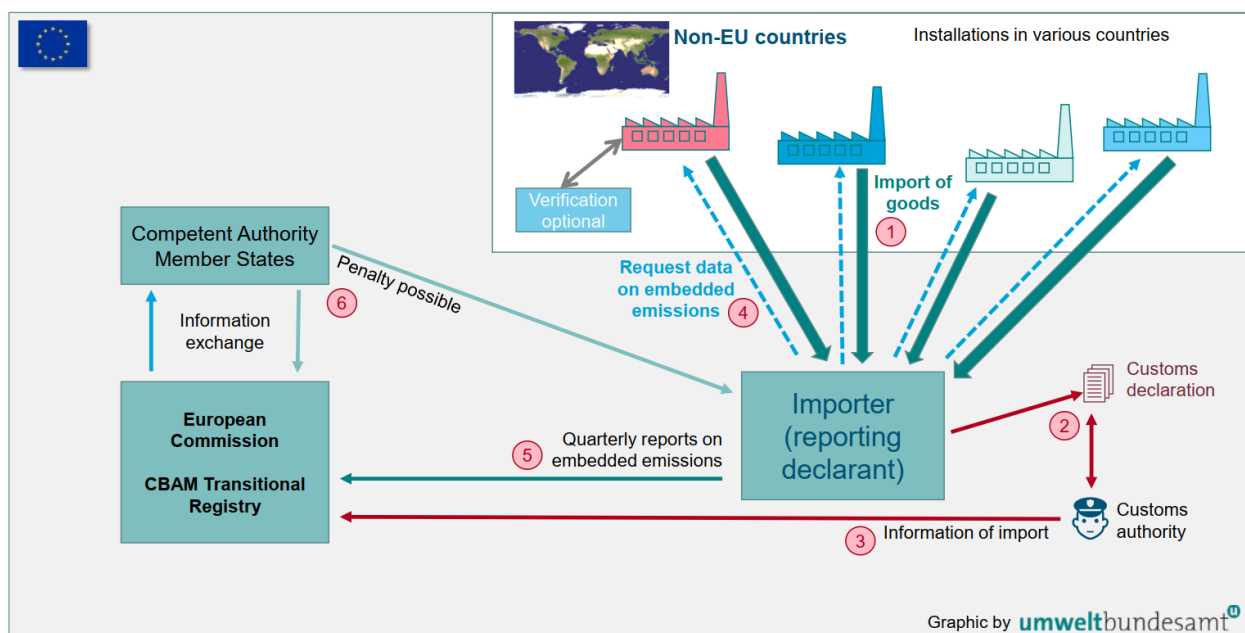


Figura 3.4: Panoramica dei ruoli e del sistema di governance nel periodo transitorio CBAM

Come illustrato schematicamente nella Figura 3.4, il sistema di governance e i flussi di lavoro nel periodo transitorio del CBAM seguono le fasi sequenziali riportate di seguito (la numerazione dei paragrafi segue i numeri rossi nella figura):

1. L'importatore (dichiarante) riceve le merci CBAM da vari impianti, situati in diversi Paesi al di fuori dell'UE.
2. Per ogni importazione, l'importatore presenta la consueta dichiarazione doganale. L'autorità doganale dello Stato membro dell'UE competente controlla e sdogana l'importazione, come di consueto.
3. L'autorità doganale (o il sistema informatico utilizzato) informa la Commissione europea (utilizzando il registro transitorio CBAM) di tale importazione. Queste informazioni possono poi essere utilizzate per verificare la completezza e l'accuratezza delle relazioni trimestrali CBAM.
4. Il dichiarante procede alla richiesta dei dati pertinenti sulle emissioni specifiche incorporate delle merci CBAM importate agli operatori (in pratica, ciò può coinvolgere commercianti intermediari, che dovrebbero inoltrare la richiesta all'operatore dell'impianto che ha prodotto le merci CBAM). Questi ultimi rispondono inviando i dati richiesti, se possibile utilizzando il modello fornito a tal fine dalla Commissione. I dati possono essere verificati volontariamente da un verificatore terzo.
5. Il dichiarante è quindi in grado di presentare la relazione trimestrale CBAM al Registro transitorio CBAM.
6. Ha luogo uno scambio di informazioni tra la Commissione e le autorità competenti degli Stati membri dell'UE. La Commissione comunica (sulla base dei dati doganali) quali dichiaranti sono tenuti a presentare le relazioni CBAM. Inoltre, la Commissione può effettuare controlli a campione delle relazioni effettive e verificarne la completezza rispetto ai dati doganali. Qualora vengano individuate irregolarità, la Commissione ne informa l'autorità competente. L'autorità competente provvederà quindi a dare seguito alla questione, solitamente contattando l'importatore e richiedendo la rettifica dell'irregolarità o la presentazione della relazione CBAM mancante. Se il dichiarante non corregge gli errori, l'autorità competente può infine imporre una sanzione (finanziaria).

Stimare l'importo CBAM: È stato messo a punto a dicembre 2025 il calcolatore CBAM di Siderweb, che consente di stimare l'entità del corrispettivo da versare per i prodotti importati dai Paesi terzi sottoposti alla normativa CBAM ed appartenenti alla categoria «Ferro e acciaio» (vedi fig. 3.5).

Il calcolatore, per i Paesi importatori, è aggiornato in base ai valori forniti dal Regolamento di esecuzione (UE) 2025/2621 della Commissione del 16 dicembre 2025, mentre per i valori di default europei la fonte è il Regolamento di esecuzione (UE) 2025/2620 della Commissione del 16 dicembre 2025.

Per i valori di default dei Paesi extra UE si considerano i dati indicati con la dicitura «Valore predefinito (maggiorazione inclusa)». Data la complessità della normativa e la periodica revisione della stessa, occorre considerare il valore del calcolatore come indicativo.

Inserisci i dati ITA EN FR

<u>Prodotto importato</u> ⓘ	--- Seleziona prodotto --- ▼
<u>Percorso produttivo</u> ⓘ	--- Seleziona percorso produttivo --- ▼
<u>Paese di provenienza</u> ⓘ	--- Seleziona paese di provenienza --- ▼
<u>Anno di arrivo della merce</u> ⓘ	--- Seleziona anno --- ▼
<u>Volumi Importati (in tonnellate)</u> ⓘ	
<u>Emissioni incorporate nei prodotti importati</u> ⓘ	
<u>Benchmark CBAM</u> ⓘ	
<u>Fattore CBAM</u> ⓘ	
<u>Costo ETS</u> ⓘ	

La stima del corrispettivo da versare è:

Figura 3.5: Calcolatore CBAM by Siderweb

Il primo prezzo di un certificato CBAM, che equivale ad una tonnellata di CO₂ emessa in atmosfera, pubblicato in via ufficiale ad aprile 2026 è di **75.36 €/tonnellata**.

3.3 Come definire “acciaio green”

Quando parliamo di acciaio green, si tende abitualmente a privilegiare quella che è l'impronta carbonica (o meglio l'intensità emissiva) di un certo acciaio dovuta al suo processo di produzione, ma non è il solo e unico indicatore da tenere in considerazione.

In figura 3.6 sono visibili i tre principali indicatori che possono essere utilizzati per caratterizzare l'impatto ambientale di uno stabilimento siderurgico:

- ✓ **Intensità emissiva**: in media 1800 – 2200 kg/tonnellata di acciaio prodotto con ciclo integrale
- ✓ **Consumo d'acqua dolce**: in media 1.5 – 2.0 m³/tonnellata di acciaio prodotto
- ✓ **Consumo di suolo**: in media 6.0 – 12.0 m²/tonnellata di acciaio prodotto

A livello internazionale, ad oggi non è ancora stato definito in maniera ufficiale uno standard che possa definire univocamente il *green steel*, nonostante la presenza di varie proposte nate su base volontaria da parte di associazioni di acciaierie che saranno descritte nei paragrafi successivi.



Figura 3.6: Indicatori principali che descrivono l'impatto della siderurgia sull'ambiente

3.3.1 L'Industrial Accelerator Act (IAA) europeo

La costruzione di un mercato guida per prodotti industriali a basse emissioni passa dalla definizione di che cosa debba essere considerato “green”. È necessario, cioè, stabilire dei criteri standardizzati, misurabili e semplici per qualificare in modo oggettivo e comparabile i prodotti industriali a basse emissioni. In questo contesto, la Commissione Europea ha pubblicato l'*Industrial Accelerator Act* (IAA).

L'IAA è una proposta legislativa della Commissione Europea che, inserendosi nel quadro del Clean Industrial Deal, mira a rafforzare la competitività e ad accelerare la transizione e l'innovazione nelle industrie europee. La pubblicazione della proposta, inizialmente prevista per il 10 dicembre 2025, poi rimandata al 29 gennaio 2026, è avvenuta il 4 marzo 2026.

L'IAA si concentra in via prioritaria su alcuni materiali industriali di base ad alta intensità emissiva, in particolare acciaio e cemento, considerati settori chiave per la decarbonizzazione delle catene del valore europee.

L'atto introduce una politica industriale basata su tre leve principali:

1. **Creazione di mercati guida (*lead markets*) per prodotti industriali decarbonizzati**, rafforzando la domanda di prodotti industriali a basse emissioni fabbricati nell'Unione Europea attraverso l'uso di appalti pubblici e l'introduzione di criteri comuni di sostenibilità ambientale, resilienza, circolarità e cybersicurezza, in particolare negli appalti pubblici e in settori come costruzioni e automotive.
2. **Accelerazione delle procedure autorizzative** per semplificare e velocizzare i processi autorizzativi per progetti industriali e infrastrutturali strategici, in particolare nei settori ad alta intensità energetica.
3. **Requisiti “Made in Europe”**, per competere con le politiche industriali di USA e Cina, e rafforzare le filiere europee.

Dal testo finale dell'atto pubblicato dalla Commissione, è stato rimosso il capitolo inerente l'etichettatura (*label*) specifica per l'acciaio “verde”, che era presente nella bozza circolata a febbraio e che era uno dei pilastri centrali per stimolarne la domanda.

Questa omissione, dovuta presumibilmente a evitare sovrapposizioni normative con ESPR (Ecodesign for Sustainable Product Regulation) ha generato molta incertezza e non è stata accolta con favore dal settore siderurgico.

- L'industria e le associazioni (come l'italiana **Federacciai**) hanno sottolineato che l'assenza di un'etichetta chiara e di una metodologia univoca per calcolare l'impronta di carbonio rende difficile applicare le quote previste dalla stessa legge (come il vincolo del 25% di acciaio "low-carbon" negli appalti pubblici).
- Senza una definizione rigorosa, c'è il timore che si crei confusione sul mercato (ad esempio su come valutare l'acciaio prodotto da rottame nei forni elettrici rispetto a quello prodotto con altoforno e convertitore ad ossigeno, molto più impattante a livello emissivo)

Andiamo ora a descrivere alcune proposte per caratterizzare prodotti in acciaio a basse emissioni.

3.3.2 LESS (*Low Emission Steel Standard*)

Negli ultimi anni si è affermato lo Standard LESS (*Low Emission Steel Standard*) come uno dei principali riferimenti per classificare l'acciaio in base alla sua intensità emissiva.

L'iniziativa, nata come organizzazione indipendente *no-profit* nel 2024 nel contesto delle acciaierie tedesche, è sostenuta dal *German Ministry for Economy and Climate Action* ed è stata presentata alla Commissione Europea. LESS ha sede a Bruxelles e al momento conta 28 membri, di 8 nazioni (fig. 3.7), che rappresentano il 45% dell'acciaio prodotto in Europa da ciclo integrale ed è aperta a nuovi partner, sia produttori di acciaio che realtà facenti parte della *value chain*.



Figura 3.7: Principali acciaierie che hanno aderito a LESS

Tutti i membri di LESS si impegnano a raggiungere una produzione di acciaio *near-zero emission* entro il 2050, accelerando la disponibilità di acciaio a basse emissioni sul mercato e consentendo agli utenti finali di ridurre in modo significativo l'impronta di carbonio dei loro prodotti.

Lo standard LESS è stato sviluppato per diventare lo standard di riferimento e di etichettatura dell'acciaio a basse emissioni attraverso un percorso che deve essere trasparente, comparabile e incentivato, indipendentemente dalla tecnologia di produzione utilizzata.

Attraverso un processo di certificazione armonizzato, LESS dichiara di garantire trasparenza e comparabilità tra i diversi produttori e percorsi produttivi, offrendo informazioni chiave sui progressi compiuti dal settore verso l'acciaio a emissioni quasi zero.

LESS utilizza la sliding scale della IEA, un metodo di classificazione delle emissioni di CO₂ derivanti dal processo di produzione dell'acciaio che combina due parametri chiave: **emissioni specifiche** di gas serra e **quantità di rottame** ferroso utilizzato nella produzione.

La sliding scale visibile in figura 3.8, definisce soglie di emissioni (*benchmark*) variabili in funzione della percentuale di rottame ferroso utilizzato nel processo produttivo.

Ciascun prodotto siderurgico viene quindi valutato, come di seguito elencato, rispetto al *benchmark* “near zero” coerente con la propria quota di rottame, anziché rispetto a una soglia uniforme valida per tutti i prodotti.

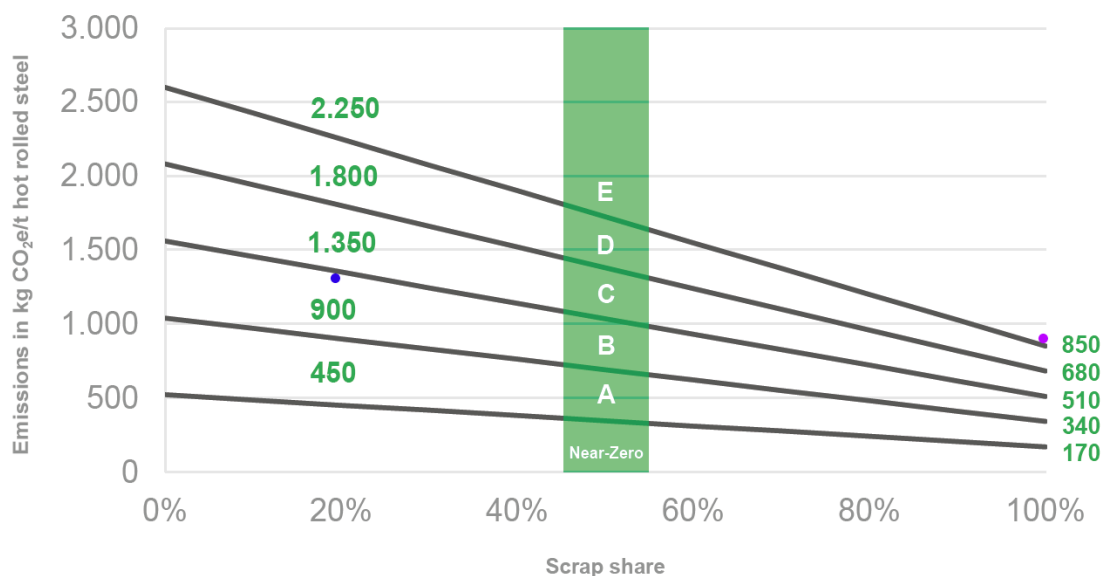


Figura 3.8: *Steel decarbonization scale* sviluppata da LESS per l'acciaio laminato a caldo

- Classificazione **E**: produzione standard NON-decarbonizzata
- Classificazione **D – A**: acciai a basse emissioni
- Classificazione **Near Zero**: top class, raggiungibile solo attraverso la decarbonizzazione dell'intero processo produttivo, inclusa la fornitura di materiale grezzo

L'approccio introduce una dinamica controversa: poiché i *benchmark near-zero* assegnati sono molto più elevati per l'acciaio da minerale rispetto all'acciaio da rottame, uno stesso livello di emissioni può essere valutato in modo diverso a seconda del processo produttivo e, quindi, anche la tecnologia utilizzata, con un approccio non neutrale dal punto di vista tecnologico.

Ciò comporta che un produttore di acciaio da riciclo – che parte già da livelli emissivi quasi 30 volte inferiori – possa risultare “lontano” dal proprio benchmark e ottenere un'etichetta, espressa in classe di prodotto, meno favorevole rispetto a un produttore di acciaio primario che, a parità di classe assegnata, presenta però emissioni reali significativamente più elevate.

Proviamo a chiarire questo punto con un esempio: se si considera un processo che produce acciaio con il 20% di rottame e che emette 1.348 kgCO₂/t_{prodotto}, secondo la sliding scale LESS questo prodotto ricadrebbe nella classe B, venendo quindi considerato come low carbon (punto **BLU** nel grafico di fig.3.8). Al contrario, un acciaio prodotto con 100% di rottame che emetta più di 850 kgCO₂/t_{prodotto} verrebbe collocato nella classe E, ossia come prodotto non decarbonizzato pur avendo un fattore emissivo assoluto significativamente inferiore rispetto a un acciaio collocato in tre classe più favorevole secondo lo standard (punto **VIOLA** in fig.3.8).

Questo approccio può portare a una classificazione per cui prodotti caratterizzati da emissioni assolute più elevate e da una minore percentuale di materiale riciclato risultano inseriti in classi più sfavorevoli e quindi maggiormente valorizzati, rispetto a acciai secondari che, pur presentando emissioni inferiori, vengono penalizzati dal sistema di classificazione.

Per questo motivo diversi attori industriali – attivi soprattutto nella produzione di acciaio da riciclo tramite processo EAF, che rappresenta circa l'85% della produzione nazionale – hanno espresso una posizione critica rispetto all'adozione della *sliding scale* come riferimento regolatorio o per etichette obbligatorie.

La principale obiezione riguarda il fatto che l'approccio non si fonda sulle emissioni assolute, ma su quelle relative, misurate in funzione della distanza rispetto a un target stabilito.

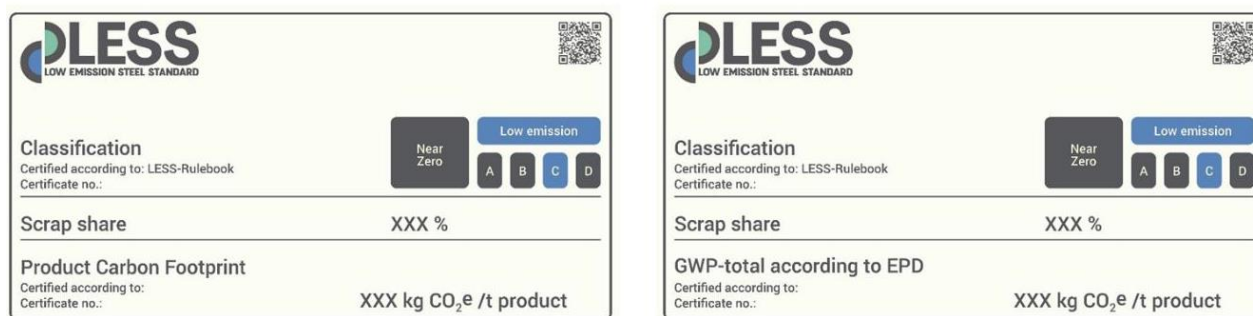


Figura 3.9: Etichettatura secondo standard LESS

Oltre alla classificazione LESS, come già descritto in precedenza, e al contenuto di rottame utilizzato per la produzione dell'acciaio, l'etichetta visibile in fig. 3.9 può presentare la Carbon Footprint o, in alternativa, il Global Warming Potential (GWP).

3.3.3 ResponsibleSteel International Production Standard

ResponsibleSteel è un'iniziativa globale senza scopo di lucro con approccio multi-stakeholder, focalizzata su standard e certificazioni. La missione è quella di essere una forza trainante nella produzione di acciaio a zero emissioni nette, socialmente e ambientalmente responsabile, a livello globale.

I membri provengono dall'intera catena del valore dell'acciaio e dalla società civile (fig. 3.10). Le organizzazioni di tutto il mondo interessate alla missione possono unirsi.

ResponsibleSteel è stato inizialmente sviluppato dall'Australian Steel Stewardship Forum. È stato costituito come Steel Stewardship Council nel 2016 e la prima bozza dello standard internazionale di produzione ResponsibleSteel è stata pubblicata nel 2017. Oltre 70 stakeholder e 180 persone hanno lavorato allo sviluppo del primo standard.

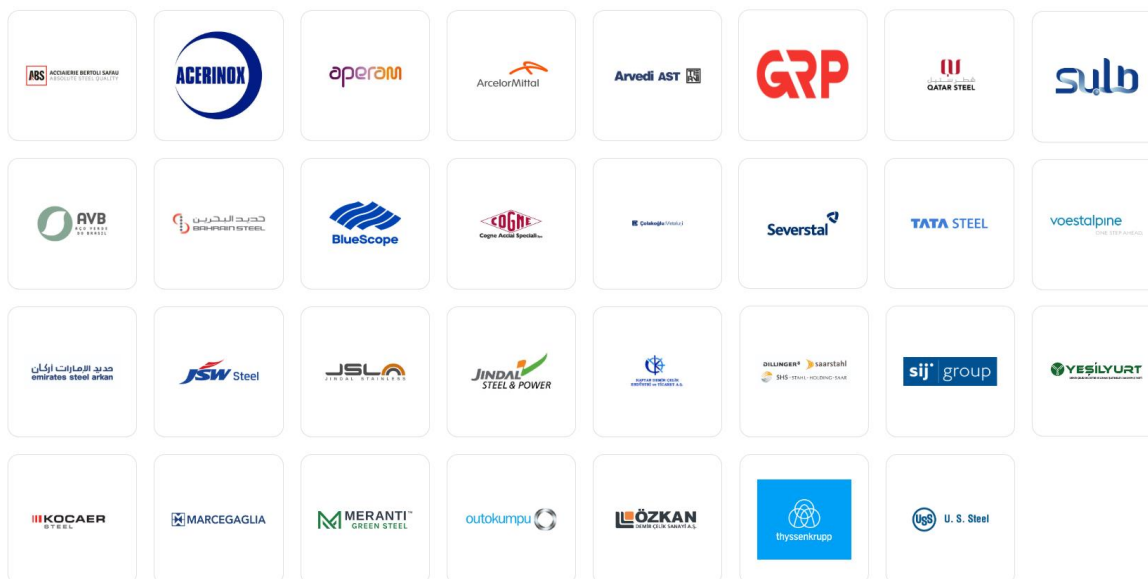


Figura 3.10: Principali acciaierie che hanno aderito a ResponsibleSteel

Lo Standard di produzione internazionale ResponsibleSteel è composto da 13 principi che contengono oltre 500 requisiti per l'approvvigionamento e la produzione responsabili dell'acciaio, comprese alcune delle aree più impegnative della sostenibilità per i produttori di acciaio, come la decarbonizzazione (principio n°10).

Tuttavia, la produzione responsabile dell'acciaio va oltre la mitigazione dei cambiamenti climatici. Ecco perché lo Standard stabilisce anche requisiti in materia di lavoro, diritti umani, acqua, biodiversità e altro ancora. Ogni cinque anni viene effettuata una revisione dello standard, con il supporto e il contributo dei membri e delle parti interessate.

La certificazione ResponsibleSteel si applica agli stabilimenti siderurgici e ai siti correlati che lavorano materie prime per la produzione dell'acciaio o che producono prodotti siderurgici. Tutti i siti certificati ResponsibleSteel devono soddisfare i requisiti fondamentali dello Standard Internazionale di Produzione per ottenere la certificazione.

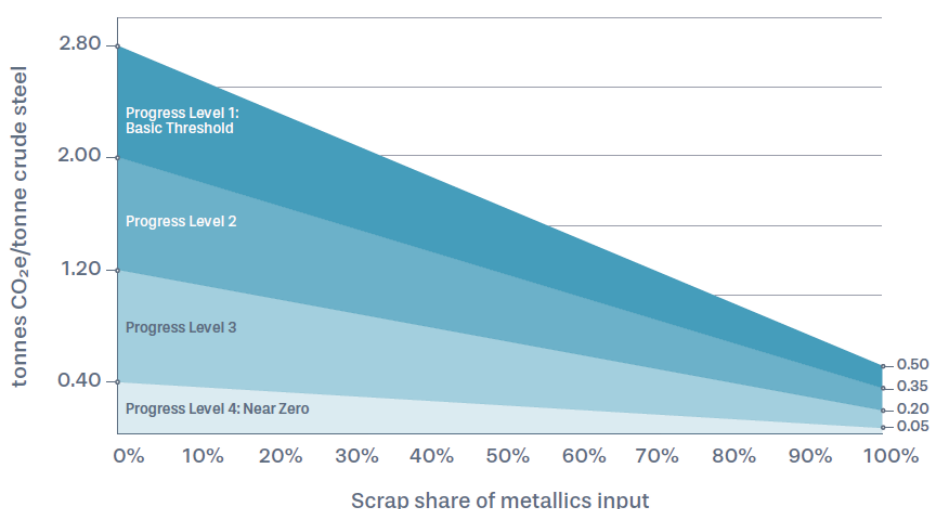


Figura 3.11: Decarbonization progress levels sviluppato da ResponsibleSteel

I livelli di avanzamento della decarbonizzazione (fig. 3.11) si basano sui requisiti fondamentali di certificazione del Principio 10 dello Standard di produzione. Oltre a fissare un obiettivo di decarbonizzazione a livello di sito in linea con i piani a lungo termine dell'azienda e con gli obiettivi dell'Accordo di Parigi, un sito deve misurare le proprie emissioni di gas serra incorporate nell'acciaio grezzo.

I livelli di progresso consentono un confronto omogeneo tra tutti i siti siderurgici a livello globale, fornendo un quadro coerente a livello internazionale per misurare i miglioramenti. Esistono quattro livelli, a partire dal livello di progresso 1 (rappresentativo della media globale nel 2022) fino al livello di progresso 4, acciaio a impatto *Near-zero*.

I livelli di progresso nella decarbonizzazione di ResponsibleSteel si basano su un approccio variabile in base alla disponibilità di rottami, progettato per incentivare tutti i produttori di acciaio, indipendentemente dalla tecnologia esistente, dall'ubicazione o dalla disponibilità di rottami, a investire in processi di produzione decarbonizzati.

Un approccio variabile in base all'utilizzo di rottame è fondamentale per prevenire la rilocalizzazione delle emissioni di carbonio dovuta alla riallocazione del rottame stesso, garantendo sia una transizione equa che un guadagno netto per il clima.

Oggi, almeno il 50% della produzione globale di acciaio è certificabile almeno al Livello di Progresso 1. Per raggiungere il Livello di Progresso 1, un sito con un utilizzo di rottami del 20% richiede un'intensità di emissioni pari o inferiore a 2,34 t CO₂e/t di acciaio grezzo (comprese le emissioni di Scope 1, Scope 2 e Scope 3 a monte associate all'estrazione, alla lavorazione e al trasporto dei materiali di input). A titolo di confronto, un sito con un utilizzo di rottami dell'80% deve soddisfare una soglia di intensità delle emissioni di 0,96 t CO₂e/t di acciaio grezzo.



Figura 3.12: Il marchio *ResponsibleSteel Certified Steel*

Per ottenere la certificazione, gli stabilimenti siderurgici sono sottoposti a rigorosi audit condotti da organismi di certificazione indipendenti riconosciuti da ResponsibleSteel.

Gli stabilimenti che ottengono la certificazione almeno al Livello di Progresso 1 per la decarbonizzazione e l'approvvigionamento dei materiali sono autorizzati a etichettare e commercializzare i propri prodotti come “Acciaio Certificato” (fig. 3.12).

3.3.4 Steel Climate Standard by Global Steel Climate Council (GSCC)

Il Global Steel Climate Council (GSCC) è un'associazione senza scopo di lucro creata per promuovere la strategia climatica attraverso la definizione di standard e la promozione della riduzione delle emissioni di carbonio da parte dei membri dell'industria siderurgica.

Il GSCC comprende oltre 30 produttori internazionali membri e sostenitori, tra cui produttori di acciaio, associazioni di categoria, utenti finali, fornitori di rottami metallici e organizzazioni non governative. I membri fondatori di GSCC sono CELSA Group, Commercial Metals Company, Institute of Scrap Recycling Industries (ISRI), Nucor Corporation, Steel Dynamics, Inc., e Steel Manufacturers Association (SMA).

Lo *Steel Climate Standard*, sviluppato dal GSCC, ha tre obiettivi importanti:

1. Fornire un quadro unico, indipendente dalla tecnologia, per la certificazione dei prodotti siderurgici e la definizione di obiettivi di emissione aziendali basati su dati scientifici, che si applichi a tutti i produttori di acciaio in modo equo a livello globale;
2. Consentire a tutti i clienti del settore siderurgico di conoscere le emissioni di carbonio associate ai prodotti siderurgici che acquistano;
3. Creare uno standard di settore per raggiungere gli obiettivi di riduzione delle emissioni previsti dall'Accordo di Parigi sul Clima entro il 2050.

L'approccio di GSCC, a differenza di LESS e di ResponsibleSteel, presuppone che l'elaborazione di uno standard basato su una *sliding scale* per i rottami ferrosi potrebbe portare a etichettare come "green" i prodotti siderurgici con emissioni più elevate, a discapito di quelli con emissioni più basse. Ciò scoraggerebbe l'innovazione e consentirebbe ai produttori di acciaio con emissioni più elevate di rinviare le modifiche ai loro processi produttivi.

Uno standard per l'acciaio a basse emissioni di carbonio veramente efficace deve essere uno standard in cui vengano misurate le emissioni di carbonio effettive e raggiunte, e deve essere applicato equamente a tutti i produttori a livello globale.

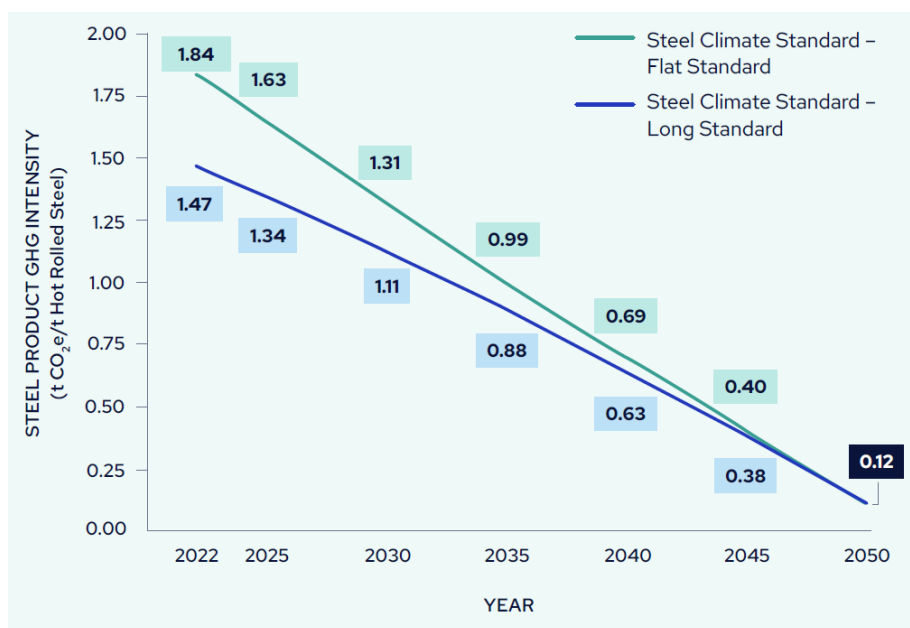


Figura 3.13: *Steel Climate Standard* per prodotti in acciaio lunghi e piani

Il percorso di discesa dell'intensità emissiva di CO₂ previsto dallo Steel Climate Standard stabilisce valori di intensità (t CO₂e/t acciaio laminato a caldo) basati su prodotti siderurgici distinti in prodotti lunghi e piani, riconoscendo che, al momento, è tecnicamente impossibile produrre prodotti piani e prodotti lunghi con intensità di carbonio equivalenti, poiché presentano una composizione chimica diversa (i piani hanno un tenore di C di circa 0.1-0.15% mentre i lunghi 0.3-0.6% di C).

Pertanto, presentano percorsi di avvicinamento diversi verso l'azzeramento netto entro il 2050, ma raggiungono lo stesso punto finale (fig. 3.13). Per certificare per la prima volta i prodotti secondo lo Steel Climate Standard, le aziende devono:

- ✓ Fornire il valore di intensità di gas serra del prodotto in acciaio e la documentazione della verifica di terze parti dei calcoli dell'intensità delle emissioni del prodotto in acciaio (t CO₂e/t acciaio laminato a caldo)
- ✓ Stabilire gli SBET (*Science Based Emission Target*) in conformità a quanto stabilito da GSCC entro due anni dall'adesione allo Steel Climate Standard

Poiché gli standard di prodotto dello Steel Climate Standard diminuiscono annualmente e i dati necessari per calcolare l'intensità di gas serra del prodotto in acciaio vengono raccolti per l'anno completo più recente, il valore di intensità deve essere confrontato con lo Steel Climate Standard per l'anno corrispondente ai dati raccolti.

Una volta che il GSCC avrà stabilito che un prodotto soddisfa lo standard, verrà rilasciata una certificazione di prodotto, valida fino a tre anni. Per mantenere questa certificazione, l'azienda dovrà calcolare e dichiarare i valori annuali di intensità di prodotto per l'anno più recente al GSCC.

I valori annuali di intensità di prodotto dovranno essere confrontati con il valore dello Steel Climate Standard per l'anno corrispondente, per dimostrare che il prodotto continua a soddisfare lo standard. I valori di intensità di prodotto dovranno essere verificati da terze parti ogni tre anni durante la riconvalida.

I modelli GSCC per la commercializzazione/etichettatura dei prodotti certificati, sono visibili nella fig. 3.14.



Figura 3.14: Etichettatura GSCC dei prodotti certificati

3.3.5 Industrial Deep Decarbonization Initiative (IDDI) by UNIDO

La Clean Energy Ministerial Industrial Deep Decarbonization Initiative (IDDI) è una coalizione globale di organizzazioni pubbliche e private che lavorano per stimolare la domanda di materiali industriali a basse emissioni di carbonio.

In collaborazione con i governi nazionali, l'IDDI si impegna a standardizzare le valutazioni delle emissioni di carbonio, stabilire obiettivi ambiziosi per gli appalti pubblici e privati, incentivare gli investimenti nello sviluppo di prodotti a basse emissioni di carbonio, come acciaio, cemento e calcestruzzo, e progettare linee guida per il settore.

Coordinata dall'UNIDO (United Nations Industrial Development Organization), l'IDDI è co-diretta da Regno Unito e India. Tra i suoi membri figurano Canada, Germania, Giappone, Arabia Saudita, Svezia, Emirati Arabi Uniti e Stati Uniti. L'Italia non fa parte ad oggi dell'IDDI.

L'iniziativa IDDI mira ad accelerare la transizione attraverso gli appalti pubblici verdi (GPP, la pratica di acquistare beni, servizi e infrastrutture pubbliche che hanno un impatto ambientale ridotto durante il loro ciclo di vita). Gli appalti pubblici rappresentano circa il 14% del Prodotto Interno Lordo (PIL) nei paesi sviluppati, e sono un motore nelle economie in via di sviluppo, rappresentando fino al 30% del loro PIL.

I governi sono spesso i maggiori acquirenti singoli di cemento, calcestruzzo, acciaio e altri materiali industriali, in particolare per i grandi progetti infrastrutturali: in alcuni paesi acquistano fino al 35% di tutto il cemento e il 25% di tutto l'acciaio utilizzato nelle costruzioni pubbliche. Quando i governi si impegnano ad acquistare prodotti a basse emissioni di carbonio, mandano un segnale alle aziende e agli investitori che la domanda di questi prodotti è in aumento.

L'impegno per gli appalti pubblici verdi (GPP) è un elemento chiave dell'IDDI e prevede quattro livelli che consentono diverse modalità di definizione degli impegni per l'approvvigionamento di acciaio, cemento e calcestruzzo a basse emissioni. I governi possono scegliere i livelli che meglio rappresentano le proprie circostanze nazionali e i propri obiettivi strategici.

- ❖ Livello 1: Richiedere la divulgazione dell'intensità emissiva del prodotto (da attuare nel minor tempo possibile) – Un requisito a livello di prodotto che richiede ai fornitori di presentare Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD) per i prodotti venduti ai governi.
- ❖ Livello 2: Entro il 2030, condurre valutazioni dell'intero ciclo di vita dei progetti di edilizia pubblica e, entro il 2050, raggiungere emissioni nette zero in tutti i progetti di edilizia pubblica.
- ❖ Livello 3: Entro e non oltre il 2030, rendere obbligatorio l'approvvigionamento di acciaio, cemento e calcestruzzo a basse emissioni nei progetti di edilizia pubblica, applicando il livello di ambizione più elevato possibile nelle circostanze nazionali.
- ❖ Livello 4: A partire dal 2030, richiedere l'approvvigionamento di una quota di cemento e/o acciaio grezzo proveniente dalla produzione di materiali a emissioni quasi zero per progetti di punta.

Ogni anno, i Paesi che hanno aderito all'impegno rendicontano i propri progressi, che vengono descritti e pubblicati all'interno del *Green Public Procurement Pledge: Annual Progress Report*.

3.3.6 Low Carbon Emission Steel Evaluation Method by CISA

La China Iron and Steel Association (CISA) ha annunciato il "Low Carbon Emission Steel Evaluation Method" nel corso della Green Development Digital Supply Chain Conference, tenutasi il 18 ottobre 2024. Questo standard, il cui studio è iniziato nel 2022, è stato promosso da Baowu Steel Group, grazie alla collaborazione di 44 partner della filiera.

Il mercato cinese dell'acciaio è attualmente caratterizzato da sovra-capacità, in quanto la domanda interna proveniente dal settore dell'edilizia è in forte contrazione. Nel 2025 la produzione di acciaio cinese è scesa al di sotto della soglia di un miliardo di tonnellate (per avere un confronto diretto, la produzione italiana nello stesso anno è stata poco superiore a 20 milioni di tonnellate).

Siccome l'acciaio cinese è prodotto per il 90% circa attraverso il ciclo integrale (il più impattante in termini di emissioni di CO₂) è oltremodo importante che vengano fatti passi avanti nella giusta direzione, quella della decarbonizzazione.

Durante lo sviluppo della metodologia, il gruppo di normazione ha promosso una stretta comunicazione e collaborazione con le principali organizzazioni internazionali specializzate in acciaio a basse emissioni di carbonio, tra cui l'Agenzia Internazionale per l'Energia (IEA), ResponsibleSteel, German Low Carbon Emission Steel e il Rocky Mountain Institute.

Lo standard cinese segue l'approccio della *sliding scale*, come già descritto in precedenza per LESS e ResponsibleSteel nei paragrafi 3.3.2 e 3.3.3.

Lo standard adotta un approccio "cradle-to-gate", che esclude le emissioni a valle e tiene conto delle emissioni di CO₂ nell'ambito degli Scope 1 e 2, nonché delle emissioni parziali dello Scope 3. Inoltre, la metodologia consente l'applicazione di crediti di carbonio per la generazione di elettricità o calore, l'energia fornita a terzi e i gas di processo utilizzati nelle tecnologie di cattura, utilizzo e stoccaggio del carbonio (CCUS).

Sulla base di queste regole di contabilizzazione dei gas serra, il sistema di classificazione stabilisce una *sliding scale* con 5 classi di prestazione per valutare le prestazioni ambientali dell'acciaio, vedere fig. 3.15.

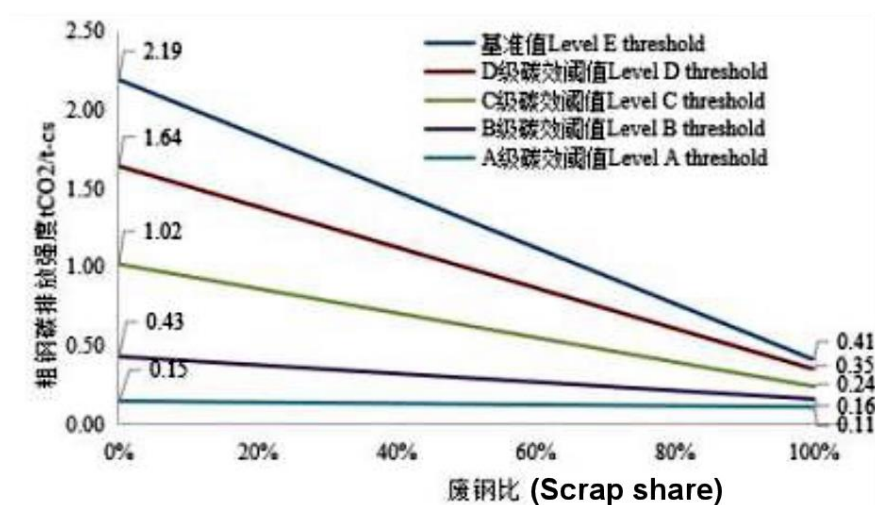


Figura 3.15: Low carbon emission steel evaluation sviluppato da CISA

La valutazione può essere condotta a due livelli: acciaio grezzo e prodotto laminato a caldo. A livello di acciaio grezzo, le soglie di efficienza del carbonio delineate nella Tabella 3.1, che fungono da parametro di riferimento.

Tabella 3.1: Soglie di efficienza emissive per acciaio grezzo

Class	a: 0% scrap steel to crude steel carbon performance threshold (tCO ₂ /t crude steel)	b :gradient	100% scrap steel to crude steel carbon performance threshold (tCO ₂ /t crude steel)
E	2.19	1.78	0.41
D	1.64	1.29	0.35
C	1.02	0.78	0.24
B	0.43	0.27	0.16
A	0.15	0.04	0.11

Per garantire la conformità ai requisiti dello standard, i produttori di acciaio sono tenuti a calcolare le emissioni di carbonio dei loro prodotti siderurgici e a determinare il corrispondente livello di efficienza in termini di emissioni di carbonio in conformità con i requisiti di contabilizzazione dei gas serra.

Nell'ambito di questo processo, i produttori di acciaio devono redigere un rapporto di valutazione che fornisca un resoconto verificabile delle proprie emissioni di carbonio e delle strategie di riduzione.

Infine, lo standard introduce un'etichetta "*Carbon Reduction Technology Label*" per riconoscere e incentivare l'adozione di energie pulite e tecnologie a basse emissioni di carbonio nella produzione di acciaio. Questa etichetta funge da riconoscimento per i produttori di acciaio che hanno integrato con successo queste tecnologie nei loro processi produttivi.

3.3.7 Steel Commitment by First Movers Coalition (FMC)

La First Movers Coalition (FMC), è una coalizione globale di aziende che sfrutta il proprio potere d'acquisto per decarbonizzare i settori industriali ad alta emissione del mondo, responsabili del 30% delle emissioni globali. La FMC collabora con iniziative esistenti per consolidare e integrare gli sforzi in corso per raggiungere le emissioni nette zero.

FMC include aziende di diversi settori, tra cui l'industria automobilistica, che mirano a mobilitare la domanda di tecnologie emergenti che hanno il potenziale per decarbonizzare settori *hard-to-abate* come l'acciaio.

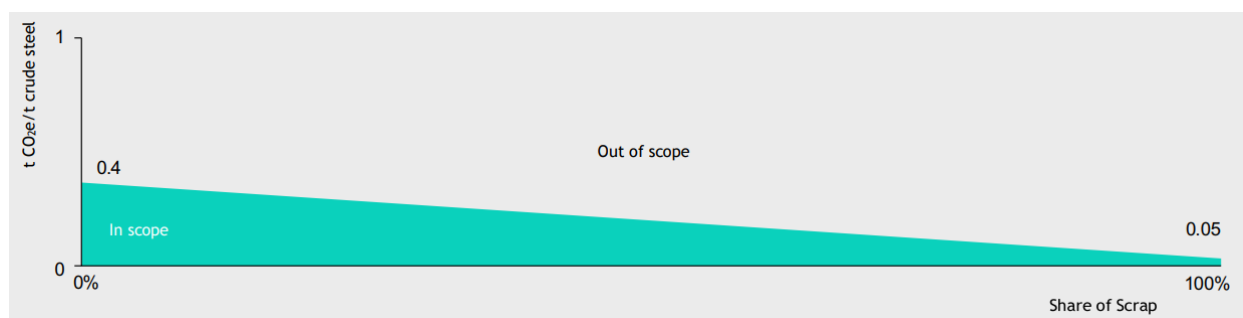


Figura 3.16: Near-Zero emission steel secondo la First Movers Coalition

Lo *Steel Commitment* pubblicato dalla First Movers Coalition definisce che:

"Almeno il 10% (in volume) di tutto l'acciaio che acquistiamo ogni anno sarà a emissioni prossime allo zero (secondo la definizione FMC, visibile in figura 3.16) entro il 2030".

I membri si impegnano ad acquistare il 10% del loro acciaio come *Near-Zero emission steel*, secondo i seguenti criteri:

- L'acciaio grezzo proviene da impianti di produzione con tecnologie innovative. Secondo le linee guida della IEA, l'acciaio dovrebbe emettere da <0,4 t (0% di rottami in ingresso) a <0,05 t (100% di rottami in ingresso) di CO₂eq per tonnellata di acciaio grezzo.
- Il limite analitico per le emissioni è *cradle-to-gate*, in linea con le linee guida dell'IEA contenute nel rapporto "*Achieving Net Zero Heavy Industry Sectors in G7 Members*" (IEA, 2022).

3.3.8 Low-Emissions Steel Definition by International Energy Agency (IEA)

L'Agenzia Internazionale per l'Energia (IEA) propone una definizione comune di "produzione a emissioni prossime allo zero, *Near-Zero*" già sottoposta all'attenzione dei Paesi del G7 e anche di "produzione a basse emissioni, *Low-Emissions*", che ha riconosciuto misure provvisorie che riducono sostanzialmente l'intensità delle emissioni dell'acciaio.

A causa dell'eterogeneità dei prodotti siderurgici, la IEA ha sviluppato la sua proposta focalizzandosi sulla fase di produzione dell'acciaio grezzo. Sono incluse le emissioni di CO₂ per Scope 1, Scope 2 e una parte a monte di Scope 3, nonché le emissioni di metano derivanti dall'approvvigionamento di combustibili fossili. Sono esclusi la selezione e il trasporto di rottami di acciaio e la produzione di rivestimenti refrattari per forni e ferroleghie.

La soglia proposta per la definizione di "produzione a emissioni prossime allo zero" è stabilita su una *sliding scale* tra zero e il 100% di utilizzo di rottami, con soglie quantitative basate sulle analisi di scenario della IEA sui potenziali percorsi per raggiungere questi obiettivi, in particolare la *Roadmap Net Zero by 2050* della IEA (IEA, 2021).

In questo quadro, la soglia proposta per la produzione di acciaio grezzo con zero utilizzo di rottami è fissata a 400 kg di CO₂ equivalente per tonnellata (kgCO₂eq/t), mentre per la produzione di acciaio grezzo con input di rottami al 100%, il valore soglia proposto è di 50 kgCO₂eq/t di acciaio grezzo (fig. 3.17).

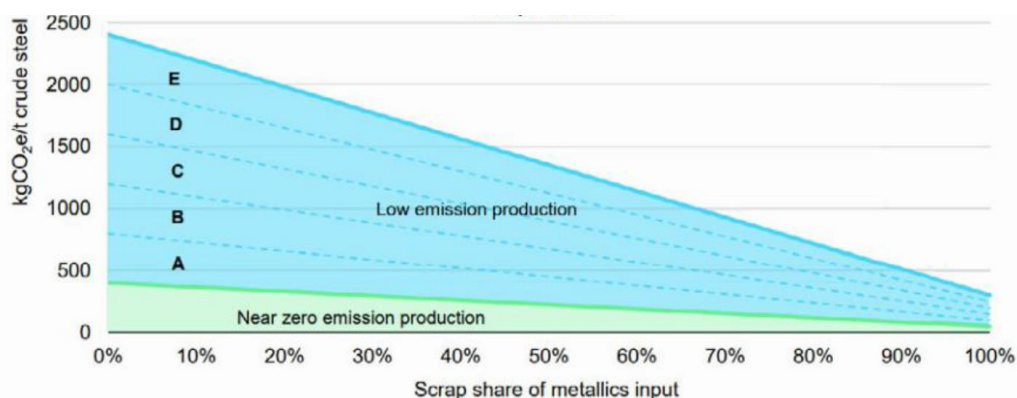


Figura 3.17: *Sliding decarbonization scale* proposta da IEA

Inoltre, l'IEA ha stabilito diversi livelli di prestazione che hanno riconosciuto l'importanza delle misure che siano progressivamente in grado di ridurre sostanzialmente le emissioni nel percorso verso il raggiungimento di una produzione prossima allo zero (*Near-Zero Emissions*).

A tal fine, l'intervallo di intensità tra la produzione a basse emissioni e la produzione a emissioni prossime allo zero è suddiviso in cinque incrementi, o "fasce", etichettate dalla Classe A alla Classe E, come illustrato nella fig. 6.11.

L'intensità massima delle emissioni consentita per qualificarsi come produzione a basse emissioni (*Low-Emissions Steel*) è fissata a sei volte la soglia di emissioni prossime allo zero (*Near-Zero Emissions Steel*). Fissare la soglia a sei volte il livello di emissioni prossime allo zero la pone circa il 10-20% inferiore all'intensità delle emissioni dei principali processi convenzionali (IEA, 2022).

Per mezzo del grafico di figura 3.18 è possibile confrontare le varie definizioni di *Near-Zero Emissions Steel* descritte nei paragrafi precedenti con il valore di riferimento (linea rossa) relativo alla produzione di acciaio da ciclo integrale (che utilizza altoforno e convertitore a ossigeno). Da notare come tutte le proposte esaminate si trovino al di sotto della soglia di 500 kg di CO₂ equivalente per tonnellata (kgCO₂eq/t), indicando una sostanziale uniformità di valutazione tra le stesse.

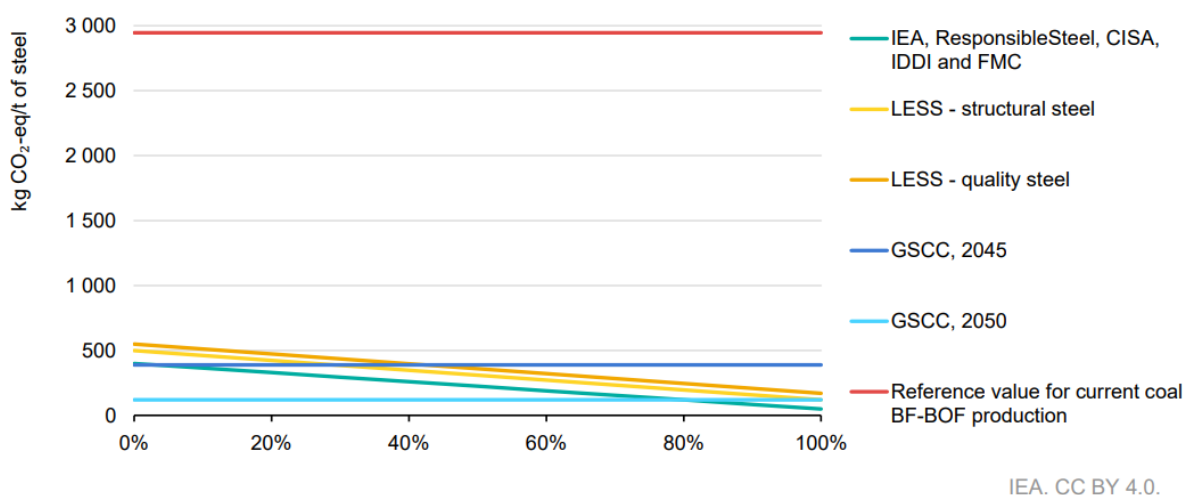


Figura 3.18: Confronto tra le varie definizioni di *Near-Zero Emissions Steel*

3.3.9 Preliminary Concept Proposal by Federacciai

Per concludere questo capitolo prendiamo in esame la bozza di proposta, dunque non ancora completa e ufficializzata, dell'associazione italiana Federacciai, focalizzata su di un sistema duale che combina un indice di impronta di carbonio e un indice di sforzo di decarbonizzazione come "esercizio concettuale".

La proposta definisce il *green steel* in base all'indice di impronta di carbonio (kgCO₂/tonnellata di acciaio) e introduce l'indice di sforzo di decarbonizzazione per monitorare i progressi verso l'acciaio verde (percentuale di raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione).

L'indice di impronta di carbonio (fig. 3.19) si riferisce alle emissioni specifiche del prodotto siderurgico senza considerare i percorsi o le tecnologie di produzione.



Figura 3.19: Carbon footprint index proposto in bozza da Federacciai

Federacciai suggerisce di calcolarlo secondo metodologie standard internazionali, con regole specifiche dettagliate. Propone inoltre la possibilità di definire indici di impronta di carbonio per diversi prodotti siderurgici, sebbene non specifici come questi prodotti debbano essere classificati, ad esempio in base a qualità di acciaio, applicazione, funzionalità, ecc.

Questo indice è destinato agli appalti verdi e a fornire informazioni sull'impatto ambientale dei prodotti ai settori degli utilizzatori a valle.

Al contrario, l'indice dello sforzo di decarbonizzazione è concepito per ottenere incentivi e accesso a fondi sostenibili, nonché per monitorare i progressi verso la neutralità climatica e renderli visibili al mercato.

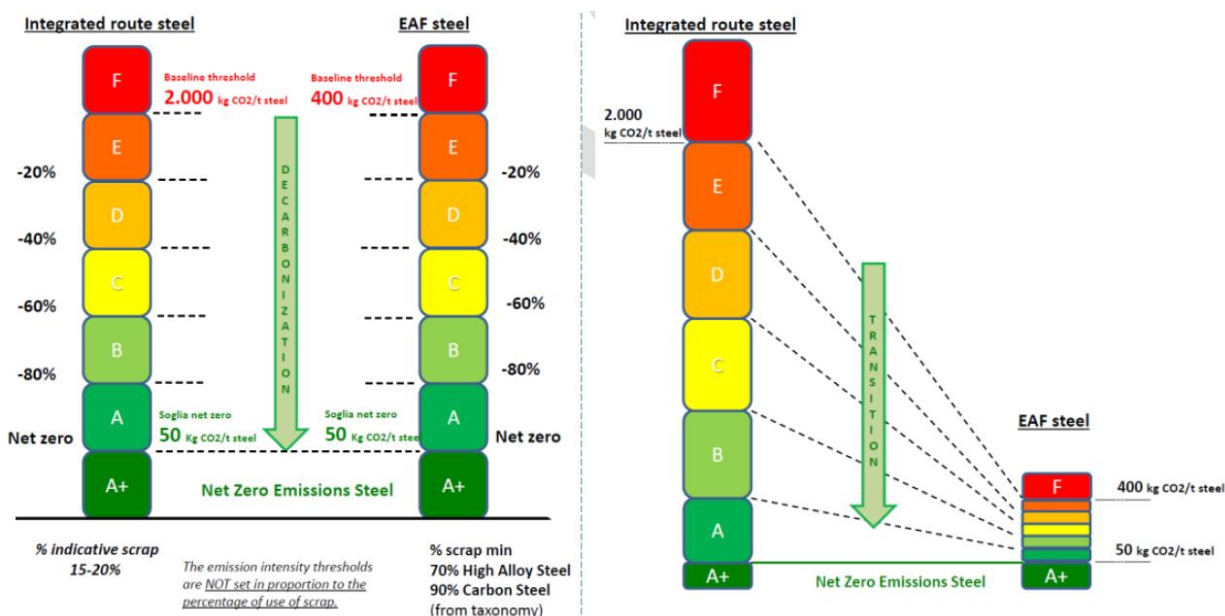


Figura 3.20: Indice dello sforzo di decarbonizzazione proposto in bozza da Federacciai

Come mostrato nella fig. 3.20, l'indice dello sforzo di decarbonizzazione presenta diverse classi, stabilite in base alla percentuale di raggiungimento dell'obiettivo di neutralità climatica (soglia *Net Zero Emission Steel*) e possono essere calibrate in modo diverso per il ciclo integrale (che include anche tecnologie DRI o DRI/EAF) e per quello che utilizza EAF, a seconda delle tecnologie a basse emissioni di carbonio applicabili a ciascun percorso.

Le soglie di intensità di emissione che definiscono le classi sono stabilite a livello di settore UE, con una soglia di base che rappresenta l'intensità di emissione della tecnologia di base con "zero interventi" di decarbonizzazione.

La soglia assoluta di intensità di emissione per raggiungere la classe A+ (zero emissioni nette) è equivalente per entrambi i percorsi tecnologici.

Un esempio di etichettatura che recepisce quanto sopra descritto è visibile nella figura 3.21, che include sia l'indice, sia l'impronta di carbonio, sia il contenuto di acciaio riciclato.

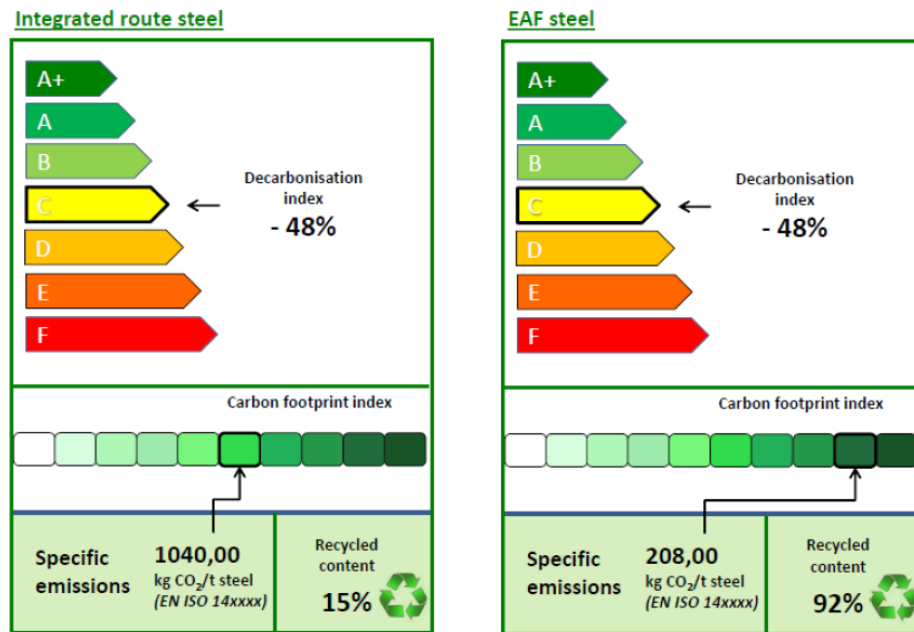


Figura 3.21: Esempio di etichettatura che recepisce la bozza di proposta di Federacciai

Nel contesto odierno, ritengo sia prioritario che standard, etichette e criteri di incentivazione per la produzione di *green steel* siano focalizzati sul riconoscimento delle emissioni assolute reali e della circolarità dei processi produttivi, piuttosto che su benchmark relativi.

La necessità e l'urgenza di politiche industriali adeguate per incentivare la decarbonizzazione del settore siderurgico e favorire lo sviluppo della domanda di *green steel* non possono andare a scapito delle produzioni più circolari e già largamente meno emissive.

4. Limiti, soluzioni e scenari futuri

4.1 Il ruolo del riciclo

Il contenuto di ferro all'interno dell'acciaio (che è l'elemento prevalente della lega Fe-C) proviene direttamente da minerali ferrosi o da rottami ferrosi riciclati.

Nonostante un tasso di riciclaggio dell'acciaio stimato a livello mondiale dell'85% (Worldsteel, 2024), attualmente i rottami disponibili sono sufficienti a soddisfare solo il 32% della domanda mondiale di acciaio nuovo (IEA, 2021).

La differenza tra il tasso di riciclaggio dell'acciaio (85%) e il contenuto medio riciclato dell'acciaio nuovo (32%) è spiegabile tramite la lunga durata dei prodotti in acciaio in uso, che impone un vincolo fondamentale alla fornitura di rottami per il riciclaggio. La durata media dell'acciaio in tutti i prodotti (comprese le infrastrutture, gli edifici e i trasporti, nonché gli imballaggi) è stimata in circa 35 anni (studio di D. Cooper, 2013, Università del Michigan).

L'offerta massima potenziale di rottami post-consumo disponibili per il riciclaggio oggi è quindi limitata alla quantità di acciaio prodotta, in media, 35 anni fa. Nel 1989 era pari a 0,78 miliardi di tonnellate (Worldsteel, 1991). Nel 2024 era pari a 1,9 miliardi di tonnellate (Worldsteel, 2025).

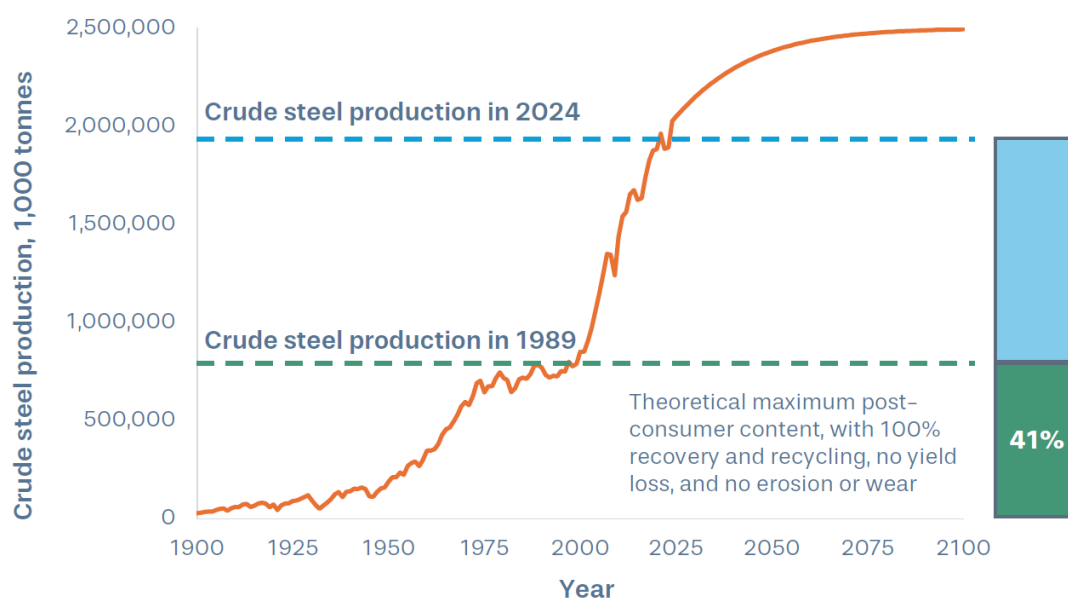


Figura 4.1: Produzione mondiale di acciaio dal 1900 al 2024 con proiezione futura al 2100

Come è visibile dalla figura 4.1, il contenuto massimo possibile di materiale riciclato post-consumo per l'acciaio prodotto nel 2024 è del 41%. La proiezione teorica evidenzia un assestamento al quantitativo massimo annuale di 2,5 miliardi di tonnellate tra il 2075 e il 2100.

In Europa, il tasso di riciclaggio dell'acciaio post-consumo è stimato tra il 70 e il 75% (Consorzio Ricrea, 2025). Il tasso di riciclaggio post-consumo dell'acciaio è così elevato perché l'acciaio è facilmente recuperabile dai prodotti che hanno raggiunto la fine del loro ciclo di vita e perché i rottami ferrosi sono un materiale prezioso per il quale esiste una forte domanda.

Sebbene sia possibile ottenere una ulteriore migliore efficienza del riciclaggio, una parte dell'acciaio continuerà a essere economicamente non recuperabile (ad esempio, nelle fondamenta interrate o perso in mare), per questo motivo la possibilità di aumenti sostanziali del tasso di riciclaggio è limitata fisicamente.

In Europa, i piani esistenti per aumentare la capacità dei forni elettrici ad arco (EAF) dovrebbero portare a una carenza di rottami a partire dal 2030 (studio di Eurofer, 2023). A livello globale, l'Agenzia internazionale per l'energia (IEA, 2021 report “Net zero by 2050”) prevede che ci saranno rottami sufficienti a soddisfare solo il 46% della domanda di acciaio nuovo nel 2050, anche nel suo “scenario di sviluppo sostenibile”.

È importante al fine di ottenere acciaio di qualità per mezzo del processo EAF l'utilizzo di rottame di qualità: la presenza di elementi come rame e stagno (che il forno elettrico non è in grado di eliminare, come nessun altro metodo industriale efficiente) nella materia prima possono favorire inneschi a rottura del prodotto finito.

Essendo quindi il potenziale di aumento dell'offerta di rottami ferrosi di alta qualità fortemente limitato, si hanno conseguenze molto significative sull'efficacia delle misure volte a promuovere la decarbonizzazione dell'acciaio incentrate sull'utilizzo del rottame.

4.1.1 Utilizzo di rottame e impatto sulle emissioni di gas serra

Come già descritto nei capitoli precedenti di questo lavoro, la produzione di acciaio direttamente dal minerale di ferro (produzione primaria o da ciclo integrale) emette circa cinque volte più gas serra (GHG) per tonnellata di acciaio rispetto alla produzione di acciaio interamente da rottami riciclati. Maggiore è la percentuale di rottami utilizzati come fonte di ferro, minori sono le emissioni di GHG, come mostrato nel grafico della fig. 4.2.

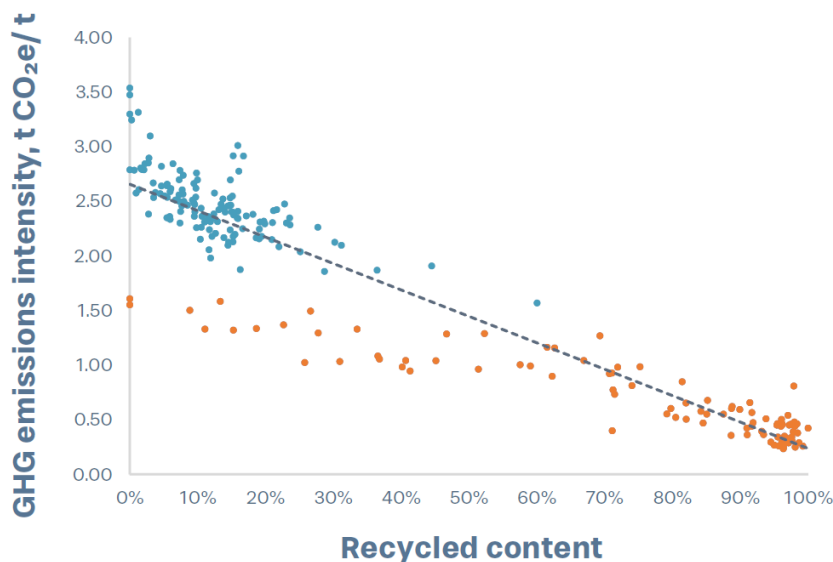


Figura 4.2: Impatto dell'utilizzo di rottame nella produzione di acciaio su emissioni di GHG

La figura 4.2 mostra l'intensità delle emissioni di gas serra di 239 siti siderurgici nel 2022. Ogni punto rappresenta un impianto: i punti blu indicano i siti con altoforno e convertitore ad ossigeno; i punti arancioni indicano i siti con forno elettrico ad arco, che utilizzano una miscela di rottami e ghisa grezza (o DRI).

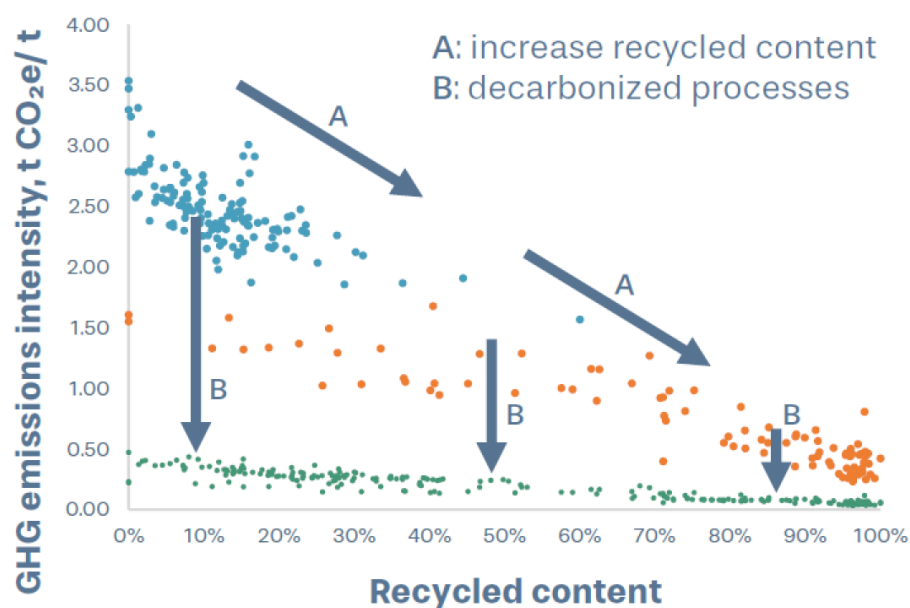


Figura 4.3: Percorsi di transizione necessari al fine della decarbonizzazione

La produzione di acciaio deve raggiungere emissioni di gas serra “*near zero*” entro la metà del secolo, come illustrato nella fig. 4.3, per mantenere in vita la possibilità di raggiungere gli obiettivi dell'Accordo di Parigi del 2015.

Ci sono due aspetti da considerare: il primo è quello di utilizzare più rottami, come indicato dalle frecce contrassegnate con la lettera “A” in fig. 4.3. Come descritto nel paragrafo precedente, il recupero dei rottami e il loro utilizzo nella produzione dell'acciaio sono pratiche consolidate e commercialmente competitive.

Si prevede che la domanda di rottami continuerà a superare notevolmente l'offerta massima disponibile oltre il 2050, garantendo che i rottami disponibili continueranno ad essere utilizzati appieno, anche se la quantità assoluta aumenterà.

Il secondo aspetto è quello di decarbonizzare i processi di produzione del ferro e dell'acciaio stessi, sia per la produzione basata sul minerale di ferro destinato all'altoforno che su quella basata sui rottami, come indicato dalle frecce contrassegnate con la lettera “B” nella fig. 4.3.

Ciò richiede l'uso di agenti riducenti alternativi come il gas naturale o l'idrogeno verde (prodotto cioè utilizzando energia elettrica proveniente da fonti di energia rinnovabile); la tecnologia di riduzione diretta del minerale di ferro (che occorre abbia un contenuto di ferro non inferiore a 66-67%) più diffusa a livello globale (60% della produzione mondiale di DRI) è il processo *Midrex*, introdotto per la prima volta nel 1968 dall'omonima società statunitense.

La principale alternativa al processo *Midrex* per la produzione di preridotto di ferro (DRI) è la tecnologia *HYL-Energiron*, messo a punto dalle aziende italiane Tenova e Danieli, in collaborazione con la messicana Hylsa. A questo processo può essere integrata la cattura e il riutilizzo dei gas di processo (CCUS), ottenendo così un abbattimento delle emissioni nette di CO₂ fino al 90% rispetto a quelle del ciclo integrale (BF-BOF) e divenendo la tecnologia di produzione più vicina al carbon-neutral.

4.1.2 Ridistribuzione del rottame e suo impatto sulle emissioni

A livello generale, le misure politiche a sostegno della decarbonizzazione della produzione siderurgica si sono basate su misurazioni delle emissioni di gas serra a livello di sito o sulla “carbon footprint” basata sull'analisi del ciclo di vita (LCA).

Questi approcci rischiano di essere poco efficaci perché non tengono conto dei vincoli fondamentali relativi alla disponibilità di rottami.

Quando la disponibilità di un materiale è limitata e le scorte disponibili sono completamente esaurite, come nel caso dei rottami ferrosi, l'uso di tale materiale non può essere aumentato, ma solo ridistribuito.

Nella figura 4.4 sono visibili tre scenari, ognuno dei quali è caratterizzato dall'utilizzo di un mix di rottame + minerale di ferro differente.

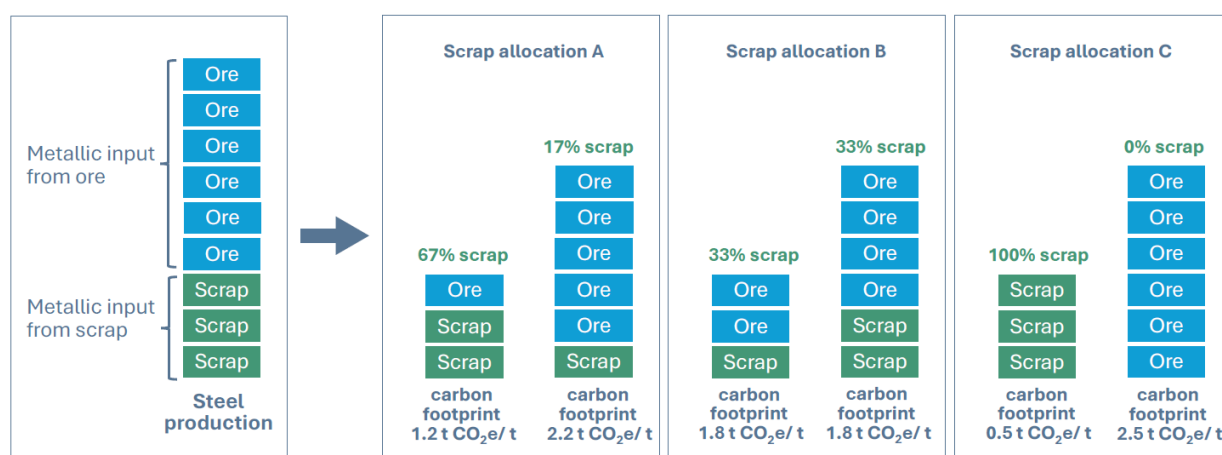


Figura 4.4: Impatto della ridistribuzione del rottame sulla *carbon footprint*

La figura mostra come i prodotti in acciaio a bassa impronta di carbonio (0.5 t CO₂ e/t) siano realizzati destinando una maggiore quantità di rottami alla loro produzione. Tuttavia, poiché l'offerta di rottami è già quasi completamente utilizzata, ciò significa che vi sono meno rottami disponibili per la produzione altrove o per altri prodotti.

Di conseguenza, l'impronta di carbonio di questi prodotti aumenta. A parità di quantitativo di acciaio prodotto, le emissioni nei tre differenti scenari sono le seguenti:

- Scenario A: carbon footprint 3.4 tCO₂ e/t
- Scenario B: carbon footprint 3.6 tCO₂ e/t
- Scenario C: carbon footprint 3.0 tCO₂ e/t

Identificare come “acciaio green” un acciaio considerando solo la sua *carbon footprint* è quindi un meccanismo altamente inefficace per promuovere la riduzione delle emissioni complessive di gas serra, aumentando la probabilità di rilocalizzazione delle emissioni di carbonio

La ridistribuzione dei rottami ridistribuisce le emissioni di gas serra, anziché ridurle. Non è dunque possibile riuscire a decarbonizzare adeguatamente il settore siderurgico unicamente focalizzandosi sul riciclo dell'acciaio. Questa è da considerarsi una **condizione necessaria, ma non sufficiente**.

Occorre a questo punto tornare a sottolineare che a livello italiano, europeo e mondiale non è ancora stato messo a punto uno standard che definisca in maniera ufficiale le caratteristiche e le peculiarità del cosiddetto “acciaio green” con relativa *label* identificativa.

Questo non significa che non ci siano proposte in merito, messe a punto da enti che rappresentano associazioni di produttori, come la German Steel Association: Low Emission Steel Standard (LESS), ResponsibleSteel International Production Standard e altri, già citati in precedenza.

La classificazione basata sulla scala di decarbonizzazione (vedi fig.4.5), tiene conto del rapporto tra rottami e ferro primario utilizzati come input per la produzione dell'acciaio (i cui dati sono già raccolti dai produttori di acciaio), oltre alla misurazione delle emissioni di gas serra.

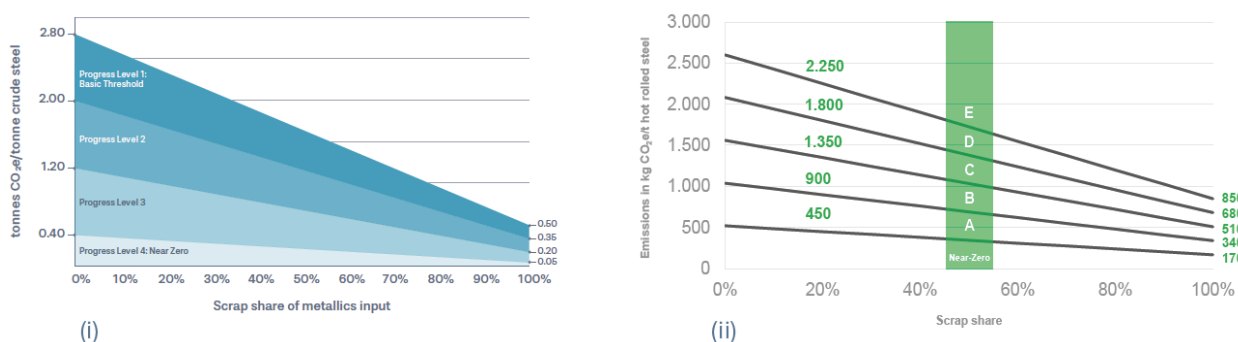


Figura 4.5: Esempi di Steel Decarbonization Scales sviluppati da ResponsibleSteel(i) e LESS(ii)

Per un approfondimento maggiormente dettagliato della Steel Decarbonization Scale e della label per gli acciai green, si rimanda al paragrafo 3.3.

4.1.3 Iniziative per la promozione del riciclo dell'acciaio

I rottami svolgono un ruolo fondamentale nella riduzione delle emissioni industriali e del consumo di risorse: ogni tonnellata di rottami utilizzata per la produzione di acciaio consente di evitare l'emissione di 1,5 tonnellate di anidride carbonica e il consumo di 1,4 tonnellate di minerale di ferro, 740 kg di carbone e 120 kg di calcare (Worldsteel, 2024).

Massimizzare il recupero e il riciclaggio dei rottami ferrosi è fondamentale per mantenere le emissioni di gas serra dell'industria siderurgica globale il più basse possibile.

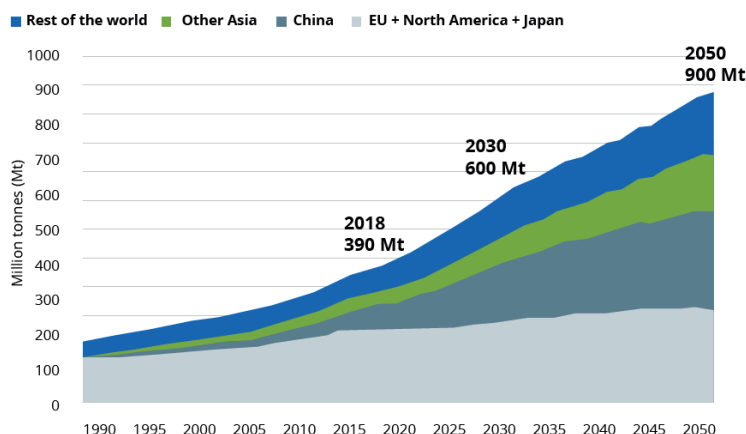


Figura 4.6: Disponibilità di rottame in acciaio stimata da Worldsteel

La disponibilità globale di rottami è attualmente sufficiente a soddisfare solo circa un terzo della domanda globale di acciaio, una cifra che dovrebbe salire a circa il 50% entro la metà del secolo, a causa del costante aumento della produzione storica di acciaio e del conseguente volume di rottami disponibili, piuttosto che di un aumento significativo dei tassi di recupero (fig. 4.6).

Si prevede che la domanda globale di acciaio aumenterà in futuro, prima di raggiungere un plateau una volta raggiunta una certa quantità di acciaio utilizzata annualmente pro capite (fig. 4.1). Una volta che la produzione avrà raggiunto il plateau e sarà trascorso un tempo sufficiente affinché la produzione annuale di rottami sia aumentata fino a raggiungere questo livello, sarà possibile soddisfare quasi tutta la domanda di acciaio attraverso il riciclaggio dei rottami ferrosi.

Andiamo ora a descrivere alcune iniziative focalizzate sulla promozione del riciclaggio dell'acciaio e della relativa diffusione di sensibilità e consapevolezza tra i cittadini.

➤ *Il logo MRF (Metal Recycles Forever)*

Il logo MRF, di proprietà di Metal Packaging Europe (collettore a cui aderiscono le associazioni europee di categoria) e lanciato nel 2014, è liberamente disponibile per i proprietari dei marchi, e applicabile a tutte le forme di imballaggi metallici (acciaio e alluminio).

Il messaggio è chiaro: un materiale da imballaggio in acciaio o alluminio può essere riciclato per un numero indeterminato di volte, senza perdita di qualità.



Figura 4.7: Il logo MRF, applicabile su tutti gli imballaggi in acciaio e alluminio

Qualsiasi bene acquistato che reca questo simbolo comunica al consumatore di aver scelto materiali di imballaggio perfettamente coerenti con l'economia circolare e di riciclo.

Il marchio MRF è importante per informare e aiutare i consumatori a comprendere meglio il ruolo chiave che devono svolgere nel mantenere il metallo nel ciclo dei materiali attraverso il riciclaggio dei loro imballaggi vuoti.

Il marchio MRF è stato progettato per essere inserito su qualsiasi formato di confezione, applicazione di prodotto e marchio, per aiutare i consumatori a capire come possono svolgere un ruolo positivo e attivo nel riciclaggio.

È pensato per funzionare sia sulla confezione che fuori dalla confezione, per aiutare l'industria e i marchi a raggiungere livelli più elevati di riciclaggio e a generare meno rifiuti.

➤ *La panchina “Steelosa” by RICREA*

RICREA, Consorzio Nazionale per il Riciclo e il Recupero degli Imballaggi in Acciaio, è nato nel 1997 ed è uno dei sette consorzi di filiera che compongono il Sistema CONAI (Consorzio Nazionale Imballaggi). Al Consorzio aderiscono i produttori della materia prima e dei contenitori d'acciaio ed anche i riciclatori.

RICREA svolge la propria funzione istituzionale favorendo, promuovendo e agevolando la raccolta e il riciclo degli imballaggi usati di acciaio. Gli imballaggi usati provengono sia dalla raccolta differenziata fatta dai cittadini (superficie pubblica) sia dalla raccolta ad hoc fatta su aziende, negozi e attività produttive (superficie privata).

Al Consorzio spetta anche l'importante compito di informare i cittadini a riconoscere i contenitori in acciaio e a sensibilizzarli a farne una corretta raccolta differenziata, primo importante step per il successivo riciclo.

Gli imballaggi metallici sono raccolti e riciclati in tutta Europa, raggiungendo una percentuale di riciclo del 70-75%, anche grazie all'attività svolta dai vari consorzi europei analoghi a RICREA. Nel 2024, il 86,4% degli imballaggi di acciaio immessi al consumo in Italia sono stati avviati a riciclo.

Nel novembre del 2024, nel contesto della fiera ECOMONDO di Rimini, RICREA ha presentato *Steelosa*, un nuovo progetto che unisce design urbano, consapevolezza ecologica e cultura. Il progetto si pone l'obiettivo di portare un messaggio di attenzione per l'ambiente in tutto il Paese.

Le panchine, raffiguranti il logo MRF (descritto nel paragrafo precedente) e realizzate interamente in acciaio riciclato recuperato dagli imballaggi, rappresentano un esempio tangibile di durabilità e circolarità.



Figura 4.8: Mappa dei comuni a cui verrà donata la panchina del progetto *Steelosa*

La prima panchina è stata installata nel comune di Alba il 21 maggio 2025 (vedi fig. 4.8). Il progetto prevede la donazione di altre panchine in acciaio riciclato a diversi Comuni italiani (uno per ogni regione),

In un momento storico in cui la sostenibilità deve tornare al centro delle sfide globali, “*Steelosa*” si propone come potente strumento di sensibilizzazione ed educazione ambientale e come esempio concreto di come il riciclo possa trasformare materiali di scarto in oggetti esteticamente belli e funzionali.

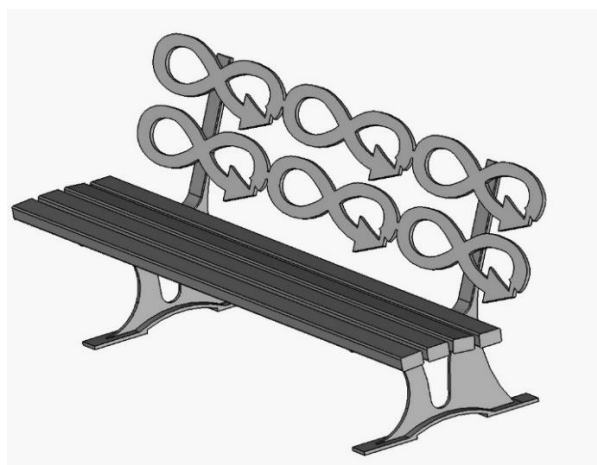
Le panchine in acciaio riciclato diventano così non solo luoghi dove riposare e riflettere, ma anche simboli di un impegno collettivo verso un futuro più sostenibile, accrescendo la consapevolezza sull’importanza di preservare il nostro pianeta attraverso gesti quotidiani come la raccolta differenziata.

➤ *Attivarsi per favorire e accelerare il cambiamento*

Ognuno di noi ha la possibilità di fare qualcosa, per quanto piccola possa essere, che contribuisca alla transizione verso la neutralità carbonica. Il primo passo è informarsi, per arrivare ad acquisire consapevolezza di:

- ✚ vivere in un’epoca in cui le nostre scelte influenzeranno le generazioni future
- ✚ dover affrontare quotidianamente campagne di disinformazione e negazionismo messe in atto da chi ha l’interesse al mantenimento dello *status quo* del sistema capitalista e dell’utilizzo smisurato dei **combustibili fossili**, che sono i **responsabili** del disastro climatico in atto
- ✚ essere ancora in tempo per contenere l’aumento della temperatura media globale tra +1.5°C e +2.0°C rispetto ai livelli preindustriali, attraverso l’attuazione da parte dei governi di politiche e soluzioni che possano ridurre in maniera significativa le emissioni di CO₂ in atmosfera (vedi capitolo 4.3.2 di questo lavoro, scenario WB2 En-ROADS)
- ✚ non potersi mai arrendere, lo dobbiamo ai nostri figli.

Superando il ridotto numero di Comuni italiani selezionati nell’iniziativa di RICREA descritta nel paragrafo precedente, è possibile penetrare in modo più capillare nel territorio italiano proponendo un *concept* analogo di panchina costruita in acciaio riciclato certificato (fig. 4.9).



LCA: Scenarios and additional technical information

Characteristic product properties
Information on biogenic Carbon

The declared product does not contain any biogenic carbon.

Packaging has not been considered within the context of the study.

End of Life Stage (C1-C4)

Name	Value	Unit
Collected separately steel scrap	6.08	kg
Recycling steel scrap	5.78	kg
Landfilling steel scrap	0.304	kg

Reuse-, Recovery- and Recyclingpotential

Name	Value	Unit
Net flow of steel scrap	5,55	kg

The scenario at hand contains a recycling rate of 95%.

Figura 4.9: Design della panchina *ConSteele* e certificato dell’acciaio *Pladur*

4.2 Caso studio: prove sperimentali di cattura CO₂

Al Politecnico di Torino, presso il Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia-DISAT, è stata sviluppata una nuova tecnologia nel contesto del progetto CO₂CAP, applicabile ai supercondensatori, dispositivi per l'accumulo di energia tra i più promettenti per l'avanzamento del settore dell'energy storage e del recupero energetico.

La nuova tecnologia è già stata testata, ed i risultati sono stati pubblicati il 6 aprile 2025 nell'articolo "*Energy Harvesting from CO₂ Emission Exploiting Ionic Liquid-Based Electrochemical Capacitor*" sulla rivista scientifica Advanced Energy and Sustainability Research.

Di seguito verranno espone le caratteristiche principali della tecnologia, successivamente verranno riepilogati i risultati di alcuni test sperimentali effettuati in laboratorio, utilizzando % di CO₂ attinenti a quelle presenti nei fumi di una acciaieria.

I dati della composizione fumi (da BF, blast furnace gas, e BOF, basic oxygen furnace gas) sono riportati nella tabella 4.1, tratta dal JRC Reference Report, Best Available Techniques (BAT) for Iron and Steel Production emesso dalla Commissione Europea nel 2013.

Tabella 4.1: Composizione tipica di fumi prodotti da una acciaieria con ciclo integrato

Parameter	Units	BF gas		COG		BOF gas
		Min.	Max.	Min.	Max.	Mean
CO	vol-%	19	27	3.4	5.8	60.9
H ₂	vol-%	1	8	36.1	61.7	4.3
CO ₂	vol-%	16	26	1	5.4	17.2
N ₂	vol-%	44	58	1.5	6	15.5
CH ₄	vol-%			15.7	27	0.1
C _x H _y	vol-%			1.4	2.4	
Lower calorific value	kJ/Nm ³	2 600	4 000	9 000	19 000	8 184
Dust content	mg/Nm ³	0	10			
Sulphur total	mg/Nm ³		170	100	800	

4.2.1 La tecnologia utilizzata per le prove di cattura della CO₂

La tecnologia di miscelazione capacitiva (CapMix), sfrutta l'energia dai gradienti di salinità.

Il guadagno di energia si ottiene sfruttando la variazione del doppio strato elettrico (EDL) che si forma spontaneamente all'interfaccia tra elettrodo ed elettrolita in seguito al riarrangiamento degli ioni. In particolare, diminuendo la concentrazione salina, l'EDL si espande, la capacità diminuisce e, di conseguenza, la tensione aumenta.

Modellando il sistema come un condensatore a facce piane parallele, possiamo affermare che, in condizioni di circuito aperto, la carica (Q) rimane costante. Poiché $Q = C \cdot V$, una diminuzione della capacità (C) comporta necessariamente un aumento della tensione (V) del dispositivo.

Prendendo ispirazione da questo processo, nel progetto CO₂CAP è stato realizzato un dispositivo che invece di usare due soluzioni con un gradiente di concentrazione di sale, utilizza un gradiente di concentrazione di CO₂. A tal fine, per la prima volta è stato sfruttato un liquido ionico (IL), sia come elettrolita che come mezzo di assorbimento della CO₂ in una cella CapMix.

Il meccanismo consiste nel far fluire un flusso di gas ricco di CO₂, alternato a un flusso di N₂, durante la carica/scarica di due elettrodi. La CO₂ influenza fortemente l'interfaccia elettrodo/IL e le proprietà fisico-chimiche dell'IL che portano ad una complessiva variazione di tensione del dispositivo.

A differenza dei sistemi basati sull'acqua, in cui la raccolta di energia si basa sull'espansione elettrica a doppio strato, è stato messo a punto un nuovo meccanismo basato sulle variazioni di potenziale elettrochimico durante la cattura/rilascio di CO₂, supportato dalla modellazione della dinamica molecolare.

Il meccanismo proposto è riportato nella Figura 4.10. Secondo gli esperimenti condotti e descritti dettagliatamente nell'articolo "*Energy Harvesting from CO₂ Emission Exploiting Ionic Liquid-Based Electrochemical Capacitor*" il processo di cattura della CO₂ avviene a livello dell'anione e consente di catturare fino a 1:1 CO₂/IL mol.

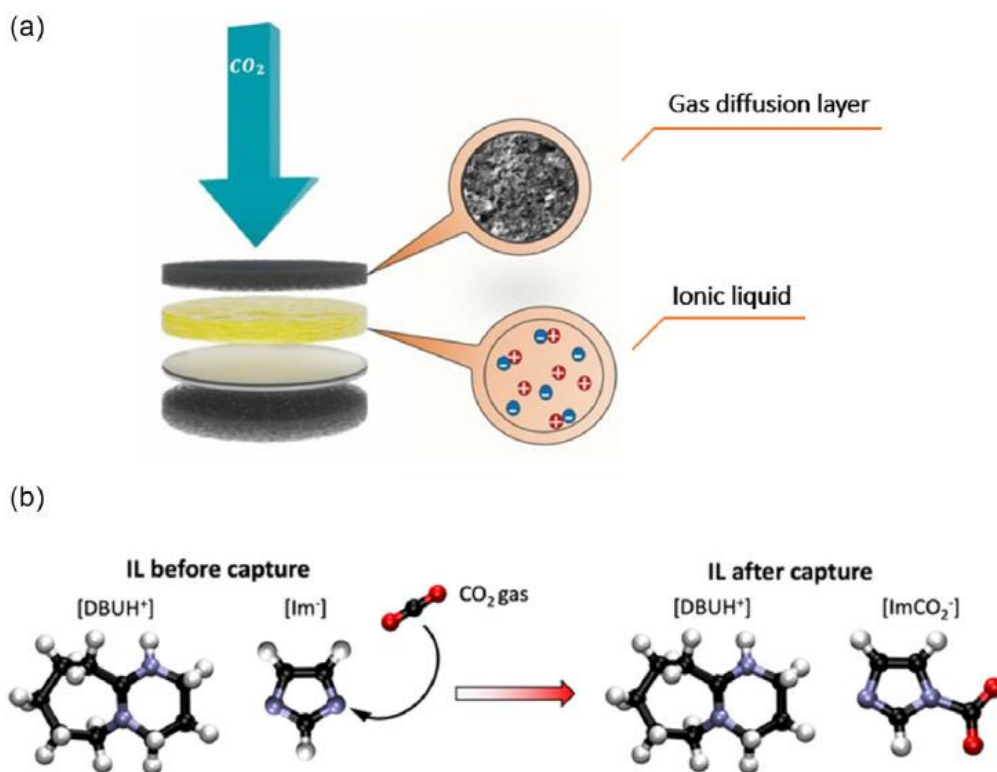


Figura 4.10: a) Schema della cella elettrochimica b) Meccanismo di cattura della CO₂

La procedura di raccolta dell'energia è impostata come segue (figura 4.11).

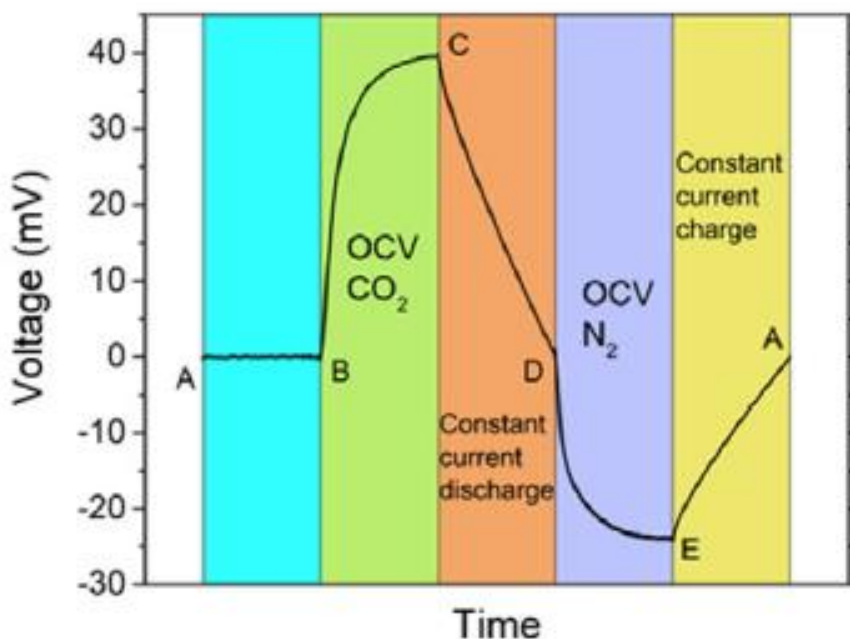


Figura 4.11: Procedura schematica del ciclo CapMix

- 1) tenuta del cortocircuito per 5' per consentire al sistema di recuperare ad ogni ripetizione le stesse condizioni di partenza (tratto A-B);
- 2) impostazione condizioni di circuito aperto e avvio flusso CO₂ (50 ml/min) all'interno del dispositivo (tratto B-C). Questo provoca un cambiamento positivo nella differenza di potenziale. Il flusso di gas è mantenuto costante fino a raggiungere un picco di tensione (punto C). Quando questa condizione è raggiunta, il flusso del gas è interrotto ed è possibile procedere al passo successivo;
- 3) la variazione di tensione può essere scaricata su un carico (per recuperare l'energia relativa alla cattura di CO₂). Questa fase viene eseguita applicando una corrente costante pari a 1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ fino a raggiungere 0 V (tratto C-D);
- 4) dopo la scarica completa del dispositivo, la condizione di circuito aperto è nuovamente impostata e un flusso di azoto (50 ml/min) viene avviato. N₂ in questa fase è utilizzato per rimuovere la CO₂ assorbita nella fase 2 (in questa fase, l'elettrolita viene rigenerato). Il flusso di gas è tenuto per un tempo fisso, scelto al fine di garantire la ripetibilità del processo (tratto D-E).
- 5) dopo la rigenerazione in N₂, la tensione è scesa ad un valore negativo. È possibile recuperare l'energia anche in questa fase, quindi anche un cambiamento negativo della tensione produce un flusso positivo di energia (tratto E-A).

Con questa sperimentazione, è stato dimostrato per la prima volta che è possibile produrre energia dall'assorbimento/desorbimento di CO₂ in un condensatore elettrochimico basato su un liquido ionico come elettrolita e mezzo di assorbimento di CO₂.

Gli studi effettuati dimostrano che la raccolta di energia nel dispositivo è il risultato di due effetti concorrenti: il ri-orientamento degli ioni all'interfaccia indotto dall'assorbimento di CO₂ e nel potenziale tra il liquido ionico incontaminato e quello che ha catturato la CO₂, che inducono una variazione di potenziale durante il processo di cattura della CO₂.

Ciò si riflette sul potenziale a circuito aperto (OCP) degli elettrodi e infine sulla tensione a circuito aperto della cella (OCV), con un guadagno energetico netto positivo nel ciclo di assorbimento/desorbimento della CO₂, sincronizzato con la carica e la scarica del condensatore elettrochimico.

4.2.2 Prove sperimentali di cattura CO₂

Scopo delle prove: testare la tecnologia di cattura messa a punto dal Politecnico utilizzando miscele di gas il più possibile sovrapponibili a quelle prodotte da una acciaieria (tabella 4.1).

Sono stati utilizzati due differenti dispositivi, aventi le seguenti caratteristiche:

- Cella n°1
 - elettrodi carboniosi Ø16 mm permeabili al gas (GDL)
 - liquido ionico [HDBU][Im] 1 molare in propilene carbonato
- Cella n°2
 - elettrodi carboniosi Ø16 mm con carboni attivi depositati su gas diffusion layer (GDL)
 - liquido ionico [HDBU][Im] con solvente trietileneglicole (TEG)

L'assunzione principale che è stata adottata per replicare la composizione dei fumi come da tabella 4.1, risiede nel fatto che la % di CO₂ è stata mantenuta fedelmente, mentre i restanti elementi sono stati sostituiti da N₂. Le cause di questa assunzione risiedono nella possibilità a livello di laboratorio di NON poter utilizzare gas tossici come il CO, inodore e altamente pericoloso per la sua propensione a legarsi all'emoglobina del sangue.

Tecniche di caratterizzazione delle celle: prima di effettuare le prove di cattura della CO₂ è stato necessario eseguire spettroscopia di impedenza e voltammetria ciclica. La Cella n°2 presenta una capacità *c* decisamente più elevata della Cella n°1, con conseguente maggiore energia *E* disponibile a parità di tensione *V*:

$$E = \frac{1}{2} * c * V^2$$

Svolgimento delle prove: ogni test effettuato è stato preceduto da una fase preliminare di cortocircuitazione, della durata di 120 secondi, finalizzata all'ottenimento di una condizione di partenza uguale. La portata del flusso di gas (miscela CO₂ + N₂) è stata impostata a 30 ml/min.

Il tempo impostato per il flusso della miscela di CO₂ + N₂ è stato definito per ottenere una significativa stabilità in termini di tensione misurata, per rispetto alle prove pregresse effettuate in fase di validazione del dispositivo utilizzando 100% di CO₂ e pari portata.

La fase successiva è la scarica, che viene effettuata applicando una corrente di pochi mA (che simula l'effetto di un resistore collegato). Al termine della fase di scarica occorre rigenerare il nostro liquido ionico che ha catturato la CO₂ passando ad un flusso 100% N₂ per venti minuti.

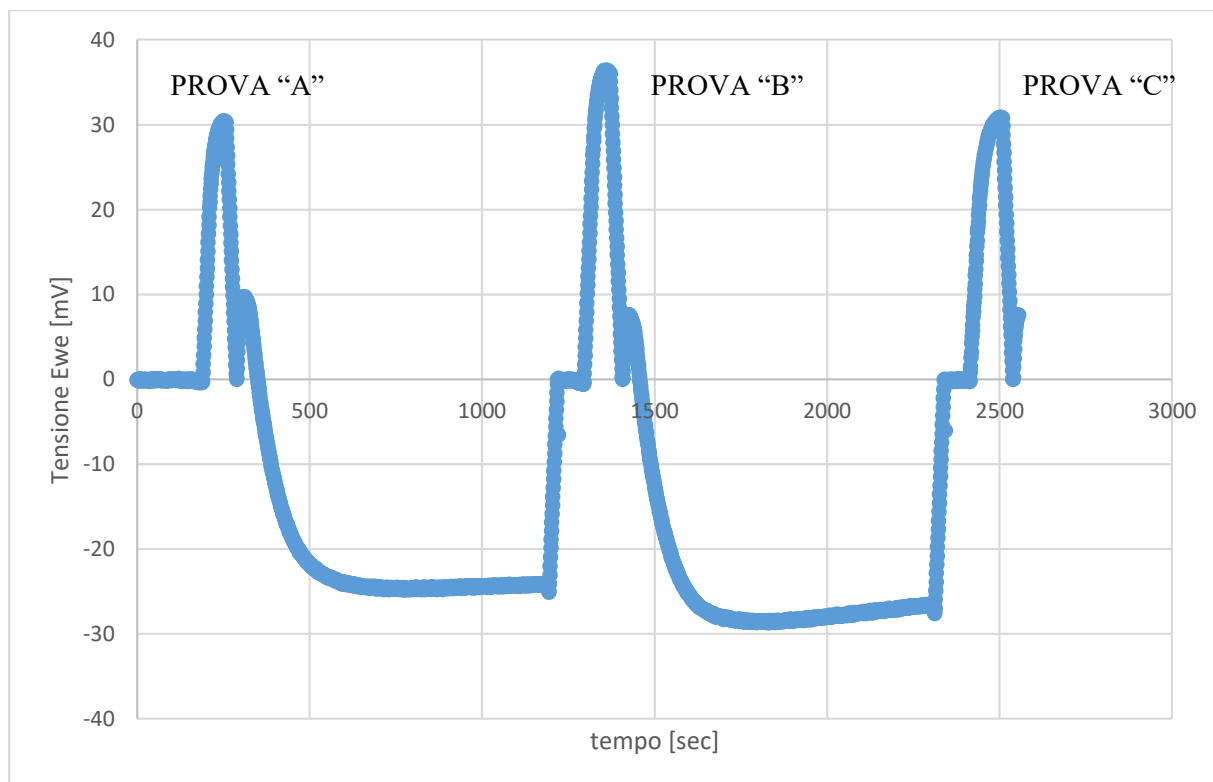


Figura 4.12: Esito test effettuati con Cella n°1

Le prove A e B effettuate con la Cella n°1 sono state effettuate con 100% CO₂, raggiungendo un picco di tensione a 30 – 35 mV. La prova C é invece stata effettuata con 16% di CO₂ (4.8 ml/min) e 84% N₂ (25.2 ml/min), simulando così la condizione con CO₂ minima da tabella 4.1, raggiungendo lo stesso risultato delle prove precedenti.

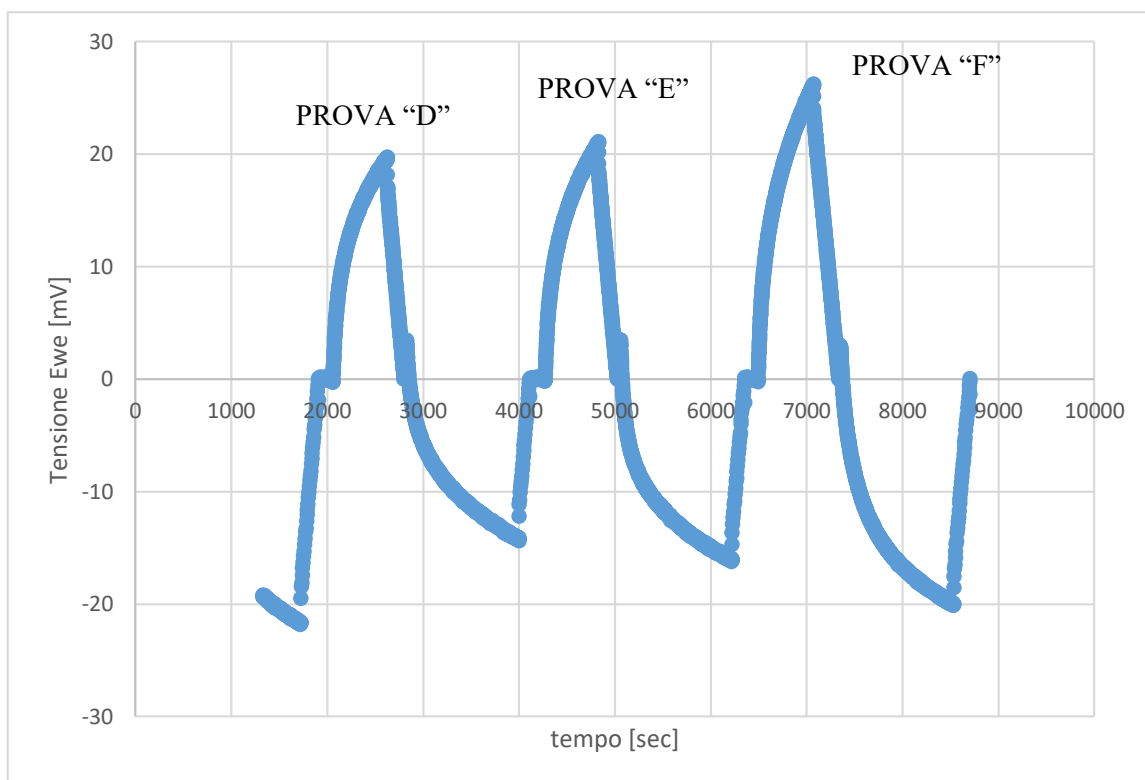


Figura 4.13: Esito test effettuati con Cella n°2

La prova D, effettuata con la Cella n°2 è stata effettuata con 16% di CO₂ (4.8 ml/min) e 84% N₂, (25.2 ml/min) simulando così la condizione con CO₂ minima per BF gas (tabella 4.1), raggiungendo un livello di tensione di 20 mV.

La prova E, effettuata con la Cella n°2 è stata effettuata con 17.2% di CO₂ (5.2 ml/min) e 82.8% N₂ (24.8 ml/min), simulando così la condizione con CO₂ da tabella 4.1 tipica per il BOF gas, raggiungendo un livello di tensione di 22 mV.

La prova F, effettuata con la Cella n°2 è stata effettuata con 26% di CO₂ (7.8 ml/min) e 74% N₂ (22.2 ml/min), simulando così la condizione con CO₂ massima per BF gas (tabella 4.1), raggiungendo un livello di tensione di 25 mV.

Conclusioni: i test effettuati hanno evidenziato che il dispositivo di cattura della CO₂ progettato e costruito dal Politecnico di Torino è in grado di funzionare anche con miscele di gas aventi una % di CO₂ relativamente bassa, rispetto al flusso 100% CO₂ utilizzato in precedenza.

Per poter procedere ai dimensionamenti necessari e scalare il dispositivo in funzione delle portate di una acciaieria, è necessario effettuare ulteriori prove on-site per escludere che la presenza di elementi nella miscela come CO, H₂, CH₄ possano interferire con l'assorbimento della CO₂ da parte del liquido ionico.

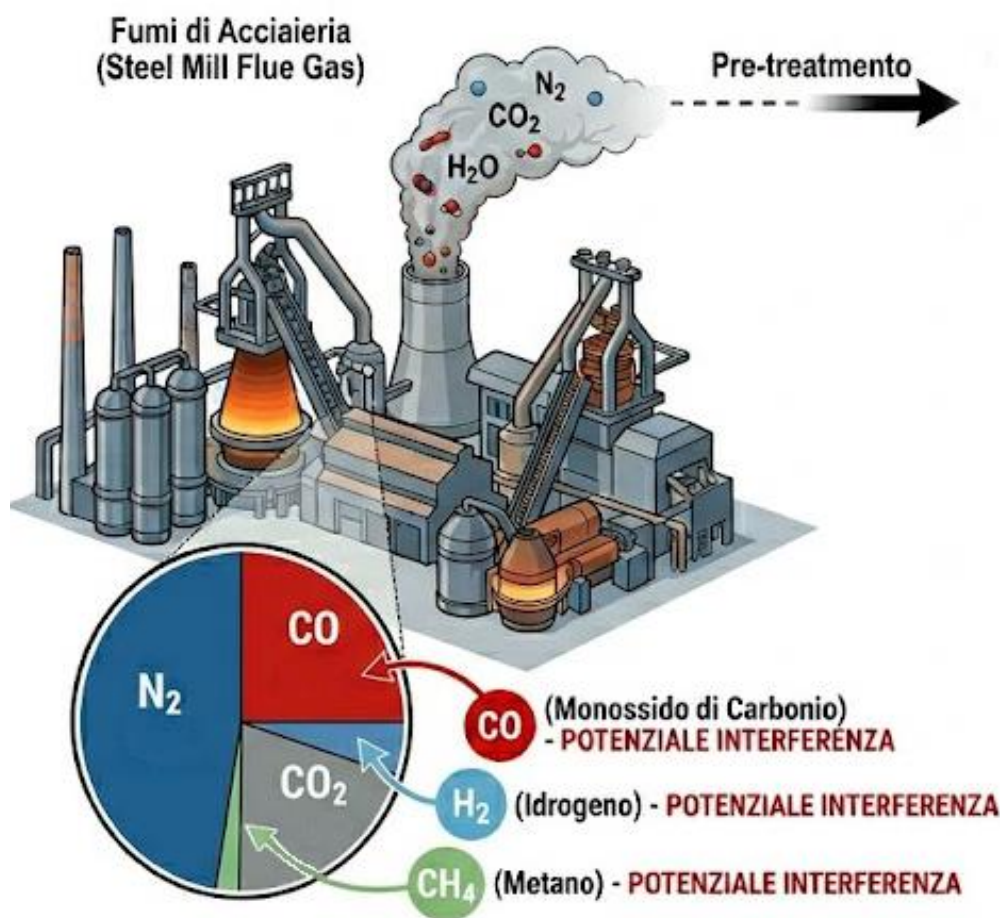


Figura 4.14: Composizione tipica fumi acciaieria con ciclo integrale

4.3 Il simulatore En-ROADS e il baseline scenario

En-ROADS è un simulatore di scenari climatici che consente di esplorare l'impatto che decine di politiche, tra le quali l'elettrificazione dei trasporti, la tassazione del carbonio, il miglioramento delle pratiche agricole, l'utilizzo dell'idrogeno, hanno su centinaia di fattori quali la temperatura, la concentrazione di CO₂ atmosferica, la qualità dell'aria e l'innalzamento del livello del mare.

Sviluppato da Climate Interactive, MIT Sloan e Ventana Systems, En-ROADS è un modello di dinamica dei sistemi accuratamente basato sulle migliori conoscenze scientifiche disponibili ed è stato calibrato rispetto a un'ampia gamma di modelli integrati esistenti di valutazione, clima ed energia. Il simulatore è disponibile gratuitamente online.

Nei paragrafi successivi, si andrà ad esplorare le main features di En-ROADS inerenti l'idrogeno e si andrà a definire uno scenario (che per semplicità chiameremo "WB2") che possa permettere alla temperatura media globale di restare *well below 2°C*, in linea con l'accordo di Parigi.

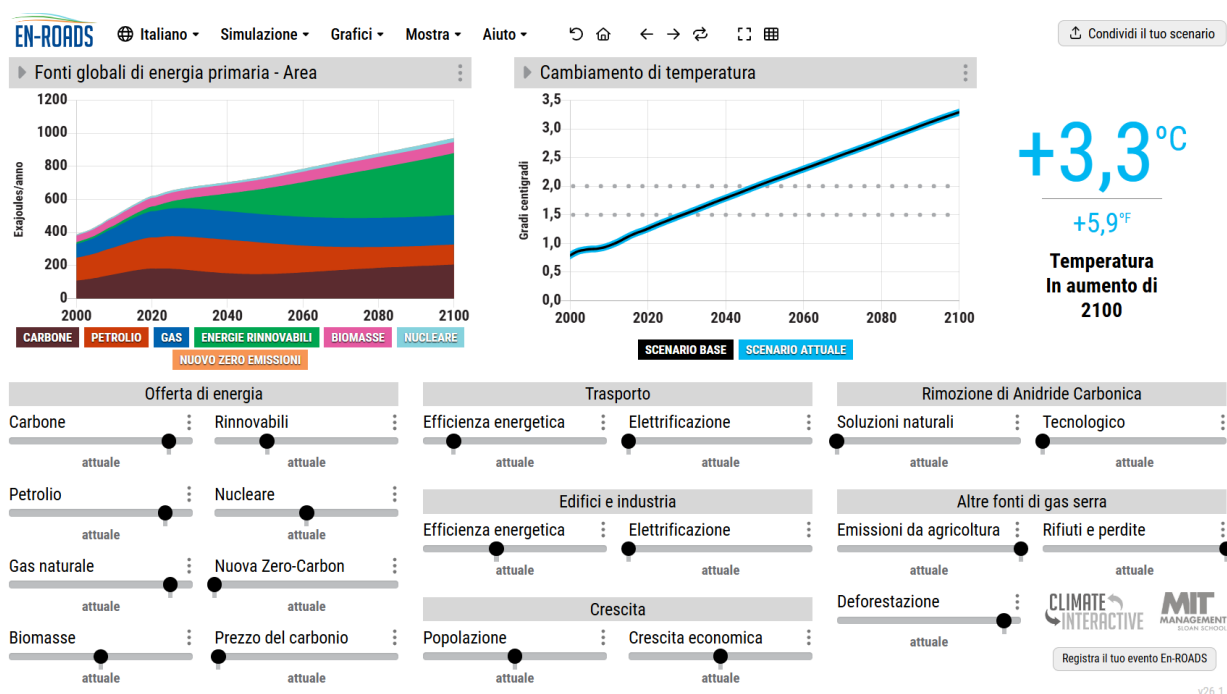


Figura 4.15: Scenario base del simulatore En-ROADS

Il *baseline scenario* di En-ROADS (fig. 4.15) rappresenta lo stato del mondo nelle attuali condizioni tecnologiche, politiche e di investimento globali. Lo scenario di base è progettato per essere un punto di partenza ragionevole da cui testare vari cambiamenti nelle politiche e nelle soluzioni e valutare gli impatti sul nostro clima globale.

Questo scenario non include gli impegni nazionali o aziendali a zero emissioni nette e non include i contributi determinati a livello nazionale (NDC) dei paesi ai sensi dell'Accordo di Parigi o la continuazione a lungo termine di altre politiche nazionali. L'aumento di temperatura media globale al 2100 stimato nel *baseline scenario* è di +3.3 °C rispetto ai livelli pre-industriali.

4.3.1 L'idrogeno per la transizione energetica

Oggi la maggior parte dell'idrogeno viene utilizzata come materia prima industriale (fig. 4.16). L'utilizzo dell'idrogeno per decarbonizzare la siderurgia (settore *hard to abate*) è stato trattato nei capitoli precedenti di questo lavoro.

Per convertire la produzione di idrogeno da exajoule all'anno (10^{18} J/anno) a milioni di tonnellate all'anno (Mt/anno), occorre moltiplicare per il coefficiente 8,33. In altre parole, 100 milioni di tonnellate di idrogeno equivalgono approssimativamente a 12 exajoule di energia.

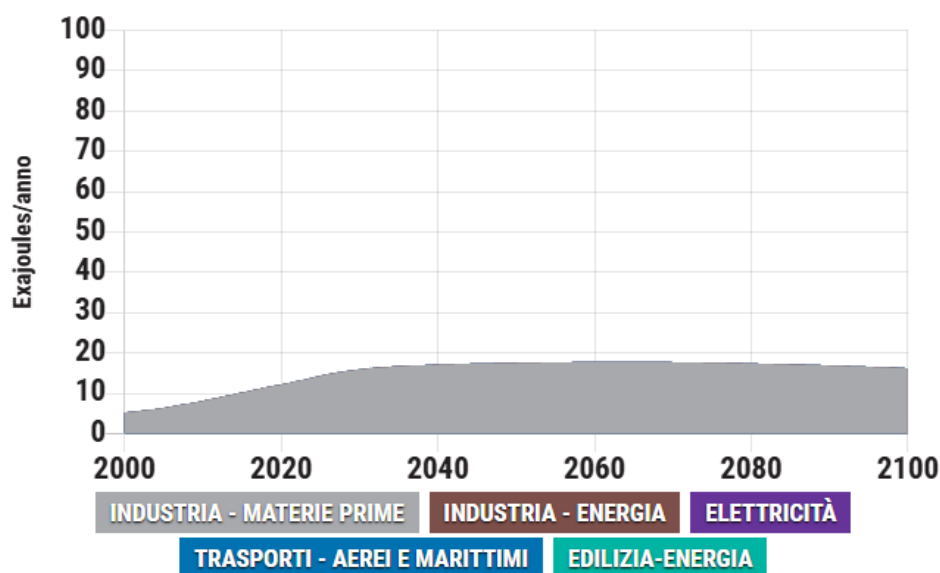


Figura 4.16: Produzione di idrogeno per utilizzo nello scenario base

Industria - Materie prime: Idrogeno utilizzato come materia prima, ad esempio per produrre ammoniaca per fertilizzanti e refrigeranti, metanolo per prodotti chimici e carburanti e nella raffinazione del petrolio. Nel nuovo scenario WB2, questa quota di utilizzo resterà invariata.

Industria - Energia: Uso diretto dell'idrogeno come combustibile, in particolare nella produzione di acciaio e ferro. Per il nuovo scenario WB2, questa quota di utilizzo è di circa 12 EJ/anno, andando ad agire sull'opzione di En-ROADS dedicata ai sussidi per le apparecchiature a idrogeno destinate all'industria e alla produzione oltre che la realizzazione di infrastrutture di rifornimento aggiuntive per soddisfare la futura domanda di idrogeno nelle apparecchiature industriali, oltre a quanto indicato dalla domanda attuale. Il sussidio (50% del costo) è graduale nell'arco di 10 anni.

Elettricità: Idrogeno utilizzato per immagazzinare energia che può essere usata quando solare ed eolico non sono disponibili per la generazione elettrica. Nel nuovo scenario WB2, questa quota è di circa 13 EJ/anno, andando ad agire sul cursore di En-ROADS (fig. 4.17) dedicato ai sussidi per la produzione di idrogeno verde (-3.0 \$/kg H₂) e sulla riduzione dei costi grazie all'accumulo di idrogeno (-50%). Questi costi includono lo stoccaggio a lungo termine dell'idrogeno (ad esempio, in caverne di sale sotterranee o serbatoi di stoccaggio fuori terra), nonché i costi di tubazioni, valvole di controllo e sistemi di sicurezza in loco.

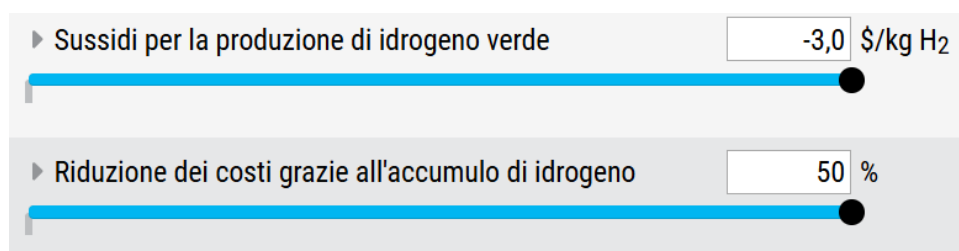


Figura 4.17: Idrogeno da energia eolica e solare e per l'accumulo di elettricità

Trasporti - Aerei e marittimi: Uso diretto dell'idrogeno come combustibile per il trasporto aereo e marittimo, in aerei e navi. Nel nuovo scenario WB2, questa quota è di circa 8 EJ/anno, andando ad agire sul cursore di En-ROADS (fig.4.18) dedicato ai sussidi sull'acquisto di nuove imbarcazioni (navi e aeromobili) alimentate a idrogeno.

Il sussidio si applica al costo di acquisto iniziale dell'intera imbarcazione a idrogeno ed è introdotto gradualmente nell'arco di 10 anni.

Questo cursore supporta anche la realizzazione di infrastrutture di rifornimento aggiuntive per soddisfare la futura domanda di idrogeno nel settore aeronautico e marittimo, in aggiunta a quanto indicato dalla domanda attuale. Il trasporto aereo e marittimo a livello globale rappresenta circa il 15% del trasporto (IEA WEO, 2025).

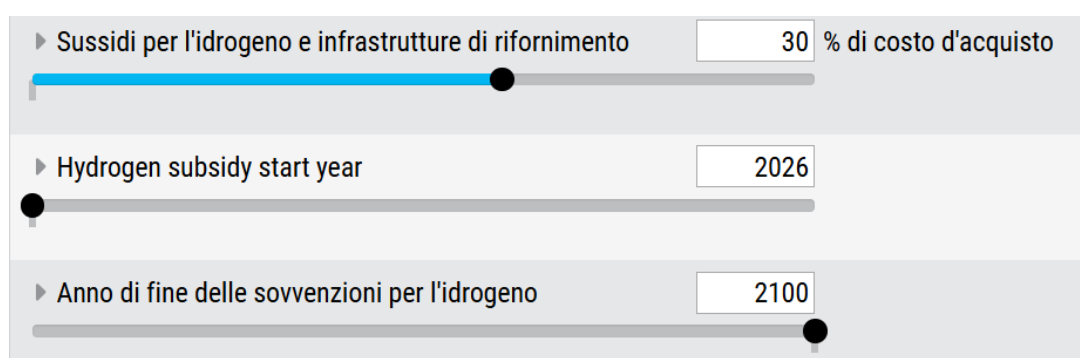


Figura 4.18: Idrogeno per trasporti aerei e marittimi

Edilizia - Energia: Uso diretto dell'idrogeno come combustibile in edifici commerciali e residenziali. Nel nuovo scenario WB2, questa quota è di circa 15 EJ/anno, andando ad agire sul cursore di En-ROADS (fig.4.19) dedicato ai sussidi per le apparecchiature a idrogeno destinate all'uso in edifici residenziali e commerciali. Questo riduce il costo di acquisto iniziale di apparecchiature, come quelle per il riscaldamento e la cottura che utilizzano l'idrogeno per la produzione di energia negli edifici. Il sussidio è erogato gradualmente nell'arco di 10 anni.

Questo cursore supporta anche la realizzazione di infrastrutture di rifornimento aggiuntive per soddisfare la futura domanda di idrogeno nelle apparecchiature residenziali e commerciali, in aggiunta a quanto indicato dalla domanda attuale.

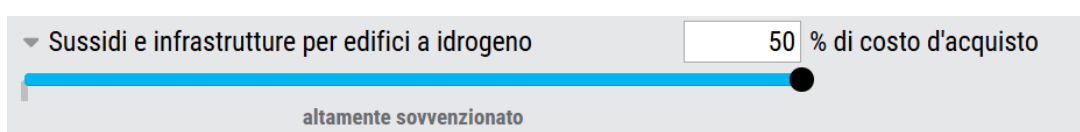


Figura 4.19: Idrogeno per edifici residenziali e commerciali

Nella figura 4.20 è visibile la nuova produzione stimata di idrogeno al 2100 nello scenario WB2, come descritto nei punti precedenti. In termini di aumento di temperatura globale al 2100, l'utilizzo dell'idrogeno come da scenario WB2 è stimato dal simulatore con una riduzione di **0.1°C** rispetto al *baseline* scenario.

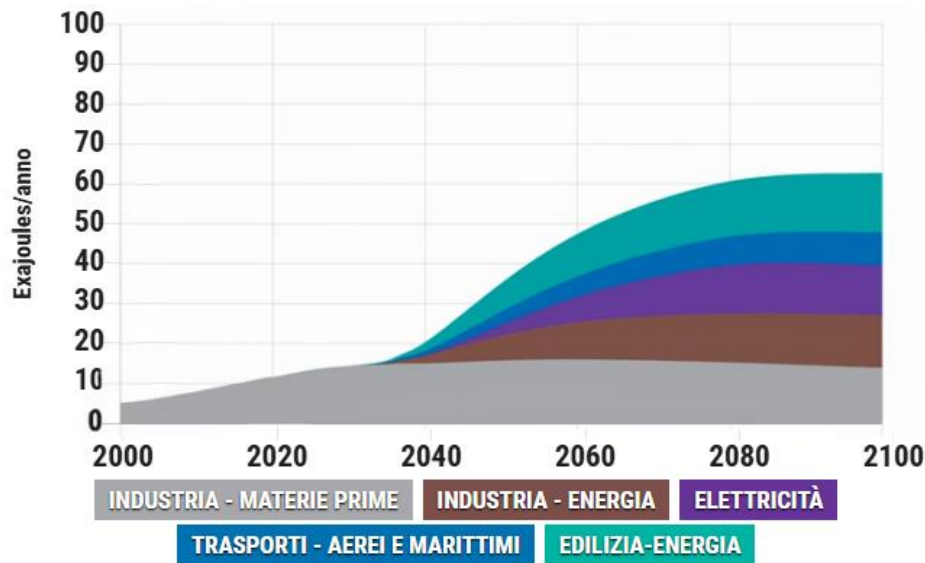


Figura 4.20: Produzione di idrogeno per utilizzo nello scenario WB2

4.3.2 Raggiungere lo scenario WB2

Per arrivare all'obiettivo di scendere ben al di sotto dei 2°C di aumento della temperatura globale al 2100, utilizzare l'idrogeno non basta. Occorre agire simultaneamente su una serie di fattori, ognuno dei quali è responsabile con un contributo più o meno grande in termini di emissioni di gas climalteranti.

Efficienza energetica degli edifici e dell'industria: include la costruzione di edifici ben isolati e la riduzione della quantità di energia che le fabbriche utilizzano. Pratiche efficienti dal punto di vista energetico possono far risparmiare denaro riducendo il fabbisogno energetico e migliorare la salute delle persone.

Il cambiamento è previsto nella quantità di energia utilizzata da nuovi edifici, industria, elettrodomestici e altri macchinari (inclusa la coibentazione degli edifici). Questa è una misura del miglioramento annuale dell'intensità energetica per i nuovi edifici e l'industria, derivante dal cambiamento tecnologico.

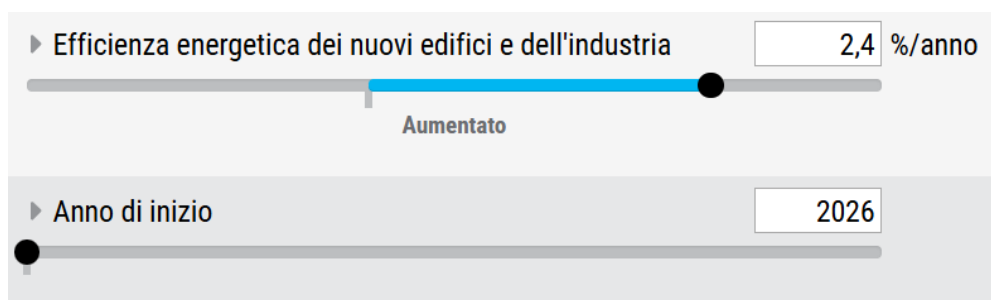


Figura 4.21: Efficienza energetica dei nuovi edifici e dell'industria

L'aumento di questo valore (dall'attuale 1.2%/anno del *baseline* scenario a 2.4%/anno dello scenario WB2, fig. 4.21) aumenta i tassi di miglioramento dell'intensità energetica media globale, che riduce la domanda di energia. Questa azione verrà introdotta gradualmente nell'arco di 10 anni.

In termini di aumento di temperatura globale al 2100, l'efficientamento energetico introdotto come da scenario WB2 si traduce con una riduzione di **0.15 °C** rispetto al *baseline* scenario.

Carbone: Il carbone è il combustibile fossile più dannoso in termini di emissioni di carbonio, nonché degli inquinanti atmosferici che causano gravi impatti sulla salute. Tuttavia, è una fonte di energia dominante a livello globale, perché è relativamente economica da estrarre e trasportare.

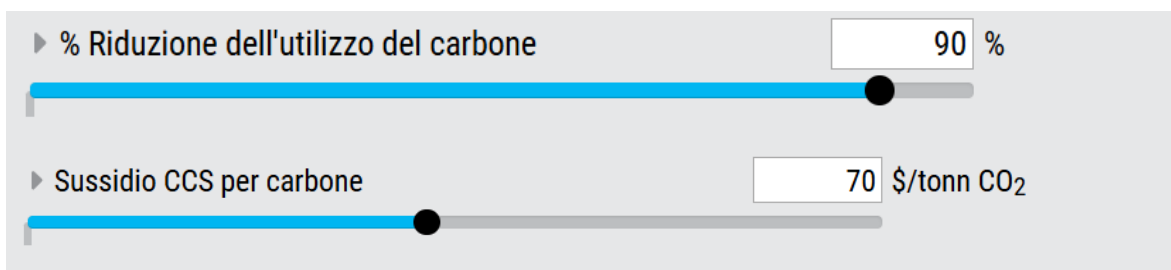


Figura 4.22: Phase-out dal carbone inserita nello scenario WB2 e sussidio CCS

Nello scenario WB2 è stata impostata una riduzione dell'utilizzo del carbone (il famoso *phase-out* che ad ogni COP ci si augura e che viene puntualmente disatteso) del 90% nell'arco di 40 anni. Parallelamente, è stato anche considerato un sussidio per l'utilizzo della tecnologia di cattura e stoccaggio del carbonio (CCS) negli impianti ancora operativi.

In termini di aumento di temperatura globale al 2100, la tassazione introdotta sul carbone come da scenario WB2 si traduce con una riduzione di **0.2 °C** rispetto al *baseline* scenario.

Petrolio: Il petrolio è un combustibile fossile che viene ampiamente utilizzato in auto, navi e aerei; è anche usato per l'industria, il riscaldamento e l'elettricità. L'accesso al petrolio ha scatenato gravi conflitti e le fuoriuscite di petrolio costituiscono una minaccia costante per gli ecosistemi e l'acqua.

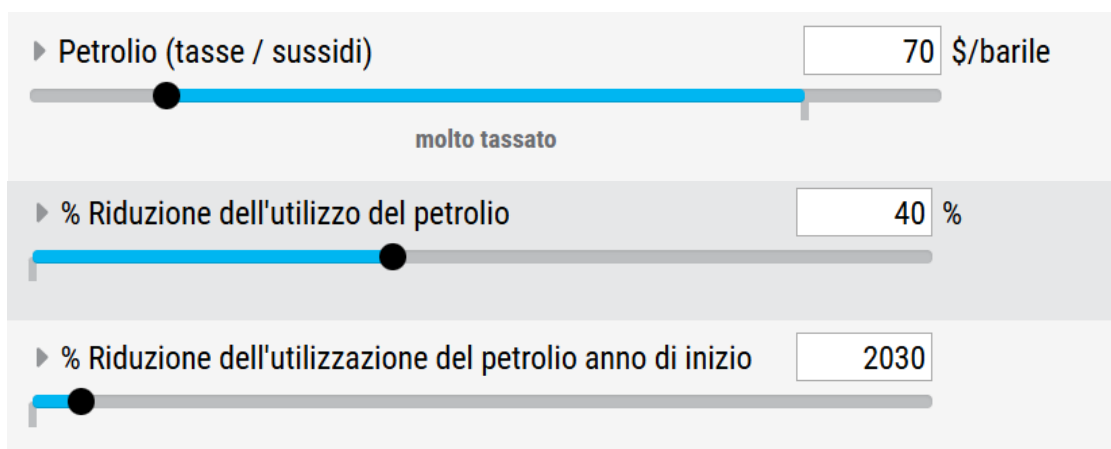


Figura 4.23: Tassazione sul petrolio e relativo phase-out nello scenario WB2

Nello scenario WB2 è stata inserita una tassa di 70 \$/ton (dollari per tonnellata di petrolio, fig. 4.23) ai produttori di petrolio, aumentando così di fatto il costo e disincentivandone fortemente l'utilizzo. Questa azione verrà introdotta gradualmente nell'arco di 10 anni.

In termini di aumento di temperatura globale al 2100, la tassazione introdotta sul carbone come da scenario WB2 si traduce con una riduzione di **0.1 °C** rispetto al *baseline* scenario.

Gas naturale: è un combustibile fossile utilizzato per l'elettricità, il riscaldamento e l'industria. Una volta bruciato, rilascia anidride carbonica (anche se inferiore al carbone e al petrolio) e, se disperso nell'aria, ha elevate proprietà climalteranti, avendo un GHP 80-85 volte superiore alla CO₂ considerando il breve periodo (20 anni). L'estrazione di gas naturale utilizza grandi quantità di acqua e può causare contaminazione delle falde.

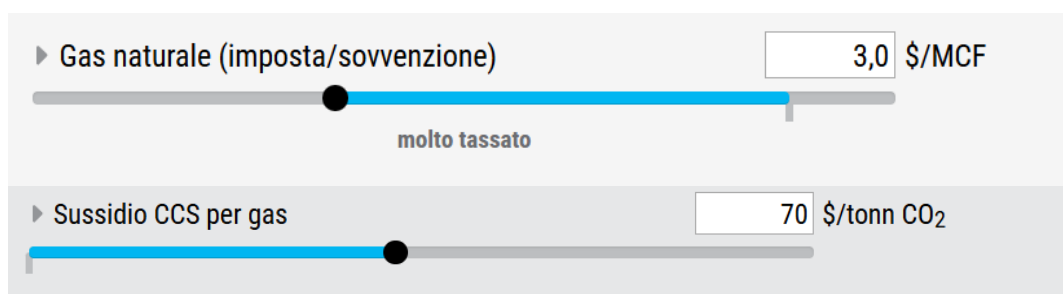


Figura 4.24: Tassazione sul gas naturale inserita nello scenario WB2

Nello scenario WB2 è stata inserita una tassa di 3.0 \$/MCF (dollars per 1000 cubic feet, fig. 4.24) ai produttori di petrolio, aumentando così di fatto il costo e disincentivandone fortemente l'utilizzo. Questa azione verrà introdotta gradualmente nell'arco di 10 anni.

In termini di aumento di temperatura globale al 2100, la tassazione introdotta sul carbone come da scenario WB2 si traduce con una riduzione di **0.05 °C** rispetto al *baseline* scenario.

Prezzo del carbonio: Imporre un prezzo globale sul carbonio rende le fonti energetiche più costose in base a quanta CO₂ rilasciano. I produttori di energia potrebbero scaricare i costi aggiuntivi ai loro clienti, pertanto la politica deve essere progettata per ridurre al minimo gli impatti sui più vulnerabili.

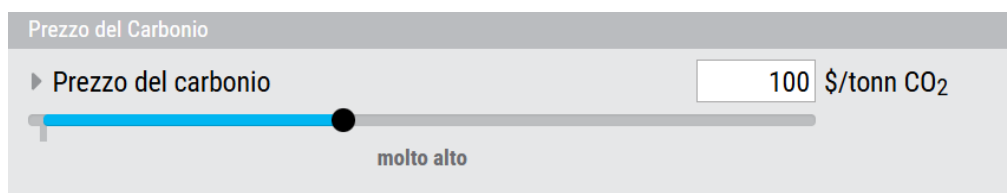


Figura 4.25: Prezzo del carbonio inserito nello scenario WB2

Nello scenario WB2 è stata inserita una tassa di 100 \$/ton (dollari per tonnellata di carbonio, fig. 4.25) simulando così una carbon tax o un sistema di scambio di quote di emissione (cap and trade). Questo prezzo viene introdotto gradualmente nel tempo, a partire dall'attuale valore medio globale. Questa azione verrà introdotta gradualmente nell'arco di 10 anni.

In termini di aumento di temperatura globale al 2100, la tassazione introdotta sul carbonio come da scenario WB2 si traduce con una riduzione di **0.2 °C** rispetto al *baseline* scenario.

Crescita economica: si ipotizza una crescita maggiore o minore dei beni prodotti e dei servizi forniti. La crescita economica, qui misurata per mezzo del Prodotto Interno Lordo (PIL) pro capite è un fattore chiave nel consumo di energia (fig. 4.26).

Il cursore di En-ROADS che gestisce la crescita annua a lungo termine del PIL pro capite (si tratta di una misura del tasso di crescita annuale della ricchezza, che stimola il consumo energetico) è stato impostato per lo scenario WB2 ad 1.0 %/anno (nello scenario *baseline* è di 1.5%/anno).

La crescita annuale media globale a breve termine del PIL pro capite (che è una misura dell'attuale tasso di crescita annuale della ricchezza e che determina il consumo di energia) è stato invece impostato per lo scenario WB2 a 2.0 %/anno (nello scenario *baseline* è di 2.5%/anno).

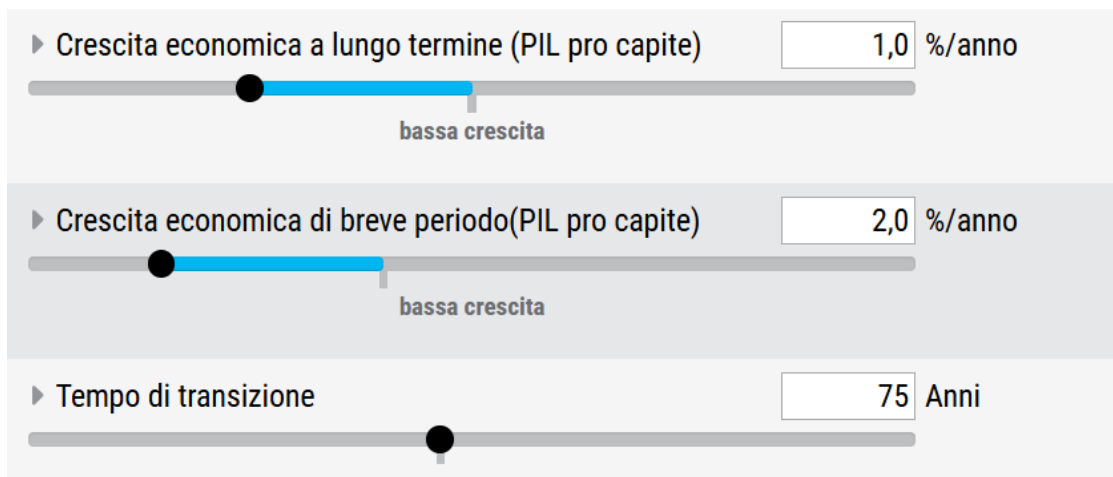


Figura 4.26: Ipotesi sulla crescita economica nello scenario WB2

In termini di aumento di temperatura globale al 2100, la riduzione della crescita economica come da scenario WB2 si traduce con una riduzione di **0.15 °C** rispetto al *baseline* scenario.

Rimozione della CO₂ basata sulla natura: qui vengono prese in considerazione l'espansione delle foreste (rimboschimento), il ripristino di quelle degradate, l'implementazione di pratiche agricole che catturano il carbonio e la produzione di biochar.

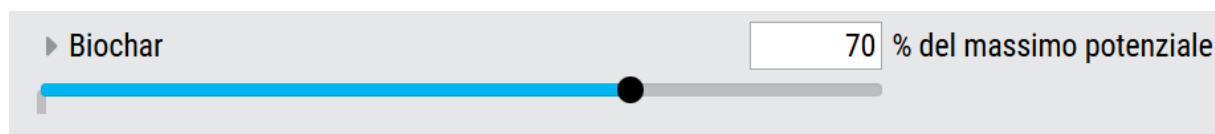


Figura 4.27: Utilizzo del biochar per la rimozione della CO₂ nello scenario WB2

Il biochar è materia organica che è stata trasformata in carbone di legna e poi sepolta per trattenere il carbonio.

Tramite il cursore di En-ROADS visibile in fig. 4.27, si può controllare l'aumento totale della rimozione dell'anidride carbonica per mezzo del biochar su larga scala, dove il 100% è la quantità massima di carbonio che potrebbe essere rimossa (per lo scenario WB2 è stato considerato il 70% del massimo potenziale).

Per quanto riguarda invece la percentuale del terreno disponibile utilizzato per la coltivazione di nuove foreste, si fa riferimento alla politica riguardante la piantumazione di alberi su terreni come i pascoli ed esclude la piantumazione in aree come terreni agricoli e tundra.

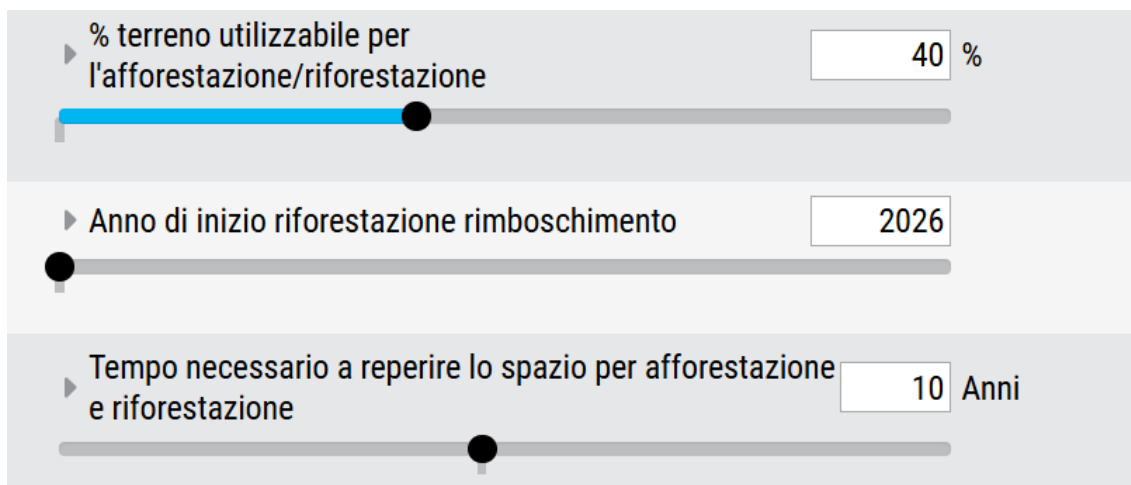


Figura 4.28: Contributo dell'afforestazione/riforestazione nello scenario WB2

Questi metodi basati sulla natura possono rimuovere l'anidride carbonica dall'atmosfera e immagazzinarla nelle piante e nel suolo. Tuttavia, questo carbonio potrebbe essere nuovamente rilasciato se il territorio viene alterato, sia attraverso la pratica dell'agricoltura che di eventi accidentali come gli incendi.

In termini di aumento di temperatura globale al 2100, l'utilizzo dei metodi sopra descritti all'interno dello scenario WB2 si traduce con una riduzione di **0.1 °C** rispetto al *baseline* scenario.

Gestione dei rifiuti: è possibile variare il livello di adozione delle *best practice* per ridurre le emissioni nei rifiuti, nell'energia e nell'industria. Metano (CH₄), protossido di azoto (N₂O), anidride carbonica (CO₂) e gas fluorurati (HFC, PFC, SF₆ e altri) vengono emessi in ingenti quantità specialmente dove ci sono inefficienze e cattive gestioni dei rifiuti.

Una migliore progettazione e gestione dei rifiuti può ridurre CH₄ e N₂O da discariche e acque reflue. La riparazione delle perdite può ridurre CH₄ nel settore dei combustibili fossili. L'efficienza dei processi può ridurre N₂O da processi industriali, come la produzione di fertilizzanti, e CO₂ da processi come la produzione di cemento.

Per i sistemi energetici, pratiche come il monitoraggio e la manutenzione delle condutture, possono ridurre le perdite di CH₄ nell'atmosfera durante l'estrazione, la lavorazione e la distribuzione dei combustibili fossili. Per i rifiuti, le migliori pratiche includono programmi di Riciclaggio, Riduzione, Riparazione, Riutilizzo (4R) compostaggio e cattura del gas.

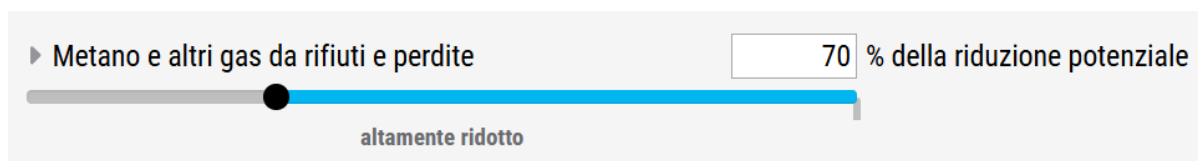


Figura 4.29: Contributo della gestione dei rifiuti nello scenario WB2

Per l'industria, le emissioni di N_2O da processi come la produzione di nylon e fertilizzanti possono essere mitigate grazie alla cattura o riduzione. Analogamente, la riduzione delle emissioni di gas fluorurati comporta il loro recupero da vecchie apparecchiature (specialmente condizionatori d'aria) e l'utilizzo di alternative nelle nuove apparecchiature.

In termini di aumento di temperatura globale al 2100, una migliore gestione dei rifiuti all'interno dello scenario WB2 (fig. 4.29) si traduce con una riduzione di **0.2 °C** rispetto al *baseline* scenario.

Emissioni da agricoltura e abitudini alimentari: mediante gli appositi cursori del simulatore EnROADS, è possibile impostare il livello di adozione delle migliori pratiche sulle emissioni in agricoltura e nelle abitudini alimentari (fig. da 4.30 a 4.34).

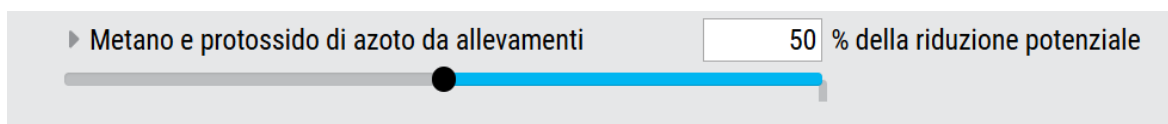


Figura 4.30: Livello di riduzione di CH_4 e N_2O da allevamenti nello scenario WB2

Questo cursore controlla la percentuale dell'azione massima possibile per ridurre le emissioni di metano (CH_4) e protossido di azoto (N_2O) del bestiame e per lo scenario WB2 è stato impostato al 50%.

Ciò rappresenta l'adozione delle migliori pratiche per ridurre la fermentazione enterica nel bestiame (ad esempio, migliorare la salute degli animali e l'uso di additivi per mangimi), una migliore gestione del letame e razze a basse emissioni.

Queste pratiche influiscono sull'intensità delle emissioni del bestiame, ovvero sulle emissioni per tonnellata di prodotti animali.

Il potenziale massimo raggiunge un fattore minimo di emissione del bestiame di 30 kg/ton per CH_4 e 0,05 kg/ton per N_2O , in linea con Gerber, et al. (2013).

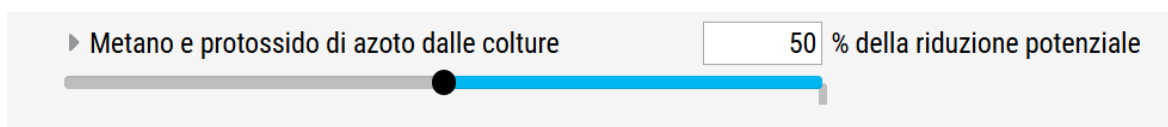


Figura 4.31: Livello di riduzione di CH_4 e N_2O dalle colture nello scenario WB2

Il cursore visibile in fig. 4.31 controlla la percentuale dell'azione massima possibile per ridurre le emissioni di metano (CH_4) e protossido di azoto (N_2O) delle colture e per lo scenario WB2 è stato impostato al 50%.

Rappresenta l'adozione delle migliori pratiche in materia di emissioni, come la bagnatura e l'essiccazione alternate nella coltivazione del riso, l'ottimizzazione dell'applicazione dei fertilizzanti, l'uso di colture di copertura e la riduzione della lavorazione. Queste pratiche influiscono sull'intensità delle emissioni delle colture, ovvero sulle emissioni per tonnellata di produzione agricola per colture alimentari e mangimi per animali.

Il potenziale massimo raggiunge un fattore minimo di emissione delle colture di 0,1 kg/ton per CH_4 e 0,1 kg/ton per N_2O , in linea con Gerber, et al. (2013).

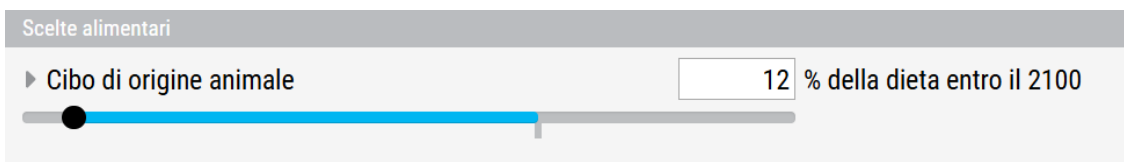


Figura 4.32: Presenza di cibo di origine animale nelle diete alimentari nello scenario WB2

In fig. 4.32 è visibile il cursore che regola la percentuale media globale di cibo di origine animale incluso nelle diete alimentari, misurato in peso. La media attuale è di circa il 24%, con un range che va dal 15% (nelle regioni meno ricche) a oltre il 40% (negli Stati Uniti).

Storicamente, la media è aumentata con l'aumento del PIL pro capite, poiché con l'aumentare della ricchezza le persone tendono ad aggiungere più carne e latticini alla propria dieta, fino a un certo punto.

Gli alimenti di origine animale, come latte, carne e uova, producono più gas serra per chilogrammo di cibo rispetto agli alimenti di origine agricola (fig. 4.33), necessitando parallelamente anche di un quantitativo maggiore di acqua e di suolo.

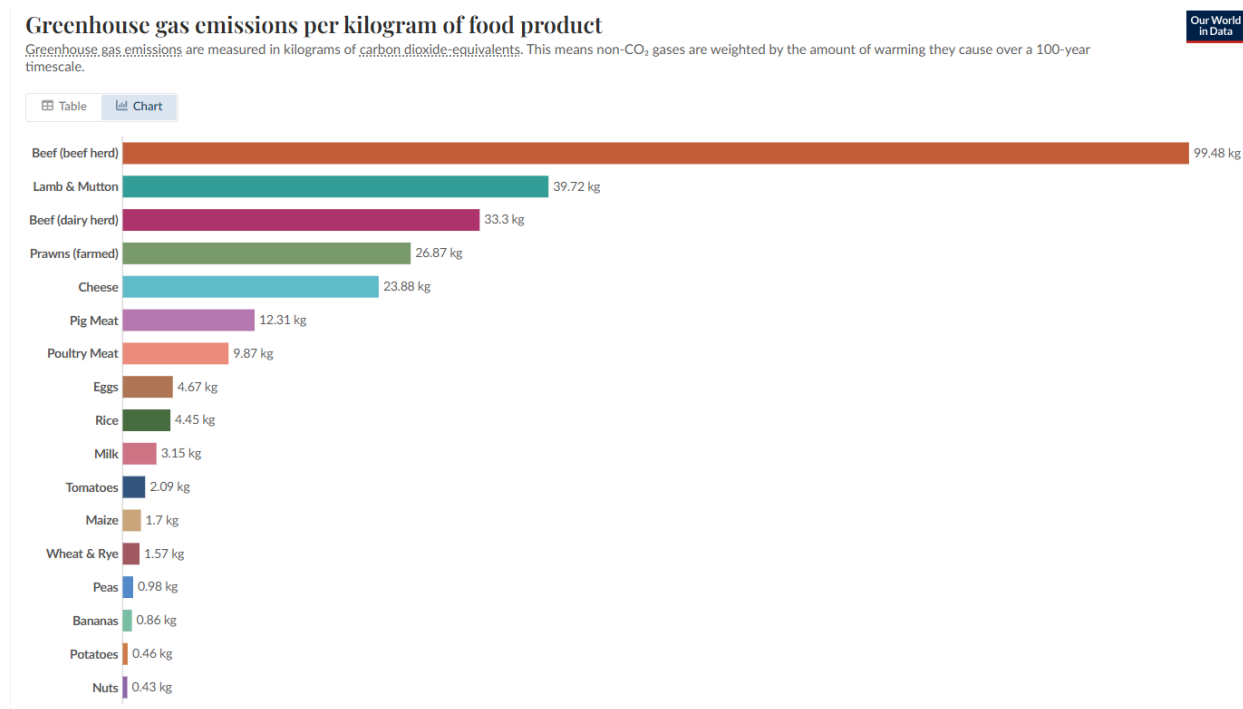


Figura 4.33: Emissioni di gas serra per kilogrammo prodotto di differenti tipi di alimenti

Il prof. Walter Willet MD, all'interno del report "Food Planet Health" di EAT-Lancet, chiarisce che: *"La transizione verso un'alimentazione sana entro il 2050 richiederà cambiamenti sostanziali nelle abitudini alimentari. Il consumo globale di frutta, verdura, frutta secca e legumi dovrà raddoppiare, mentre il consumo di alimenti come carne rossa e zucchero dovrà essere ridotto di oltre il 50%. Una dieta ricca di alimenti di origine vegetale e povera di alimenti di origine animale comporta benefici sia per la salute che per l'ambiente."*

Il cursore di figura 4.32 è stato dunque impostato per lo scenario WB2 a 12% (-50% rispetto al valore medio attuale del baseline scenario di En-ROADS).



Figura 4.34: Livello di adozione di buone pratiche in agricoltura e nelle scelte alimentari nello scenario WB2

Il cursore di fig. 4.34 regola la percentuale media globale di cibo prodotto ma non consumato, da raggiungere entro il 2100. La stima odierna del cibo che viene sprecato tra l'azienda agricola e il consumatore (o dai consumatori dopo l'acquisto) è del 30% (IPCC).

Inoltre, lo studio “Animal lives embodied in food loss and waste” pubblicato sulla rivista scientifica *Sustainable Production and Consumption*, ha stimato che ogni anno vengono sprecate 52,4 milioni di tonnellate di carne commestibile già senza ossa, che equivalgono a **18 miliardi di animali** allevati e uccisi e non consumati né da umani, né da altri.

I ricercatori dello studio sopra citato hanno sottolineato che si otterrebbe una riduzione fino al 50 per cento degli sprechi solo con l'applicazione degli Obiettivi di sviluppo sostenibile dell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite, obiettivi sui quali siamo ancora molto indietro. Dunque, il cursore di fig. 8.19 è stato impostato su 15% (-50% rispetto all'attuale).

In termini di aumento di temperatura globale al 2100, quanto sopra impostato inerentemente a emissioni da agricoltura e abitudini alimentari all'interno dello scenario WB2, si traduce con una riduzione di **0.2 °C** rispetto al *baseline* scenario.

Deforestazione e degradazione delle foreste antiche: per mezzo del cursore di En-ROADS visibile in fig. 4.35, è possibile impostare un trend nel tasso di protezione delle foreste per modificare l'attuale tendenza alla deforestazione e al degrado.

La deforestazione è la conversione dei terreni forestali ad altri usi, principalmente all'agricoltura. L'espansione dei terreni agricoli è una delle principali cause della deforestazione. Il degrado forestale è la perdita temporanea di foreste dovuta allo sfruttamento dei prodotti del legno o della biomassa.

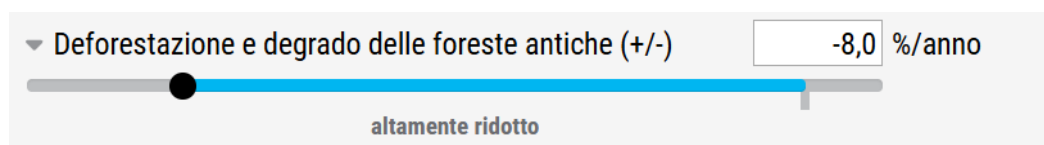


Figura 4.35: Riduzione della deforestazione nello scenario WB2

Il degrado delle foreste mature è il risultato dell'abbattimento di foreste più vecchie di 100 anni per la produzione di carta, legname e bioenergia, dove gli alberi vengono successivamente fatti ricrescere. Quando il degrado delle foreste mature si riduce, la domanda di alberi viene spostata verso le foreste più giovani.

Alla COP30 di Belém, svoltasi a novembre 2025 proprio in un luogo simbolico come l'Amazzonia, non è stato raggiunto un accordo vincolante per fermare la deforestazione e i negoziati hanno deluso le aspettative, portando a risultati deboli e a una roadmap poco chiara per porre fine alla deforestazione e all'utilizzo dei combustibili fossili.

Sono stati fatti passi avanti su meccanismi volontari, come il nuovo fondo Tropical Forest Forever Facility (TFFF) per le foreste tropicali, e si è rafforzato il ruolo dei popoli indigeni, ma senza un impegno globale vincolante e con le contraddizioni tra sviluppo e conservazione che continuano a emergere.

In termini di aumento di temperatura globale al 2100, la riduzione della deforestazione con un tasso dell'8.0 %/anno all'interno dello scenario WB2, si traduce con una riduzione di **0.05 °C** rispetto al *baseline* scenario.

Rimozione tecnologica della CO₂ dall'atmosfera (direct air capture): è possibile impostare il livello della rimozione di CO₂ grazie alla cattura e stoccaggio diretto del carbonio dall'atmosfera (DACCS) e dalla mineralizzazione migliorata, dove il 100% è il livello di sforzo più alto (fig. 4.36).

Sebbene queste tecnologie offrano soluzioni promettenti per ridurre il carbonio atmosferico, richiedono molta energia e investimenti per essere implementate su larga scala.

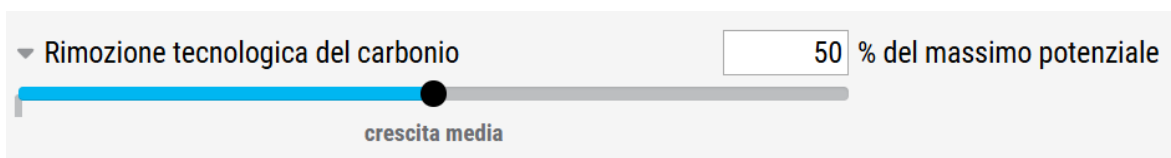


Figura 4.36: Utilizzo della direct air capture nello scenario WB2

In termini di aumento di temperatura globale al 2100, l'utilizzo della *direct air capture* al 50% del massimo potenziale all'interno dello scenario WB2, si traduce con una riduzione di **0.05 °C** rispetto al *baseline* scenario.

Efficienza energetica ed elettrificazione dei trasporti: per mezzo dei cursori di En-ROADS visibili in fig. 4.37 è possibile aumentare o ridurre l'efficienza energetica dei veicoli, delle spedizioni, dei viaggi aerei e dei sistemi di trasporto.

L'efficienza energetica include le auto ibride, i trasporti pubblici ampliati e i modi in cui le persone possono spostarsi usando meno energia. L'adozione di pratiche più efficienti dal punto di vista energetico può migliorare la salute pubblica (in quanto vi è una minore emissione di polveri sottili in atmosfera) e far risparmiare denaro.

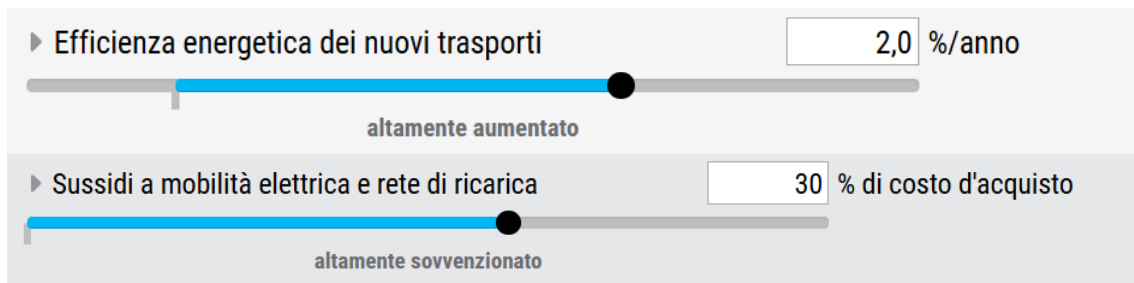


Figura 4.37: Efficienza energetica ed elettrificazione dei trasporti nello scenario WB2

In termini di aumento di temperatura globale al 2100, il miglioramento dell'efficienza energetica con un tasso del 2.0 %/anno e l'inserimento di sussidi del 30% alla mobilità elettrica all'interno dello scenario WB2, si traduce con una riduzione di **0.05 °C** rispetto al *baseline* scenario.

Tabella 4.2: Riepilogo impatti sulla temperatura media globale al 2100 dello scenario WB2

Baseline Scenario	Utilizzo dell'idrogeno	0,1 °C	Scenario WB2
	Efficienza energetica edifici e industria	0,15 °C	
	Carbone	0,2 °C	
	Petrolio	0,1 °C	
+3,3°C	Gas	0,05 °C	+1,7°C
	Prezzo del carbonio (carbon tax)	0,2 °C	
	Crescita economica	0,15 °C	
	Rimozione CO ₂ (natura)	0,1 °C	
	Gestione rifiuti	0,2 °C	
	Agricoltura e abitudini alimentari	0,2 °C	
	Deforestazione	0,05 °C	
	Rimozione CO ₂ (direct capture)	0,05 °C	
	Efficienza energetica ed elettrific. dei trasporti	0,05 °C	

Nella tabella 4.2 sono stati riepilogati i vari interventi effettuati per mezzo del simulatore di scenari climatici En-ROADS, descritti nel dettaglio nei paragrafi precedenti.

L'aumento di temperatura stimato al 2100 per rispetto ai livelli pre-industriali, è sceso da **+3.3°C** a **+1.7°C**, portandosi all'interno della fascia che corrisponde all'accordo di Parigi (fig. 4.38).

Di seguito alcune considerazioni in merito:

- La strada seguita per raggiungere il risultato di +1.7°C (scenario WB2) è solamente una delle molteplici che possono essere intraprese, agendo su parametri differenti e con intensità di azione/sussidi/tasse più o meno importanti.
- Il tasso attuale di crescita della popolazione mondiale non è stato modificato rispetto al *baseline* scenario, così come l'utilizzo del nucleare (tematiche ampiamente divisive).

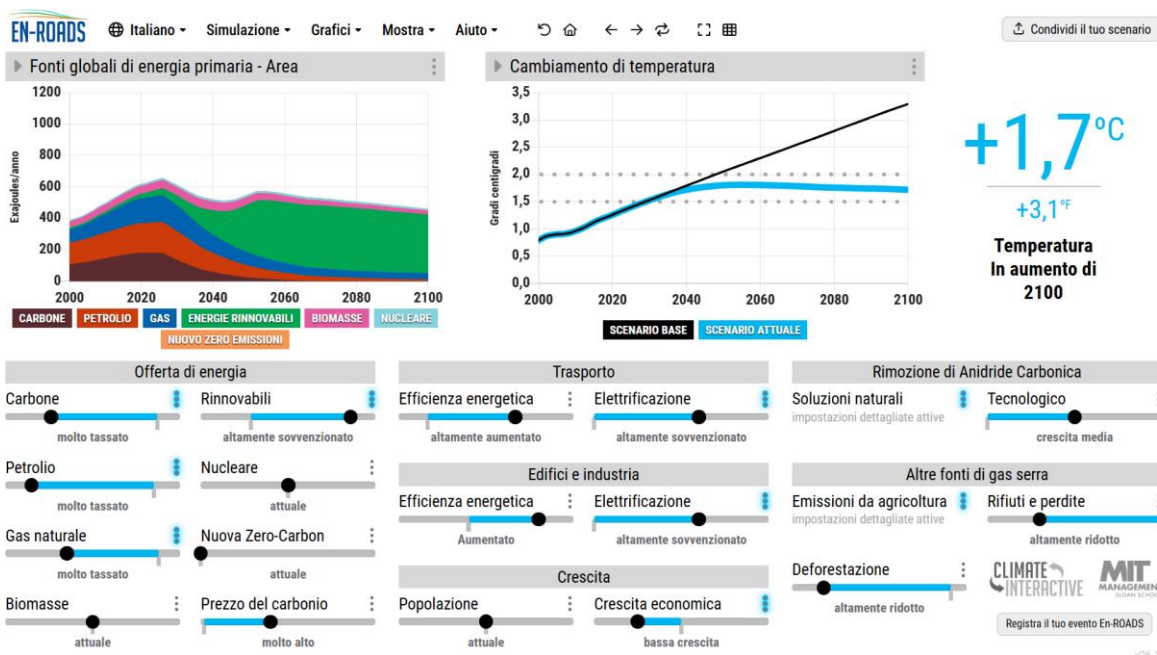


Figura 4.38: Scenario WB2 a seguito di introduzione riduzione emissioni

I grafici di Kaya, visualizzabili tramite En-ROADS (fig. 4.39), descrivono i driver della crescita delle emissioni di anidride carbonica da energia, che riflette circa i due terzi di tutte le emissioni di gas serra.

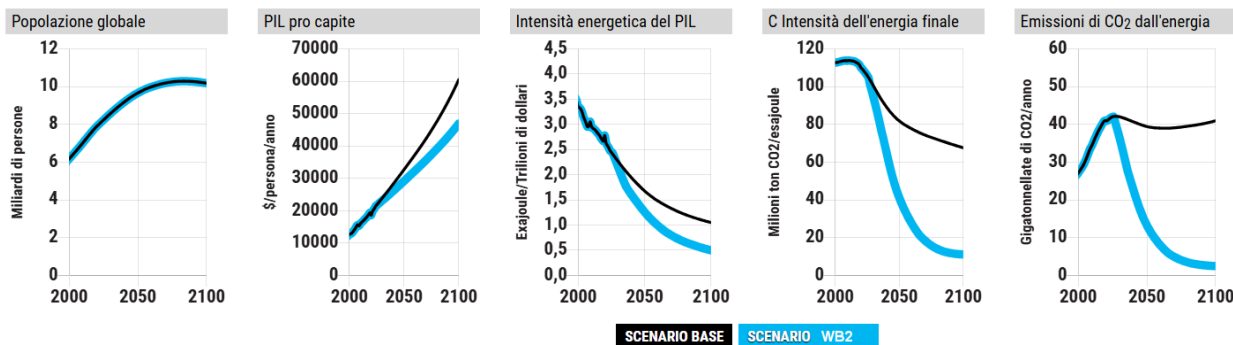


Figura 4.39: Grafici KAYA per lo scenario WB2

L'equazione seguente, messa a punto da Yoichi Kaya, un economista giapponese, studioso di politiche energetiche:

$$\text{Popolazione globale} \times \text{PIL pro capite} \times \text{Intensità energetica del PIL} \times \text{Intensità di carbonio dell'energia} = \text{Emissioni di CO}_2 \text{ da energia}$$

Le emissioni di anidride carbonica da energia sono il risultato di tutti e quattro i fattori moltiplicati insieme e, come è possibile vedere dalla riga nera che corrisponde al *baseline scenario* in fig. 4.39, le emissioni sono in crescita.

Poiché il livello di anidride carbonica nell'atmosfera è correlato alla temperatura, una maggiore concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera porta inevitabilmente ad un aumento delle temperature globali.

Nei grafici di fig. 4.40 sono rappresentate a SX le emissioni nette di CO₂ conseguenti alle impostazioni dello scenario WB2 e la concentrazione in atmosfera conseguente (409 ppm anziché 616 ppm stimate al 2100 dal *baseline scenario*). Da notare che ad una discesa repentina delle emissioni non corrisponde una discesa della concentrazione altrettanto veloce: questo a causa della permanenza delle molecole di anidride carbonica in atmosfera per migliaia di anni.

Uno sviluppo importante dell'efficienza della rimozione diretta (direct air capture) nei prossimi anni potrebbe favorire una discesa più rapida.

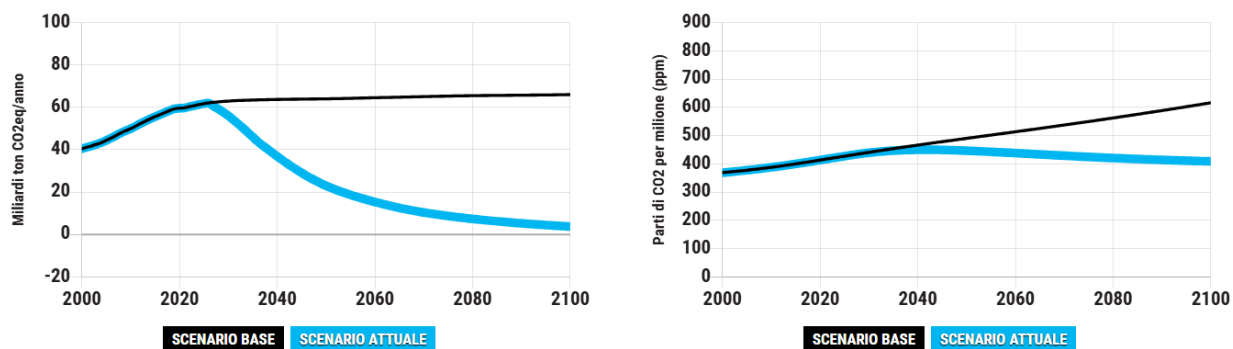


Figura 4.40: Emissioni nette di CO₂ e concentrazione di CO₂ in atmosfera per *baseline scenario* e scenario attuale (WB2)

4.3.3 Impatti concreti dello scenario WB2 rispetto a baseline scenario

Andiamo ora ad esaminare alcuni degli strumenti che il simulatore En-ROADS mette a disposizione per valutare gli effetti concreti di differenti scenari.

Temperatura: Nella mappa mondiale interattiva, è stata individuata a titolo di esempio la città di Torino che, nello scenario base, nel 2100 vedrà un aumento di $+4.1^{\circ}\text{C}$ rispetto ai livelli pre-industriali (fig. 4.41).

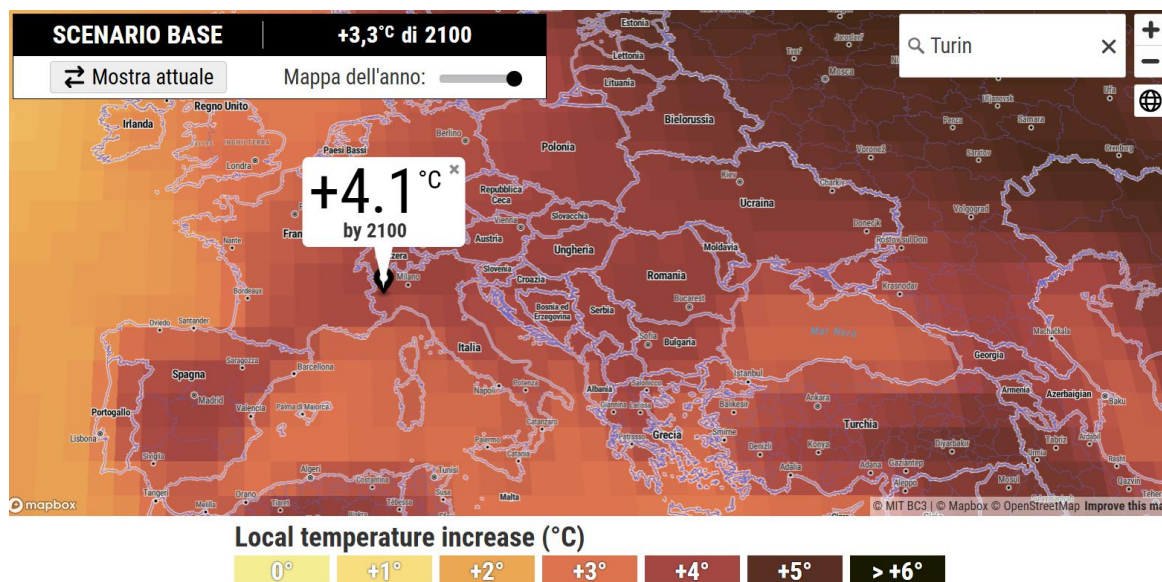


Figura 4.41: Aumento stimato di temperatura in Europa al 2100, *baseline* scenario

Per la stessa città di Torino, considerando invece lo scenario WB2, è stato calcolato dal simulatore un aumento di $+2.1^{\circ}\text{C}$ rispetto ai livelli pre-industriali (fig. 4.42).

Il fatto che rispetto alla media globale di $+1.7^{\circ}\text{C}$ ci sia una differenza positiva è spiegabile dal fatto che le terre emerse si scaldano maggiormente rispetto agli oceani. Inoltre, l'area del Mediterraneo è considerato un hot-spot climatico per via della conformazione del bacino (è sostanzialmente un grande lago).

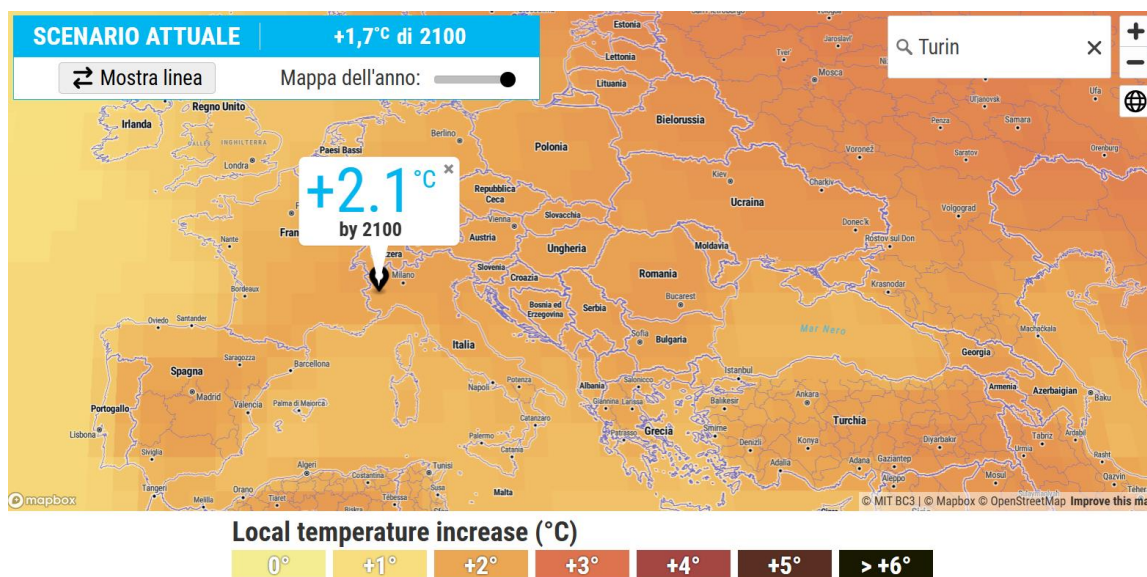


Figura 4.42: Aumento stimato di temperatura in Europa al 2100, scenario WB2

Frequenza di caldo estremo: è stimato il numero di anni in un periodo di 50 anni in cui la temperatura massima giornaliera sulla terra supera la soglia di calore estremo (fig. 4.43).

In questo grafico, la "soglia del caldo estremo" è la temperatura massima giornaliera verificatasi tra il 1850 e il 1900. I punti scuri rappresentano anni con temperature massime giornaliere superiori alla soglia del caldo estremo, mentre i punti chiari rappresentano anni con temperature massime giornaliere inferiori alla soglia del caldo estremo. soglia di calore estremo.

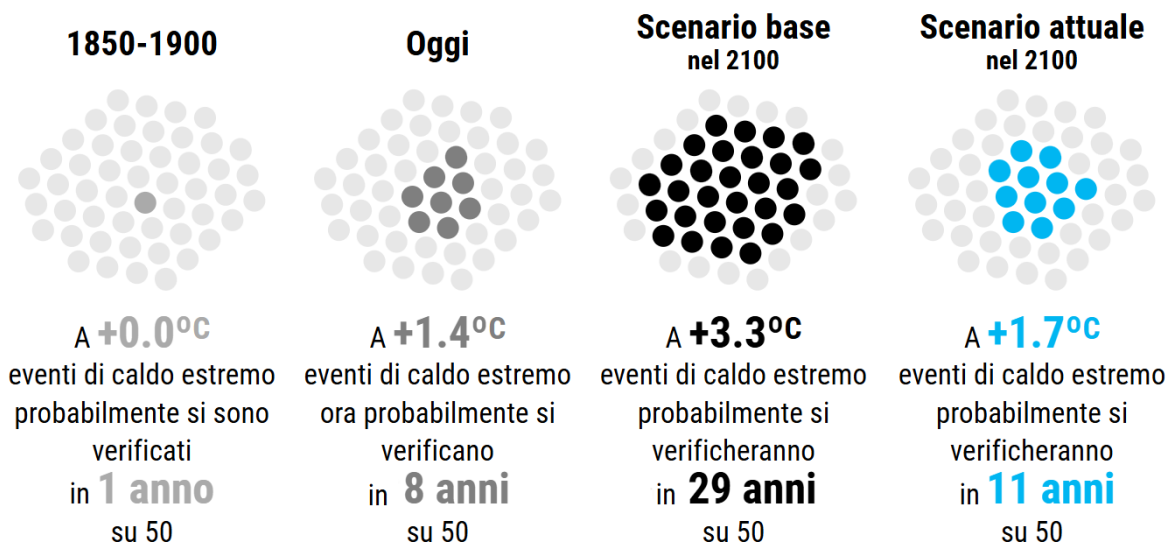


Figura 4.43: Frequenza di eventi di caldo estremo in periodi e scenari diversi

Morti per caldo estremo: è il numero di decessi ogni 100.000 persone ogni anno a causa dell'esposizione al calore, suddiviso per regione. L'esposizione prolungata al calore estremo aumenta il rischio di condizioni pericolose per la vita come stress da calore e colpo di calore. Ciò è particolarmente pericoloso per bambini, anziani e persone con malattie croniche. Con l'aumento delle temperature globali, gli eventi di calore estremo diventano più frequenti e intensi.

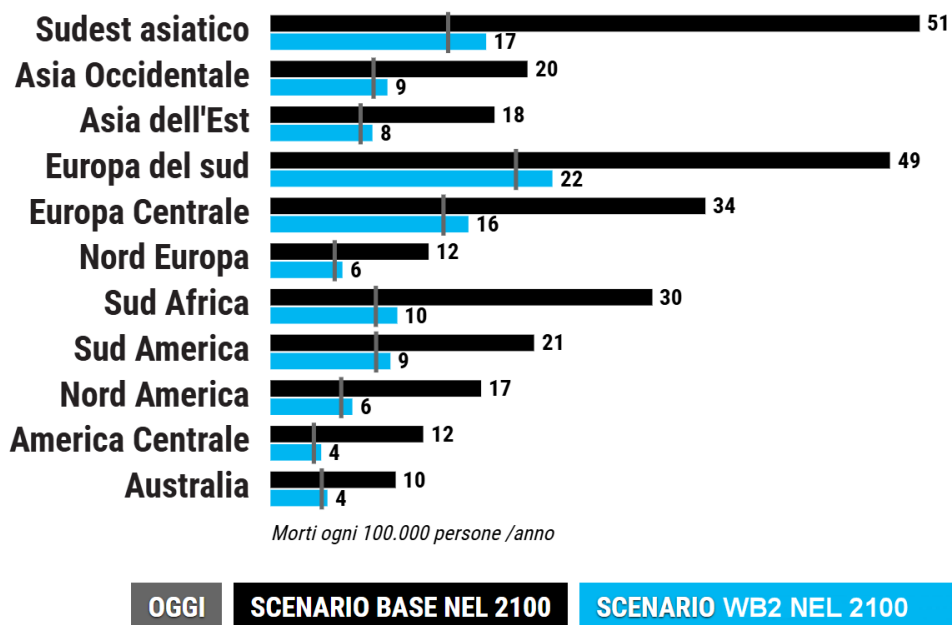


Figura 4.44: Morti per caldo estremo per regioni

I decessi per calore estremo sono misurati come decessi in eccesso, ovvero tassi di mortalità che superano quelli che ci si aspetterebbe normalmente senza calore estremo (fig. 4.44). A titolo di confronto, il tasso di mortalità globale medio per tutte le cause è di 739 decessi ogni 100.000 persone (calcolato da Vicedo-Cabrera 2018 e dalla Banca Mondiale). I tassi di mortalità per tutte le cause variano da 515 decessi ogni 100.000 persone nell'Asia occidentale a 1.074 decessi ogni 100.000 persone nell'Africa meridionale.

Secondo l'OMS, i morti causati dalle ondate di calore in Europa negli ultimi quattro anni sono stati ben 200.000.

Il grafico non presuppone misure di adattamento aggiuntive, come un più ampio accesso all'aria condizionata e alla sensibilizzazione dell'opinione pubblica. Esistono notevoli disparità nei tassi di mortalità correlati al calore sia all'interno che tra i paesi, influenzate dall'accesso alle risorse di raffreddamento e dalla consapevolezza pubblica.

A causa dei dati limitati, alcune regioni del mondo non sono incluse in questo grafico. Molte popolazioni in aree come la penisola arabica, l'Asia meridionale e la maggior parte dell'Africa sono altamente vulnerabili ai cambiamenti climatici e al caldo estremo, ma non ci sono ancora abbastanza ricerche per fornire stime affidabili per queste regioni. Si prevede che un ulteriore calore dovuto ai cambiamenti climatici avrà un impatto sproporzionato su queste aree rispetto ad altre regioni del mondo.

Perdita di PIL globale: nel grafico di fig. 4.45 è visibile la perdita di PIL globale, che è la differenza assoluta tra il prodotto mondiale lordo (PIL globale) nello scenario con e senza i danni climatici. Il PIL è misurato in trilioni \$/anno.

Baseline: Perdita di PIL globale dovuto al cambiamento climatico nello scenario di base.

Scenario WB2: Perdita di PIL globale dovuto al cambiamento climatico nello scenario WB2.

Il PIL globale nel 2024 e il PIL degli Stati Uniti nel 2024 sono inclusi come riferimenti per confrontare l'entità della perdita.

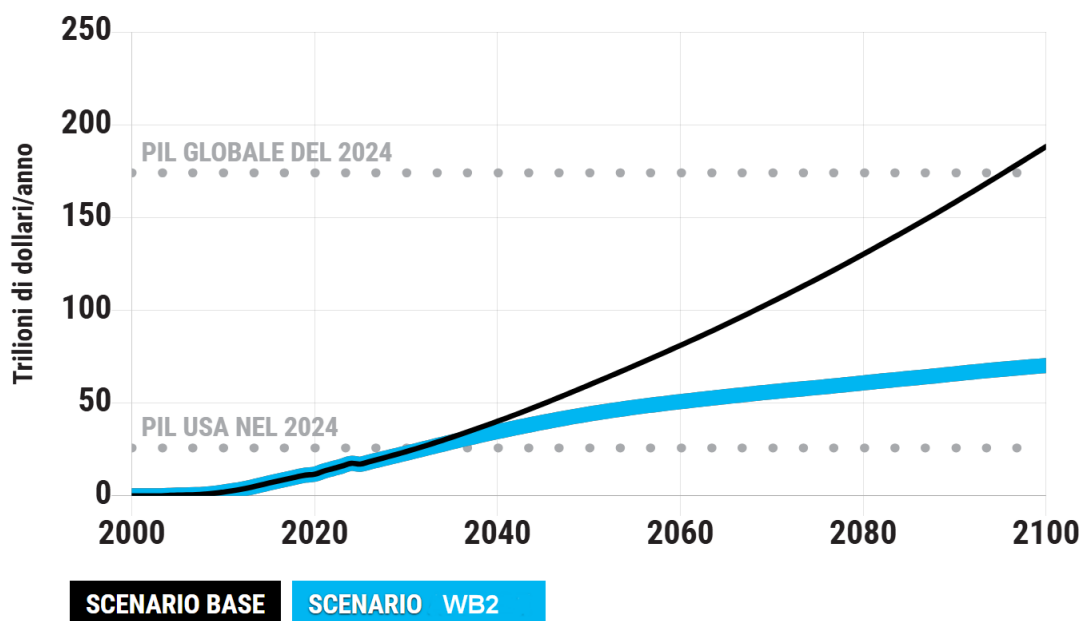


Figura 4.45: Perdita di PIL globale a seguito dei danni da cambiamento climatico

Acidificazione degli oceani e perdita di vita nell'oceano: nel grafico di fig. 4.46 è visibile il pH medio globale dell'oceano superficiale. Con la diminuzione del pH, l'acidità dell'acqua di mare aumenta. Il pH dell'oceano varia di 0,25 unità a seconda della posizione: le acque polari tendono a essere più basiche di quelle tropicali. Il pH medio dell'oceano preindustriale era di circa 8,18.

Quando l'anidride carbonica si dissolve nell'acqua di mare, reagisce con l'acqua per formare acido carbonico. Questo altera l'equilibrio chimico dell'oceano, riducendo la disponibilità di ioni carbonato di calcio su cui molti organismi fanno affidamento per costruire gusci e scheletri. L'acidificazione degli oceani indebolisce coralli, molluschi e altre forme di vita marina, minacciando ecosistemi vitali per la salute degli oceani.

La riduzione delle emissioni di CO₂ come da scenario WB2 rallenta inizialmente l'acidificazione degli oceani e, a partire dall'anno 2040, tende a riavvicinare il valore del pH al livello preindustriale.

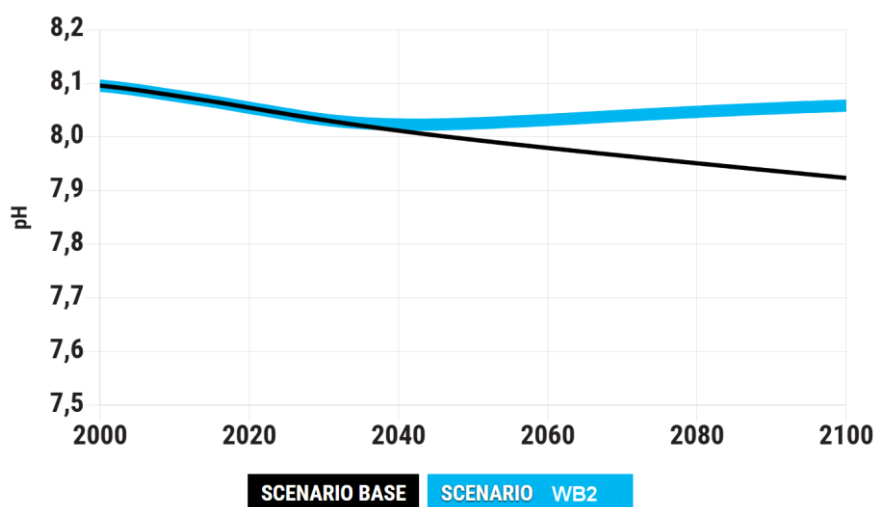


Figura 4.46: Acidificazione degli oceani

In figura 4.47 è visibile la quantità cumulativa di vita marina persa a causa del riscaldamento, misurata come percentuale di biomassa.

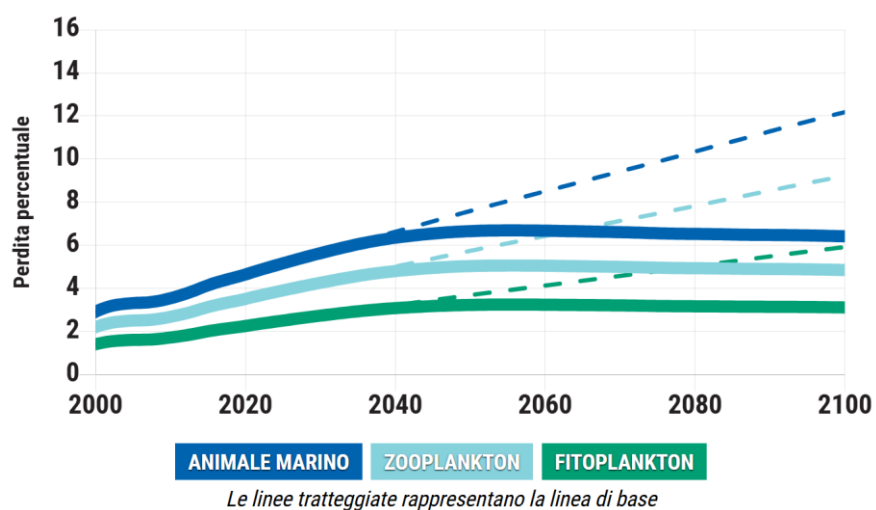


Figura 4.47: Perdita di vita nell'oceano dovuta al riscaldamento

La biomassa include tutta la vita oceanica, dal piccolo plancton ai grandi animali marini, e di solito è misurata dalla quantità di carbonio in quel materiale vivente. Il plancton, i piccoli organismi che vanno alla deriva nel mare, sono il fondamento degli ecosistemi oceanici. Il fitoplancton (simile alle piante) e lo zooplancton (simile agli animali) sono essenziali perché forniscono cibo a molte altre creature marine.

Sebbene l'acqua più calda possa accelerare i tassi di crescita degli organismi marini, aumenta anche i tassi di mortalità. Inoltre, man mano che l'acqua si riscalda, il fitoplancton diventa più piccolo, il che significa che c'è meno cibo disponibile per lo zooplancton e gli animali (Carozza et al., 2019).

Il riscaldamento rende anche l'oceano più stratificato, il che riduce la miscelazione dei nutrienti dalle acque più profonde alla superficie dove vive la maggior parte della vita marina. Ciò porta a meno cibo per gli organismi più in alto nella catena alimentare, come pesci e mammiferi marini. L'effetto del riscaldamento varia a seconda della regione. È probabile che le aree tropicali subiscano perdite significative di vita marina, mentre le regioni più fredde e a latitudini più elevate potrebbero subire aumenti della biomassa oceanica (Lotze et al., 2019).

La relazione tra temperatura e perdita di biomassa oceanica è derivata da Tittensor et al. (2021).

Estate artica senza ghiaccio: si ha quando la copertura media di ghiaccio marino di settembre dell'Oceano Artico è inferiore a un milione di km² (circa il 7% dell'area dell'Oceano Artico).

In figura 4.48, le due percentuali specifiche per ogni anno rappresentano la probabilità che l'Artico sarà libero dai ghiacci rispettivamente nel 2050 o nel 2100. Le barre finali rappresentano la probabilità che l'Oceano Artico sia libero dai ghiacci almeno una volta prima del 2100.

Un Oceano Artico privo di ghiaccio cambierebbe in modo significativo l'albedo della Terra, perché l'acqua dell'oceano è più scura del ghiaccio marino, quindi assorbe più calore del sole. Ciò significa che la Terra si riscalderebbe più velocemente (effetto *feedback* positivo).

La riduzione delle emissioni di CO₂ come da scenario WB2, contribuisce ad abbattere in maniera considerevole le probabilità di estati artiche senza ghiaccio.

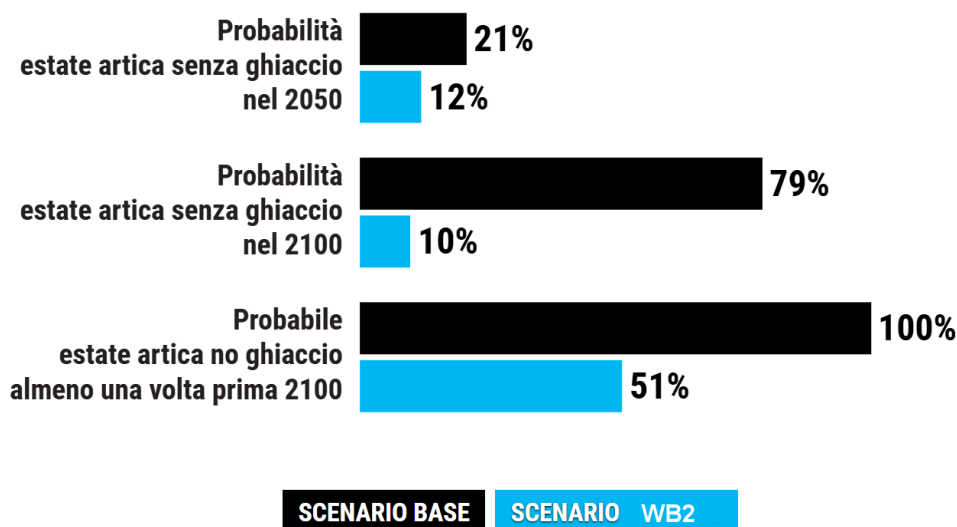


Figura 4.48: Probabilità di un'estate artica senza ghiaccio

Qualità dell'aria: è rappresentata per mezzo del livello di particolato globale annuo (PM_{2,5}) emesso dalle fonti energetiche, in megatoni (10⁶ ton) PM_{2,5}/anno, fig. 4.49. Le PM_{2,5}, emesse per esempio dalla combustione del carbone, sono particelle molto piccole che hanno un diametro pari o inferiore a 2,5 micrometri e possono essere facilmente inalate e causare problemi di salute.

Secondo il rapporto Lancet 2025, l'inquinamento causato dalla combustione del carbone nel 2022 è stato responsabile di un milione di morti in tutto il mondo.

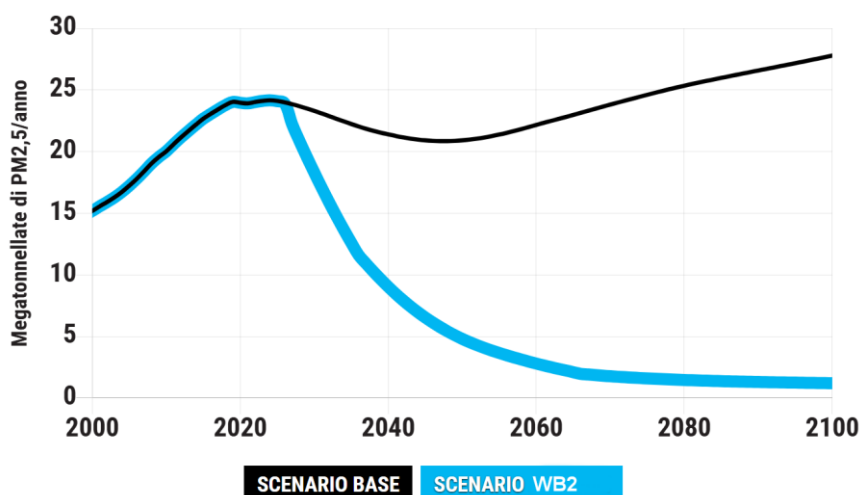


Figura 4.49: Inquinamento da energia – Emissioni di particelle PM_{2.5}

Innalzamento medio globale del livello del mare: il livello zero di partenza è rappresentato da quello misurato nell'anno 2000 in metri (m), fig. 4.50. L'espansione termica dell'acqua è il motore principale dell'innalzamento del livello del mare osservato negli ultimi decenni. Man mano che il pianeta si riscalda, l'acqua di mare diventa meno densa e si espande.

Altre componenti che contribuiscono all'innalzamento del livello del mare sono lo scioglimento dei ghiacciai, lo scioglimento delle calotte glaciali in Antartide e Groenlandia e i cambiamenti indotti dall'uomo nello stoccaggio dell'acqua terrestre (ovvero, estraendo più acque sotterranee che finiscono negli oceani rispetto a quelle raccolte nei bacini artificiali).

Porre un freno all'innalzamento del livello del mare può essere determinante per la sopravvivenza di Paesi come le isole Marshall, in cui l'altitudine massima è di 2 m.

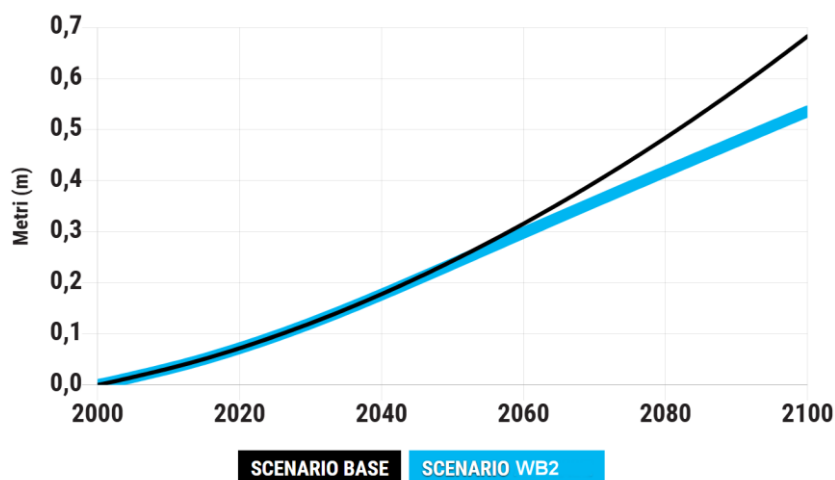


Figura 4.50: Innalzamento medio globale del livello del mare

4.4 Discussione finale

L'impatto benefico sull'aumento della temperatura globale al 2100 dell'utilizzo su larga scala dell'idrogeno per la decarbonizzazione di un settore *hard-to-abate* come quello siderurgico, è stato stimato per mezzo del simulatore di scenari climatici En-ROADS.

Ciò che di primo acchito può apparire un contributo benefico minimo di una singola soluzione implementata (-0.1 °C) assume un significato più importante se contestualizzato con i contributi alla riduzione delle emissioni provenienti da altri fattori (come riepilogato in tabella 4.2).

Sperimentare tramite simulazioni l'applicazione di politiche e soluzioni mirate al raggiungimento di uno scenario (WB2) in linea con l'accordo di Parigi ha evidenziato in maniera nitida quanto segue:

- Si può raggiungere l'obiettivo applicando simultaneamente azioni correttive in diversi ambiti, non agendo su di un unico fattore.
- Siamo ancora in tempo per raggiungere l'obiettivo
- Ridurre le emissioni di gas serra in atmosfera non contribuisce solamente al contenimento dell'aumento della temperatura globale, ma si concretizza in altri numerosi benefici. Per citarne alcuni, la riduzione del numero di morti per caldo estremo, la salvaguardia della vita negli oceani dovuta ad una minore acidificazione e riscaldamento, la riduzione delle perdite di PIL globale a causa di danni climatici (ricordiamo il transito sulla Sicilia, Sardegna e Calabria del ciclone Harry, che ad inizio 2026 ha causato danni per almeno 740 milioni di euro)
- Ci sono buone potenzialità che la tecnologia di miscelazione capacitiva per la cattura della CO₂ basata possa dare un contributo significativo al raggiungimento degli obiettivi dell'accordo di Parigi, ma il processo di maturazione tecnologica per applicazione su larga scala necessita di una accelerazione importante.
- Utilizzare strumenti di simulazione di scenari climatici e incoraggiare un dibattito pubblico è molto importante per diffondere consapevolezza e mantenere alta l'attenzione sul tema climatico che ad oggi non è in cima all'agenda dei leader del mondo e dei mass media.
- La sopravvivenza del progetto En-ROADS, finanziato tramite fondi provenienti da organizzazioni come ClimateWorks Foundation, Hewlett Foundation, the Goldman-Sonnenfeldt Foundation, Active Philanthropy, Zennström Philanthropies, the KR Foundation, HSBC, the Morgan Family Foundation, The Why Wait Fund, The Rockefeller Brothers Fund è messo a repentaglio dall'attuale politica negazionista dell'amministrazione US che ha già tagliato i finanziamenti a moltissimi enti di ricerca scientifici, oscurato siti internet di divulgazione climatica e ritirato la partnership da organismi (IPCC, UNFCCC, solo per citarne alcuni) il cui lavoro è di importanza basilare per la sopravvivenza della specie umana su di un pianeta abitabile.

Riferimenti bibliografici

- Simone Gasperin, Giulia Novati, Chiara Di Mambro. ECCO Climate, 2024. *Politiche per la trasformazione industriale dell'acciaio*. https://eccoclimate.org/wp-content/uploads/2024/06/Policy-paper-acciaio_26giugno.pdf
- Costanza Scano, Giulia Novati. ECCO Climate, 2026. *Cos'è l'industrial accelerator act europeo, cosa prevede e perchè è necessario*. <https://eccoclimate.org/industrial-accelerator-act-iaa-europeo-cosa-prevede-e-perche-e-necessario/>
- Commission européenne/Europese Commissie, 2024. *Documento di orientamento sull'attuazione del CBAM per gli importatori di merci nell'UE*. https://taxation-customs.ec.europa.eu/document/download/bc15e68d-566d-4419-88ec-b8f5c6823eb2_it?filename=TAXUD-2023-01189-00-00-IT-TRA-00_0.pdf
- Rinnovabili.it, 2024. *Idrogeno miscelato a gas naturale, ad Arezzo iniziano i test*. <https://www.rinnovabili.it/energia/idrogeno/idrogeno-miscelato-a-gas-naturale-arezzo-test/>
- Ricrea, Consorzio Nazionale Riciclo e Recupero Imballaggi Acciaio, 2024. *Relazione sulla gestione 2024 bilancio e programma specifico di prevenzione*. <https://www.consorzioricrea.org/wp-content/uploads/2025/06/RGPS-RICREA-2025.pdf>
- Ricrea, Consorzio Nazionale Riciclo e Recupero Imballaggi Acciaio, 2024. *Steelosa: la panchina che racconta l'infinito riciclo dell'acciaio*. <https://www.consorzioricrea.org/2024/11/05/steelosa-la-panchina-che-racconta-linfinito-riciclo-dellacciaio/>
- ICER International, 2025. *Energia: MASE pubblica studio su Cattura e Stoccaggio di Carbonio, per quadro normativo e sviluppo filiera*. <https://icer-grp.com/index.php/it/novita/news-e-comunicati/energia-mase-pubblica-studio-su-cattura-e-stoccaggio-di-carbonio-per-quadro-normativo-e-sviluppo-filiera>
- Commission européenne/Europese Commissie, Customs and tax EU learning portal, 2026. *Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM)* <https://customs-taxation.learning.europa.eu/mod/resource/view.php?id=15154>
- RavennaCCS.com, 2026. *Cos'è la cattura e stoccaggio della CO₂?* <https://ravennaccs.com/it-IT/tecnologia/cos-e-la-ccs>
- MITE.gov, 2024. *Relazione idrogeologica CCS Pianura Padana*. <https://va.mite.gov.it/File/Documento/1133757>

ClimateInteractive.org, Guida dell'utilizzatore di EN-Roads, 2026. *Scenario di base di EN-Roads. Grafici Kaya*. <https://docs.climateinteractive.org/projects/en-roads/it/latest/guide/baseline.html> <https://docs.climateinteractive.org/projects/en-roads/it/latest/guide/kaya.html>

MASE.gov, 2024. *Strategia nazionale idrogeno*.
<https://www.mase.gov.it/sites/default/files/Strategia%20Nazionale%20Idrogeno.pdf>

Riccardo Boarelli, FieraIdrogeno.com, 2023. *Misura delle miscele di idrogeno e Gas Naturale e per uso in fuel cell*. <https://www.fieraidrogeno.com/misura-delle-miscele-di-idrogeno-e-gas-naturale-e-per-uso-in-fuel-cell-29326>

Luca Leonardi, BureauVeritas.it, 2023. *Il meccanismo di adeguamento del carbonio alla frontiera (CBAM)* [https://www.bureauveritas.it/newsroom/il-meccanismo-di-a
adeguamento-del-carbonio-alle-frontiere-cbam](https://www.bureauveritas.it/newsroom/il-meccanismo-di-a adeguamento-del-carbonio-alle-frontiere-cbam)

PRC Commentary, China Policy, 2024. *Politiche per la trasformazione industriale dell'acciaio*. https://eccoclimate.org/wp-content/uploads/2024/06/Policy-paper-acciaio_26giugno.pdf

Recoverweb.it, 2025. *Catturare e purificare CO2 producendo energia: PoliTO ci riesce*.
<https://www.recoverweb.it/catturare-e-purificare-co2-producendo-energia-polito-ci-riesce/>

Siderweb.com, 2024. *Rottame: i possibili scenari in Italia ed Europa*.
<https://www.siderweb.com/articoli/top/723731-rottame-i-possibili-scenari-in-italia-ed-europa>

Stefano Peiretti, Echos Edizioni, 2021. *“Non voglio morire. Torino 6 dicembre 2007”*.

Davide Molino, Federico Raffone, Pietro Zaccagnini, Alessandro Pedico, Simone Martellone, Giuseppe Ferraro, Sergio Bocchini, Giancarlo Cicero, Andrea Lamberti. Advanced Energy and Sustainability Research. Politecnico di Torino, 2025. *Energy Harvesting from CO2 Emission Exploiting Ionic Liquid-Based Electrochemical Capacitor*.
<https://doi.org/10.1002/aesr.202500019>.

Atti del congresso “La decarbonizzazione dell’industria siderurgica: un passo avanti”
Acciaierie d’Italia, Taranto, 16 novembre 2023

Atti del congresso “All-Energy & Decarbonise”. Filippo Cirilli, Irene Luzzo, Antonio Lucci.
“Hydrogen as a fuel for Industrial Processes: lessons learned from application cases”.
Glasgow, 10-11 maggio 2023

Ringraziamenti

Questo lavoro completa il percorso che ho intrapreso per gettare le basi per rinnovare la mia carriera professionale, allineandola maggiormente con i principi di sostenibilità.

Un ringraziamento speciale va a Zien, Alessia e Luca, per essere stati i miei mentori da quando sono tornato ad essere uno studente. Senza il vostro aiuto tutto sarebbe stato più difficile!

Ringrazio le e gli Ing. Sohrab Kiani, Farnoosh Noroozi, Rafay Khalid Awan per aver lavorato con me al progetto di Applied Hydrology & Environmental Fluid Mechanics. Siete stati grandi!

Ringrazio le e gli Ing. Ateeq Ur Rehman, Fatemeh Firouzi Shirabad, Maryam Karrar e Zienalabden Hussein per aver lavorato con me nel lavoro di gruppo di Climate change mitigation.

Ringrazio le e gli Ing. Filippo Graziano, Al Hassan Choucair, Misbah Imtiyaz (fantastica disegnatrice) e Aquil Sadiq per aver lavorato con me durante la Challenge. Bel lavoro!

Ringrazio l'Ing. Fabio per avermi aiutato a preparare l'esame di Geophysics. Senza di te non penso ce l'avrei fatta!

Ringrazio gli Ing. Atashipoor Seyedmohammadreza, Mohammad Raisi, Ali Gholami e Luca Eusebiu Purice per aver lavorato con me nei progetti di gruppo di Climate change adaptation.

Ringrazio le e gli Ing. Roya Esmaeilidahaj, Donya Mohammadi, Mohammad Elmi Zadeh per aver lavorato con me al lavoro di gruppo di ESA, non so come avrei fatto senza di voi!

Ringrazio le e gli Ing. Roberto e Selu per avermi aiutato a preparare l'esame di Gestructures under Climate Change. Il vostro aiuto è stato estremamente prezioso!

Ringrazio le Ing. Faezeh Sajjadi, Sophia K. Pourtafy, Fatemeh Firouzi, Sara Salari e Samira Naghashzargar per aver lavorato con me al progetto di Innovation lab for Climate Change.

Ringrazio le e gli Ing. Seyedabolfazl Amirkhalili, Filippo De Miccolis Angelini, Sajjad Eshghali, Yeganeh Heravi, Kimia Kavian, Sara Saloua Rinauro e Atahan Uzunur per aver lavorato con me al progetto di Renewable energy resources.

Ringrazio la Ing. Bahar per avermi aiutato a preparare l'esame di The Climate System e gli Ing. Luca Bellani, Tommaso Salaorni e Roberto Poiatti per aver lavorato con me al progetto di gruppo.

Ringrazio l'Ing. Arman Mohammadi per il prezioso aiuto con gli esercizi di Groundwater Engineer.

Ringrazio l'Ing. Paolo Climan per avermi ospitato in veste di tirocinante presso il suo ufficio tecnico e avermi formato sia nel campo delle energie rinnovabili che in apicoltura!

Ringrazio la prof. Deborah Panepinto per aver sostenuto la realizzazione di questo lavoro e avermi supportato nei momenti di difficoltà.

Ringrazio l'Ing. Simone Martellone per la preziosa collaborazione durante le prove di cattura della CO₂.

Ringrazio l'Ing. Filippo Cirilli e l'Ing. Irene Luzzo per il tempo dedicatomi.

Ringrazio il prof. Carlo Mapelli per aver sempre puntualmente risposto alle mie mail.

Ringrazio Greta Thunberg, il cui contributo alla causa climatica è stato incommensurabile e il cui coraggio è sconfinato.

Ringrazio i pilastri italiani dell'informazione e della divulgazione sul clima: Ferdinando Cotugno, Giovanni Mori, Luca Mercalli, Giulio Betti, Serena Giacomini, e tutti coloro che combattono quotidianamente la disinformazione, i negazionisti e chi continua a sostenere che la crisi climatica sia una bufala.

Ringrazio le irriducibili attiviste e gli irriducibili attivisti per il clima di Parents for Future Italia e Global, di Fridays for Future, Extinction Rebellion, Ultima Generazione e chiunque stia dando il meglio di sé per difendere il pianeta dal collasso climatico ed ecologico.

Ringrazio mia moglie Rossella, per avermi assecondato nel mio percorso e aver fatto il tifo per me! I♥U

#Because we love our children

#Never give up