



Corso di laurea in *Strategic Management:  
Sustainability and Green Economy*

Cattedra di *Sustainable Innovation*

*Carbon Capture, Utilization and Storage: Awareness  
and Business Opportunities for Sustainable Innovations*

Prof. Riccardo Giovannini

---

**RELATORE**

Piergiorgio Palamara

---

**CORRELATORE**

Matr. 783011

Teresa Di Caprio

---

**CANDIDATO**

Anno Accademico 2024/2025

## Sommario

<i>Introduzione</i> .....	4
<i>Capitolo 1 - Innovazione sostenibile e contesto normativo</i> .....	10
1.1 Il concetto di innovazione .....	10
1.2 Innovazione green .....	12
1.3 La crisi climatica e la necessita' di decarbonizzazione.....	14
1.4 Il ruolo della transizione energetica e dell'innovazione tecnologica .....	15
1.4.1 Sinergia tra innovazione sostenibile e sviluppo economico.....	18
1.4.2 Innovazione sostenibile nei modelli industriali.....	19
1.4.3. Casi specifici di approcci alla sostenibilita' nel Mondo.....	21
1.5 La Governance Climatica Globale ed Europea .....	24
1.5.1. Conference Of The Parties (COP).....	27
1.5.2. Regolamenti e normative adottate dall'UE .....	29
1.5.3. Il Clean Industrial Deal .....	31
<i>Capitolo 2 - La cattura della CO<sub>2</sub>: tecnologie e potenzialita'</i> .....	32
2.1 Perché' catturare la CO <sub>2</sub> .....	32
2.2 Carbon Capture, Utilization and Storage .....	35
2.2.1 Classificazione delle tecnologie CCUS.....	37
2.2.2 Cattura Pre-Combustione .....	40
2.2.3 Cattura Post-Combustione .....	41
2.2.4 Combustione Oxy-Fuel.....	42
2.2.5 Direct Air Capture.....	43
2.3 Costi di investimento .....	45
<i>Capitolo 3 – Panoramica degli impianti esistenti con cattura della CO<sub>2</sub></i> .....	48
3.1 Diffusione degli impianti a livello globale .....	48

<b>3.2 Tipologie di impianti e applicazione per settore industriale .....</b>	<b>50</b>
<b>3.3 Opportunita' e limiti delle soluzioni CCUS .....</b>	<b>53</b>
<b><i>Capitolo 4 – Analisi di un caso studio reale .....</i></b>	<b><i>55</i></b>
<b>4.1 Boundary Dam – Canada .....</b>	<b>55</b>
<b>4.1.1 Contesto e funzionamento dell'impianto .....</b>	<b>56</b>
<b>4.1.2 Analisi economica del progetto.....</b>	<b>58</b>
<b>4.1.3 Sostenibilita' del progetto.....</b>	<b>61</b>
<b><i>Conclusioni .....</i></b>	<b><i>68</i></b>
<b><i>Bibliografia .....</i></b>	<b><i>71</i></b>

## Introduzione

La crisi climatica non è più una minaccia lontana o un'ipotesi futura, è una realtà che stiamo vivendo ora e che rappresenta senza dubbio una delle sfide più complesse e urgenti della nostra epoca. Gli effetti del cambiamento climatico sono sempre più visibili, si possono toccare con mano, e ci invitano a riflettere ai nostri modelli di sviluppo, in particolare quelli legati alla produzione di energia e all'industria. La concentrazione di gas serra in atmosfera, con la CO<sub>2</sub> come principale responsabile, è in gran parte riconducibile alle attività umane, e i settori più impattanti come l'industria pesante, i trasporti e la produzione elettrica da fonti fossili, sono anche quelli più difficili da decarbonizzare.

Secondo l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), per mantenere l'aumento della temperatura globale entro la soglia di 1,5°C rispetto ai livelli preindustriali, è indispensabile raggiungere emissioni nette pari a zero entro la metà del secolo (IPCC, 2022).

Un indicatore estremamente significativo è l'Earth Overshoot Day, che nel 2022 è caduto il 29 luglio: Sapete questo cosa significa? Che in soli sette mesi l'umanità ha consumato tutte le risorse naturali che il pianeta è in grado di rigenerare in un anno. Nel 2002 cadeva il 1° ottobre. In soli vent'anni abbiamo accelerato il nostro ritmo di consumo in modo così insostenibile da “bruciare” 1,75 Terre ogni anno (Claudi de Saint Mihiel & Thiebat, 2023).

Un esempio molto efficace dell'impatto che i nostri modelli di consumo e produzione generano sull'ambiente è rappresentato dal grafico sottostante, tratto da Statista (2023), basato sui dati del National Footprint and Biocapacity Accounts.

Esso mostra quante “Terre” sarebbero necessarie se l’intera popolazione mondiale adottasse lo stile di vita medio di alcuni Paesi.

Gli Stati Uniti, ad esempio, richiederebbero l’equivalente di oltre cinque pianeti per sostenere il proprio livello di consumo, un dato che evidenzia l’insostenibilità del modello attuale e l’urgenza di una transizione verso sistemi più equilibrati e rigenerativi.

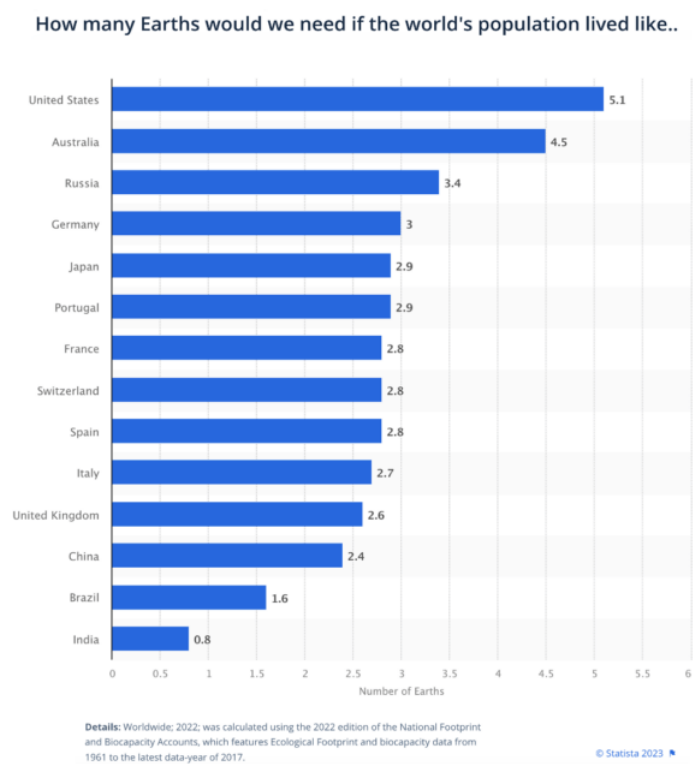


Figura 1. Numero di Pianeti necessari se l’intera popolazione vivesse come nei diversi Paesi. Fonte: Statista, 2023.

Se questa tendenza non verrà invertita, le conseguenze potrebbero essere drammatiche: l'aumento delle temperature porterà con sé fenomeni climatici estremi sempre più frequenti, difficoltà nella gestione delle risorse idriche e alimentari, migrazioni forzate, instabilità politica e crisi economiche profonde. Appare quindi evidente che non si tratta solo di un problema ambientale, ma di un rischio sistemico che riguarda la nostra sicurezza, la nostra economia e il nostro modo di vivere.

È per questo che la transizione verso un'economia decarbonizzata non è più un'opzione ma una necessità, e serve una risposta globale e coraggiosa che metta in discussione la nostra quotidianità e abbracci un nuovo modello di sviluppo più equo, più resiliente e più compatibile con i limiti del nostro pianeta.

Il cammino verso un sistema climatico più stabile e sostenibile è iniziato ormai diversi decenni fa, anche se spesso in maniera discontinua e a volte insufficiente rispetto alla gravità del problema. Tutto ha avuto inizio nel 1992 con la “Convenzione delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici”, primo passo formale della comunità internazionale verso il riconoscimento del cambiamento climatico come sfida comune. Da allora il percorso si è sviluppato tra successi e battute d'arresto: il Protocollo di Kyoto del 1997 ha rappresentato un tentativo concreto di definire obiettivi vincolanti per la riduzione delle emissioni, ma è stato seguito da anni di difficoltà politiche, rinvii e divisioni tra Paesi.

E' arrivata poi una svolta nel 2015 con l'Accordo di Parigi, in cui per la prima volta quasi tutti i Paesi del Mondo hanno riconosciuto ufficialmente l'urgenza di contenere l'aumento

della temperatura globale “ben al di sotto dei 2°C”, puntando idealmente a 1,5°C rispetto ai livelli preindustriali.

In questo contesto geopolitico e normativo si inserisce il ruolo attivo dell’Unione Europea, che ha deciso di porsi come leader globale nella transizione ecologica attraverso il Green Deal Europeo, fissando come obiettivo il raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050.

La Commissione Europea ha annunciato un piano da mille miliardi di Euro per guidare questo cambiamento attraverso iniziative come “Fit for 55”, che mira a ridurre le emissioni del 55% entro il 2030 e la “REPowerEU”, pensata per rafforzare la sicurezza energetica attraverso lo sviluppo di fonti rinnovabili e la riduzione della dipendenza dai combustibili fossili (European Commission, 2022).

Eppure, nonostante gli impegni, cresce la consapevolezza che non stiamo ancora facendo abbastanza. Come osserva Gracceva (2022), la transizione energetica in atto è senza precedenti: mai prima d’ora si è chiesto ad intere economie e sistemi industriali di trasformarsi così rapidamente: le transizioni del passato hanno impiegato decenni, mentre oggi abbiamo solo pochi anni per cambiare direzione. E non si tratta solo di sostituire una fonte energetica con un’altra, ma di ripensare l’intero sistema, dalle tecnologie alle infrastrutture, dalle regole alle abitudini quotidiane. Come sottolinea Geels (2002), ogni vera transizione tecnologica è anche una riconfigurazione sistemica, che tocca la società nel profondo. Cambiare il modo in cui produciamo e consumiamo energia significa anche cambiare il nostro ruolo: da semplici consumatori a “prosumer” (Toffler, 1980), partecipanti attivi nella produzione, nella gestione e nella scelta dell’energia.

Per questo la sfida climatica non è solo tecnica, ma è profondamente culturale, ed è necessaria una rivoluzione nei nostri comportamenti e nella nostra mentalità, una vera e propria “cultura del limite” (Smil, 2017), che ci spinga non solo a trovare soluzioni più efficienti, ma anche a consumare di meno e meglio, mettendo in discussione le nostre abitudini.

In questa prospettiva si inserisce l’interesse per le tecnologie di Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS), che rappresentano una delle strade più promettenti, ma anche complesse, per contribuire alla riduzione delle emissioni. Il CCUS permette infatti di catturare la CO<sub>2</sub> emessa da fonti industriali altamente inquinanti o direttamente dall’atmosfera, per poi stoccarla in modo sicuro o riutilizzarla all’interno di nuovi cicli produttivi. Secondo l’International Energy Agency (IEA), questa tecnologia potrebbe da sola coprire fino al 15% del percorso necessario per arrivare al net-zero entro il 2050 (IEA, 2021). Se utilizzata in modo consapevole e integrata in modelli di business lungimiranti, la CCUS può contribuire non solo a ridurre le emissioni, ma anche a generare nuove opportunità economiche, posti di lavoro e competitività sostenibile.

Il presente elaborato si propone di analizzare in maniera approfondita come le tecnologie di Carbon Capture, Utilization and Storage possano essere efficacemente integrate nei modelli di business sostenibili, con l’obiettivo di comprenderne non solo la validità tecnica e ambientale, ma anche la sostenibilità economica e strategica in un contesto industriale reale. L’analisi, oltre ad una valutazione teorica del potenziale delle tecnologie CCUS, cercherà di metterne in evidenza anche l’applicabilità pratica nei contesti a più alta intensità emissiva come gli impianti industriali, le centrali termoelettriche o i grandi stabilimenti produttivi,

dove la generazione di CO<sub>2</sub> è continua e significativa. L'elaborato intende proporre quindi un approccio integrato che tenga insieme le diverse dimensioni della sostenibilità: da un lato quella ambientale analizzando il contributo che i sistemi di cattura, utilizzo e stoccaggio della CO<sub>2</sub> possono fornire alla decarbonizzazione dei processi produttivi e alla riduzione delle emissioni climalteranti, dall'altro quella economica e strategica, considerando in che misura tali tecnologie possano essere inserite in modelli di business capaci di garantire un ritorno per le imprese, sia attraverso la valorizzazione diretta della CO<sub>2</sub> catturata e la possibilità di generare crediti di carbonio, sia tramite benefici indiretti come il miglioramento dell'immagine aziendale e il posizionamento come flagship projects nell'ambito dell'innovazione sostenibile.

A supporto dell'analisi è stato esaminato il caso studio Boundary Dam, primo impianto a livello mondiale ad aver integrato un sistema CCUS su scala commerciale in una centrale a carbone esistente. Il caso ha permesso di valutare in concreto lo stato di maturità tecnologica (Technology Readiness Level) e soprattutto la sostenibilità economica e gestionale del progetto, attraverso lo studio di scenari basati su differenti prezzi della CO<sub>2</sub>. Questo approccio ha consentito di collegare la teoria con l'esperienza reale, evidenziando punti di forza, criticità e condizioni necessarie per una futura replicabilità. L'elaborato intende quindi offrire uno sguardo trasversale e concreto sul ruolo delle tecnologie CCUS nella transizione energetica, mettendo in luce l'innovazione come leva non solo ambientale, ma anche economica e strategica, e sottolineando come il rapporto tra impresa, tecnologia e sostenibilità richieda una visione integrata e di lungo periodo.

# Capitolo 1 - Innovazione sostenibile e contesto normativo

## 1.1 Il concetto di innovazione

Quando si parla di innovazione spesso la si associa all'idea di progresso, di novità, di tecnologia all'avanguardia. Ma in passato questo concetto è stato svuotato del suo significato più profondo: “innovazióne, dal latino *innovatio -onis*, ogni novità, mutamento, trasformazione che modifichi radicalmente o provochi comunque un efficace svecchiamento in un ordinamento politico o sociale, in un metodo di produzione, in una tecnica, ecc.: *un'i. felice, ricca di conseguenze e di risultati;*” (Treccani,2023). Innovare quindi, non significa solo “fare qualcosa di nuovo”, ma migliorare, rispondere in modo creativo a bisogni reali, superare i limiti di ciò che conosciamo per costruire qualcosa di più giusto, di più efficiente e, oggi più che mai, di più sostenibile.

Negli ultimi anni ci siamo resi conto di quanto effettivamente il nostro modello di sviluppo fondato per decenni su produzione intensiva, spreco e sfruttamento delle risorse naturali, abbia avuto un costo elevatissimo: un costo ambientale prima di tutto, ma anche sociale e umano, e le conseguenze sono sotto gli occhi di tutti: cambiamenti climatici, perdita di biodiversità, crisi energetiche, disuguaglianze crescenti. E se è vero che non possiamo cambiare il passato, possiamo però scegliere come scrivere il futuro.

In questo contesto bisogna ripensare alle nostre azioni come individui, come imprese e come collettività, per ridurre l'impatto che generiamo sull'ambiente e sul pianeta che ci ospita.

L'economista austriaco Joseph Alois Schumpeter descrive il processo innovativo come una "distruzione creatrice" (Schumpeter, 1947). Con questa espressione Schumpeter intende sottolineare come ogni innovazione comporti inevitabilmente la sostituzione di tecnologie, processi o assetti organizzativi esistenti, provocando allo stesso tempo l'apertura di nuove possibilità di crescita. Innovare secondo questa visione significa rompere con lo status quo e riorganizzare le risorse in maniera più efficiente e funzionale. Schumpeter classifica l'innovazione in cinque categorie principali, tutte accomunate dalla capacità di generare un cambiamento significativo rispetto al passato. Si può avere innovazione:

1. **Di prodotto**, ovvero l'introduzione di un bene completamente nuovo sul mercato, oppure un'evoluzione sostanziale di un prodotto già esistente;
2. **Di processo**, che riguarda il miglioramento o la trasformazione dei metodi produttivi, tramite nuove combinazioni di fattori già esistenti;
3. **Organizzativa**, come ad esempio un cambiamento nella struttura aziendale o nel modo in cui l'impresa si relaziona con le parti interessate;
4. **Di mercato**, attraverso l'apertura verso nuovi segmenti di domanda o l'espansione in aree geografiche precedentemente non coperte;
5. **Sugli input intermedi**, con l'utilizzo di nuovi materiali o tecnologie che migliorano le performance del processo produttivo.

La transizione dall'idea all'azione avviene tramite l'invenzione, che può essere definita come *il momento creativo in cui nasce una soluzione nuova*. Ma è solo quando questa invenzione viene trasformata in applicazione concreta e utilizzabile che si parla davvero di innovazione. Questo passaggio è particolarmente rilevante nel contesto tecnologico: si parla infatti di

innovazione tecnologica quando *un nuovo materiale, componente o sistema viene introdotto con l'obiettivo di generare valore sul piano pratico o commerciale* (Schilling MA, 2009, p.1).

## 1.2 Innovazione green

L'innovazione green è un concetto che negli ultimi anni ha acquisito sempre più rilevanza non solo a livello globale ma anche nelle dinamiche aziendali. L'emergere di questa tematica è strettamente legata alla crescente consapevolezza riguardo l'impatto ambientale delle nostre azioni, che si è tradotto in un uso incontrollato delle risorse naturali e in conseguenze negative per l'ecosistema.

In ambito aziendale cresce la consapevolezza dell'importanza della sostenibilità ambientale e della ricerca di soluzioni innovative che rispettino il principio di "green innovation". Come sottolineato da Montresor e Quatraro (2020), l'introduzione di tecnologie verdi è cruciale per lo sviluppo locale sostenibile, poiché tali tecnologie sono progettate per ridurre o eliminare l'impatto ambientale delle attività economiche.

L'innovazione verde è dunque definita come un'innovazione finalizzata a un utilizzo efficiente delle risorse e a una riduzione al minimo dei danni ambientali. La Commissione Mondiale sull'ambiente e lo sviluppo (1987, p. 37) ha definito lo sviluppo sostenibile come *“un processo di cambiamento in cui lo sfruttamento delle risorse, la direzione degli investimenti, l'orientamento dello sviluppo tecnologico e il cambiamento istituzionale sono tutti in armonia e accrescono il potenziale attuale e futuro per soddisfare i bisogni e le*

*aspirazioni umane*”. In questo senso, l'obiettivo ultimo deve essere quello di creare sinergia tra crescita economica e tutela ambientale, prendendo chiaramente in considerazione la limitatezza delle risorse naturali.

L'innovazione ambientale, come descritta da Kemp (2001), comprende nuovi processi, tecniche, sistemi e prodotti progettati per evitare o ridurre i danni ambientali, rappresentando un elemento fondamentale per una crescita intelligente e sostenibile che mira a sviluppare un'economia capace di utilizzare le risorse in modo efficiente e di garantire al contempo elevati livelli di occupazione, produttività e coesione sociale (Fabrizi et al., 2018). Ogni settore, dal food al farmaceutico, dall'aerospaziale all'automotive, sta iniziando a integrare soluzioni verdi: tra questi si possono annoverare la riduzione dei rifiuti, la creazione di prodotti riutilizzabili e rivendibili, la gestione delle emissioni per garantire un risparmio energetico, l'efficienza produttiva, l'uso di energie alternative e la condivisione del know-how con altre imprese.

L'adozione di un approccio green è ormai un requisito indispensabile per perseguire una crescita sostenibile basata sulla continuità dell'innovazione e sullo sviluppo di soluzioni in grado di minimizzare gli effetti negativi legati a fenomeni come il cambiamento climatico, la gestione dei rifiuti, le emissioni di gas serra e l'inquinamento idrico. Tra le minacce più gravi per l'ambiente e lo sviluppo umano, il riscaldamento globale occupa una posizione di rilievo, ma non sono meno gravi altre problematiche come la perdita di biodiversità, l'esaurimento dello strato di ozono, l'acidificazione degli oceani, la scarsità di risorse idriche, il degrado del suolo e l'accumulo di rifiuti chimici e plastici (Rockstrom et al., 2009; WBGU, 2011).

### 1.3 La crisi climatica e la necessita' di decarbonizzazione

Negli ultimi decenni abbiamo assistito a un'accelerazione preoccupante dei fenomeni legati alla crisi climatica: lo scioglimento dei ghiacciai, l'innalzamento del livello del mare, incendi sempre più frequenti e lunghi periodi di siccità. L'equilibrio climatico del nostro pianeta sta collassando, e la scienza lo dice chiaramente: il principale motore di questa trasformazione è l'aumento delle concentrazioni di gas serra in atmosfera, con la CO<sub>2</sub> in cima alla lista (IPCC, 2022).

Le attività umane ed in particolare quelle legate alla produzione energetica, all'industria pesante, ai trasporti e all'agricoltura, sono responsabili di emissioni enormi che hanno spinto la concentrazione di anidride carbonica ben oltre i livelli preindustriali. Secondo i dati della National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), la CO<sub>2</sub> ha raggiunto nel 2023 una concentrazione media di oltre 424 ppm, un valore mai registrato negli ultimi 800.000 anni (NOAA, 2023). È importante ricordare che prima della rivoluzione industriale i livelli erano stabili intorno ai 280 ppm e che non si tratta solo di numeri, ma di un campanello d'allarme che dovrebbe farci rendere conto di quanto stiamo alterando gli equilibri del sistema Terra.

È scientificamente accertato che l'aumento della CO<sub>2</sub> contribuisce in modo diretto al riscaldamento climatico: più gas serra trattengono calore nell'atmosfera, più la temperatura media globale aumenta. Ed è proprio per questo che gli Accordi Internazionali come quello di Parigi del 2015, insistono sull'urgenza di contenere il riscaldamento entro 1,5°C rispetto ai livelli preindustriali.

L'elemento centrale di questa sfida è la decarbonizzazione, ovvero l'eliminazione progressiva della dipendenza dai combustibili fossili e la riduzione delle emissioni climalteranti, e per farli bisogna agire direttamente sulle fonti emissive e adottare soluzioni tecnologiche che ci aiutino a neutralizzare o quantomeno a compensare, le emissioni residue.

La decarbonizzazione richiede un insieme di strumenti che includono anche la Carbon Capture, Utilization and Storage, che permette di intervenire là dove le emissioni sono difficili da eliminare con altri mezzi, e per questo motivo il CCUS viene indicato come una tecnologia “necessaria, ma non sufficiente” per la transizione (IEA, 2021). È una sfida complessa, ma anche un'occasione irripetibile per ripensare i modelli produttivi e costruire un futuro sostenibile, ed ogni anno di ritardo riduce le possibilità di successo e aumenta i costi futuri.

## 1.4 Il ruolo della transizione energetica e dell'innovazione tecnologica

Negli ultimi anni, l'innovazione sostenibile è diventata sempre più una leva strategica non solo per ridurre l'impatto ambientale, ma anche per stimolare la crescita economica e la competitività delle imprese. Secondo l'OECD (2025), infatti, promuovere innovazioni green consente ai Paesi di avanzare verso gli obiettivi climatici riducendo l'inquinamento e aumentando l'efficienza produttiva. In questo scenario, la sostenibilità non è più percepita come un costo, bensì come un investimento a lungo termine capace di generare valore.

Negli anni la letteratura ha evidenziato sempre più la complementarità tra innovazione ambientale e sviluppo economico, sottolineando come questi due aspetti siano spesso

direttamente proporzionali: e' così che nasce e si consolida la visione dell'innovazione verde come *motore in grado di produrre benefici sia economici che ambientali*, generando una situazione win-win (Carraro, 2000).

L'aspetto green, quindi, non si limita ad apportare benefici ambientali, ma si traduce anche in vantaggi concreti dal punto di vista della politica industriale ed economica. Come osserva Bina (2013), questi approcci non si limitano a ridurre l'impatto ambientale, ma sono capaci di integrare le dimensioni ecologiche con obiettivi economici di più ampio respiro, aprendo la strada a dinamiche di progresso sostenibile. Anche Bonsinetti e Falco (2013) affermano che questa convergenza tra innovazione e sostenibilità può essere una chiave per uscire dalle crisi economiche, trasformando la società in una realtà a basse emissioni, più resiliente e inclusiva.

L'innovazione ambientale è inoltre percepita come un valore aggiunto dal consumatore finale, che e' sempre più attento e consapevole: infatti le aziende che integrano pratiche sostenibili riescono generalmente a migliorare la propria immagine e a posizionarsi in modo più competitivo sul mercato.

Secondo l'UNEP (2011), la green economy è "*un'economia che genera un miglioramento del benessere umano e dell'equità sociale, riducendo in modo significativo i rischi ambientali e l'uso delle risorse naturali*". È un modello che punta a minimizzare l'impatto ambientale e allo stesso tempo a creare benefici sociali, come la riduzione della disoccupazione e dei costi energetici. Tuttavia, non bisogna sottovalutare anche gli effetti collaterali: la transizione verso un'economia più sostenibile può comportare la riduzione

delle opportunità occupazionali in alcuni settori tradizionali ad alta intensità di emissioni (Altenburg & Rodrik, 2017).

Il legame tra diversificazione produttiva e aumento dei redditi è stato evidenziato da Imbs e Wacziarg (2003), sottolineando come i benefici economici dell'innovazione green siano significativi soprattutto nelle fasi iniziali dello sviluppo. La crescente attenzione dei policy makers verso l'innovazione ambientale deriva anche dalla possibilità di accedere a nuovi mercati, sviluppare nuove filiere produttive e ridurre i costi ambientali (Hascic & Migotto, 2015).

Allo stesso tempo però va considerato il rischio delle distorsioni politiche, come l'eccessivo incentivo all'uso di risorse naturali tramite sussidi o liberalizzazioni che favoriscono attività ad alta intensità energetica (Munasinghe, 1999). In questo senso, l'eliminazione graduale dei sussidi ai combustibili fossili potrebbe essere una misura concreta per ridurre gli impatti negativi sull'ambiente.

La ricerca sul clima, ad esempio quella di McGlade ed Ekins (2015), suggerisce che per mantenere il riscaldamento globale sotto i 2°C, gran parte delle riserve fossili esistenti dovranno restare nel sottosuolo. Ciò implica un cambiamento profondo nelle scelte industriali, nella finanza e nella governance globale.

Per favorire questa trasformazione, è essenziale adottare politiche pubbliche ambiziose, capaci di incoraggiare comportamenti sostenibili attraverso norme, incentivi e infrastrutture adeguate. Le politiche industriali verdi si distinguono da quelle tradizionali perché includono obiettivi ambientali espliciti, affrontano le esternalità ecologiche come fallimenti di mercato

e cercano di coordinare gli sforzi pubblici e privati per la gestione dei beni comuni (Hallegatte et al., 2013; Lutkenhorst et al., 2014). In ultima analisi, costruire una sinergia tra innovazione sostenibile e sviluppo economico significa ripensare le priorità, investire nella resilienza e accettare la sfida di un futuro più giusto e duraturo per tutti.

### 1.4.1 Sinergia tra innovazione sostenibile e sviluppo economico

L'innovazione sostenibile è sempre più riconosciuta come una leva fondamentale per favorire sviluppo economico duraturo e resiliente. Contrariamente alla percezione comune, l'integrazione intelligente della sostenibilità nelle strategie industriali non è un freno alla crescita, ma bensì un vantaggio competitivo per le aziende.

Secondo Eurostat, nel 2022 l'economia ambientale europea ha registrato una crescita occupazionale del 13%, e un aumento del 14,7% del valore aggiunto lordo, dati annuali superiori all'economia complessiva, che si è fermata rispettivamente al 2,2% e al 3,5% (Eurostat, 2025). Il Rapporto sulla Blue Economy 2025 evidenzia che il settore marittimo e costiero europeo ha generato un fatturato di quasi €890 miliardi nel 2022 e ha impiegato 4,82 milioni di persone, con una crescita della GVA del 33% rispetto all'anno precedente (European Commission, 2025).

Un sondaggio della London Climate Action Week mostra che 91% dei dirigenti aziendali ha aumentato o mantenuto l'investimento in strategie Net Zero e il 92% ritiene più costosa l'innovazione rispetto alla transizione (Reuters, 2025).

L'investimento in tecnologie pulite e ad alta intensità di ricerca come rinnovabili, circolarità, idrogeno verde e CCUS, è cruciale per modernizzare il settore industriale e al contempo ridurre l'impatto ambientale. I dati IRENA mostrano un investimento globale annuo in energie rinnovabili di circa \$499 miliardi nel 2022, con una crescita media del 16% rispetto all'anno precedente (IRENA, 2023). Appare chiaro che le economie che adottano politiche ambientali robuste attraggono capitali, mentre quelle con percorsi normativi incerti perdono competitività.

Un esempio emblematico è il settore automobilistico europeo: Volkswagen ha annunciato un piano di investimento da €165 miliardi nei prossimi cinque anni in mobilità elettrica, digitalizzazione e guida autonoma (Financial Times, 2025).

La sinergia tra innovazione sostenibile e sviluppo economico non è più un ideale astratto, ma una traiettoria concreta verso la resilienza e la competitività. I dati aggiornati dimostrano che la decarbonizzazione può stimolare crescita, creare posti di lavoro e attrarre investimenti, ma richiede politiche lungimiranti, investimenti in R&S, e un quadro regolatorio chiaro.

### 1.4.2 Innovazione sostenibile nei modelli industriali

L'evoluzione dei modelli industriali verso pratiche sostenibili rappresenta oggi una delle priorità più rilevanti nelle agende politiche e aziendali. Non si tratta più di scelte opzionali o "di immagine", ma di un adattamento necessario per rimanere competitivi in un mercato sempre più guidato da normative ambientali stringenti, aspettative dei consumatori e vincoli legati alla disponibilità di risorse naturali.

L'innovazione sostenibile si configura come un cambiamento sistemico dei modelli industriali tradizionali, integrando criteri ambientali, sociali ed economici fin dalle prime fasi del ciclo di vita del prodotto o del processo. Questo approccio implica l'adozione di soluzioni circolari, decarbonizzate e ad alta efficienza energetica, con le imprese che ripensano l'intera catena del valore anziché limitarsi a minimizzare l'impatto ambientale a valle.

Un'analisi del McKinsey Global Institute (2023) rileva che le aziende che investono in modelli produttivi sostenibili registrano un incremento medio del 12% dell'efficienza operativa e una riduzione del 30–50% delle emissioni di CO<sub>2</sub> nei settori manifatturiero, chimico ed energetico. Tra gli strumenti più diffusi troviamo eco-design, la digitalizzazione con sensori IoT per il monitoraggio energetico, l'uso di materie prime seconde, la servitization (l'offerta di servizi su prodotto), e l'integrazione di tecnologie CCUS.

Un esempio significativo viene da LafargeHolcim (oggi Holcim), leader nei materiali da costruzione, che ha integrato la cattura della CO<sub>2</sub> nei propri cementifici per ridurre l'intensità emissiva in un settore notoriamente hard-to-abate. Similmente, aziende come Siemens, BASF e ArcelorMittal sperimentano soluzioni Power-to-X e Green Hydrogen per riconvertire comparti industriali ad alta intensità energetica.

In parallelo, si diffondono standard volontari e framework di rendicontazione ESG, che incoraggiano le imprese a misurare e comunicare in modo trasparente le performance ambientali e sociali. Nonostante le sfide legate a costi elevati, competenze tecniche e normative in continua evoluzione, i benefici a medio-lungo termine (reputazione, accesso al finanziamento green, resilienza operativa e migliore competitività) sono evidenti.

### 1.4.3. Casi specifici di approcci alla sostenibilit  nel Mondo

Alcuni Paesi si sono distinti pi  di altri per l'adozione di strategie lungimiranti e misure concrete per affrontare il cambiamento climatico, decarbonizzare l'industria e promuovere una crescita compatibile con i limiti planetari. Analizzare questi esempi consente di comprendere come, in contesti differenti, sia possibile far combaciare sviluppo economico e riduzione dell'impatto ambientale.

#### 1. Svezia

La Svezia rappresenta un modello avanzato di economia circolare e di decoupling tra crescita economica e uso delle risorse. Attraverso una strategia nazionale adottata gi  nel 2020, il Paese ha introdotto misure per l'estensione della vita utile dei prodotti, la riduzione degli sprechi e la valorizzazione dei materiali riciclati. Secondo l'OCSE (2025), la Svezia   riuscita a migliorare gli indicatori ambientali pur mantenendo alta la competitivit  economica.

Un esempio particolarmente interessante   la citt  di Tomelilla, che ha adottato un approccio ispirato alla "doughnut economics", un modello che pone al centro l'equilibrio tra benessere umano e salvaguardia dei confini ecologici. Qui i principi della sostenibilit  sono stati integrati nella pianificazione urbana, nell'istruzione pubblica e negli appalti, generando una trasformazione culturale oltre che infrastrutturale (The Guardian, 2025).

## **2. Corea del Sud**

La Corea del Sud ha lanciato il Green New Deal nel 2020 come parte di una strategia più ampia per rilanciare l'economia post-pandemia e orientare gli investimenti verso settori sostenibili e digitali. Il piano prevede l'installazione di oltre 42 GW di capacità da fonti rinnovabili entro il 2025, la diffusione di oltre un milione di veicoli elettrici e a idrogeno, e il ritiro progressivo di veicoli altamente inquinanti (IEA, 2024).

Accanto agli investimenti infrastrutturali, la Corea ha avviato importanti riforme per decarbonizzare l'industria pesante e sviluppare una filiera dell'idrogeno. Tuttavia, il Climate Action Tracker (2025) sottolinea che per raggiungere gli obiettivi di neutralità climatica, il Paese dovrà accelerare l'adozione di energie rinnovabili, anche per far fronte all'aumento della domanda derivante dallo sviluppo dell'intelligenza artificiale e dei semiconduttori.

## **3. Cile**

Il Cile si è posizionato come uno dei paesi emergenti più attivi nella transizione energetica, con un mix elettrico in cui le fonti rinnovabili coprono circa il 70% della produzione (Ember, 2024). In particolare, il paese ha investito fortemente nell'energia solare e nell'eolico, sfruttando condizioni climatiche favorevoli e territori ampi e poco antropizzati.

Parallelamente, il Cile ha avviato un piano nazionale per l'idrogeno verde che prevede la produzione di almeno 5 GW entro il 2025: l'obiettivo è diventare uno dei principali esportatori mondiali, attirando investimenti stranieri e stimolando l'occupazione locale (IRENA, 2024). Queste strategie si inseriscono in una visione più ampia di

decarbonizzazione dell'industria mineraria e dei trasporti, che sono settori fondamentali per l'economia del Paese.

#### **4. Germania**

La Germania ha aggiornato nel 2023 la propria strategia nazionale per l'idrogeno, fissando l'obiettivo di raggiungere una capacità di elettrolisi pari a 10 GW entro il 2030 (BMWK, 2025). Questo raddoppio rispetto al piano iniziale è accompagnato da una strategia per l'importazione di idrogeno, considerata necessaria per soddisfare la domanda interna nei settori industriali hard-to-abate come acciaio, cemento e chimica.

Ci sono però alcune criticità: secondo il Financial Times (2025), i costi elevati dell'idrogeno verde (fino a 10 €/kg entro il 2030) e i ritardi infrastrutturali rischiano di compromettere la competitività dell'industria tedesca nel medio periodo. Nonostante ciò, la Germania resta uno dei paesi con il più alto livello di investimenti pubblici in ricerca e sviluppo per tecnologie a basse emissioni.

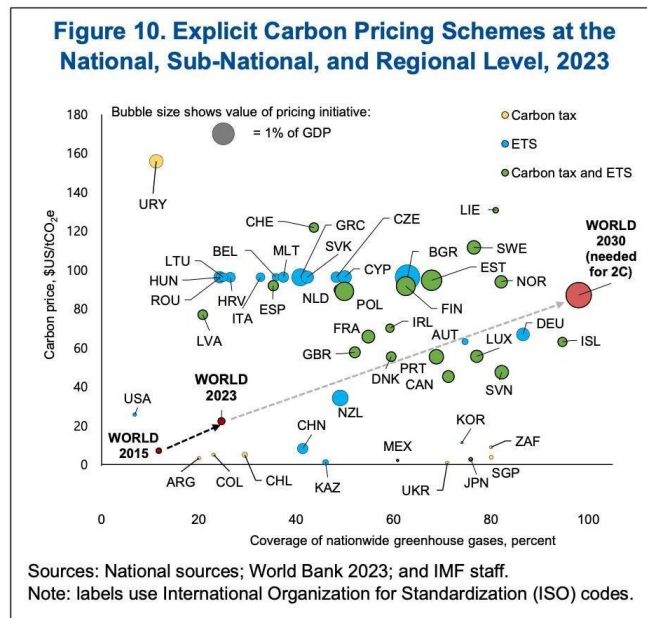


Figura 2. Prezzi espliciti del carbonio a livello nazionale, sub-nazionale e regionale.

Fonte: Word Bank, 2023.

## 1.5 La Governance Climatica Globale ed Europea

La governance climatica rappresenta l'insieme delle politiche, delle istituzioni e dei meccanismi di cooperazione che regolano l'azione globale contro il cambiamento climatico. In un contesto in cui le emissioni di gas serra non conoscono confini geografici, risulta evidente come nessun singolo Stato possa affrontare efficacemente la crisi climatica in maniera isolata. È pertanto fondamentale costruire una struttura multilivello che includa sia la dimensione globale, attraverso organismi sovranazionali e accordi internazionali, sia la dimensione regionale, come nel caso dell'Unione Europea, che ha adottato un approccio normativo molto ambizioso.

A livello globale, il principale strumento di governance climatica è rappresentato dalla Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC), istituita nel 1992 in occasione del Summit della Terra di Rio de Janeiro. Questa convenzione ha dato vita alla Conference of the Parties (COP), un appuntamento annuale che riunisce le parti firmatarie per negoziare obiettivi e strumenti di lotta al cambiamento climatico (UNFCCC, 2023).

Parallelamente, l'Unione Europea si è distinta per il suo ruolo pionieristico nel guidare l'azione climatica attraverso un vasto impianto normativo, che comprende il sistema di scambio di quote di emissione (EU ETS), il regolamento sulla condivisione degli sforzi (Effort Sharing Regulation), e strumenti finanziari e tecnici per facilitare la transizione ecologica. L'UE non solo implementa le decisioni prese a livello internazionale, ma spesso ne anticipa i contenuti, fungendo da guida per altri attori globali (European Commission, 2023).

La governance climatica multilivello permette di collegare gli obiettivi globali con le esigenze specifiche dei singoli territori, rendendo possibili strategie più efficaci e coordinate. Restano però alcune criticità, come l'assenza di regole vincolanti a livello internazionale, le differenze negli impegni presi dai vari Paesi e la distribuzione non equa di risorse e responsabilità. Un aspetto centrale di questo modello, soprattutto nelle COP, è rappresentato dai meccanismi di finanziamento e trasferimento tecnologico, che dovrebbero sostenere la cooperazione e la diffusione delle soluzioni più avanzate. A questo proposito, la figura che segue illustra come, nell'ambito delle COP, siano stati istituiti due meccanismi principali per supportare l'azione climatica: il Technology Mechanism, che facilita il trasferimento e la

diffusione di tecnologie pulite attraverso il Technology Executive Committee e il Climate Technology Centre & Network, e il Financial Mechanism, che fornisce risorse economiche tramite il Green Climate Fund e il Global Environment Facility. Entrambi rappresentano strumenti fondamentali per tradurre gli impegni globali in azioni concrete a livello locale.

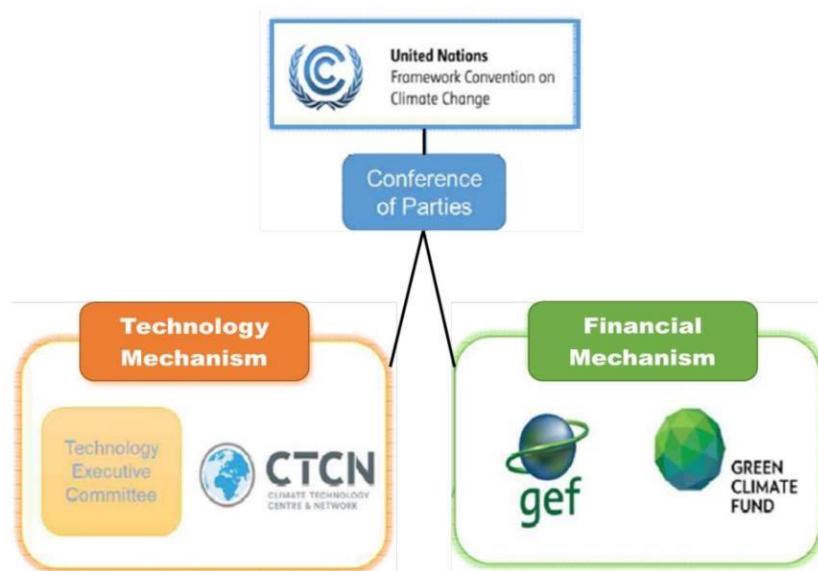


Figura 3. Meccanismi tecnologici e finanziari nell'ambito delle COP previsti dalla UNFCCC.

Fonte: Bell, Gray & Haggett, Sustainability (2018).

### 1.5.1. Conference Of The Parties (COP)

Nel contesto della transizione verso modelli di business sostenibili e dell'adozione di tecnologie a basse emissioni di carbonio, è fondamentale comprendere il ruolo degli organismi internazionali che ne definiscono le traiettorie e ne guidano le priorità strategiche. Tra questi, la Conference of the Parties (COP) rappresenta uno degli strumenti di governance climatica più rilevanti, in quanto sede in cui si prendono decisioni globali sulle azioni da intraprendere contro il cambiamento climatico. Parlare della COP in una tesi dedicata all'innovazione sostenibile e alla decarbonizzazione industriale è essenziale per collocare gli sforzi tecnologici, tra cui la Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS), in un quadro istituzionale e politico internazionale coerente. È proprio nel contesto delle COP che vengono definiti gli obiettivi globali di riduzione delle emissioni, si valuta il contributo dei Paesi membri attraverso le NDC (Nationally Determined Contributions), e si pongono le basi per l'introduzione di strumenti come i carbon market, gli incentivi alla cattura della CO<sub>2</sub> e i finanziamenti alla transizione.

La COP è l'organo decisionale supremo della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC), adottata nel 1992 durante il Summit della Terra di Rio de Janeiro. Include tutte le Parti firmatarie della Convenzione e si riunisce annualmente con lo scopo di monitorare l'attuazione degli obiettivi climatici globali, aggiornare gli impegni nazionali e negoziare nuovi accordi internazionali (UNFCCC, 2023).

Dalla sua prima edizione, tenutasi a Berlino nel 1995, la COP è diventata il luogo per eccellenza in cui si discute di strategie climatiche, si valuta il progresso delle politiche

ambientali e si negoziano strumenti multilaterali. Tra gli eventi più significativi si ricordano la COP3 di Kyoto (1997), con l'adozione del primo protocollo internazionale vincolante sulla riduzione delle emissioni; la COP21 di Parigi (2015), che ha segnato un cambio di paradigma con l'Accordo di Parigi; e le più recenti COP26 di Glasgow (2021) e COP28 di Dubai (2023), che hanno posto l'accento sull'eliminazione progressiva dei combustibili fossili e sul ruolo delle tecnologie di rimozione della CO<sub>2</sub>.

La COP opera tramite sessioni plenarie, gruppi di lavoro tecnici (come SBI e SBSTA), negoziati bilaterali e una fitta rete di eventi collaterali che coinvolgono anche il settore privato, la società civile, le istituzioni finanziarie e il mondo accademico. La sua struttura riflette la complessità della governance climatica contemporanea, dove le decisioni ambientali hanno impatti diretti su mercati, innovazione, occupazione e geopolitica (Woodwell Climate, 2024).

In particolare, le decisioni prese durante le COP rappresentano il quadro politico e normativo di riferimento per l'adozione di tecnologie come la CCUS. Ad esempio, nella COP26 è stato riconosciuto ufficialmente il ruolo della cattura del carbonio tra le soluzioni tecnologiche compatibili con l'obiettivo della neutralità climatica. La crescente attenzione a queste soluzioni è confermata anche nei documenti di lavoro della COP28, in cui si sottolinea la necessità di accelerare gli investimenti in tecnologie di rimozione della CO<sub>2</sub> per compensare le emissioni residue nei settori hard-to-abate.

Per tutti questi motivi, la COP non è solo un evento simbolico, ma una vera e propria piattaforma in cui si orientano le scelte strategiche globali in tema di sostenibilità.

## 1.5.2. Regolamenti e normative adottate dall'UE

In un'ottica di innovazione sostenibile e decarbonizzazione dell'industria, il modello della governance europea gioca un ruolo cruciale, non solo perché fornisce il quadro normativo entro cui si sviluppano soluzioni tecnologiche e politiche industriali, ma anche perché orienta i finanziamenti, i mercati e l'innovazione verso obiettivi di Neutralità Climatica.

Il pacchetto *Fit for 55*, approvato tra il 2021 e il 2023, incarna il cuore della strategia climatica dell'UE: il suo obiettivo è ridurre le emissioni di gas serra di almeno il 55 % entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990, gettando le basi per la Neutralità Climatica entro il 2050 (Consilium, 2025).

Uno degli strumenti centrali è il Sistema di Scambio delle Quota di Emissione (EU ETS): riformato recentemente per aumentare la sua ambizione, rafforzare la riserva di stabilità del mercato, includere nuovi settori come il trasporto marittimo, e introdurre il secondo sistema ETS per edifici e trasporti stradali (ETS2) a partire dal 2027–2028 (European Commission, 2023; ICAP, 2025). Il sistema ha contribuito a una significativa riduzione delle emissioni, attirando finanziamenti per la transizione verde tramite aste e fondi innovativi (ICAP, 2025).

Il Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) è un'altra iniziativa fondamentale: dal 2026 imporrà un prezzo sul carbonio incorporato in prodotti importati ad alta intensità emissiva, come acciaio, cemento, fertilizzanti e idrogeno, evitando fenomeni di “carbon leakage” e stabilizzando il mercato interno (Normative, 2025; PwC, 2024).

Altre componenti rilevanti del *Fit for 55* includono:

- Il Regolamento sulla Tassonomia Verde, che stabilisce criteri per identificare le attività economiche realmente sostenibili e orientare finanziamenti.
- Normative sulla rendicontazione ambientale come la CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive) e lo SFDR (Sustainable Finance Disclosure Regulation), che impongono trasparenza e informativa nei processi ESG, costruendo un collegamento tra finanza e sostenibilità (Aspect Advisory, 2023).

Nel complesso, l'UE ha organizzato una architettura normativa sofisticata, dove i mercati (ETS), il commercio (CBAM), i fondi, la rendicontazione e gli obiettivi di lungo termine collaborano per creare un ambiente favorevole alla decarbonizzazione industriale.

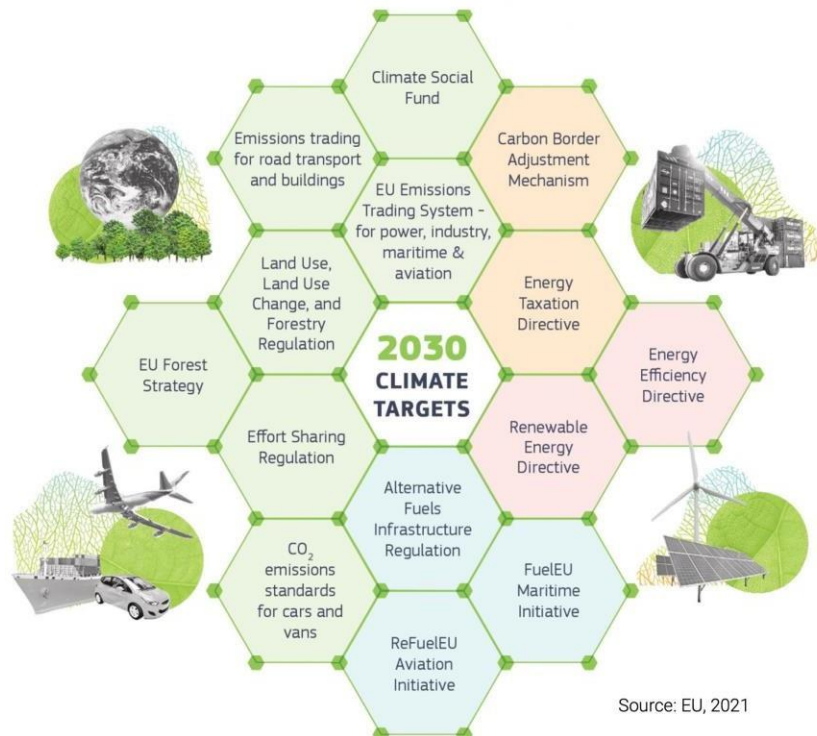


Figura 4. Componenti chiave del pacchetto Fit for 55 (obiettivi 2030).

Fonte: EU, 2021

### 1.5.3. Il Clean Industrial Deal

Nel contesto di una decarbonizzazione efficace, l'Unione Europea ha trasformato il Green Deal in Clean Industrial Deal, presentato nel febbraio 2025. Il Clean Industrial Deal si presenta non solo come un intervento ambientale, ma come un piano che mira a rendere più competitiva l'industria Europea, sostenendo chi consuma più energia e favorendo le tecnologie pulite, ma anche rafforzando la resilienza del sistema produttivo.

Questo pacchetto strategico si articola in sei direttrici d'azione:

1. Garantire energia accessibile per le imprese;
2. Canalizzare il finanziamento verso tecnologie pulite;
3. Promuovere l'economia circolare;
4. Rafforzare le partnership internazionali;
5. Creare lead market per prodotti green;
6. Favorire l'occupazione qualificata (Commissione Europea, 2025).

Inoltre, il Clean Industrial Deal prevede l'istituzione di una Banca per la decarbonizzazione industriale, con un plafond iniziale di 100 miliardi di euro, e il fondo mira a mobilitare altri 400 miliardi di investimenti privati, facilitando l'accesso ai capitali e sovvenzioni per la transizione verde (Reuters, 2025). Tra le misure messe in campo troviamo:

- Un piano pilota da 500 milioni con la Banca Europea per gli Investimenti per contratti di acquisto di energia rinnovabile destinato alle PMI;
- Accelerazione dei permessi per infrastrutture energetiche pulite;
- Semplificazione delle regole sugli aiuti di Stato per favorire l'innovazione industriale sostenibile;
- Promozione di un "Circular Economy Act" per ridurre i costi delle materie prime e incentivare il riciclo (Reuters, 2025; El País, 2025).

L'approccio integrato del progetto rappresenta una svolta tra le politiche europee, combinando governance, ambizione climatica e supporto industriale (Wuppertal Institute, 2025). Tuttavia, ha suscitato reazioni miste riguardo alla semplificazione della rendicontazione ambientale per le PMI, che alcuni ritengono possa ridurre la trasparenza green (Greenpeace via Guardian, 2025; Reuters, 2025).

## Capitolo 2 - La cattura della CO<sub>2</sub>: tecnologie e potenzialità

### 2.1 Perché catturare la CO<sub>2</sub>

La CO<sub>2</sub>, o biossido di carbonio, è un gas incolore, inodore e termicamente stabile, naturalmente presente nell'atmosfera in quantità modeste. Viene emessa attraverso processi biologici (come la respirazione e la decomposizione) e attività umane (quali la combustione

di combustibili fossili). Una volta immessa, rimane nell'atmosfera per lungo tempo contribuendo all'effetto serra, ovvero al meccanismo che mantiene la Terra a temperature adatte alla vita. Tuttavia, l'aumento antropico delle concentrazioni di CO<sub>2</sub> e di altri gas serra sta alterando questo bilancio, provocando il riscaldamento globale.

Tra i principali gas serra, oltre alla CO<sub>2</sub>, troviamo:

- Metano (CH<sub>4</sub>), emesso da discariche, allevamenti e coltivazioni di riso;
- Protossido d'azoto (N<sub>2</sub>O), derivante da pratiche agricole intensive e processi industriali;
- Idrofluorocarburi (HFC) e perfluorocarburi (PFC), usati in refrigerazione, elettronica e manifattura, caratterizzati da un elevato potenziale di riscaldamento;
- Esafluoruro di zolfo (SF<sub>6</sub>), impiegato in alcune applicazioni industriali, con un GWP migliaia di volte superiore a quello della CO<sub>2</sub>.

Ogni gas ha un proprio Potenziale di Riscaldamento Globale (Global Warming Potential, GWP), che indica il contributo climatico relativo a parità di massa emessa rispetto a una pari quantità di CO<sub>2</sub> (che ha GWP = 1). Nonostante la CO<sub>2</sub> non sia il gas con il più elevato GWP, è attualmente il principale responsabile del riscaldamento globale poiché le sue emissioni sono molto più diffuse. I grafici riportati di seguito mostrano chiaramente come, a partire dalla rivoluzione industriale, i livelli di CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O abbiano registrato un incremento significativo parallelo ad un aumento anomalo delle temperature medie globali.

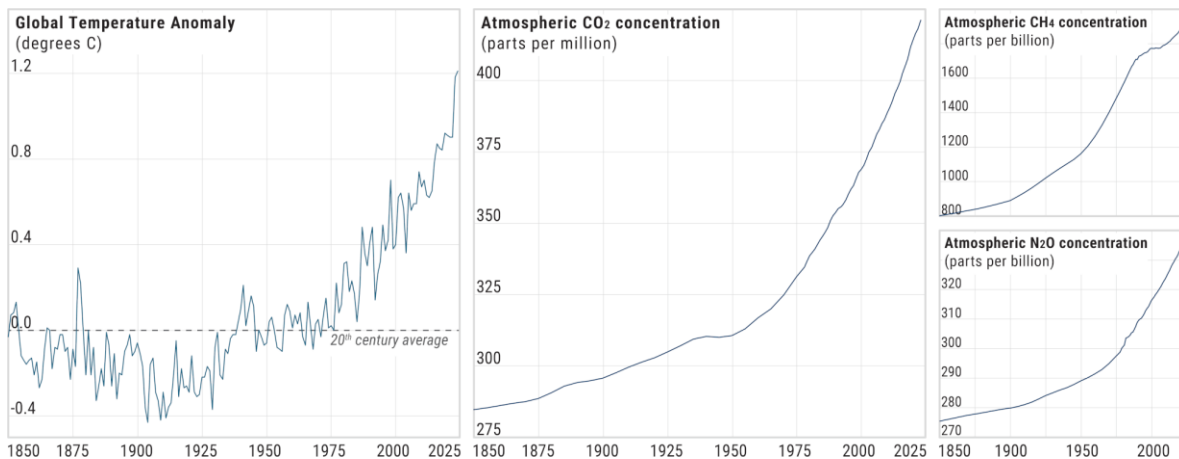


Figura 5. Correlazione tra anomalia della temperatura globale e concentrazioni atmosferiche di CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O (1850–2025).

Fonte: European Environment Agency.

L'analisi storica della CO<sub>2</sub> atmosferica, ricostruita grazie ai dati ottenuti dalle carote di ghiaccio e successivamente dalle rilevazioni strumentali, mostra come per centinaia di migliaia di anni le concentrazioni non abbiano mai superato i 300 ppm. Soltanto in epoca recente, a seguito delle attività antropiche, questo limite è stato ampiamente superato, fino a raggiungere valori superiori a 420 ppm. Secondo le rilevazioni della NASA, il contenuto atmosferico di CO<sub>2</sub> è aumentato del 50 % in meno di due secoli, sottolineando il rilevante impatto delle attività umane sul nuovo equilibrio climatico (NASA, 2025).

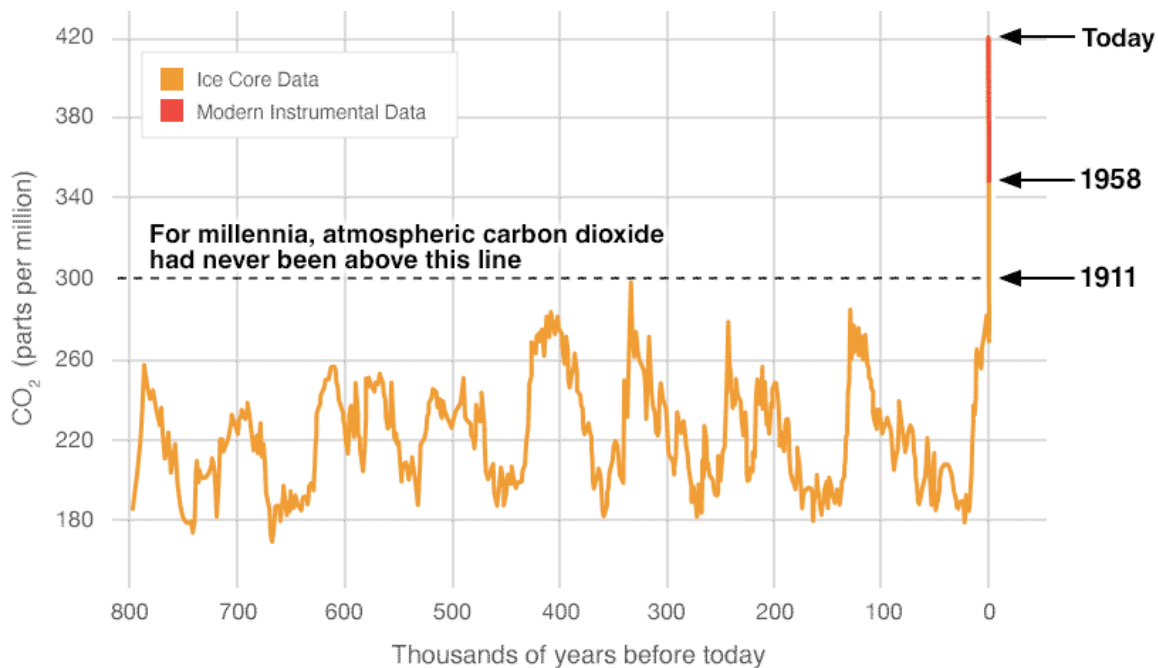


Figura 6. Concentrazioni atmosferiche di CO<sub>2</sub> negli ultimi 800.000 anni.

Fonte: NASA, 2025.

## 2.2 Carbon Capture, Utilization and Storage

In un contesto in cui la necessità di ridurre drasticamente le emissioni climalteranti diventa sempre più urgente, la tecnologia del Carbon Capture, Utilization and Storage rappresenta una delle opzioni più concrete per affiancare la decarbonizzazione nei settori cosiddetti hard-to-abate, ovvero quelli in cui le alternative sostenibili sono ancora limitate o poco mature. L'idea alla base del CCUS è apparentemente semplice: catturare la CO<sub>2</sub> prima che venga rilasciata in atmosfera, per poi destinarla a un processo di utilizzo o a uno stoccaggio sicuro a lungo termine. Questa soluzione, sebbene complessa e molto costosa, è considerata

fondamentale da numerose organizzazioni internazionali, soprattutto per raggiungere gli obiettivi Net Zero entro la metà del secolo. La tecnologia CCUS si articola in diverse fasi che comprendono la cattura della CO<sub>2</sub>, il trasporto e infine il suo utilizzo o stoccaggio.

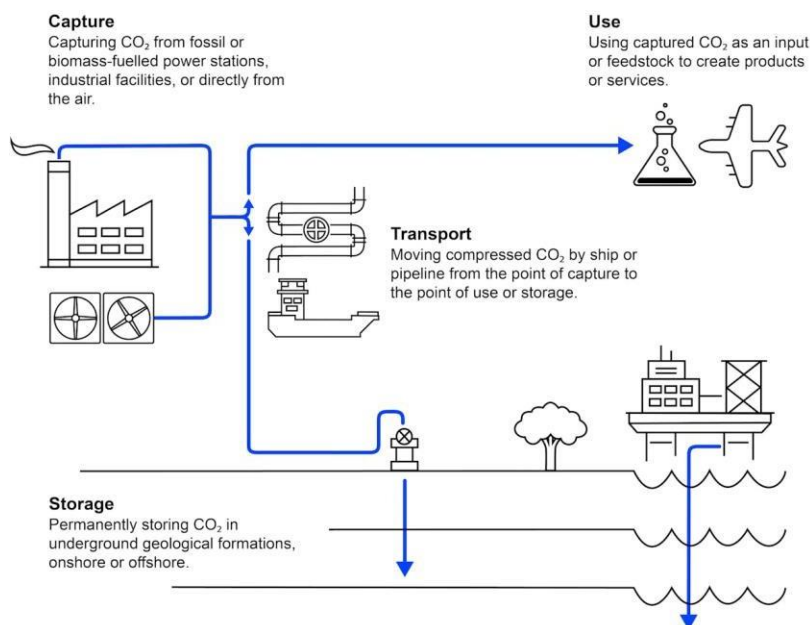


Figura 7. Schema del processo CCUS: cattura, trasporto, utilizzo e stoccaggio della CO<sub>2</sub>.

Fonte: IEA, riportato in *“About CCUS”*

L'utilizzo può riguardare la produzione di carburanti sintetici, materiali da costruzione o l'impiego diretto in processi industriali, mentre lo stoccaggio avviene generalmente in formazioni geologiche profonde, come giacimenti esauriti di gas naturale o saline, dove la CO<sub>2</sub> può essere isolata in modo permanente. A livello Europeo la strategia industriale del 2024 ha posto il CCUS tra gli strumenti chiave per la neutralità climatica, con obiettivi come

la cattura di almeno 50 milioni di tonnellate di CO<sub>2</sub> entro il 2030 e oltre 280 milioni entro il 2040. In parallelo, numerosi progetti stanno emergendo in Norvegia, Olanda, Danimarca e Italia, dove si sta investendo nella creazione di hub integrati che possano connettere più impianti emissivi a infrastrutture condivise di trasporto e stoccaggio. Tra questi, il progetto Northern Lights in Norvegia rappresenta un caso pilota a livello mondiale, mentre l'hub CCS di Ravenna in Italia è destinato a diventare il primo impianto nazionale su larga scala. Nonostante queste evoluzioni, il CCUS resta una tecnologia controversa sia per i costi elevati legati alla sua implementazione che per le incertezze sul lungo periodo circa la sicurezza dello stoccaggio geologico.

Studi recenti mettono in dubbio anche la reale capacità di stoccaggio globale, sottolineando che, sebbene il potenziale tecnico sia enorme, quello effettivamente accessibile e sicuro potrebbe essere molto più limitato rispetto alle stime iniziali. Ciononostante, nei settori in cui l'elettrificazione o l'idrogeno verde non sono soluzioni praticabili nel breve termine, il CCUS continua a rappresentare un ponte necessario verso la decarbonizzazione, soprattutto per industrie ad alta intensità energetica come quella del cemento, dell'acciaio o della raffinazione. La sua efficacia dipenderà dalla capacità dei Governi e degli Investitori di sostenerne lo sviluppo con politiche chiare, incentivi adeguati e una pianificazione integrata che ne garantisca l'applicazione su scala industriale.

### 2.2.1 Classificazione delle tecnologie CCUS

Quando si parla di cattura della CO<sub>2</sub> non si fa riferimento a un'unica tecnologia, ma a un insieme di soluzioni ingegneristiche e chimiche che vengono impiegate in base al tipo di

processo industriale, alla composizione dei gas emessi, al contesto territoriale e agli obiettivi di ciascun impianto. In generale le tecnologie di cattura si distinguono in tre grandi famiglie principali: Post-Combustione, Pre-Combustione e Combustione Oxy-Fuel. Ognuna di queste ha caratteristiche e limiti diversi, e la scelta della migliore opzione dipende fortemente dall'impianto esistente e dal tipo di combustibile utilizzato. La Post-Combustione è forse la tecnica più diffusa e studiata, perché può essere applicata a impianti esistenti senza dover modificare radicalmente il processo produttivo: In questo caso la CO<sub>2</sub> viene separata dai fumi esausti, tipicamente utilizzando solventi chimici assorbenti come le ammine. È una tecnologia relativamente matura, ma comporta un consumo energetico non trascurabile per la rigenerazione del solvente e la compressione del gas. La Pre-Combustione invece prevede la trasformazione del combustibile in un gas di sintesi contenente idrogeno e CO<sub>2</sub>, prima che avvenga la combustione vera e propria. La CO<sub>2</sub> viene quindi separata dal gas in una fase iniziale, a concentrazioni più elevate e con maggiore efficienza rispetto alla Post-Combustione. Tuttavia questa tecnologia richiede impianti progettati ad hoc ed è quindi difficilmente adattabile a infrastrutture esistenti. Infine, la combustione Oxy-Fuel prevede la combustione del combustibile in ossigeno puro anziché in aria, generando così una miscela di CO<sub>2</sub> e vapore acqueo facilmente separabile per condensazione. Questo approccio consente di ottenere una CO<sub>2</sub> quasi pura ma presenta alcune complessità tecniche, soprattutto legate alla produzione dell'ossigeno. Oltre a queste tre categorie principali, negli ultimi anni si stanno sviluppando anche tecnologie emergenti come la cattura tramite membrane selettive, assorbenti solidi o processi criogenici, che potrebbero migliorare l'efficienza complessiva e ridurre i costi operativi, ma non verranno analizzate nel dettaglio durante la stesura di questo elaborato.

Un elemento cruciale da tenere in considerazione è che la cattura della CO<sub>2</sub> rappresenta solo una parte dell'intera catena del valore del CCUS: per essere efficace infatti, essa deve essere integrata con sistemi affidabili di trasporto e con destinazioni finali sicure, che possono essere geologiche o industriali. La figura seguente illustra schematicamente le tre modalità più diffuse, evidenziando i diversi punti del processo energetico in cui la CO<sub>2</sub> può essere separata, compressa e successivamente stoccata o riutilizzata.

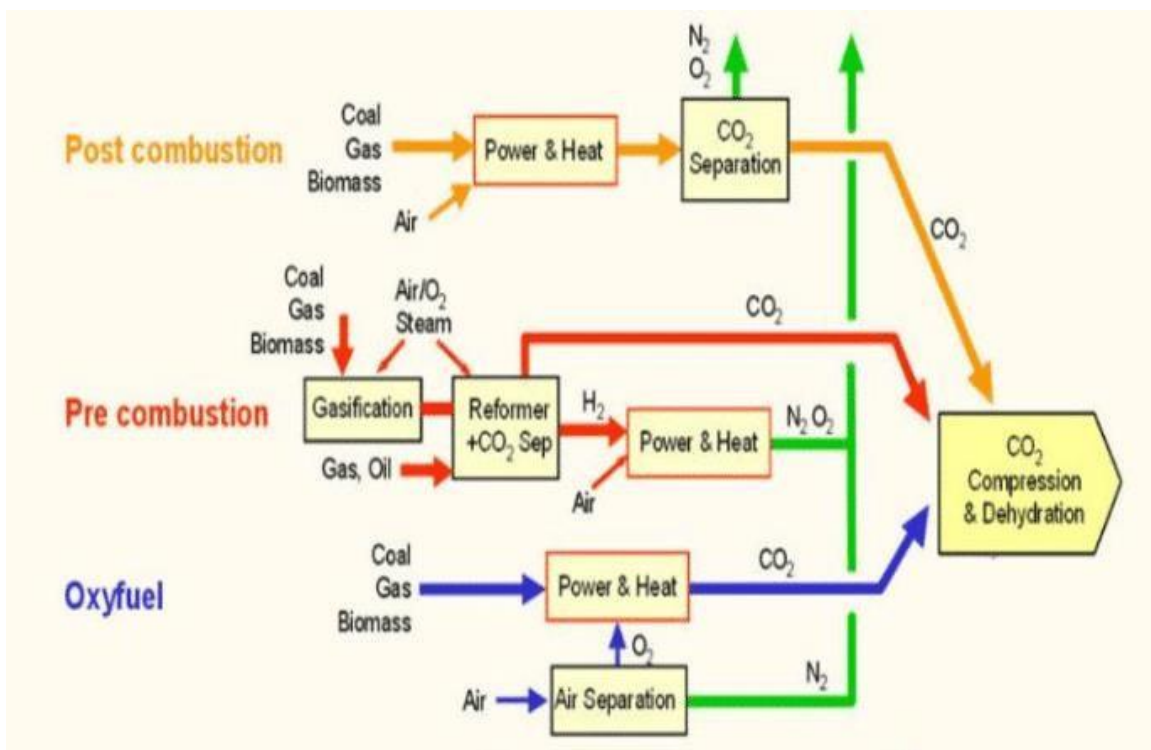


Figura 8. Ways of catching CO<sub>2</sub> from industries (Post-Combustion, Pre-Combustion and Combustion).

Fonte: IPCC, 2005.

## 2.2.2 Cattura Pre-Combustione

Tra le tecnologie di cattura della CO<sub>2</sub>, quella in fase di pre-combustione rappresenta un approccio particolarmente interessante dal punto di vista dell'efficienza del processo e della concentrazione dei gas da trattare. In questo caso, la CO<sub>2</sub> viene separata prima della combustione vera e propria. Il combustibile fossile, tipicamente carbone, gas naturale o biomassa, viene inizialmente convertito in un gas di sintesi, detto syngas, composto principalmente da idrogeno e monossido di carbonio. Successivamente, attraverso un processo chimico chiamato shift catalitico, il monossido di carbonio reagisce con il vapore acqueo per produrre ulteriore idrogeno e CO<sub>2</sub>. Quest'ultima viene quindi separata in una fase in cui è presente in alta concentrazione e ad alta pressione, rendendo più semplice ed efficiente la cattura rispetto ad altri sistemi. Il risultato è una corrente di idrogeno puro che può essere utilizzata come combustibile a zero emissioni. Questo sistema è alla base dei cicli integrati a gassificazione combinata, noti come IGCC, e risulta particolarmente promettente anche per la produzione di idrogeno low carbon, ovvero idrogeno ottenuto da fonti fossili ma con abbattimento della CO<sub>2</sub>. I vantaggi di questa tecnologia risiedono soprattutto nell'efficienza del processo e nella possibilità di combinare la cattura della CO<sub>2</sub> con la produzione di un combustibile pulito, ma la complessità tecnica e l'elevato costo di realizzazione ne limitano attualmente l'applicabilità su larga scala. Gli impianti devono essere progettati fin dall'inizio per adottare questa configurazione e ciò rappresenta una barriera significativa per l'adattamento del parco industriale esistente. Inoltre, la disponibilità di infrastrutture per il trasporto e lo stoccaggio della CO<sub>2</sub> rappresenta un ulteriore fattore determinante per la fattibilità del processo. Nonostante queste criticità, la pre-combustione

continua a essere studiata e sperimentata in diversi progetti pilota e rappresenta una componente importante nel panorama tecnologico del CCUS, in particolare per i settori dove l'idrogeno potrà assumere un ruolo centrale nella transizione energetica.

### 2.2.3 Cattura Post-Combustione

La tecnologia di cattura della CO<sub>2</sub> in fase di post-combustione è probabilmente la più diffusa e conosciuta, soprattutto perché si adatta bene agli impianti esistenti senza richiedere modifiche strutturali radicali. In questo approccio, la CO<sub>2</sub> viene separata dai gas esausti generati dopo il processo di combustione, cioè nel momento in cui il combustibile ha già bruciato e ha rilasciato le sue emissioni. I fumi vengono convogliati in un impianto di trattamento dove un solvente chimico, generalmente un'ammina, assorbe selettivamente la CO<sub>2</sub> lasciando passare gli altri gas. Il solvente saturo viene poi riscaldato per rilasciare la CO<sub>2</sub> in forma concentrata, pronta per essere compressa e trasportata. Questo processo è relativamente semplice e ben collaudato, ma comporta alcune criticità, in particolare per quanto riguarda il consumo energetico legato al recupero del solvente e alla compressione del gas, che possono ridurre l'efficienza complessiva dell'impianto. Nonostante ciò, l'adattabilità della post-combustione rappresenta un vantaggio strategico per la decarbonizzazione rapida, soprattutto in contesti dove non è possibile ricostruire ex novo le infrastrutture. Inoltre, la CO<sub>2</sub> catturata in questo modo può essere reimpiegata in vari settori industriali oppure stoccata in siti geologici profondi, contribuendo così a ridurre concretamente le emissioni nette. Diverse sperimentazioni e progetti pilota sono in corso in Europa, Nord America e Asia, e alcuni impianti sono già operativi a livello commerciale. In

Italia, ad esempio, è in fase avanzata il progetto pilota ENEA-Saipem che testa una tecnologia di cattura post-combustione a base di solventi innovativi, con l'obiettivo di ridurre costi e migliorare le prestazioni ambientali. Questo conferma come la post-combustione sia oggi una delle tecnologie più pronte all'uso, in grado di dare un contributo immediato alla transizione energetica, pur con i limiti noti legati alla sua efficienza e sostenibilità economica nel lungo periodo.

## 2.2.4 Combustione Oxy-Fuel

La combustione oxy-fuel rappresenta una soluzione innovativa all'interno delle tecnologie di cattura della CO<sub>2</sub>, e si distingue dalle altre perché non utilizza aria nel processo di combustione ma ossigeno puro, generando una miscela di gas composta quasi esclusivamente da anidride carbonica e vapore acqueo. Questo permette di semplificare notevolmente la fase di separazione della CO<sub>2</sub>, in quanto l'assenza di azoto nella miscela dei fumi elimina la necessità di filtri chimici o solventi per catturare selettivamente il carbonio. Una volta raffreddato il flusso di gas, l'acqua condensa e lascia la CO<sub>2</sub> quasi pura, pronta per essere compressa e avviata al trasporto o allo stoccaggio. Dal punto di vista teorico, questo approccio consente di ottenere efficienze di cattura molto elevate, spesso superiori al 90%, e una qualità del gas che richiede minime operazioni di purificazione. Tuttavia, il principale ostacolo è legato alla produzione dell'ossigeno puro, che richiede processi energivori come la separazione criogenica o la membrana a ossigeno, i quali incidono fortemente sull'efficienza complessiva del sistema. Inoltre, l'uso di ossigeno puro comporta implicazioni tecniche e di sicurezza da non sottovalutare, soprattutto in impianti esistenti non progettati

per funzionare in condizioni così particolari. La tecnologia oxy-fuel è stata testata con successo in alcuni progetti pilota in Europa e negli Stati Uniti, ma al momento rimane meno diffusa rispetto alla post-combustione, anche per i maggiori costi iniziali e per la necessità di riconvertire in modo significativo gli impianti. Tuttavia, il suo potenziale rimane alto, soprattutto in quei contesti industriali dove l'elettrificazione non è praticabile e dove la disponibilità di ossigeno tecnico già presente rende più semplice l'adozione di questa tecnologia. Inoltre, se integrata con sistemi di recupero del calore e di ottimizzazione energetica, l'oxy-fuel potrebbe contribuire a ridurre ulteriormente le emissioni nei settori energivori, affiancandosi alle altre tecnologie CCUS in un portafoglio sempre più articolato di soluzioni per la decarbonizzazione.

### 2.2.5 Direct Air Capture

La Direct Air Capture, spesso abbreviata in DAC, è una delle tecnologie più innovative e promettenti nel panorama delle soluzioni per la rimozione della CO<sub>2</sub>. A differenza dei sistemi che catturano l'anidride carbonica dai fumi industriali o da impianti di combustione, la DAC agisce direttamente sull'aria atmosferica, estraendo la CO<sub>2</sub> già diffusa nell'ambiente attraverso processi chimici. Si tratta quindi di una tecnologia che non si limita a ridurre le emissioni alla fonte, ma che potenzialmente consente di rimuovere CO<sub>2</sub> già presente in atmosfera, agendo in modo diretto sul problema dell'accumulo storico dei gas serra. Il principio su cui si basa è semplice solo in apparenza: grandi ventole aspirano l'aria e la convogliano verso materiali assorbenti che reagiscono con la CO<sub>2</sub>, trattenendola e permettendo così la separazione del gas. Successivamente, il materiale viene riscaldato per

rilasciare la CO<sub>2</sub> in forma concentrata, pronta per lo stoccaggio geologico o per l'utilizzo in processi industriali, ad esempio nella produzione di combustibili sintetici, nella fabbricazione di materiali da costruzione o in agricoltura. I materiali utilizzati per catturare il carbonio possono essere liquidi o solidi, e la scelta tra le due tecnologie dipende da fattori come la temperatura di rigenerazione, la selettività del processo e il costo energetico complessivo. Tra i principali vantaggi della DAC c'è sicuramente la sua capacità di operare in qualsiasi luogo, a prescindere dalla presenza di sorgenti industriali, rendendola potenzialmente utilizzabile su scala globale e in modo distribuito. Inoltre, è una delle poche tecnologie che può teoricamente portare a emissioni nette negative, ovvero rimuovere più CO<sub>2</sub> di quanta ne venga emessa nel ciclo produttivo. Tuttavia, i limiti attuali sono ancora significativi, soprattutto in termini di consumo energetico ed economico. Trattandosi di una tecnologia che lavora con una concentrazione di CO<sub>2</sub> molto bassa (circa lo 0,04% nell'aria), richiede un'enorme quantità di energia per essere efficace. Attualmente, i costi per tonnellata di CO<sub>2</sub> rimossa sono ancora piuttosto elevati, ma si prevede una progressiva riduzione grazie all'ottimizzazione dei processi, all'uso di fonti rinnovabili per alimentare gli impianti e all'aumento delle economie di scala. Tra le aziende pioniere del settore c'è Climeworks, con sede in Svizzera, che ha già realizzato diversi impianti operativi, tra cui Orca e Mammoth, capaci di catturare migliaia di tonnellate di CO<sub>2</sub> all'anno. Un'altra realtà attiva è Carbon Engineering, in Canada, che adotta un approccio diverso basato su solventi liquidi. Questi esempi dimostrano che, sebbene ancora in una fase iniziale, la DAC sta già muovendo i primi passi verso l'industrializzazione. Alcuni progetti combinano la DAC con il sequestro geologico, creando sistemi DACCS (Direct Air Carbon Capture and Storage) che mirano a ottenere rimozioni permanenti del carbonio. In altri casi, la CO<sub>2</sub> catturata viene impiegata per

produrre combustibili sintetici, dando vita a modelli circolari in cui il carbonio viene continuamente riutilizzato. In definitiva, la Direct Air Capture rappresenta una delle frontiere più affascinanti e controverse della lotta al cambiamento climatico. È affascinante per la sua capacità teorica di invertire l'accumulo di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera, ma è anche oggetto di dibattito per i suoi costi elevati, per il rischio di essere considerata una soluzione tecnologica che ritarda l'adozione di misure strutturali più radicali e per le sfide legate al suo impatto ambientale complessivo. Nonostante ciò, la DAC è sempre più presente nelle roadmap internazionali verso la neutralità climatica e continua ad attrarre investimenti pubblici e privati in tutto il mondo. Sarà fondamentale monitorare i progressi tecnologici, valutare attentamente i trade-off e accompagnare lo sviluppo della DAC con politiche che ne incentivino un utilizzo responsabile, mirato e realmente efficace nel lungo periodo.

## 2.3 Costi di investimento

Il tema dei costi è un aspetto centrale per valutare la reale sostenibilità e scalabilità di queste tecnologie. Quando si analizzano i progetti CCUS, si distingue generalmente tra costi di investimento iniziali (CAPEX) e costi operativi ricorrenti (OPEX). I CAPEX includono tutto ciò che riguarda la costruzione degli impianti, l'acquisto delle tecnologie, le infrastrutture per il trasporto della CO<sub>2</sub> e l'eventuale preparazione di siti di stoccaggio. Gli OPEX invece riguardano il funzionamento quotidiano dell'impianto: consumo energetico, manutenzione, personale tecnico, rigenerazione dei solventi, compressione e trasporto della CO<sub>2</sub>.

Uno degli ostacoli principali alla diffusione su larga scala delle tecnologie di cattura è proprio l'elevato investimento iniziale richiesto, che può variare notevolmente in base alla tecnologia

adottata, alla localizzazione dell'impianto e alla disponibilità di infrastrutture esistenti. Per esempio, i sistemi di post-combustione applicati ad impianti esistenti possono presentare costi più contenuti rispetto ad approcci completamente nuovi come la pre-combustione o l'oxy-fuel, che richiedono impianti progettati ad hoc. Secondo stime della IEA, i costi CAPEX per la cattura della CO<sub>2</sub> possono variare da circa 300 a oltre 1000 dollari per tonnellata di CO<sub>2</sub> catturata all'anno, mentre gli OPEX possono andare da 40 a 80 dollari per tonnellata. Le tecnologie più emergenti, come la Direct Air Capture, risultano attualmente più costose, con stime che superano i 600 dollari per tonnellata, anche se i trend indicano una potenziale riduzione significativa nel prossimo decennio grazie all'innovazione e alle economie di scala.

Il consumo energetico rappresenta una voce particolarmente rilevante nei costi operativi. In alcuni casi, fino al 30% dell'energia prodotta da un impianto può essere reimpiegata per alimentare il sistema di cattura, generando così un trade-off evidente tra riduzione delle emissioni e efficienza complessiva. Questo aspetto ha un impatto diretto anche sulle emissioni indirette: se l'energia utilizzata non proviene da fonti rinnovabili, il bilancio ambientale complessivo può risultare meno vantaggioso di quanto previsto. È per questo che i progetti più avanzati puntano sempre di più a integrare le tecnologie CCUS con energie rinnovabili, in modo da massimizzare l'efficienza ambientale complessiva. Un altro elemento importante è il costo legato al trasporto e allo stoccaggio della CO<sub>2</sub>: pipeline, compressori, pozzi di iniezione e siti geologici sicuri rappresentano infrastrutture fondamentali ma anche molto onerose. Tuttavia, si stanno sperimentando modelli di "hub" o cluster industriali dove

più impianti condividono le stesse infrastrutture di trasporto e stoccaggio, con l'obiettivo di abbattere i costi unitari.

Infine, la sostenibilità economica di un impianto CCUS non dipende solo dai costi, ma anche dalle entrate potenziali che può generare. Alcuni progetti riescono a valorizzare la CO<sub>2</sub> catturata, ad esempio vendendola per utilizzi industriali (come nella produzione di metanolo, materiali da costruzione o bevande gassate), oppure inserendosi nei sistemi di carbon pricing e credit trading. In questo senso, il ritorno sull'investimento può variare notevolmente: se ben progettati e inseriti in un contesto normativo favorevole, alcuni progetti possono ammortizzare i costi in un periodo compreso tra 6 e 10 anni, avvicinandosi alla soglia di sostenibilità economica. Tuttavia, questo richiede un'adeguata previsione di incentivi pubblici, partnership pubblico-private e, soprattutto, una cornice regolatoria stabile e prevedibile.

La questione dei costi resta quindi uno dei principali nodi da sciogliere per rendere le tecnologie di cattura un'opzione realmente competitiva rispetto ad altre forme di mitigazione. Ma come dimostrano le recenti roadmap europee e internazionali, il progresso tecnologico, unito al supporto politico e alla crescente pressione sociale, sta già contribuendo a rendere il CCUS una componente sempre più concreta del futuro energetico globale.

# Capitolo 3 – Panoramica degli impianti esistenti con cattura della CO<sub>2</sub>

## 3.1 Diffusione degli impianti a livello globale

Negli ultimi anni si è assistito a una diffusione significativa delle tecnologie di cattura e stoccaggio della CO<sub>2</sub>, che da sperimentazioni isolate e su scala ridotta si stanno trasformando in veri e propri sistemi industriali strutturati. Questa evoluzione è il risultato di una crescente consapevolezza globale circa l'urgenza di ridurre le emissioni climalteranti e della necessità di affiancare soluzioni di rimozione del carbonio a quelle tradizionali di mitigazione. La distribuzione degli impianti CCUS nel mondo è fortemente disomogenea, ma è possibile individuare alcune aree geografiche in cui queste tecnologie si stanno sviluppando con maggiore rapidità, guidate sia da politiche pubbliche favorevoli sia da strategie industriali lungimiranti.

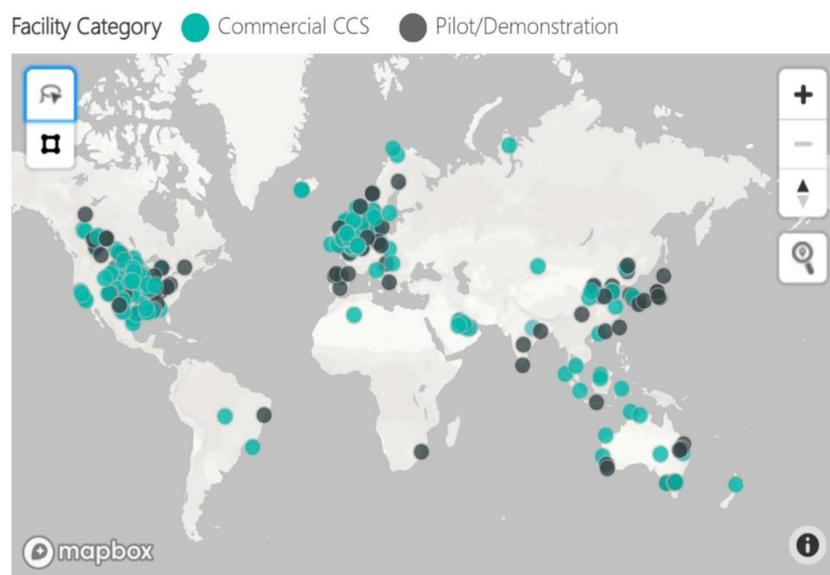


Figura 9. Distribuzione globale dei progetti CCUS, inclusi impianti commerciali e piloti/dimostrativi.

Fonte: RPB Energy Economics (2023).

Il Nord America è attualmente la regione più avanzata per quanto riguarda la diffusione degli impianti CCUS. Negli Stati Uniti numerosi progetti sono già operativi e molti altri sono in fase di progettazione o espansione, anche grazie al sostegno di programmi federali come il 45Q Tax Credit, che prevede incentivi economici per ogni tonnellata di CO<sub>2</sub> catturata e stoccata. Anche in Canada si registrano esempi virtuosi, come l'impianto Boundary Dam, che rappresenta uno dei primi progetti su scala commerciale al mondo e che verrà analizzato in dettaglio nel capitolo successivo. L'Europa segue a distanza, ma con un approccio strategico molto chiaro: oltre agli impianti in fase avanzata nei Paesi Bassi, in Norvegia e nel Regno Unito, si sta assistendo alla creazione di veri e propri hub industriali dove le infrastrutture di trasporto e stoccaggio della CO<sub>2</sub> vengono condivise tra più attori. Un esempio è il progetto Northern Lights, in Norvegia, che rappresenta il primo tentativo europeo di realizzare una rete transfrontaliera per la cattura, il trasporto marittimo e l'iniezione della CO<sub>2</sub> in formazioni geologiche sottomarine.

Anche la Cina ha cominciato ad investire massicciamente in questa direzione, con progetti pilota legati soprattutto al settore energetico e industriale pesante. Il Paese ha inserito il CCUS nella propria strategia nazionale per la neutralità carbonica entro il 2060, prevedendo lo sviluppo di impianti integrati nelle principali regioni carbonifere. In misura minore, anche altre economie asiatiche come la Corea del Sud, il Giappone e l'India stanno sperimentando

soluzioni analoghe, pur con livelli di maturità tecnologica e supporto politico ancora limitati. Nel Medio Oriente, l'Arabia Saudita e gli Emirati Arabi Uniti si stanno ritagliando un ruolo da protagonisti, soprattutto per la volontà di decarbonizzare settori difficilmente elettrificabili come quello petrolchimico, e per la disponibilità di vaste aree geologicamente idonee allo stoccaggio del carbonio.

Un aspetto interessante è che sempre più spesso i nuovi impianti non vengono pensati come sistemi stand-alone, ma come parte integrante di ecosistemi industriali interconnessi. Questa logica “hub and cluster” prevede la condivisione delle infrastrutture di trasporto e stoccaggio tra più aziende, con l'obiettivo di ridurre i costi unitari e rendere la cattura della CO<sub>2</sub> più accessibile anche per le PMI. Inoltre, si assiste a un'accelerazione degli investimenti privati, sostenuti da fondi pubblici e da strumenti finanziari innovativi, come i carbon credit o i contratti per differenza. Seppur ancora lontana dagli obiettivi fissati dalle roadmap internazionali, la diffusione degli impianti CCUS rappresenta oggi un segnale concreto del fatto che la transizione energetica richiede non solo riduzione delle emissioni, ma anche strumenti per rimuovere la CO<sub>2</sub> già presente in atmosfera. È una corsa contro il tempo, e l'espansione globale di queste tecnologie ne è il riflesso più evidente.

### 3.2 Tipologie di impianti e applicazione per settore industriale

Le tecnologie di cattura e stoccaggio della CO<sub>2</sub> trovano applicazione in differenti tipologie di impianti industriali, ognuna con caratteristiche specifiche legate al processo produttivo e alla composizione dei gas emessi. A livello globale, gli impianti con sistemi CCUS già operativi o in fase avanzata di sviluppo si concentrano prevalentemente in tre grandi settori:

la produzione di energia da combustibili fossili, l'industria pesante e i cluster industriali multi-settoriali. In ciascuno di questi ambiti la tecnologia è stata adattata a esigenze e vincoli differenti, fornendo importanti indicazioni sul suo grado di maturità e sulle prospettive future (IEA, 2022).

Un primo gruppo è rappresentato dagli impianti di generazione elettrica alimentati a carbone o gas naturale. In questi casi la CO<sub>2</sub> è prodotta principalmente dalla combustione e può essere catturata attraverso sistemi di Post-Combustione, Pre-Combustione o Combustione Oxy-Fuel. L'esperienza di progetti come Boundary Dam in Canada o Petra Nova negli Stati Uniti ha dimostrato che è possibile integrare sistemi di cattura su centrali esistenti, sebbene con penalità energetiche e costi elevati (IEEFA, 2020; Global CCS Institute, 2021). Nei Paesi in cui il carbone rimane una risorsa rilevante per la sicurezza energetica, queste applicazioni rivestono un ruolo strategico, in quanto consentono di ridurre l'impatto ambientale senza abbandonare completamente la produzione termoelettrica.

Un secondo ambito di applicazione riguarda i settori industriali cosiddetti *hard-to-abate*, caratterizzati da emissioni processuali oltre che energetiche. Tra questi figurano la siderurgia, la produzione di cemento, la chimica di base e la raffinazione del petrolio. In tali settori la cattura della CO<sub>2</sub> assume un valore particolarmente rilevante, poiché le emissioni non possono essere eliminate solo attraverso il ricorso alle energie rinnovabili. Gli impianti pilota nel comparto del cemento, come quello sviluppato da Norcem in Norvegia, o nei processi siderurgici, come il progetto pilota ArcelorMittal in Belgio, mostrano che la CCS può rappresentare un passaggio obbligato per ridurre drasticamente le emissioni industriali e

garantire la competitività in un contesto normativo che spinge verso la neutralità climatica (IEA, 2021; European Commission, 2022).

Una terza tipologia è rappresentata dai cluster industriali, ossia poli produttivi in cui più impianti condividono infrastrutture comuni per la cattura, il trasporto e lo stoccaggio della CO<sub>2</sub>. Questo modello, promosso soprattutto in Europa e nel Regno Unito, consente di abbattere i costi unitari attraverso economie di scala e di favorire sinergie tra diversi settori industriali. Progetti come il Northern Lights in Norvegia o il Net Zero Teesside nel Regno Unito rappresentano esempi concreti di questa logica, che mira a trasformare intere aree industriali in hub decarbonizzati, riducendo al contempo i rischi e le barriere all'ingresso per i singoli operatori (Global CCS Institute, 2022; Equinor, 2023).

La distribuzione delle tipologie di impianti riflette quindi non solo scelte tecnologiche, ma anche priorità politiche e industriali dei diversi Paesi. Laddove l'economia dipende ancora in larga misura dai combustibili fossili, gli impianti di cattura applicati alla generazione elettrica costituiscono la principale area di investimento. Nei contesti più avanzati dal punto di vista della transizione energetica, invece, la CCS viene sempre più associata ai settori industriali energivori e ai modelli cluster, in un'ottica di integrazione sistemica. Questo dimostra come le tecnologie CCUS non abbiano un'applicazione unica e standardizzata, ma vadano adattate di volta in volta al contesto produttivo e territoriale, con l'obiettivo di massimizzare l'efficienza, ridurre i costi e garantire una reale sostenibilità economica e ambientale (IEA, 2022).

### 3.3 Opportunita' e limiti delle soluzioni CCUS

Le tecnologie di cattura, utilizzo e stoccaggio della CO<sub>2</sub> rappresentano oggi una delle soluzioni più discusse e promettenti per affrontare la sfida della decarbonizzazione globale. La loro rilevanza deriva dal fatto che, a differenza di altre strategie come l'efficienza energetica o le fonti rinnovabili, intervengono direttamente sulle emissioni residue di processi industriali che difficilmente possono essere decarbonizzati in altro modo. L'International Energy Agency sottolinea che senza un contributo significativo della CCS sarà estremamente complesso raggiungere gli obiettivi di neutralità climatica entro il 2050, soprattutto nei settori hard-to-abate come cemento, acciaio e chimica (IEA, 2021).

Le opportunità legate alla diffusione delle tecnologie CCUS sono molteplici: in primis permettono di preservare l'uso di infrastrutture esistenti, come centrali a carbone e a gas, evitando l'abbandono immediato di asset industriali e riducendo i costi di transizione per le imprese. Inoltre, la possibilità di utilizzare la CO<sub>2</sub> catturata come materia prima in applicazioni industriali (ad esempio nella produzione di carburanti sintetici, plastiche, fertilizzanti o materiali da costruzione) apre la strada ad un'economia circolare del carbonio in cui *le emissioni non rappresentano più un rifiuto, ma una risorsa*. A ciò si aggiunge la prospettiva della creazione di cluster industriali e hub per la decarbonizzazione, come i progetti Northern Lights in Norvegia e Net Zero Teesside nel Regno Unito, che testimoniano l'interesse crescente verso un approccio integrato e condiviso (Global CCS Institute, 2022). Infine, un ulteriore punto di forza è rappresentato dal potenziale contributo delle CCUS alla competitività internazionale delle imprese: adottare per primi queste soluzioni può garantire

vantaggi reputazionali e di mercato, soprattutto in un contesto in cui i consumatori e gli investitori premiano la sostenibilità (European Commission, 2022).

Nonostante tali opportunità, i limiti attuali delle soluzioni CCUS restano significativi. Il primo e più evidente è legato ai costi: i valori di CAPEX e OPEX rimangono elevati e spesso insostenibili senza sussidi o incentivi pubblici. In media, il costo di cattura si colloca tra i 100 e i 150 dollari per tonnellata, ben al di sopra dei livelli di prezzo del carbonio oggi presenti nella maggior parte dei mercati (IEA, 2022). A ciò si aggiungono criticità tecniche, tra cui il cosiddetto *energy penalty*, ovvero la riduzione dell'efficienza degli impianti dovuta all'elevato consumo energetico richiesto per la cattura e compressione della CO<sub>2</sub>. Anche la stabilità operativa costituisce un limite: numerosi impianti pionieristici, tra cui Boundary Dam e Petra Nova, hanno registrato periodi di inattività prolungata e performance inferiori alle attese (IEEFA, 2020).

Un altro aspetto critico riguarda la destinazione finale della CO<sub>2</sub> catturata: se da un lato l'utilizzo nell'Enhanced Oil Recovery consente di generare ricavi e migliorare la redditività, dall'altro solleva dubbi sulla reale efficacia climatica, poiché l'aumento della produzione di idrocarburi rischia di vanificare parte dei benefici ottenuti. Inoltre, la disponibilità di siti sicuri e adatti per lo stoccaggio geologico non è distribuita uniformemente a livello globale, creando disparità tra Paesi e limitando la possibilità di implementare la CCS ovunque con le stesse condizioni.

Nel complesso, le soluzioni CCUS si trovano in una fase di transizione tra sperimentazione e maturità industriale e, se è vero che offrono opportunità rilevanti per la decarbonizzazione,

e' anche vero che il loro successo dipenderà dalla capacità di ridurre i costi, migliorare le performance tecniche e garantire un quadro regolatorio stabile e incentivante. Senza tali condizioni, il rischio è che queste tecnologie rimangano confinate a pochi progetti pilota e non riescano a contribuire in maniera significativa agli obiettivi globali di neutralità climatica (Global CCS Institute, 2022).

Per rendere più concreto quanto discusso nel capitolo, il paragrafo successivo analizzerà il progetto Boundary Dam in Canada, il primo impianto a carbone commerciale al mondo ad aver integrato un sistema CCUS. Questo caso studio rappresenta un esempio paradigmatico: da un lato testimonia le potenzialità tecnologiche della cattura su scala industriale, dall'altro mette in evidenza i limiti economici e operativi che ancora caratterizzano tali soluzioni.

## Capitolo 4 – Analisi di un caso studio reale

### 4.1 Boundary Dam – Canada

Ho scelto come caso studio il progetto Boundary Dam perché credo rappresenti una delle iniziative più pionieristiche e concrete per dimostrare la fattibilità della cattura e stoccaggio della CO<sub>2</sub> su scala commerciale.

Si tratta del primo impianto al Mondo ad aver integrato un sistema CCUS in una centrale termoelettrica a carbone già esistente. Il Progetto è stato realizzato nella provincia canadese del Saskatchewan, ed è stato concepito come risposta a una duplice esigenza: da un lato, la

necessità di ridurre le emissioni di gas serra in un contesto ancora fortemente dipendente dal carbone; dall'altro, la volontà di preservare una risorsa energetica locale, affiancandola a tecnologie innovative capaci di mitigarne l'impatto ambientale.

Boundary Dam, operativo dal 2014, è diventato un caso di studio di riferimento a livello internazionale, citato spesso come esempio emblematico di come la cattura della CO<sub>2</sub> possa essere integrata nei processi produttivi tradizionali senza rinunciare alla continuità dell'approvvigionamento energetico.

Il progetto è stato promosso e realizzato da SaskPower, l'utility pubblica responsabile della fornitura di energia elettrica nella provincia. Con un investimento iniziale considerevole, l'impianto ha rappresentato un importante banco di prova per la fattibilità tecnica ed economica del CCUS applicato a impianti esistenti.

La rilevanza del caso Boundary Dam non è data solo dalla tecnologia adottata, ma anche dal fatto che ha generato un ampio dibattito sia in ambito scientifico che politico, su costi, benefici e potenziale replicabilità di progetti simili in altre aree del Mondo.

Nel corso dei paragrafi seguenti verranno analizzati nel dettaglio il funzionamento tecnico dell'impianto, i principali indicatori di performance, lo schema operativo, i costi di investimento e di gestione, nonché le considerazioni legate alla sostenibilità economica e ambientale del progetto.

#### 4.1.1 Contesto e funzionamento dell'impianto

Il contesto in cui nasce questo progetto è strettamente legato alla strategia del Canada per la decarbonizzazione del settore energetico, ma anche alla volontà del governo locale di

preservare l'utilizzo delle proprie risorse fossili attraverso l'adozione di tecnologie innovative. In un'epoca in cui l'abbandono del carbone era già avviato in molte parti del mondo, Boundary Dam ha scelto di percorrere una strada diversa, cercando una soluzione tecnologica per renderlo compatibile con gli obiettivi climatici. Il sistema adottato per la cattura è di tipo Post-Combustione, e utilizza un processo chimico a base di ammine che consente di separare la CO<sub>2</sub> dai fumi generati dalla combustione, per poi comprimerla e inviarla in parte per lo stoccaggio geologico in profondità, e in parte per l'uso in operazioni di Enhanced Oil Recovery, ovvero per aumentare la produttività di giacimenti petroliferi esauriti.

Il funzionamento dell'impianto integra la produzione elettrica convenzionale con un sistema avanzato di trattamento dei fumi, all'interno di un'architettura abbastanza complessa e che richiede competenze multidisciplinari, dalla chimica ambientale alla geologia fino all'ingegneria energetica. Il ciclo operativo prevede la cattura della CO<sub>2</sub>, la sua compressione, il trasporto attraverso una condotta dedicata e infine l'iniezione sotterranea. I dati operativi raccolti nel corso degli anni hanno permesso di valutare non solo le performance tecniche, ma anche l'affidabilità del sistema nel lungo termine, fornendo un benchmark importante per lo sviluppo di progetti simili in altre parti del mondo.

Ad oggi Boundary Dam è considerato non solo un impianto attivo, ma anche un punto di riferimento nella letteratura scientifica e nelle politiche industriali legate alla transizione energetica, perché in un momento storico in cui l'abbandono del carbone sembrava inevitabile, l'esperienza canadese ha dimostrato che è possibile percorrere una strada intermedia, puntando sulla decarbonizzazione dei combustibili fossili piuttosto che sulla loro

immediata sostituzione. Nei paragrafi successivi verranno analizzati più nel dettaglio i principali KPI dell'impianto, lo schema tecnico, l'analisi economica e la valutazione della sua sostenibilità ambientale e finanziaria, al fine di comprendere fino a che punto questo progetto possa essere replicato su scala globale.



Figura 10. Boundary Dam Power Station;

Fonte: SaskPower, 2025.

#### 4.1.2 Analisi economica del progetto

Il valore pionieristico del Progetto appena descritto, Boundary Dam, è indiscutibile, ma altrettanto rilevanti sono le difficoltà e i limiti emersi soprattutto sul piano economico. Il

progetto è stato avviato nel 2014 con un investimento iniziale di circa 1,5 miliardi di dollari canadesi, dei quali 800 milioni destinati specificamente al sistema CCUS. Parte del finanziamento è stato coperto da un contributo del governo federale canadese pari a 240 milioni, mentre il resto è stato sostenuto da SaskPower attraverso fondi propri e altri strumenti finanziari. A questo si sono aggiunti incentivi e sussidi da parte del governo della provincia del Saskatchewan, che nel tempo ha continuato a sostenere progetti legati alla decarbonizzazione industriale, compreso questo.

Fin dai primi anni di attività è emerso come il costo di cattura per tonnellata di CO<sub>2</sub> risultasse ben più elevato rispetto alle stime iniziali: Il valore si è attestato tra i 100 e i 120 dollari canadesi per tonnellata nei periodi di piena efficienza, ma ha superato i 200 dollari in momenti di instabilità tecnica o malfunzionamenti dell'impianto. Questi costi sono risultati sensibilmente più alti rispetto a quanto necessario per garantire un ritorno economico in tempi brevi, anche in presenza di una filiera di vendita della CO<sub>2</sub> per attività di recupero petrolifero avanzato (EOR) e di una produzione parallela di acido solforico. La redditività legata a queste due attività è rimasta molto volatile nel tempo, in quanto soggetta a variazioni di mercato, periodi di inattività degli impianti e oscillazioni della domanda industriale.

Un elemento particolarmente critico riguarda il cosiddetto "energy penalty", cioè il calo di efficienza dell'impianto dovuto all'elevato consumo energetico del sistema CCUS. Questa riduzione dell'efficienza comporta una minore produzione netta di energia elettrica vendibile, e quindi una diminuzione dei ricavi a parità di costi fissi. Anche sotto questo profilo, il progetto si è rivelato meno competitivo rispetto alle aspettative, e ha richiesto continue ottimizzazioni tecniche per contenere l'impatto economico negativo.

Dal punto di vista dei costi operativi, l'unità BD3 ha dovuto affrontare periodi complessi caratterizzati da guasti e interruzioni frequenti, soprattutto nei primi cinque anni di attività. Questo ha avuto un impatto diretto sulla quantità di CO<sub>2</sub> effettivamente catturata e, di conseguenza, sulla quota venduta a terzi. Sebbene il progetto abbia catturato complessivamente circa 6,8 milioni di tonnellate di CO<sub>2</sub> dal 2014 al 2025, i dati dimostrano che l'obiettivo iniziale di una cattura annua superiore a 1 milione di tonnellate non è mai stato raggiunto in maniera costante. Ciò ha inevitabilmente inciso sul recupero dell'investimento, che inizialmente era stimato in circa sette anni, ma che oggi viene considerato difficilmente realizzabile prima dei dieci anni, nonostante la presenza di sussidi pubblici.

A livello macroeconomico, è interessante osservare che il governo canadese, insieme a quelli provinciali di Alberta e Saskatchewan, ha stanziato complessivamente oltre 5 miliardi di dollari canadesi a favore di progetti di cattura e stoccaggio del carbonio. Tuttavia, l'efficacia di tali investimenti è ancora oggetto di dibattito, considerando che il contributo effettivo della CCUS alla riduzione complessiva delle emissioni del Paese è rimasto marginale. Il caso Boundary Dam conferma quindi quanto la sostenibilità economica della tecnologia CCUS sia fortemente dipendente dal sostegno pubblico e da meccanismi di mercato del carbonio ancora poco maturi.

Il progetto resta comunque una fonte preziosa di dati e know-how tecnico per le future implementazioni di questa tecnologia in contesti industriali diversi e con condizioni di contorno più favorevoli.

### 4.1.3 Sostenibilità del progetto

Nonostante Boundary Dam sia stato il primo impianto a integrare la tecnologia CCUS in una centrale a carbone commerciale, le sue performance sono state oggetto di accesi dibattiti. Da un lato, il progetto ha segnato una svolta nella transizione energetica, dimostrando che anche impianti esistenti e alimentati a fonti fossili possono essere riconvertiti in ottica decarbonizzante. Dall'altro, i dati operativi raccolti nei primi anni di funzionamento hanno evidenziato numerose criticità in termini di efficienza, affidabilità e ritorno economico.

Secondo l'Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA), il sistema di cattura implementato presso la unità 3 della centrale ha registrato nei primi anni un tasso medio di cattura della CO<sub>2</sub> del 57%, a fronte di un obiettivo iniziale del 90% (IEEFA, 2024). Inoltre, l'impianto ha operato solo per circa l'80% del tempo previsto, e in molte occasioni ha trattato solo una parte dei gas combustibili, generando così un'efficienza ridotta del sistema. La CO<sub>2</sub> catturata è stata destinata in larga parte all'Enhanced Oil Recovery (EOR), una pratica che, pur permettendo un recupero parziale dei costi attraverso la vendita del gas, solleva dubbi sul reale bilancio ambientale dell'intera operazione.

Tuttavia, i dati più recenti forniscono un quadro parzialmente più ottimistico. Nel primo trimestre del 2025, SaskPower ha riportato una disponibilità operativa del sistema di cattura pari al 98,4%, con una rimozione totale di 2,263,59 tonnellate di CO<sub>2</sub> nel solo periodo gennaio-marzo. Il tasso medio giornaliero di CO<sub>2</sub> catturata ha raggiunto le 2,553 tonnellate, con picchi superiori alle 2,700 tonnellate giornaliere. L'intero esercizio fiscale 2024–2025 si

è chiuso con oltre 834,000 tonnellate di CO<sub>2</sub> sequestrate, segnando il terzo anno consecutivo sopra la soglia delle 800,000 tonnellate (SaskPower, 2025a).

A fronte di questi risultati positivi, l'azienda ha comunque avviato una manutenzione programmata da aprile a luglio 2025 per revisionare alcuni componenti chiave del sistema, tra cui le colonne di assorbimento, il compressore CO<sub>2</sub> e la condotta di trasporto (SaskPower, 2025b). Questo intervento suggerisce che, nonostante i miglioramenti, la tecnologia impiegata presenti ancora margini di ottimizzazione in termini di stabilità e durata.

Possiamo quindi concludere dicendo che Boundary Dam rappresenta un caso paradigmatico delle opportunità e dei limiti delle tecnologie CCUS applicate su scala commerciale, infatti l'impianto ha dimostrato che è tecnicamente possibile integrare sistemi di cattura su infrastrutture esistenti, ma ha evidenziato allo stesso tempo che la sostenibilità di tali progetti non può prescindere da una performance stabile nel tempo, da una destinazione finale della CO<sub>2</sub> coerente con gli obiettivi climatici e da una chiara convenienza economica a lungo termine.

L'ultimo aggiornamento di SaskPower relativo al primo trimestre del 2025 mostra dati contrastanti sull'efficienza complessiva del progetto Boundary Dam. L'unità BD3 ha registrato un livello di disponibilità del 100%, e la CCS Facility ha raggiunto un'eccellente disponibilità del 98,4%, superando gli obiettivi prefissati. Questi risultati indicano che, dal punto di vista operativo, l'infrastruttura è attualmente ben gestita.

Tuttavia, nonostante questi dati incoraggianti, alcuni indicatori suggeriscono margini di miglioramento, la disponibilità dell'impianto di produzione di acido solforico si attesta solo al 65,2%, al di sotto del target minimo del 70%, e la quantità effettiva di acido prodotto (1.261

tonnellate) è appena sopra la soglia target, dopo un trimestre (Q4 2024) fortemente sotto la media. Inoltre, l'intensità delle emissioni si ferma a 376 tonnellate di CO<sub>2</sub> per GWh prodotto, ancora ben lontana dal limite fissato a 549 tCO<sub>2</sub>/GWh ma superiore a quanto idealmente auspicabile in termini di riduzione progressiva dell'impatto.

Il dato più rilevante riguarda il volume di CO<sub>2</sub> catturata: 226,4 kilotonnellate nel primo trimestre 2025, in linea con i trimestri precedenti, ma ancora distante dagli obiettivi iniziali del progetto (IEEFA, 2023). Complessivamente, dal 2014 ad oggi, il progetto ha catturato circa 6,8 milioni di tonnellate di CO<sub>2</sub>, un traguardo significativo in termini assoluti, ma insufficiente rispetto alle aspettative iniziali e alle potenzialità teoriche dell'impianto.

Questi dati confermano che, sebbene l'impianto presenti oggi un funzionamento regolare e una capacità operativa pienamente sfruttata, persistono delle limitazioni strutturali che impediscono un'efficienza ottimale.

#### 4.1.4 Analisi critica dei risultati

Per comprendere in modo più concreto le dinamiche economiche del progetto Boundary Dam, è stata condotta un'analisi basata sui dati reali di cattura della CO<sub>2</sub> relativi al periodo 2015–2024 e su alcune ipotesi di scenario riguardanti il prezzo di mercato della CO<sub>2</sub> fino all'anno 2033. L'obiettivo di questo esercizio è stato quello di valutare, anche solo in via semplificata, la sostenibilità economica del progetto e di identificare i principali fattori che ne influenzano il risultato.

L'analisi ha preso in considerazione i seguenti parametri: un investimento iniziale (CAPEX) pari a circa 1,467 miliardi di dollari canadesi, un costo operativo medio (OPEX) di 70 CAD

per tonnellata catturata, e una ripartizione della CO<sub>2</sub> catturata stimata in un 60% destinato alla vendita per attività di Enhanced Oil Recovery (EOR) e un 40% destinato allo stoccaggio geologico, valorizzato in base al prezzo del carbonio fissato dal governo canadese a partire dal 2019.

Sono stati elaborati due scenari:

- *Scenario 1 – Prezzo di vendita a 25 CAD/t*: riflette una situazione storicamente realistica, con ricavi limitati derivanti dalla vendita della CO<sub>2</sub>.
- *Scenario 2 – Prezzo di vendita a 100 CAD/t*: simula un contesto di mercato più favorevole, in cui la CO<sub>2</sub> potrebbe avere un valore significativamente più alto.

Dai risultati emerge che nello *Scenario 1* il progetto rimane strutturalmente in perdita: i costi di cattura superano largamente i ricavi, portando a un saldo cumulato negativo anche dopo dieci anni di attività. Questa evidenza dimostra come, a prezzi di mercato bassi, la CCS non sia economicamente sostenibile senza un forte supporto pubblico.

Nello *Scenario 2* invece, la situazione migliora ma non in misura tale da garantire un pieno ritorno dell'investimento nel periodo considerato. Pur riducendosi il deficit, i ricavi derivanti dalla vendita e dallo stoccaggio della CO<sub>2</sub> non sono sufficienti a compensare i costi complessivi, anche ipotizzando una stabilità tecnica dell'impianto.

Questi risultati permettono di trarre alcune considerazioni critiche:

1. Dipendenza dai prezzi di mercato: la redditività del progetto è strettamente legata al valore riconosciuto alla CO<sub>2</sub>, che oggi non è ancora sufficientemente alto da garantire la sostenibilità economica.

2. Peso dei costi operativi: con un OPEX medio di circa 70 CAD/t, Boundary Dam conferma quanto i costi di cattura rimangano un ostacolo significativo, soprattutto in contesti di scarsa continuità operativa.
3. Ruolo degli incentivi pubblici: senza i sussidi e le politiche di supporto, l'impianto non sarebbe stato avviato né mantenuto in funzione, confermando che la CCS, nelle condizioni attuali, non può reggersi solo su logiche di mercato.
4. Lezioni per il futuro: affinché progetti analoghi diventino profittevoli, è necessario un contesto caratterizzato da un prezzo del carbonio molto più elevato, da mercati industriali in grado di assorbire grandi quantità di CO<sub>2</sub> e da un continuo miglioramento tecnologico volto a ridurre i costi di cattura e aumentare l'affidabilità operativa.

In conclusione, l'analisi dimostra che Boundary Dam, pur essendo stato un progetto pionieristico e ricco di valore tecnico-scientifico, rimane un caso emblematico delle difficoltà economiche della CCS su larga scala. I dati raccolti evidenziano che, senza condizioni di mercato e di policy più favorevoli, la sostenibilità economica resta lontana, rafforzando l'idea che il ruolo principale di questo progetto sia stato quello di fornire esperienza, dati e indicazioni utili per migliorare le implementazioni future.

Tutti i dati economici relativi al progetto Boundary Dam sono riportati in dollari canadesi (CAD), come pubblicato nelle fonti ufficiali (SaskPower, report governativi e letteratura scientifica). Non è stata effettuata alcuna conversione in dollari statunitensi per mantenere coerenza con i documenti originali e garantire la fedeltà dei valori riportati.

A completamento dell'analisi sono stati realizzati due grafici che mostrano l'andamento del saldo economico cumulato (espresso in dollari canadesi) nei due scenari ipotizzati.

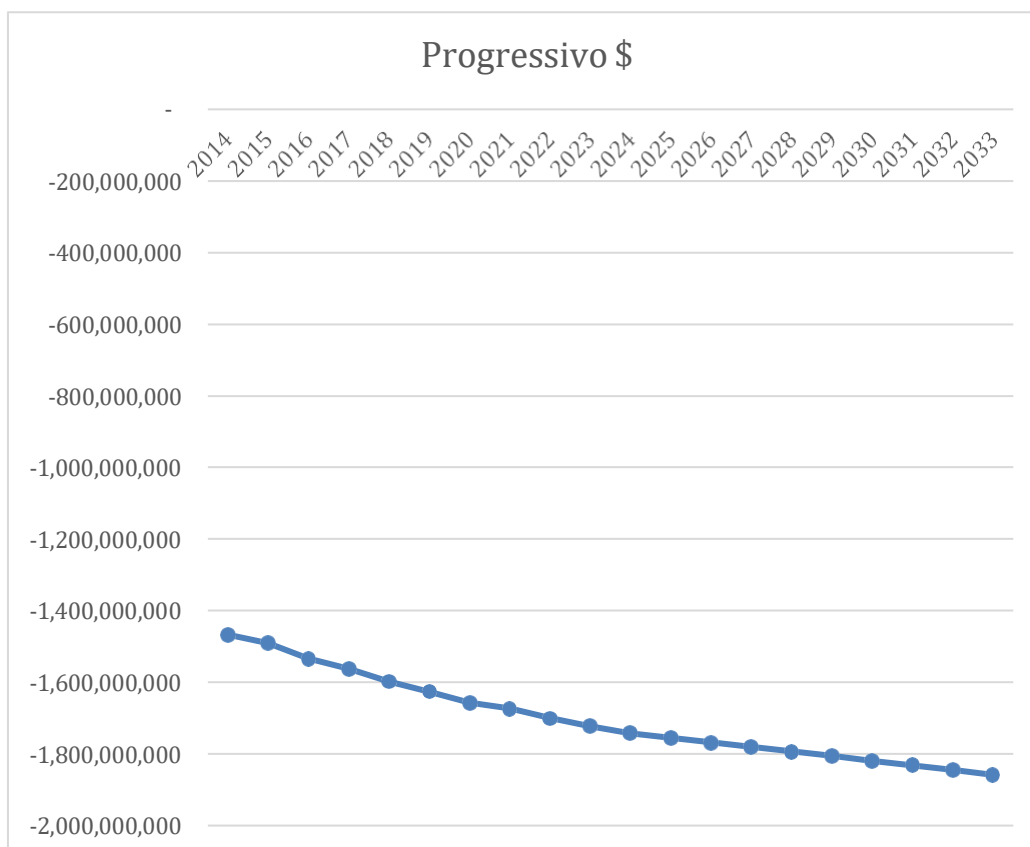


Figura 11. Andamento progressivo dei risultati economici nello Scenario 1 (vendita CO<sub>2</sub> a 25 CAD/t). Il grafico evidenzia come, in presenza di un prezzo di mercato ridotto, il progetto mantenga costantemente un saldo negativo, senza possibilità di recupero dell'investimento nel periodo considerato.

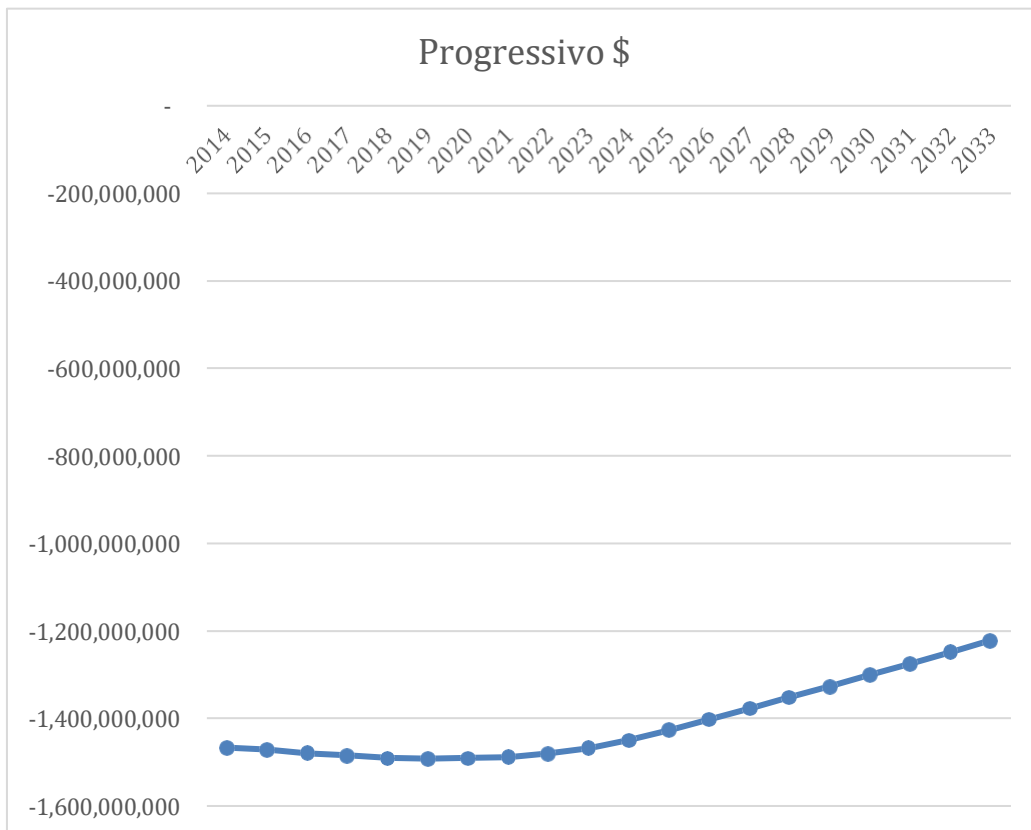


Figura 12. Andamento progressivo dei risultati economici nello Scenario 2 (vendita CO<sub>2</sub> a 100 CAD/t). In questo caso si osserva un miglioramento rispetto allo Scenario 1, con una riduzione progressiva delle perdite, ma senza comunque raggiungere la piena sostenibilità economica.

## Conclusioni

Il percorso sviluppato in questa tesi ha avuto l'obiettivo di approfondire il ruolo delle tecnologie di cattura, utilizzo e stoccaggio della CO<sub>2</sub> come strumenti di innovazione sostenibile, analizzandone la fattibilità tecnica, economica e ambientale e valutando in che modo esse possano integrarsi nei modelli di business delle imprese che intendono perseguire strategie di decarbonizzazione. La ricerca è partita da una cornice teorica più ampia, legata al concetto di innovazione e al suo declinarsi in chiave green, per poi focalizzarsi sul contesto climatico attuale e sugli strumenti politici, finanziari e regolatori adottati a livello internazionale e in particolare dall'Unione Europea. Successivamente, l'attenzione si è concentrata sulla tecnologia CCUS, con la descrizione delle sue principali varianti, dei costi associati e delle difficoltà ancora presenti, per arrivare infine all'analisi concreta di un caso studio di applicazione reale che ha permesso di comprendere in che misura tali sistemi possano essere realmente sostenibili e replicabili.

Dal quadro emerso, risulta evidente che la CCUS rappresenti oggi una delle poche opzioni tecnologiche disponibili per la decarbonizzazione dei settori cosiddetti hard-to-abate, cioè quelli caratterizzati da processi industriali in cui le emissioni di CO<sub>2</sub> sono difficilmente eliminabili attraverso le sole fonti rinnovabili o l'efficienza energetica. Nonostante questa centralità strategica, la tecnologia è ancora lontana dal raggiungere una piena competitività economica, e i dati raccolti lo confermano con chiarezza. I costi di investimento iniziali rimangono molto elevati, spesso superiori al miliardo di dollari per singolo impianto, mentre i costi operativi si attestano su valori che oscillano mediamente tra i 100 e i 120 dollari per

tonnellata catturata, con picchi anche superiori in caso di problematiche tecniche. Questi valori, se confrontati con l'attuale prezzo medio del carbonio in mercati come l'ETS Europeo o il Carbon Pricing Canadese, evidenziano un gap ancora significativo che rende impossibile un ritorno economico senza un forte sostegno pubblico.

L'analisi del caso Boundary Dam ha rappresentato un punto particolarmente rilevante della ricerca, poiché ha permesso di osservare concretamente le performance di un progetto pionieristico che, pur avendo un valore simbolico e tecnico indiscusso, ha messo in luce limiti sostanziali in termini di efficienza e redditività. L'impianto ha catturato complessivamente una quantità di CO<sub>2</sub> molto inferiore rispetto alle aspettative iniziali ed i costi di cattura si sono rivelati più alti del previsto, compromettendo la possibilità di un ritorno dell'investimento nei tempi stimati.

Le analisi economiche condotte hanno confermato che, nelle condizioni attuali, il progetto non risulta profittabile e che, anche nello scenario più favorevole, che ipotizza un prezzo elevato del carbonio, il recupero dell'investimento rimane problematico e richiede comunque un arco temporale più lungo del previsto.

Questo risultato evidenzia due considerazioni principali: da un lato, la CCUS non può essere valutata solo sulla base della sua sostenibilità economica immediata, ma va inserita in una prospettiva di lungo periodo, in cui il valore generato non è limitato ai flussi di cassa diretti ma comprende benefici ambientali, reputazionali e strategici; Dall'altro lato, emerge con forza la necessità di politiche pubbliche solide e di strumenti di sostegno finanziario adeguati, senza i quali il rischio è che progetti di questo tipo non possano sopravvivere sul mercato.

In conclusione, la tesi dimostra che la CCUS, pur non essendo oggi una soluzione economicamente autosufficiente, rappresenta un tassello imprescindibile della transizione energetica globale. Il suo valore va oltre la mera contabilità finanziaria, poiché consente di mantenere in vita settori produttivi ancora difficilmente sostituibili e, allo stesso tempo, di ridurre in modo significativo le emissioni di gas serra. La sostenibilità a lungo termine di queste tecnologie dipenderà dalla capacità di inserire la CCUS in un quadro più ampio di politiche climatiche, innovazioni tecnologiche e dinamiche di mercato, trasformandola da sperimentazione pionieristica a componente strutturale delle strategie industriali per la decarbonizzazione.

Uno degli intenti fondamentali di questo lavoro, infatti, non è stato soltanto quello di analizzare modelli e tecnologie, ma anche di contribuire a diffondere conoscenza e consapevolezza. Credo fermamente che il tema della crisi climatica non possa rimanere confinato ai soli ambiti accademici, politici o industriali: è una sfida collettiva che richiede il coinvolgimento di tutti. È mia convinzione che soltanto attraverso una comunicazione chiara, accessibile e inclusiva sia possibile generare un cambiamento reale e duraturo.

Questa tesi vuole quindi rappresentare non solo un esercizio accademico, ma anche una sorta di *call to action*, un invito alla riflessione e all'impegno personale. Perché la transizione ecologica non riguarda soltanto i decisori politici o le grandi imprese, ma ciascuno di noi, nelle proprie scelte quotidiane e nei propri comportamenti di consumo. La sostenibilità è un percorso che deve unire dimensione tecnologica, economica e sociale, e richiede una responsabilità condivisa.

## Bibliografia

Agenda Digitale. (2023). *Le tecniche di cattura CO<sub>2</sub> per ridurre le emissioni*.

Aspect). *Overview of Finance framework*.

BMWK – Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action. (2025). *Hydrogen Strategy Germany*.

Claudi de Saint Mihiel, A., & Thiebat, F. (2023). Verso il 2050: transizione energetica e politiche di decarbonizzazione. *TECHNE – Journal of Technology for Architecture and Environment*, 26(1), 14–17.

Climate Action Tracker. (2025). *South Korea's power sector policies & action*.

Commissione Europea. (2025). *Clean Industrial Deal: sostenere la trasformazione dell'industria europea*.

Consilium – Council of the European Union. (2025). *Fit for 55 package*.

ECCO. (2023). *Cos'è la CCS? Q&A sulla Cattura e Stoccaggio del Carbonio*.  
eccoclimate.org

Ellen MacArthur Foundation. (2022). *Circular economy in practice: industrial case studies*.

Ember. (2024). *Chile surpasses 40% wind and solar for the first time in December*.

Equinor. (2023). *Northern Lights project update*.

ESG360. (2024). *Articoli su DAC, carbon farming e CCUS*.

European Alliance to Save Energy. (2025). *Meet the Energy Efficiency Ecosystem*.

European Commission. (2022). *Carbon Removals and Certification Framework*.

Financial Times. (2025, September 7). Expensive 'green' hydrogen jeopardises German industrial energy transition.

Financial Times. (2025). *Limits of underground CO<sub>2</sub> storage capacity*.

Geels, F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: A multi-level perspective and a case study. *Research Policy*, 31(8–9), 1257–1274.

Global CCS Institute. (2023). *Technologies overview – Oxy-fuel combustion*.

Global CCS Institute. (2023). *The Global Status of CCS 2023*.

Gracceva, F. (2022). Transizione energetica. Cos'è, perché è difficile, in che misura è realizzabile. *ENEA Magazine*, 2–3.

Holcim. (2024). *Carbon capture and utilization projects*.

IEA – International Energy Agency. (2021). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*.

IEA – International Energy Agency. (2022). *CCUS in Clean Energy Transitions*.

IEA – International Energy Agency. (2022). *Carbon Capture, Utilisation and Storage: A key technology for net zero*.

IEA – International Energy Agency. (2023). *CCUS in Clean Energy Transitions – Analysis and Cost Outlook*.

IEA – International Energy Agency. (2023). *Oxy-fuel combustion technology: Status and prospects*.

IEA – International Energy Agency. (2024). *Korea's Green New Deal: A roadmap to net-zero*.

IEEFA – Institute for Energy Economics and Financial Analysis. (2020). *Petra Nova mothballing highlights challenges for CCS*.

IEEFA – Institute for Energy Economics and Financial Analysis. (2024). *Carbon capture at Boundary Dam 3 still underperforming failure*.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Sixth Assessment Report, Working Group III*.

IRENA – International Renewable Energy Agency. (2024). *Renewables Readiness Assessment: Chile*.

McKinsey & Company. (2023). *Sustainable operations: How to transform manufacturing for net zero*.

Morgan Lewis. (2025, July 1). *EU Clean Industrial Deal: A New Plan to Bring Together Climate Action and Competitiveness*.

NASA. (2025). *Atmospheric carbon dioxide levels have risen by 50 percent in less than 200 years*. NASA – Climate Change: Vital Signs of the Planet.

National Grid. (2023). *Carbon Capture and Storage explained*.

National Oceanic and Atmospheric Administration. (2023). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*.

OGCI – Oil and Gas Climate Initiative. (n.d.). *Understanding Carbon Capture, Use and Storage (CCUS)*.

PwC. (2024). *CBAM and supply chain implications*.

Rabobank. (2025). *Carbon capture utilization and storage in Europe: A critical tool for decarbonization*.

Raza, A., Gholami, R., Rezaee, R., Bing, C. H., Nagarajan, R., & Yekeen, N. (2019). A review on carbon capture, storage and utilization technologies: Current status and future prospects. *Journal of Cleaner Production*, 225, 895–909.

Reuters. (2024, July 24). *German government signs off on hydrogen import strategy*.

Reuters. (2025, February 26). *What's in the EU's plan to boost clean tech, lower energy bills?*

Reuters. (2025). *Carbon capture utilization and storage sector faces cost pressures in the U.S.*

Reuters. (2025). *Decarbonizing the cement industry – challenges and CCUS role*.

ReteAmbiente. (2025, February 27). *Clean industrial deal, il Piano UE per l'industria pulita*.

Saipem & ENEA. (2024). *Progetto per la cattura CO<sub>2</sub> con solventi avanzati: risultati e prospettive*.

SaskPower. (2025a, May 2). *BD3 Status Update: Q1 2025*.

SaskPower. (2025b, July 23). *BD3 Status Update: Q2 2025*.

Schilling, M. A. (2009). *Strategic Management of Technological Innovation* (3rd ed.). McGraw-Hill Education.

Schumpeter, J. A. (1947). The creative response in economic history. *Journal of Economic History*, 7(2), 149–159.

Statista. (2023). Number of Earths required if the world's population lived like in selected countries. National Footprint and Biocapacity Accounts.

Swedish Government. (2020). *Sweden's Circular Economy Strategy*.

The Guardian. (2025, July 17). 'It feels cool to be a cog in change': how doughnut economics is reshaping a Swedish town.

Toffler, A. (1980). *The Third Wave*. Morrow.

Treccani. (2023). *Innovazione*. Istituto della Enciclopedia Italiana.

Visual Capitalist. (2024). *The Price of Carbon Around the World in 2024*.

Wired Italia. (2024). *Carbon Capture Utilization and Storage: trasformare l'anidride carbonica in opportunità*.

World Bank. (2024). *State and Trends of Carbon Pricing 2024*.

World Economic Forum. (2023). *Net-Zero Industry Tracker 2023*.

ZEP – Zero Emissions Platform. (2020). *Role of pre-combustion capture in low-carbon hydrogen production*.

ZEP – Zero Emissions Platform. (2023). *CO<sub>2</sub> infrastructure and cost efficiency in Europe*.

