www.dii.unipd.it

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Relazione per la prova finale

«Cattura e stoccaggio della CO_2 per ridurre le emissioni di gas ad affetto serra: tecniche attuali e prospettive future»

Tutor universitario: Prof. Marco Tancon

Laureando*: Francesco Ferro*

Padova, 13/03/2026

INTRODUZIONE

www.dii.unipd.it

Il **CCS (carbon capture & storage)** è una tecnologia che consiste nel catturare la CO_2 nel punto di generazione, per poi trattarla, trasportarla e poterla stoccare in degli appositi spazi. Questa necessità nasce dal bisogno globale di fronteggiare rischi e conseguenze dovute al cambiamento climatico.

L'anidride carbonica è infatti uno di quei gas definiti come «gas serra», responsabili dell'eccessivo intrappolamento del calore solare dato, per l'appunto, dall'effetto serra che questi gas estenuano. In particolare la CO_2, data le enormi emissioni causate dalla società «carbon-based» in cui viviamo, risulta estremamente impattante in questo meccanismo; si tratta dunque di un problema che va affrontato molto seriamente.

Dunque il **CCS,** che tratteremo in questo elaborato, viene proposta come un alternativa utile per ridurre le emissioni e i danni che queste causano. Gli obiettivi futuri saranno di integrare queste tecnologie in accompagnamento alla transizione ecologica, guidata dal miglioramento delle efficienze e dal sostentamento energetico tramite le fonti rinnovabili.

OBIETTIVI DEL LAVORO

www.dii.unipd.it

In questo lavoro vedremo i 3 passaggi principali che prevede questo processo. L'obiettivo è avere una visione chiara dello stato attuale di questa tecnologia, per poter sviluppare un pensiero critico e ragionare su un percorso futuro che essa può percorrere. Il lavoro tratterà dunque:

1. **CATTURA DELLA CO_2 :** in questo capitolo studieremo le principali metodologie di cattura dalla fonte. Tra queste figurano la post-combustione, la pre-combustione e l'ossicombustione;

2. **TRASPORTO DELLA CO_2 :** l'anidride carbonica in questa fase verrà compressa fino a fluido supercritico, per poi venire trasportata fino al sito di stoccaggio. Verrà fatto un confronto tra le due principali metodologie, trasporto mediante condotti e mediante nave;

3. **STOCCAGGIO DELLA CO_2 :** nell'ultima fase del nostro studio vedremo le principali soluzioni di stoccaggio, discutendo anche le controversie che allo stato dell'arte essi comportano. Parleremo di stoccaggio geologico, oceanico e di mineralizzazione.

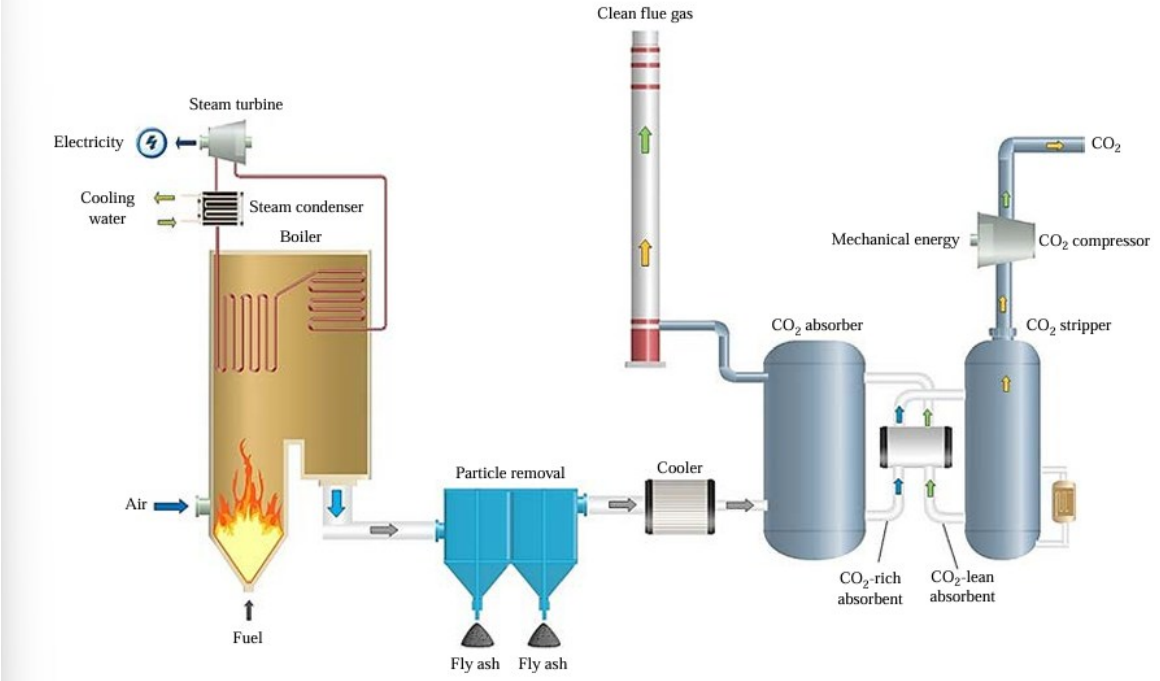
CATTURA DELLA CO_2: POST-COMBUSTIONE

www.dii.unipd.it

La **post-combustione** è una delle metodologie di cattura che vedremo. Essa può avvenire in differenti metodi, uno è l'**assorbimento.** Questa tecnica consiste nell'assorbimento della CO_2 presente nei gas di scarico da parte di sostanze chimiche, principalmente ammine (ottimi assorbitori di gas acidi), che vengono scelte in base alla loro capacità di assorbimento, cinetica di reazione e altre caratteristiche. Il processo consiste in un principale passaggio in cui in una colonna a 313-333 K, chiamata assorbitore, le ammine trattengono la CO_2, per poi passare allo stripper dove vengono separati questi due elementi. La separazione è favorita dal calore ceduto da del vapore acqueo. Avviene una seconda fase di assorbimento per arrivare a un elevata purezza, prima della compressione necessaria al trasporto. La quantità di CO_2 separata è direttamente proporzionale ai costi dell'operazione.

Troviamo poi l'**adsorbimento**. Il principio alla base di questo metodo è dato dalle forze intermolecolare tra sostanze solide e fluide. Ciò che avviene è il passaggio del gas di scarico attraverso una colonna di solido poroso che, grazie alla grande affinità di alcuni materiali con la CO_2 (zeoliti, per esempio), trattengono quest'ultima.

Si raggiungerà dunque uno stato di equilibrio, dove sarà necessaria una variazione di una delle variabili del sistema per permettere il desorbimento della CO_2, ripetendo poi il processo. Sono metodi ad oscillazione delle variabili, si può scegliere infatti pressione, temperatura o altre, che diversificano i metodi di adsorbimento.

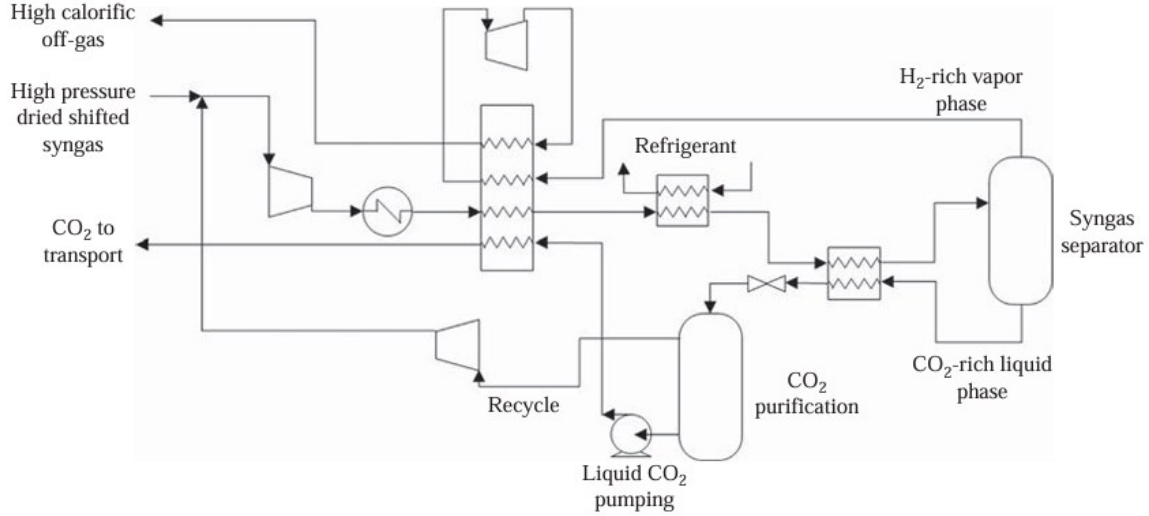


CATTURA DELLA CO_2: POST-COMBUSTIONE

www.dii.unipd.it

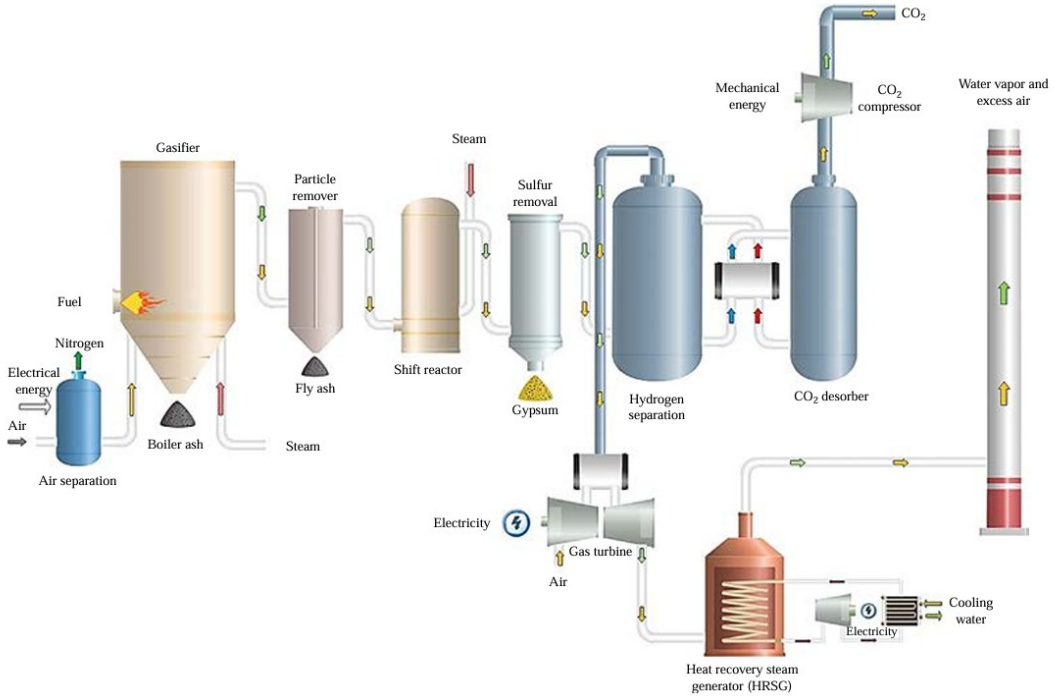
Abbiamo poi la **separazione tramite membrane**. Si tratta di una tecnica con vantaggi di semplicità, efficienza e sostenibilità. Una membrana polimerica, grazie ad un gradiente di pressione, viene attraversata dal fluido e l'alta selettività dei micro-pori permette di intrappolare le molecole target. Requisiti di temperatura e scarsa resistenza sono i principali problemi. Col tempo inoltre tende ad intasarsi diminuendo l'efficienza sul lungo periodo. La strumentazione è inoltre relativamente semplice, consiste nella barriera e in due contenitori per contenere i fluidi separati.

L'ultima metodologia di post-combustione è la **separazione criogenica**. Queste tecnologie utilizzano le capacità di condensazione e de-sublimazione per la separazione. Le differenti temperature di ebollizione permettono di ottenere anidride carbonica in uno stato molto puro prima della compressione.



La scelta del metodo dipende quasi esclusivamente dai costi, favorendo quindi le membrane in prospettiva futura e l'assorbimento allo stato attuale. La separazione criogenica seppure molto efficiente ha requisiti energetici molto alti che non le permettono di essere l'alternativa pilota.

CATTURA DELLA CO_2: PRE-COMBUSTIONE



Nella **pre-combustione** gli idrocarburi vengono scomposti in H_2 e CO_2 e quest'ultima viene catturata prima della combustione. Il reattore viene dunque alimentato esclusivamente ad idrogeno e nella combustione viene emessa esclusivamente acqua. La separazione affinché avvenga, necessità di alte pressioni e alte temperature richiedendo un grande apporto di energia. Questo avviene nel gassificatore dove, all'uscita, la miscela reagisce in un water-gas shift, dove in un catalizzatore reagisce con del vapore acqueo. Verrà poi rimossa la CO_2 tramite ammine.

In questo processo vengono utilizzati solventi fisici per la produzione di H_2, ovvero solventi senza reazioni chimiche. Allo stato dell'arte vengono usati anche solventi ibridi (fisici + chimici), per minimizzare le rispettive debolezze.

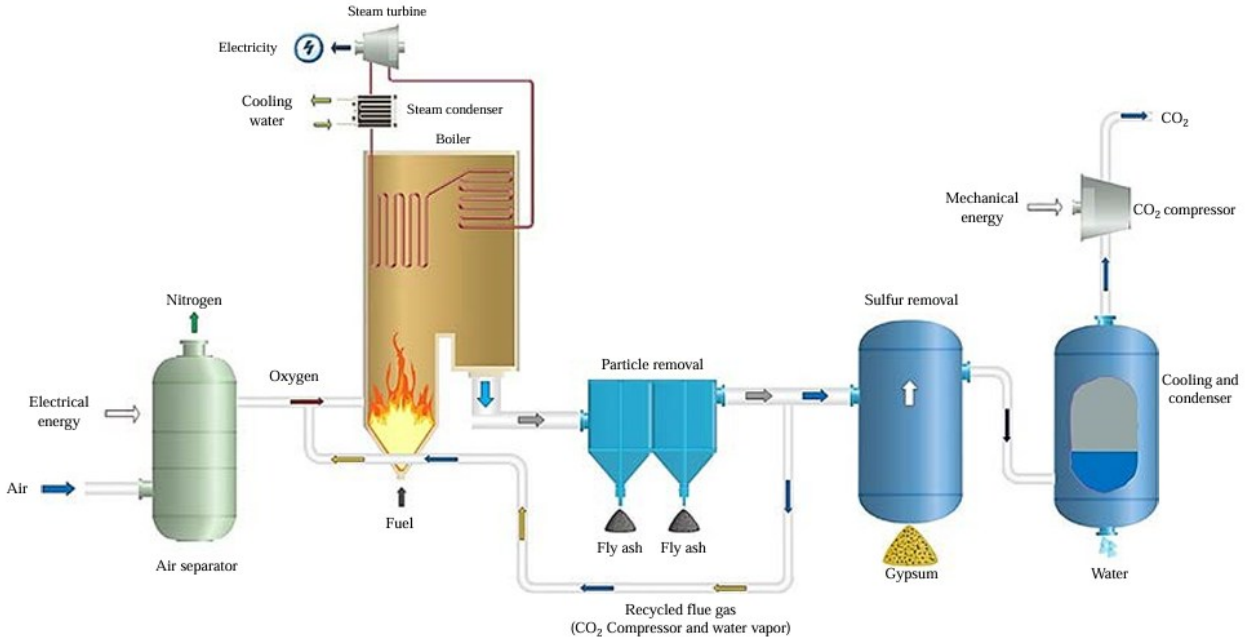
Il principale vantaggio di questo metodo è l'integrazione di H_2 per altri scopi, seguito dalla relativa poca energia necessaria alla pressurizzazione della CO_2. Inoltre richiede minore spazio rispetto agli altri processi.

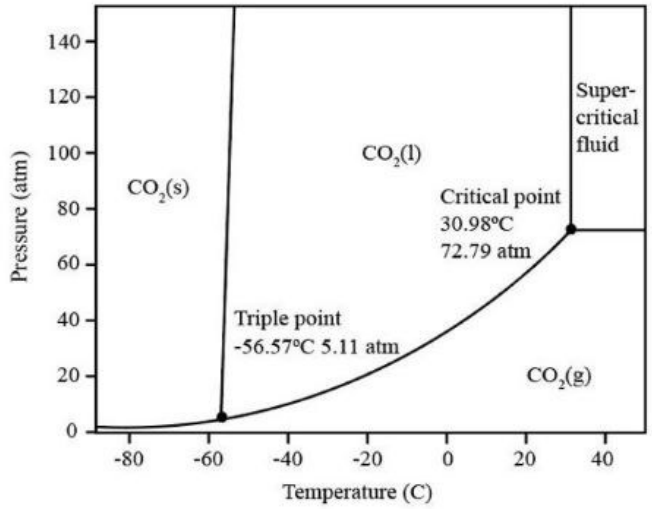
www.dii.unipd.it

CATTURA DELLA CO_2: OSSICOMBUSTIONE E COMPRESSIONE

www.dii.unipd.it

L'ultimo metodo è l' **ossicombustione**. Consiste nella combustione con ossigeno puro per la cattura di CO_2. Si estrae dall'aria l'ossigeno, facendolo bruciare producendo vapore acqueo e CO_2 . Poi tramite refrigerazione di separerà l'acqua in stato liquido. L'efficienza risulta estremamente alta e il processo semplice. Sono richieste comunque elevate energie.





Prima del trasporto il flusso di CO_2 viene compresso fino ad uno stato supercritico.
Questa è la forma ideale per trasportarla in quanto alta densità e bassa viscosità sono due proprietà ottime e favorevoli al trasporto su lunghe distanze.

TRASPORTO DELLA CO_2: INTRODUZIONE E TRAPORTO VIA CONDOTTO

www.dii.unipd.it

Dopo la compressione della CO_2, la fase successiva è il **trasporto**.
Per il trasporto, come detto prima, la CO_2 viene compressa fino a fase densa, in quanto porta vantaggi economici e le cadute di pressione sono minori. La fase gassosa invece viene sconsigliata a causa di problemi di garanzia del condotto e per i costi elevati. Uno dei due metodi principali è il **trasporto mediante condotto;**

Possiamo classificare le strutture di trasporto pipeline in:

- **On-shore**: installazioni su terraferma, minori problemi di costruzione e manutenzione più semplice. I principali problemi sono l'ingombro e la necessità di maggiori stazioni di pompaggio lungo il percorso;

- **Off-shore**: vengono installate sotto acqua aumentando i costi e le difficoltà di costruzione. Si guadagna però il vantaggio di non creare ingombri nella terraferma.

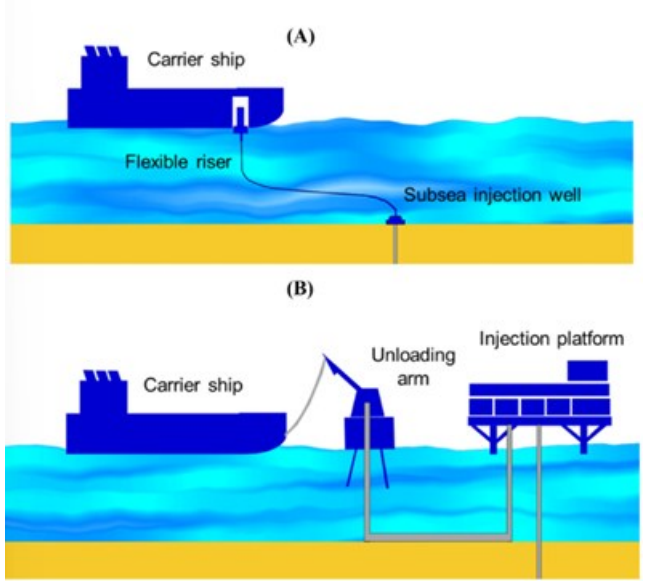
Il diametro è una delle caratteristiche principali, che deve avere un buon equilibrio per evitare eccessive cadute di pressione e non rendere l'impianto troppo costoso.
Fondamentale è monitorare la corrosione dei condotti (che può causare fratture), la formazione di idrati (monitorabile disidratando il flusso) e la formazione di flusso bifase.

TRASPORTO DELLA CO_2: TRASPORTO VIA NAVE E CONFRONTO

www.dii.unipd.it

L'altra metodologia di trasporto è **mediante nave**.
In questa maniera la CO_2 viene trasportata anche in fase liquida vicina al punto triplo, in serbatoi criogenici.
Le caratteristiche principali del trasporto via nave sono:

- **Impianto di liquefazione**: vengono installati cicli a refrigerante o ad auto-refrigerazione per far avvenire il cambio di fase;
- **Serbatoi intermedi e sistemi carico/scarico**: tra questi troviamo sistemi a iniezione diretta della c con torrette sottomarine o trasferimento in piattaforme off-shore con impianti temporanei di stoccaggio.



Formazione di idrati, fanghi e corrosione sono i principali problemi. È fondamentale fare anche un bilancio di emissioni tra quelle alla fonte e quelle date dall'impianto di liquefazione e il trasporto fisico per capire la fattibilità del progetto.

La scelta del miglior metodo è quasi prettamente economica. Il costo della pipeline varia in modo proporzionale alla distanza di trasporto. La distanza nella quale i costi si pareggiano è detta «break-even distance». Per il futuro il riutilizzo di vecchi condotti e il trasporto in fase solida vengono considerati.

STOCCAGGIO DELLA CO_2: INTRODUZIONE E STOCCAGGIO GEOLOGICO

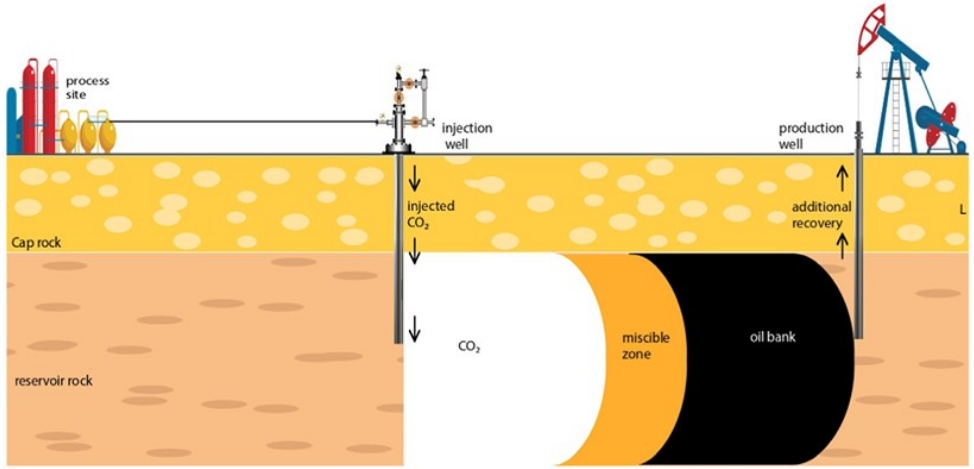
www.dii.unipd.it

L'ultima fase consiste nello **stoccaggio.**
Vedremo tre principali metodologie; la prima è lo **stoccaggio geologico**.
Questo metodo nasce dalla necessità di immagazzinare in modo sicuro e duraturo la CO_2. Dopo lo stoccaggio infatti, i gas non contribuiscono in nessun modo all'aumento dell'effetto serra.

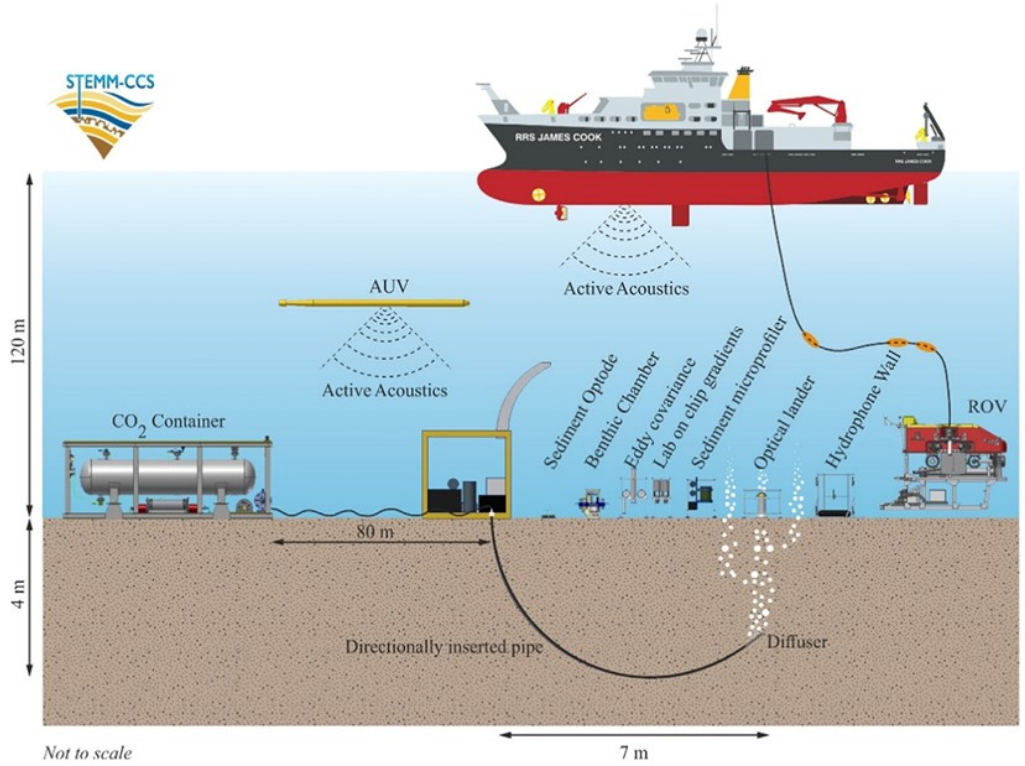
Il fluido arriva al sito in stato supercritico, i metodi di intrappolamento sono (dalla meno stabile alla più stabile):

- **Strutturale**: consiste nell'intrappolamento fisico nella roccia, con queste ultime che fanno da sigillante;
- **Residuo**: la CO_2 penetra nella roccia e sostituisce il fluido pre-esistente, rimanendo come gocce discontinue;
- **Per solubilità**: una parte della CO_2 si dissolve nelle acque saline presenti negli spazi porosi di roccia;
- **Minerale**: la CO_2 disciolta in acqua salina si combina con minerali formando altri minerali carbonatici solidi;

Lo stoccaggio può essere utilizzato per riutilizzare serbatoi dismessi, per esempio. Si usa infatti il metodo EOR (recupero potenziato del petrolio), il recupero del metano in giacimenti di carbone, lo stoccaggio in pozzi di idrocarburi dismessi o anche lo stoccaggio in formazioni saline.



STOCCAGGIO DELLA CO_2: STOCCAGGIO OCEANICO E MINERALIZZAZIONE



Lo **stoccaggio oceanico**, consiste nell'iniettare flussi di CO_2 nelle acque profonde, utilizzando la differenza di densità per dissolvere e immagazzinare la CO_2.
Nonostante la possibilità di stoccare enormi quantità di CO_2, non è ignorabile l'acidificazione degli oceani e la difficoltà di iniezione a grandi profondità.
Alcune soluzioni interessanti sono gli ecosistemi di carbonio blu (ecosistemi costieri in grado di catturare grandi quantità di CO_2) e l'alterazione potenziata che si basa sul frantumare e distribuire determinate rocce nell'oceano che reagiranno mineralizzando la CO_2 .

Come visto in precedenza, la **mineralizzazione** è una delle soluzioni più stabili che ci sia. È possibile farlo in situ, ovvero lasciando che reagisca con i minerali presenti nel serbatoio, o ex situ, estraendo i minerali dal terreno e facendoli reagire in superficie. Alta intensità energetica e la lenta cinetica delle reazioni sono i principali problemi di questa tecnica.
Lo stoccaggio geologico dunque è sicuramente la metodologia pilota, però mineralizzazione e alternative «donate» da oceano ed ecosistemi naturali sono interessanti da sviluppare per il futuro.

www.dii.unipd.it

CONCLUSIONI

www.dii.unipd.it

Abbiamo avuto modo di vedere nel dettaglio molti aspetti delle tre fasi che caratterizzano il **CCS**.

Questa serie di tecniche e processi è molto attuale, con molti spunti di ricerca e margine di miglioramento per ridurre la quantità di emissioni. Persistono delle controversie, soprattutto nelle fasi di trasporto e stoccaggio, tra le quali fattori ambientali, gli alti costi necessari per l'intero impianto e il bilancio di emissioni reale dato dall'intero processo, rispetto alla quantità catturata.

Si tratta di un opzione forte e interessante, ottima se accompagnata da un costante sviluppo sotto il piano energetico, favorendo la transizione alle rinnovabili e un miglioramento continuo delle efficienze.