

Ricerca di Sistema elettrico



Realizzazione e sperimentazione di un sistema di captazione
di CO₂ da suolo in scala da laboratorio per applicazioni

Power to Gas (LA2.7)

Anna Carmela Violante, Paolo Deiana, Yuri De Pra, Claudia Bassano, Luca Simonetti, Claudio Felici,
Giovanni Testa, Antonio Scotini, Marco Proposito

REALIZZAZIONE E SPERIMENTAZIONE DI UN SISTEMA DI CAPTAZIONE DI CO₂ DA SUOLO IN SCALA DA LABORATORIO PER APPLICAZIONI POWER TO GAS (LA2.7)

Anna Carmela Violante, Paolo Deiana, Yuri De Pra, Claudia Bassano, Luca Simonetti, Claudio Felici, Giovanni Testa, Antonio Scotini, Marco Proposito

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: Tema di ricerca 1.3 - Progetto Integrato Tecnologie dell'idrogeno

Linea di attività: L.A.2.7.

Responsabile del Progetto: Luca Turchetti, ENEA

Responsabile del Work Package: Luca Turchetti, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Anna Carmela Violante, ENEA

Mese inizio previsto: Luglio 2023

Mese inizio effettivo: Luglio 2023

Mese fine previsto: Dicembre 2024

Mese fine effettivo: Dicembre 2024

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti.....	5
3	Prodotti attesi	7
4	Prodotti sviluppati	8
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	9
6	Sintesi delle attività svolte	10
7	Dettaglio delle attività svolte.....	11
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	24
9	Pubblicazioni scientifiche	25
10	Eventi di disseminazione	26

Indice delle figure

Figura 1. Captatore a superficie sommitale piana.....	11
Figura 2. Captatore a superficie sommitale a volta a crociera	12
Figura 3. Disegno tecnico del captatore a superficie sommitale piana	13
Figura 4. Disegno tecnico del captatore a superficie sommitale a volta a crociera	14
Figura 5. Distribuzione di ugelli e collettore su rete metallica. Nel setup la parte visibile in figura risulta rivolta verso il basso	15
Figura 6. Geotessile permeabile fissato sulla rete metallica	15
Figura 7. Strato basale di argilla.....	16
Figura 8. Sistema di captazione della CO ₂ realizzato a scala di laboratorio.....	16
Figura 9. Sensori di temperatura e umidità relativa di terreno (TT-02, RH-02) e ambiente (TT-03, RH-01), questi ultimi protetti da schermo anti-radiazione	17
Figura 10. Pompa a membrana di aspirazione da captatore con bypass manuale	18
Figura 11. Sensori e attuatori lungo la linee di adduzione ed estrazione del gas	18
Figura 12. Quadro di acquisizione segnali (sinistra) e monitoraggio/controllo setup sperimentale in LabView (destra)	19
Figura 13. Campana di acquisizione LI-8100 A (LI-COR® Biosciences)	19
Figura 14. Campana di acquisizione LI-8100 A (LI-COR® Biosciences) disposta su ogni punto della matrice di prova (a destra tufo, a sinistra terriccio).....	20
Figura 15. Matrice di prova a griglia (3 righe X 3 colonne)	20
Figura 16. Risultati test di verifica sulla matrice di prova con flusso in entrata pari a 1,35 kg/m ² *giorno	21
Figura 17. Risultati test di verifica sulla matrice di prova con flusso in entrata pari a 5,41 kg/m ² *giorno	22

Indice delle tabelle

Tabella 1. Flussi di CO ₂ simulati	10
---	----

1 Risultati attesi

La presente attività si inserisce nel progetto di ricerca di cui all'art. 10 comma 2, lettera a) del Decreto 26/01/2000, relativo al Piano Triennale di realizzazione 2022-2024 della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale, e riguarda il tema di ricerca 1.3 denominato "Progetto integrato tecnologie dell'idrogeno". Nello specifico, l'attività in oggetto è la L.A. 2.7, contenuta nel WP2, riguardante la "Realizzazione e sperimentazione di un sistema di captazione di CO₂ da suolo in scala da laboratorio per applicazioni Power to Gas".

I risultati attesi per la presente L.A., come indicato nel capitolato vigente, comprendono:

- La progettazione, implementazione e riproduzione di un sistema di captazione di CO₂ su scala di laboratorio;
- La definizione delle condizioni operative per la conduzione dei test;
- L'esecuzione di test sperimentali sul sistema di captazione di laboratorio;
- L'analisi dei risultati ottenuti.

Sulla base delle evidenze emerse nella precedente linea di attività (L.A. 2.6), sarà riprodotto in laboratorio un sito emulatore, sia dal punto di vista geologico sia in termini di concentrazione di CO₂ (kg/m²·giorno).

In particolare, sarà sviluppato un modulo emulatore del sito di degassamento, riempito con sedimenti naturali disposti dal basso verso l'alto, al fine di riprodurre litologie analoghe (materiale sedimentario e materiale vulcanico) a quelle che caratterizzano i siti reali di degassamento, principalmente composti da rocce vulcaniche, terrigene e sedimentarie.

Saranno progettati e stampati in 3D due captatori in scala da laboratorio utilizzando materiale PETG (polietilene tereftalato glicole), scelto per garantire robustezza, durabilità e resistenza agli agenti atmosferici. Nello specifico, saranno realizzati due captatori con base quadrata di 50 x 50 cm: uno con superficie sommitale piana e uno con superficie sommitale a volta a crociera.

L'intera struttura dei captatori, comprensiva della base e della copertura superficiale, sarà progettata per contenere il flusso gassoso iniettato tramite ugelli direttamente nel sistema di captazione, simulando il degassamento naturale del suolo in un ambiente confinato. I captatori saranno dotati di un sistema di aspirazione del gas e di misuratori dei principali parametri caratteristici del processo.

I captatori, in scala ridotta, saranno collocati sul terreno emulatore di prova per caratterizzarne le prestazioni. L'attività sperimentale sarà condotta su diversi flussi di CO₂ immessi nel terreno, considerando differenti tipologie di suolo, sia in condizioni di saturazione idrica che in condizioni anidre.

2 Risultati ottenuti

Tutti i risultati previsti sono stati conseguiti nel corso dell'attività svolta.

L'attività sperimentale condotta nell'ambito della L.A. 2.7 ha prodotto i seguenti risultati:

1. Definizione delle condizioni operative per la conduzione dei test

- Sono state individuate le configurazioni ottimali per il funzionamento dei captatori in diverse condizioni di suolo (saturazione idrica e stato anidro) e per differenti flussi di CO₂ iniettati nel terreno (da 0,2 l/m a 9 l/m).
- Il sistema di aspirazione e misurazione dei parametri principali del processo di captazione sono stati opportunamente dimensionati e implementati nell'intero sistema di captazione della CO₂.

2. Progettazione, implementazione e riproduzione di un sistema di captazione di CO₂ a scala di laboratorio

- È stato completato lo sviluppo di due captatori con base quadrata di 50 x 50 cm e superfici sommitali rispettivamente piana e a volta a crociera, realizzati in materiale PETG mediante stampa 3D, con caratteristiche progettuali tali da garantire robustezza, durabilità e adattabilità a diverse condizioni operative.
- È stato realizzato il modulo emulatore (banco prova), a base quadrata, di dimensione 65 X 65 cm.
- È stata integrata la sensoristica dell'intero sistema di captazione della CO₂, e collegata a schede di acquisizione e controllo per gestire e monitorare il sistema in ambiente LabVIEW.
- È stato integrato un sistema di analisi gas con campionamento continuo per monitorare i livelli di gas CO₂ e O₂ presenti nella linea di aspirazione durante i test di prova.

3. Esecuzione dei test sperimentali

- È stato caratterizzato il banco prova per il terreno al fine di valutare la variabilità spaziale di emissione a diversi gradi di emissione di CO₂.
- I test sperimentali hanno valutato la capacità del sistema di captazione di catturare CO₂ in condizioni controllate, in differenti tipologie di terreno (terriccio e tufo vulcanico) ed in condizioni sature ed insature del terreno.

4. Analisi dei risultati

- L'analisi dei dati raccolti ha permesso di caratterizzare le prestazioni del sistema in termini di capacità di captazione ed efficienza operativa.
- Le prestazioni del sistema di captazione sono influenzate dalle caratteristiche del terreno emulato, e dalle condizioni di saturazione o meno.

Attualmente, i risultati ottenuti in condizioni controllate di laboratorio hanno evidenziato una notevole variabilità nelle performance di captazione legata ai parametri fisici propri dei terreni (granulometria, porosità, permeabilità) ed alla mancata possibilità di controllare i flussi emessi

al di fuori della superficie coperta dal sistema di captazione. Tuttavia, questa variabilità è presente anche in contesti naturali, che risultano pertanto ancora più difficili da controllare.

3 Prodotti attesi

Per la L.A 2.7 era prevista la produzione dell'allegato al report dal titolo "Attività di sperimentazione del sistema, a scala di laboratorio, di captazione della CO₂ endogena", che fornisce dettagli sulle attività svolte e documenta il raggiungimento dei risultati attesi.

In questa L.A. erano previsti i disegni tecnici e la realizzazione di due captatori in stampa 3D, rispettivamente a superficie sommitale piana e a volta a crociera. Inoltre, erano inclusi gli elementi di automazione e controllo del processo per l'implementazione del sistema di captazione della CO₂.

4 Prodotti sviluppati

È stato redatto l'allegato al report dal titolo "Attività di sperimentazione del sistema, a scala di laboratorio, di captazione della CO₂ endogena" previsto dal capitolato tecnico del progetto.

In questa L.A. sono stati sviluppati i disegni tecnici, e sono stati realizzati due captatori tramite stampa 3D, rispettivamente a superficie sommitale piana e a volta a crociera. Inoltre, sono stati acquisiti e implementati elementi di automazione e controllo del processo.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Per la linea di attività 2.7 relativa alla realizzazione e sperimentazione di un sistema di captazione di CO₂ da suolo in scala da laboratorio per applicazioni Power to Gas, non si evidenziano criticità e scostamenti su attività svolte e risultati ottenuti rispetto a quanto previsto nel capitolato tecnico.

In merito alla rendicontazione economica, si evidenzia quanto segue:

- Le spese di personale rendicontate sono in linea con quanto preventivato.
- Le procedure di acquisto hanno portato a un leggero scostamento tra i costi di tipo B e C preventivati, evidenziato da un maggiore costo per i materiali e le forniture rispetto a quello per gli strumenti e le attrezzature inventariabili. Si evidenzia, comunque, che ciò non ha avuto alcun impatto sul raggiungimento dei risultati attesi.

In merito alle attività tecniche e di laboratorio si sono verificati scostamenti temporali delle attività scientifiche pianificate dovuti a ritardi nella consegna della strumentazione e dei materiali da parte dei fornitori. Tali scostamenti hanno limitato fortemente il tempo progettuale residuo per le campagne sperimentali, rendendo necessarie alcune modifiche alla matrice di prove sperimentali inizialmente prevista.

6 Sintesi delle attività svolte

Le attività svolte hanno riguardato la realizzazione di un sistema di captazione di CO₂ a scala di laboratorio. È stato realizzato un modulo emulatore a base quadrata (65 x 65 cm) per simulare un sito di degassamento naturale, riempito con materiale litologico per riprodurre le condizioni reali. Sono stati progettati e realizzati due tipi di captatori in PETG tramite stampa 3D, uno con superficie piana e l'altro a volta a crociera. Il sistema è stato dotato di sensori per il controllo del processo: misuratori di portata, sensori di pressione, temperatura, umidità e una pompa a membrana. Sono stati effettuati test su terreni sedimentari e vulcanici in condizioni sature e anidre per analizzare la variazione di concentrazione di CO₂. Sono stati simulati flussi di emissione di CO₂ da 1 a 60 kg/m²*giorno, con la sensoristica dimensionata per flussi da 0,15 l/m a circa 9 l/m (Tabella 1).

Emissione specifica giorno Kg/m ² *giorno	Flusso di CO ₂ l/m
1	0,15
5	0,74
10	1,49
60	8,94

Tabella 1. Flussi di CO₂ simulati

7 Dettaglio delle attività svolte

A seguito della ricerca bibliografica condotta nella precedente L.A. 2.6, relativa a diversi siti di degassamento naturale di gas endogeni situati nell'Italia centrale, sono state identificate due tipologie litologiche rappresentative delle aree di degassamento da sottoporre a test. In aggiunta, è stato definito l'intervallo di flusso di CO₂ da simulare, compreso tra 0,15 l/m e circa 9 l/m.

Prima di eseguire i test con i due captatori, è stata verificata l'emissione puntuale di ciascun ugello per assicurare una distribuzione uniforme del gas CO₂ nell'area dell'emulatore.

Sono stati effettuati test su litologie di natura sedimentaria e vulcanica in condizioni sia sature, sia insature.

La configurazione realizzata rappresenta chiaramente un modello semplificato e indicativo di un ambiente ricreato in laboratorio. Tuttavia, è evidente che, in contesti naturali, occorre considerare ulteriori fattori, come l'eterogeneità di facies e la stratigrafia che caratterizzano le aree di riferimento.

I captatori di CO₂ sono stati progettati e stampati in 3D utilizzando materiale PETG, con l'obiettivo di garantire robustezza, durata e resistenza agli agenti atmosferici. Entrambi i captatori sono dotati di lamine in alluminio di 1,5 mm di spessore alla base, che permettono un'infissione agevole nel terreno per un corretto posizionamento e stabilità.

Sono stati progettati due modelli di captatori: uno con superficie sommitale piana (Figura 1) e l'altro con superficie sommitale a volta a crociera (Figura 2).

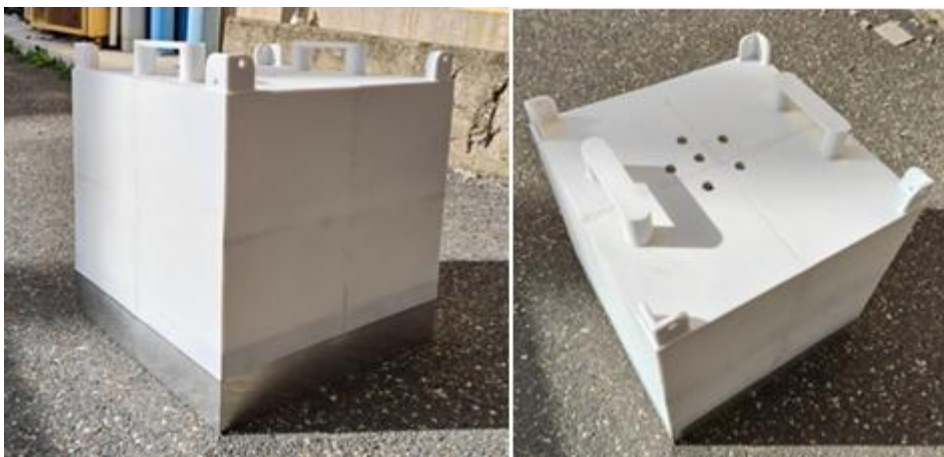


Figura 1. Captatore a superficie sommitale piana



Figura 2. Captatore a superficie sommitale a volta a crociera

Le dimensioni in pianta di entrambi i captatori sono 50 cm x 50 cm, con un'altezza totale di circa 40 cm escluse le lamine in alluminio poste alla base lungo il perimetro. Lo spessore delle pareti dei captatori è di 4 mm.

Ogni captatore dispone di 6 fori sulla superficie sommitale, dotati di passa parete filettati femmina BSPP (British Standard Pipe Parallel) con diametro nominale della filettatura di 1/4 di pollice. Questi fori permettono la connessione a strumenti analitici per la misurazione dei gas o per operazioni di prelievo di campioni.

Sono state previste due maniglie sommitali in PETG integrate nel corpo del captatore, che ne facilitano la movimentazione e il posizionamento sul campo. Inoltre, sono presenti agganci per la connessione rapida tra più captatori, con un foro di 10 mm di diametro per l'inserimento di perni o barre di fissaggio per creare una serie di captatori interconnessi.

Di seguito si riportano i disegni tecnici dei due captatori realizzati (Figure 3 e 4).

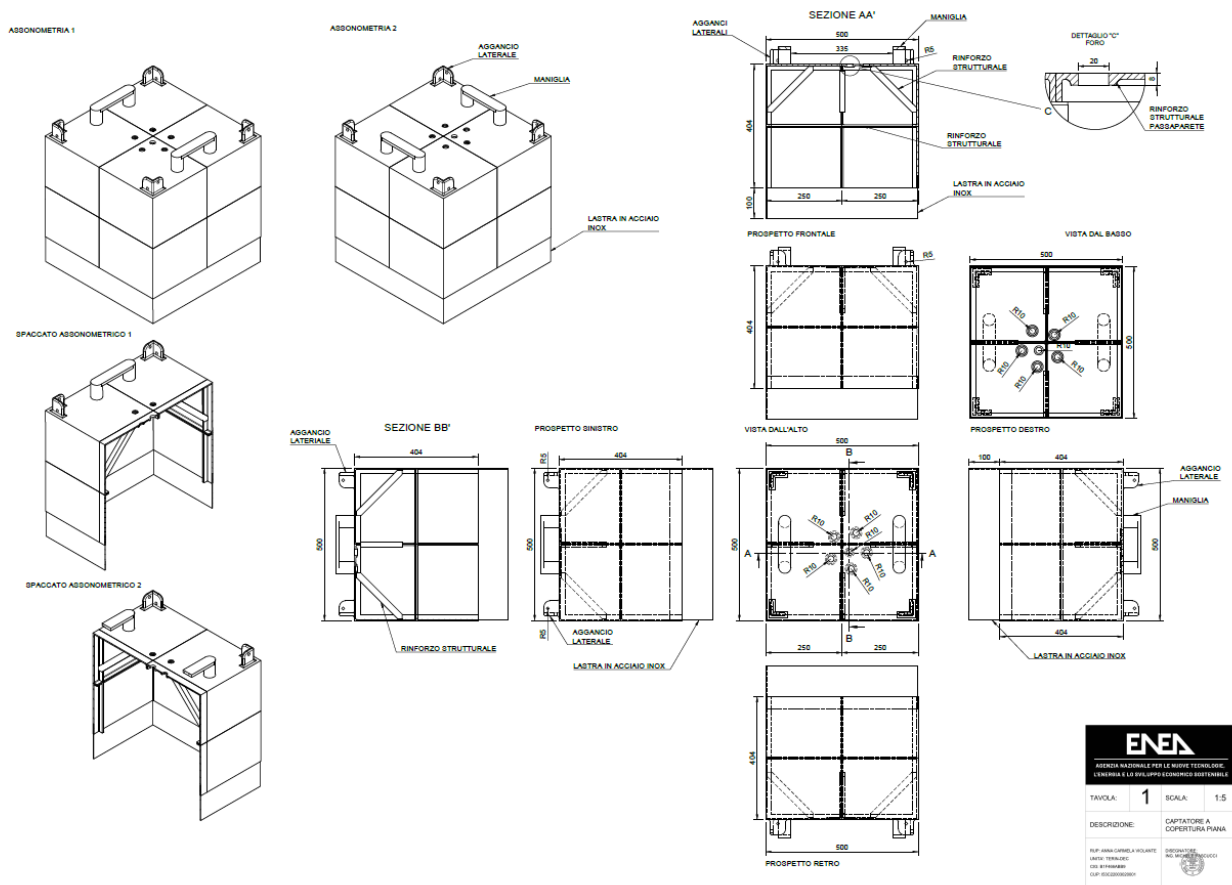


Figura 3. Disegno tecnico del captatore a superficie sommitale piana

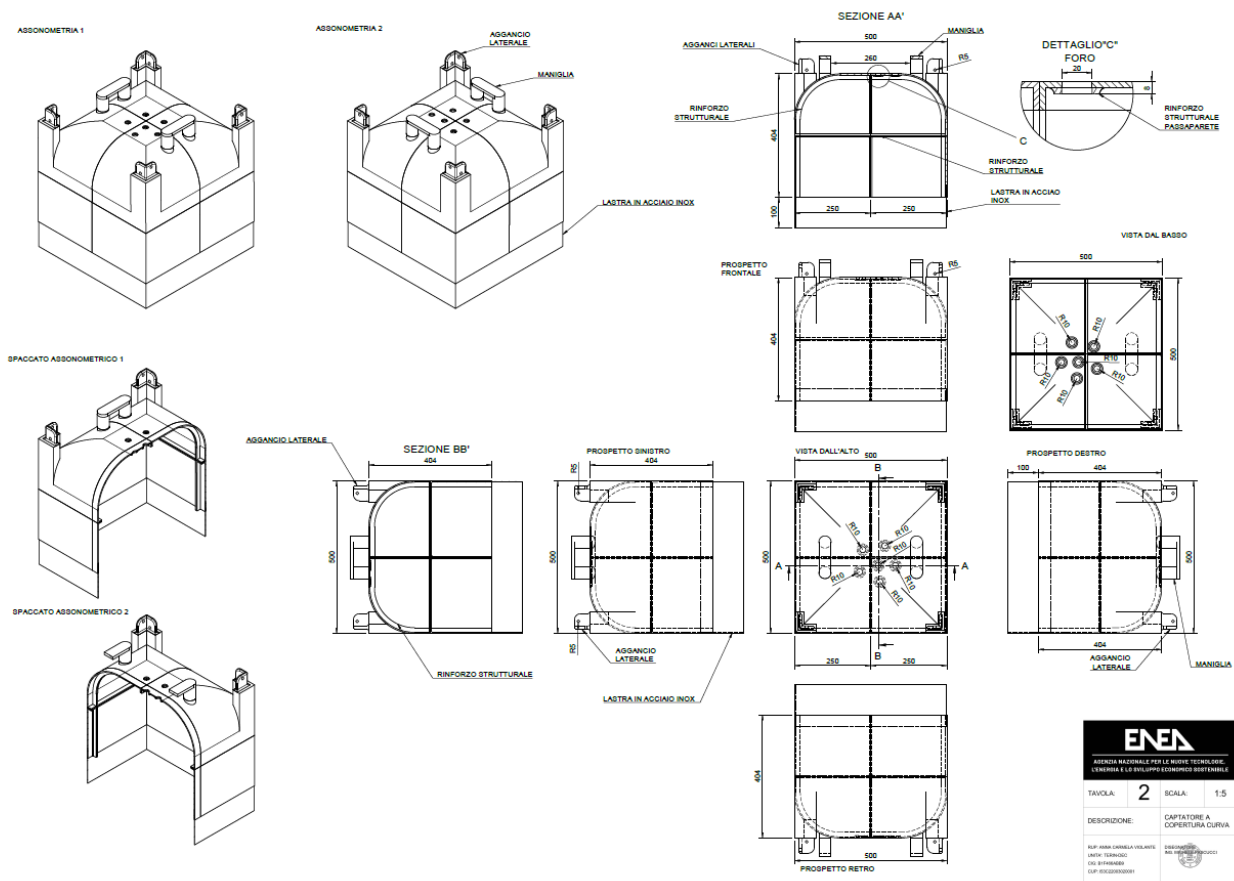


Figura 4. Disegno tecnico del captatore a superficie sommitale a volta a crociera

In laboratorio, è stato allestito il banco prova per la captazione di CO₂. Le dimensioni del banco prova sono 65 x 65 cm, e area pari a 0,4225 m². La superficie ricoperta dal captatore è 0,25 m², corrispondente al 59% della superficie del terreno nel quale è distribuita l'emissione di CO₂.

Il banco prova è stato progettato per analizzare il comportamento del gas CO₂ addotto attraverso un sistema di ugelli e la successiva captazione per mezzo di un captatore posizionato sulla superficie.

Alla base è stato posto uno strato impermeabile in materiale plastico per prevenire le dispersioni di gas verso il basso. Successivamente, è stata realizzata una superficie di emissione composta da 4 file orizzontali, ognuna con 5 ugelli, formando una matrice di 20 ugelli distribuiti uniformemente sulla superficie di 65 X 65 cm. Come riportato in Figura 5, ogni ugello ha una posizione ben definita e una distanza costante dagli ugelli adiacenti sia orizzontalmente che verticalmente di 13 cm. Un collettore principale ad anello, che riceve il gas CO₂ da una bombola, consente l'adduzione del gas agli ugelli tramite tubazioni di distribuzione di lunghezza uniforme. La funzione di questa configurazione è di immettere CO₂ nel sistema con portate controllate e distribuite uniformemente (perdita di carico pressoché uniforme). Gli ugelli sono ancorati a una rete metallica, che ha lo scopo di supportare gli strati sovrastanti e migliorare la distribuzione uniforme del gas, creando una camera di diffusione di circa 2 cm di altezza.

Rispetto a quanto mostrato in Figura 5, la rete metallica è stata posizionata capovolta sul banco prova.



Figura 5. Distribuzione di ugelli e collettore su rete metallica. Nel setup la parte visibile in figura risulta rivolta verso il basso

Sopra la rete metallica è stato posizionato un geotessile permeabile (Figura 6), che garantisce che il gas CO_2 , che si diffonde attraverso la rete, non venga ostacolato dalla presenza del sedimento. Inoltre, il geotessile favorisce una distribuzione uniforme del flusso di CO_2 , prevenendo la formazione di canali preferenziali.

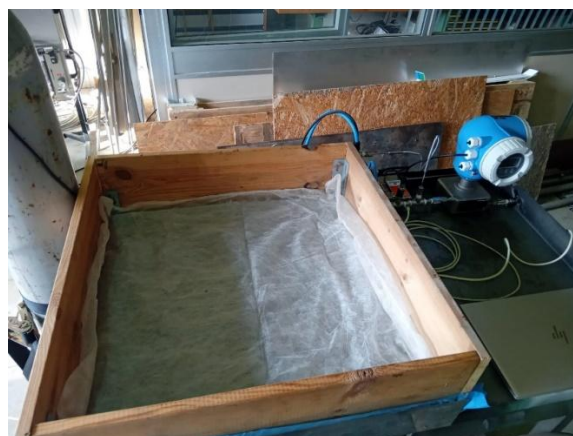


Figura 6. Geotessile permeabile fissato sulla rete metallica

Per entrambi i test, è stato posizionato uno strato di argilla di 5 cm alla base, che consente la diffusione del gas verso lo strato superiore e agisce da mezzo filtrante (Figura 7). Sopra questo strato, è stato collocato un geotessile permeabile ai gas ma resistente alla compattazione, con l'obiettivo di separare il sedimento dal terreno sovrastante e prevenire la mescolanza degli

strati. In base alla configurazione della prova, è stato poi aggiunto un secondo strato di terreno spesso circa 5 cm, composto da materiale diverso a seconda del test di conduzione. Infine, l'intero sistema è stato assemblato integrando la sensoristica e la linea di trattamento del gas, sia in entrata che in uscita.



Figura 7. Strato basale di argilla

Come schematizzato in Figura 8, il banco prova descritto in precedenza è stato inserito in un sistema controllato di immissione e captazione di CO₂. Una bombola di gas CO₂, equipaggiata con riscaldatore gas e riduttore di pressione manuale impostato a 3 bar, è stata connessa al sistema di adduzione.

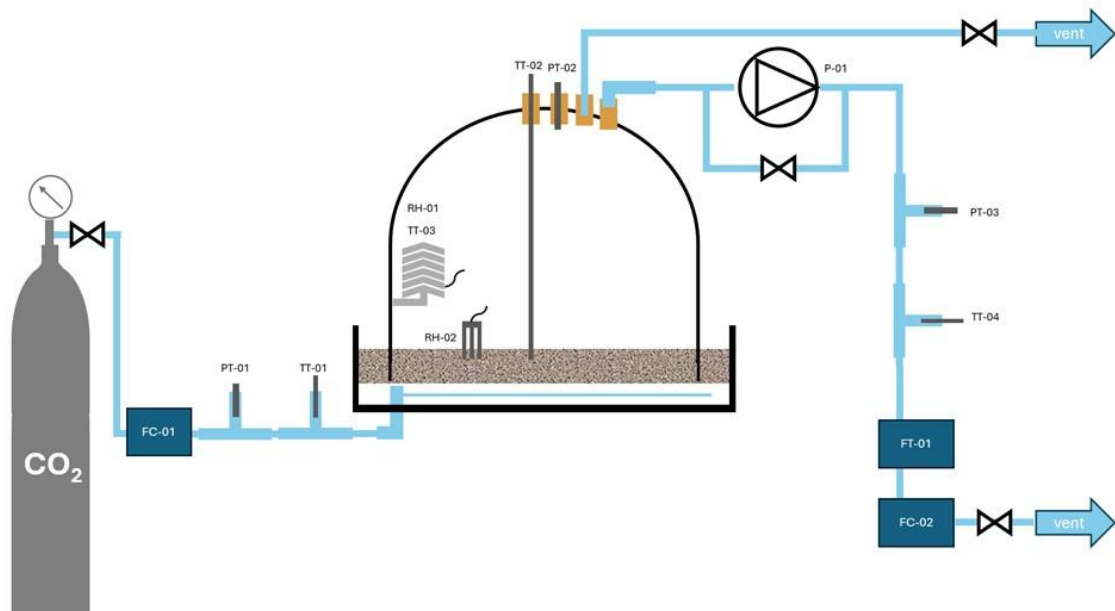


Figura 8. Sistema di captazione della CO₂ realizzato a scala di laboratorio

La pipeline di adduzione è stata realizzata con tubazioni plastiche LLDPE da 10 mm e connessioni ad innesto rapido di resina acetica. Tutta la sensoristica utilizzata è stata connessa alla pipeline mediante interconnessioni da 1/4" gas.

Sulla linea di mandata, è presente una valvola di intercetto manuale seguita da un regolatore di flusso massico per CO₂ Bronkhorst MFC (FC-01) il cui fine è la regolazione della portata di gas CO₂ immesso nel sistema di captazione tra 0,18 l/min (1.45 kg/m²*giorno) e 9 l/min globali (60,5 kg/m²*giorno) in base alle esigenze del test. Seguono un sensore di pressione (PT-01) e un sensore di temperatura (TT-01) per monitorare le caratteristiche del gas CO₂ immesso nel banco prova. In particolare, la temperatura può influenzare la densità del gas e il suo comportamento di diffusione nel suolo.

I sensori installati direttamente sui captatori includono: il sensore di temperatura del terreno (TT-02), il sensore di umidità relativa del terreno (RH-02)(Figura 9), il sensore di temperatura e umidità relativa dell'aria all'interno del captatore (TT-02 e RH-01), e infine, il sensore di pressione assoluta (PT-02).



Figura 9. Sensori di temperatura e umidità relativa di terreno (TT-02, RH-02) e ambiente (TT-03, RH-01), questi ultimi protetti da schermo anti-radiazione

La linea di captazione del gas è composta da una pompa a membrana (P-01) (Figura 10), predisposta con un bypass, la cui regolazione è stata realizzata mediante valvola a sfera manuale. La portata massima della pompa è 4 l/min.



Figura 10. Pompa a membrana di aspirazione da captatore con bypass manuale

I sensori posizionati lungo la linea di estrazione da 10 mm sono (Figura 11): il sensore di pressione (PT-03), il sensore di temperatura (TT-04), il misuratore di portata d MFC e il misuratore di Portata Coriolis. L'analizzatore gas ABB AO2020 caratterizza il gas estratto con misurazioni continue di CO_2 e O_2 .



Figura 11. Sensori e attuatori lungo la linee di adduzione ed estrazione del gas

I sensori e gli attuatori descritti sono stati collegati ad un sistema di acquisizione "DAQ MX" National Instruments sul cui hardware è stato sviluppato un applicativo in ambiente LabVIEW (Figura 12).

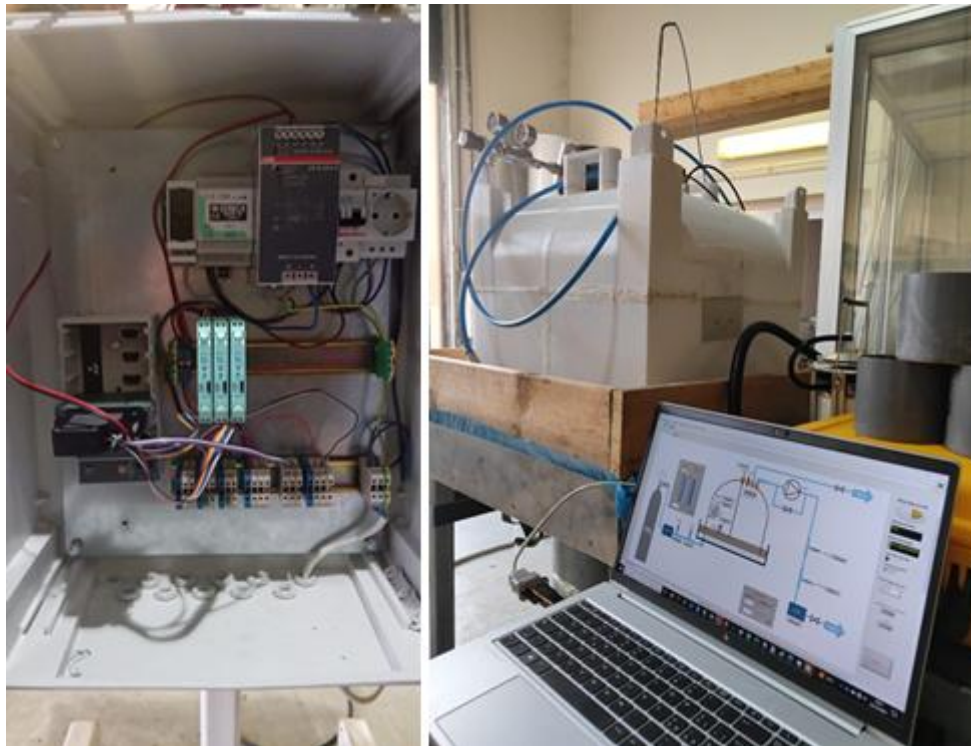


Figura 12. Quadro di acquisizione segnali (sinistra) e monitoraggio/controllo setup sperimentale in LabView (destra)

È stato eseguito un test di verifica di uniformità di emissione di CO₂ sul banco prova con la campana di acquisizione LI-8100 A (LI-COR® Biosciences) (Figura 13), con l'obiettivo di verificare l'efficacia dell'uniformità di emissione della CO₂, monitorando il flusso di gas in diversi punti del banco prova.

La campana è stata posizionata in corrispondenza di ciascun punto del banco di prova (Figura 14) mediante una matrice di test composta da 9 celle (3 righe X 3 colonne) i cui indici sono riportati in Figura 15. Facendo riferimento ai limiti del range di emissione, sono state fatte delle misurazioni considerando un flusso pari a 0,2 l/m e a 0,8 l/m tramite sistema di adduzione, rispettivamente pari a 1,35 kg/m² * giorno e 5,41 kg/m² * giorno.



Chamber Volume: 635.2 cm³
 Soil Area Exposed: 63.7 cm² (13 in.²)
 Dimensions: 15.2 cm L x 15.2 cm W x 25.4 cm H (6" x 6" x 10")
 Air temperature thermistor
 Operating Range: -20 to 45 °C
 Accuracy: ± 0.2 °C from 0 to 50 °C, ± 0.3 °C from -20 to 0 °C
 Cable length: 1.01 m (40")
 Weight: 1.6 kg (3.5 lb.)

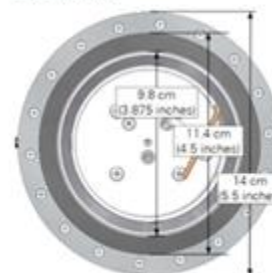


Figura 13. Campana di acquisizione LI-8100 A (LI-COR® Biosciences)



Figura 14. Campana di acquisizione LI-8100 A (LI-COR® Biosciences) disposta su ogni punto della matrice di prova (a destra tufo, a sinistra terriccio)

Posizione degli indici nella prova di flusso

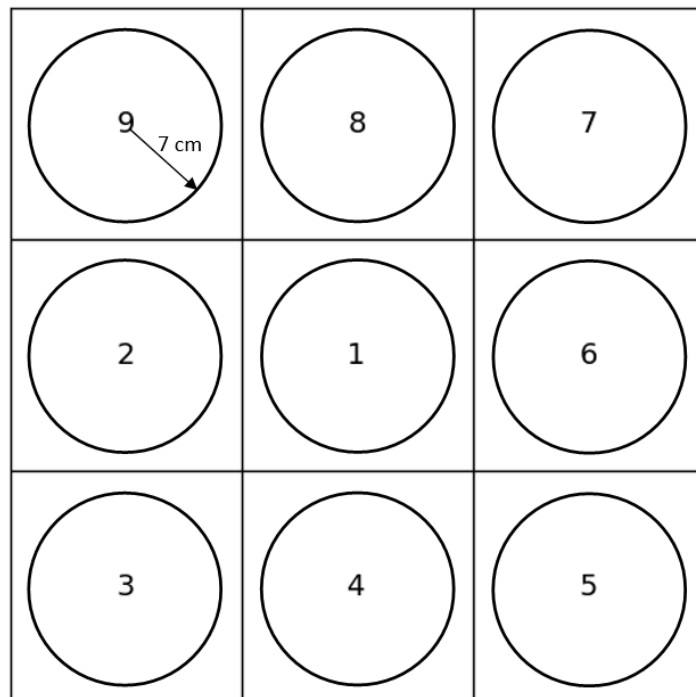


Figura 15. Matrice di prova a griglia (3 righe X 3 colonne)

Dai test di verifica condotti sul tufo, è emerso che il flusso in uscita misurato in ciascun punto della griglia, considerando valori di flusso in entrata pari a 0,2 e 0,8 l/min, varia in funzione delle

caratteristiche di permeabilità e porosità del terreno attraversato. Come riportato nella Figura 16, per un flusso in entrata di 1,35 kg/m²*giorno, i valori più elevati del flusso in uscita si osservano nelle zone 1, 5, 6 e 7 della matrice di prova. Al contrario, valori di flusso più bassi sono stati registrati nelle zone 3 e 4. La media sulla matrice dell'emissione di CO₂ è stata di 1,13 kg/m²*giorno, con deviazione standard di 0,13.



Figura 16. Risultati test di verifica sulla matrice di prova con flusso in entrata pari a 1,35 kg/m²*giorno

In Figura 17, per un flusso in entrata di 5,41 kg/m²*giorno, i valori più elevati del flusso in uscita si osservano nelle zone 1, 2 e 7 della matrice di prova. Come precedentemente, anche qui si registrano valori di flusso più bassi nelle zone 3 e 4. La media sulla matrice dell'emissione di CO₂ è stata di 2.82 kg/m²*giorno e deviazione standard pari a 0,21.

A fronte di tali evidenze, oltre ad una possibile disomogeneità dovuta all'emissione degli ugelli, le aree che presentano un flusso in uscita più elevato suggeriscono che il tufo disposto su tale area presenta una permeabilità maggiore e granulometria più grossolana, con un ipotizzabile conseguente drenaggio maggiore. I valori più bassi di flusso in uscita, invece, potrebbero essere sintomo di una maggiore concentrazione di particelle fini che riducono la permeabilità, oppure indicano la presenza di vie di infiltrazione in prossimità dei bordi.

Generalmente, all'aumentare del flusso in ingresso, l'emissione misurata dal terreno decresce in modo non proporzionale passando da una media dell'84% a una media del 52%. Tale fenomeno può essere collegato alla creazione di vie di fuga preferenziali alternative ai siti su cui insistono le misure, che risultano amplificate all'aumentare della portata. Purtroppo, a causa dei limiti di misura, al momento non è stato possibile caratterizzare questo fenomeno con portate ancora maggiori.

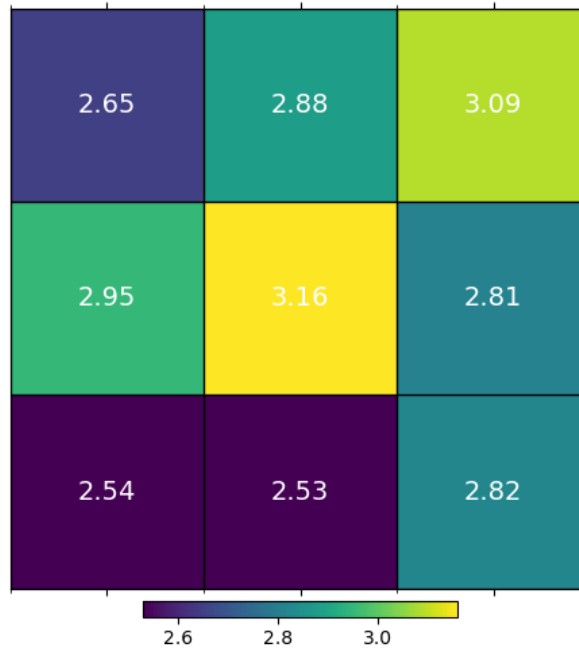


Figura 17. Risultati test di verifica sulla matrice di prova con flusso in entrata pari a 5,41 kg/m²*giorno

La campagna sperimentale prevista inizialmente è stata ridimensionata compatibilmente con i tempi di progetto disponibili a causa della ritardata fornitura dei componenti e dei materiali necessari. Per tale ragione si è scelto di strumentare il solo captatore con volta a crociera, considerato il più efficiente e rappresentativo per le prove preliminari di caratterizzazione del sistema. In particolare, sono state condotte diverse prove al fine di testare l'efficienza del sistema di captazione sopra descritto sul banco di prova nelle seguenti condizioni:

1. Prova con terriccio asciutto mediante captatore e terreno saturi in CO₂ (captatore riempito artificialmente);
2. Prova con terriccio asciutto partendo da condizioni di assenza di CO₂ (start-up);
3. Prova con tufo vulcanico asciutto partendo da condizioni di assenza di CO₂, con portata di captazione costante massima e variazione della portata di adduzione;
4. Prova con tufo vulcanico asciutto partendo da condizioni di assenza di CO₂, con portata di captazione ridotta e variazione della portata di adduzione;
5. Prova con tufo vulcanico bagnato partendo da condizioni di assenza di CO₂, con portata di captazione massima e ridotta.

Per i dettagli sulle evidenze e la discussione dei risultati ottenuti per ciascuna prova effettuata, insieme ai relativi grafici, si rimanda al rapporto tecnico dal titolo: "Attività di sperimentazione del sistema, a scala di laboratorio, di captazione della CO₂ endogena".

I risultati dei test sperimentali eseguiti hanno evidenziato come la distribuzione del flusso di CO₂ sia fortemente influenzata dalle proprietà fisiche del terreno. Il tufo vulcanico ha mostrato una capacità di captazione superiore rispetto al terriccio, suggerendo che terreni più permeabili favoriscono una maggiore efficienza nel rilascio del gas. La prova sul terreno saturo di acqua ha mostrato un impatto significativo sulla diffusione del gas, evidenziando una minore capacità di captazione rispetto ai terreni asciutti. Durante le prove sperimentali, è emerso che la riduzione della portata di estrazione influisce significativamente sulla concentrazione di CO₂ catturata, impedendo il raggiungimento di un equilibrio tra flusso in ingresso e in uscita. Ciò è dovuto, probabilmente, alla dispersione del gas dalla superficie esterna del captatore e alle differenti caratteristiche fisiche del terreno. Questo riproduce, a scala di laboratorio, quanto avviene naturalmente nel terreno, caratterizzato da disomogeneità nella sua composizione.

In conclusione, il sistema di captazione sviluppato ha mostrato un buon potenziale per la simulazione delle emissioni di CO₂ in laboratorio, ma è necessario considerare le variabili ambientali, la geometria dei captatori e le caratteristiche del terreno per ottimizzare le performance in scenari naturali. I risultati ottenuti sono promettenti per future applicazioni e per miglioramenti nei modelli di captazione in ambienti reali.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Per l'esecuzione delle attività di ricerca previste nella presente LA si è fatto ricorso a servizi di consulenza esterna, in particolare per la redazione dei disegni tecnici e per la realizzazione in stampa 3D delle due tipologie di captatori.

9 Pubblicazioni scientifiche

Al momento non è stata prodotta alcuna pubblicazione scientifica relativa ai risultati di questa L.A.

10 Eventi di disseminazione

Primo Workshop di progetto Integrato 1.3 "Tecnologie dell'idrogeno" (Enea, CNR, RSE); Messina, 26 Giugno 2023 (CNR).

Secondo Workshop di progetto Integrato 1.3 "Tecnologie dell'idrogeno" (Enea, CNR, RSE); Milano 13-14 Dicembre 2023 (RSE).

Terzo Workshop di progetto Integrato 1.3 "Tecnologie dell'idrogeno" (Enea, CNR, RSE); Roma 19-20 Dicembre 2024 (C.R. Enea - Casaccia).