

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE - PIANO TRIENNALE DI REALIZZAZIONE 2022-24

Progetti di ricerca di cui all'art. 10 comma 2, lettera a) del decreto 26 gennaio 2000

Tema 1.3

Progetto Integrato Tecnologie dell'Idrogeno

Relazione semestrale prodotta ai sensi dell'Art. 5, comma 13 dell'Accordo di Programma tra MASE, RSE, ENEA e CNR per lo svolgimento delle attività di ricerca di sistema elettrico del piano triennale 2022-2024 (02/11/2023)

Periodo di riferimento: Semestre VI - 01/07/2024 – 31/12/2024

Di seguito si riporta una sintesi delle attività svolte e dei risultati conseguiti in ogni LA attiva nel periodo di riferimento. Le attività descritte contribuiscono all'ottenimento dei benefici per il sistema energetico e per il settore produttivo evidenziati nel capitolato del progetto.

LA 1.2: Ottimizzazione del processo di gassificazione di rifiuti agroindustriali per la produzione di gas di sintesi ricco in idrogeno attraverso lo sviluppo di materiali catalitici [CNR]

Durante l'ultima fase progettuale sono state condotte misure catalitiche di gassificazione per la conversione del rifiuto agro-industriale selezionato nelle condizioni operative ottimali di processo per la produzione di gas di sintesi ricco in idrogeno. Tutti i test sono stati condotti in un reattore a letto fluido in scala da laboratorio e i risultati messi a confronto in termini di resa di produzione di gas di sintesi, resa in idrogeno e produzione di tar, nonché in termini di composizione chimica.

Tra i catalizzatori testati, la dolomite dopata con nichel ha fornito i migliori risultati seguita dal Ni/ γ -allumina. Tra i catalizzatori di nichel, quello supportato su olivina ha mostrato le rese minori, sebbene in termini di resa a gas di sintesi abbia fatto registrare risultati non molto differenti rispetto a quelli ottenuti con il catalizzatore Ni/ γ -allumina. In termini di resa a idrogeno, invece, il processo di gassificazione con Ni/olivina ha evidenziato un lieve miglioramento rispetto ai dati ottenuti in assenza di materiale catalitico nel gassificatore. Infine, dal punto di vista della concentrazione di tar nel gas di sintesi, la presenza di Ni/olivina ha nel complesso confermato l'effetto positivo che il catalizzatore promuove sugli equilibri di processo.

LA 1.4: Studio catalitico per la produzione di idrogeno “green” mediante processi catalitici dideidrogenazione di substrati organici [CNR]

Nell'ultimo semestre di attività è stato messo a punto un protocollo per le misure catalitiche e condotta la campagna di prove sperimentali dei catalizzatori nelle reazioni di deidrogenazione.

La caratterizzazione dei materiali catalitici ha riguardato lo studio delle proprietà chimico-fisiche, catalitiche e di resistenza allo stress chimico. Le proprietà chimico-fisiche sono state determinate tramite protocollo di analisi, appositamente messo a punto, che riguarda l'uso singolo o combinato di tecniche analitico-strumentali quali: XRF, XRD, TGA-DSC, SA-BET, H₂-TPR.

Le attività sono state promosse attraverso la partecipazione al 8th Green & Sustainable Chemistry Conference, Dresden, 13-15/05/2024 (L. Spadaro, A. Palella. “Valorization of bioresources vis crude tall oil (CTO) catalytic processing”).

LA 1.6: Produzione di idrogeno da pirolisi di biogas/biometano in bagni fusi: studio sperimentale del processo su scala di laboratorio [ENEA]

Il setup per le prove di pirolisi è stato utilizzato per condurre campagne sperimentali. I prodotti gassosi sono stati analizzati sia in termini qualitativi che quantitativi attraverso gaschromatografia, per determinare la composizione e, indirettamente, la resa della reazione di produzione di idrogeno. Inoltre, ulteriori analisi con gas cromatografia associata alla massa, hanno permesso di identificare eventuali composti indesiderati che potrebbero richiedere trattamenti successivi al reattore.

I prodotti solidi sono stati opportunamente prelevati e inviati all'UCBM per una caratterizzazione morfologica e strutturale nell'ambito della parallela LA 1.10, al fine di determinare la tipologia, la composizione e la qualità in relazione alle condizioni operative adottate, con l'obiettivo di valutarne una possibile valorizzazione commerciale.

Parallelamente i test di compatibilità sono stati effettuati in condizioni isoterme, utilizzando tre diversi tempi di contatto (approssimativamente, 100, 200 e 400 ore). Al termine dei test, i provini sono stati prelevati e consegnati a URM2 che, nella parallela LA 1.9, ha svolto successive prove di caratterizzazione morfologica metallografica.

LA 1.8: Produzione di idrogeno da pirolisi da biogas/biometano in bagni fusi: modellizzazione di dettaglio del reattore e analisi tecnico-economica del processo [URM1-DICMA]

Analisi tecnico-economica del processo. In particolare, la funzione di costo del reattore è stata calcolata sulla base della performance predetta dall'analisi CFD sviluppata nel semestre precedente. Per le altre unità di processo (scambiatori, unità di PSA, compressore e impianto eliostatico a torre) sono state utilizzate funzioni di costo reperite in recenti studi di letteratura. Fissando la pressione e la temperatura di esercizio del reattore rispettivamente a 1 atm e 1050 °C si è determinato che la portata minima di idrogeno prodotto da un impianto che fornisca un costo unitario di idrogeno minore o uguale a 3 \$/kg è di poco superiore a 70 kg/h.

LA 1.9: Produzione di idrogeno da pirolisi da biogas/biometano in bagni fusi: analisi metallografiche dei materiali sottoposti a test di compatibilità ad alta temperatura [URM2]

L'attività svolta dal Centro Interdipartimentale Nanoscienze, Nanotecnologie e Strumentazione Avanzata (NAST) dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" (UniRM2) ha riguardato la continuazione della caratterizzazione dei provini sottoposti a prove di compatibilità con cloruri fusi da ENEA nell'ambito della linea LA 1.6 per il secondo e il terzo campionamento effettuato.

LA 1.10: Produzione di idrogeno da pirolisi da biogas/biometano in bagni fusi: analisi morfologiche e spettroscopiche dei prodotti solidi ottenuti nei test sperimentali [UCBM].

L'attività ha riguardato l'esecuzione di analisi morfologiche e spettroscopiche dei prodotti solidi ottenuti nei test sperimentali condotti da ENEA nella LA 1.6 da pirolisi del biometano in bagni fusi. Partendo dai protocolli realizzati nel semestre precedente si è proceduto, mediante le analisi basate sulla microscopia elettronica, ad investigare i campioni in relazione alla morfologia superficiale, al livello di agglomerazione, alla formazione di seconde fasi o alla formazione di un'eventuale porosità oltre a parametri quali l'area superficiale, il diametro di Feret, e il coefficiente di forma. Sono state inoltre fatte delle indagini basate sull'analisi FT-IR per valutare la struttura molecolare delle suddette fasi solide. Anche in questo semestre, UCMB ha attivamente collaborato con ENEA attraverso le caratterizzazioni fornite, nell'affinamento delle condizioni di preparazione dei campioni in modo che fossero conformi alle necessità di progetto.

LA 1.12: Progettazione esecutiva, realizzazione e test delle modifiche impiantistiche del gassificatore a letto fluido bollente [SOTACARBO]

Sono state completate le modifiche impiantistiche previste che hanno permesso di effettuare dei test sperimentali di gassificazione con ossigeno e vapore per il commissioning, collaudo e primi test sperimentali della nuova configurazione impiantistica dell'impianto Faber. In particolare, la concentrazione di ossigeno è stata aumentata fino all'80%. Le suddette attività sperimentali sono state svolte in accordo con la progettazione di processo effettuata da UVAN e secondo le analisi dei dati registrati durante i test sperimentali. Nello specifico sono state eseguite le seguenti attività:

1. è stato realizzato un sistema di caricamento automatico del combustibile al fine di migliorare la precisione della portata di scarto plastico in ingresso al gassificatore;
2. è stata sostituita la valvola a ghigliottina del sistema di caricamento combustibile con una valvola a farfalla per migliorare la tenuta dell'impianto Faber e dunque ridurre fortemente il rischio di perdite di syngas;
3. sono stati effettuati nuovi test sperimentali in cui è stata alimentata aria arricchita in ossigeno fino ad una concentrazione del 80%. La portata di vapore necessaria per il contenimento della temperatura è stata aumentata fino a circa 55 kg/h grazie al funzionamento della nuova caldaia. L'unico scarto plastico utilizzato come combustibile in questi test è stato il Blu-C, che rappresenta lo scarto plastico, classificato come CSS, con le caratteristiche più simili al plasmix;
4. l'adeguamento del sistema di campionamento e di analisi in linea della composizione del syngas, per tener conto della diversa composizione del syngas;
5. la verifica della funzionalità della torcia nell'esercizio con un syngas di potere calorifico più elevato, come risultato dalle simulazioni modellistiche;
6. è stata effettuata la classificazione del rischio delle zone ATEX per l'impianto Faber per la valutazione dei rischi sull'impianto Faber con l'utilizzo di ossigeno e vapore come agenti gassificanti e per le nuove unità di impianto realizzate nella LA 1.13;
7. sono stati elaborati i dati ottenuti durante i test sperimentali e sono state effettuate nei laboratori Sotacarbo le analisi dei campioni (ceneri, tar e syngas) prelevati durante i test sperimentali.

Questa fase ha portato alla pubblicazione di un ulteriore articolo su rivista internazionale:

F. Parrillo, F. Ardolino, C. Boccia, G. Calì, A. Pettinau, U. Arena. 2024. Mixed plastic waste gasification in a large pilot-scale fluidized bed reactor operated with oxygen-enriched air and steam. *Energy&Fuels.* 38/22.

e alla presentazione di un contributo a una conferenza internazionale:

Parrillo F., Calì G., Arena U., Materazzi M., Pettinau A., Ardolino F., Sebastiani A. Plastic waste gasification using oxygen-enriched air and steam: pilot plant performance and model results. 10th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation. Sendai, Giappone, 20-23 agosto 2024.

LA 1.13: Progettazione esecutiva e realizzazione del nuovo sistema di pulizia a caldo del syngas [SOTACARBO]

Sulla base della progettazione di processo del nuovo sistema di pulizia a caldo, effettuata da UVAN è stata effettuata da Sotacarbo la progettazione esecutiva, realizzazione, commissioning, collaudo e primi test sperimentali del nuovo sistema di pulizia a caldo del syngas ed è stato realizzato e collaudato un nuovo sistema di pulizia del syngas a freddo. A tal fine Sotacarbo ha effettuato le seguenti attività:

1. è stata completata la progettazione esecutiva, con l'indicazione delle modifiche dell'impianto;
2. è stata realizzata una nuova unità di pulizia caldo del syngas;

3. è stata realizzata una nuova unità di pulizia a freddo in sostituzione della precedente che ora consente l'impiego nello scrubber ad umido di acqua che consenta la condensazione/scarico (o ricircolo) di portate di vapore dell'ordine di circa 80 kg/h presenti nel syngas prodotto dal gassificatore, garantendone l'esercizio in sicurezza;
4. è stata completata la classificazione delle zone ATEX per l'inserimento sull'impianto Faber della sezione di pulizia a caldo del syngas;
5. sono state effettuate le modifiche alla strumentazione di analisi del syngas e del campionamento del tar per le nuove esigenze sperimentali;
6. è stato effettuato il commissioning, il collaudo e primi test sperimentali della linea caldo del syngas e del sistema di pulizia a freddo con il supporto di UVAN.

LA 1.15: Progettazione di processo delle modifiche impiantistiche del gassificatore a letto fluido bollente [UVAN]

Nell'ultimo semestre della L.A. 1.15 "Progettazione di processo delle modifiche impiantistiche del gassificatore a letto fluido bollente", sulla base sia di un modello matematico che UVAN ha contribuito a sviluppare e di cui si è valutata la capacità di fornire dati in buon accordo con quelli sperimentali sia dei dati ottenuti dalle nuove 15 prove eseguite tra gennaio e aprile 2024, UVAN ha suggerito una serie di modifiche, condivise da Sotacarbo, che sono così schematizzabili:

1. la sostituzione dell'attuale intera sezione di syngas clean-up con una che consenta l'alimentazione nello scrubber ad umido di acqua corrente (meglio se demineralizzata) oltre che la condensazione e scarico (o ricircolo) di portata di vapore dell'ordine dei 75-80 kg/h, garantendone l'esercizio in sicurezza;
2. l'adeguamento del sistema di campionamento del syngas e di analisi in linea della sua composizione, per tener conto di come questa cambierà a seguito delle nuove modalità di esercizio;
3. la verifica della funzionalità della torcia nell'esercizio con un syngas di potere calorifico più elevato, come previsto dalle simulazioni modellistiche;
4. la predisposizione di un sistema di spillamento di una portata di syngas, nell'intervallo tra 20 e 30 m³N/h, da collocare subito a valle del ciclone. Tale portata dovrà essere inviata ad un sistema di abbattimento termochimico dei tar, costituito da uno o due forni di cracking catalitico disposti in parallelo, come da progettazione di processo sviluppata nell'ambito delle attività della LA1.16;
5. lo sviluppo di un'accurata analisi dei rischi, che definisca le azioni impiantistiche e operative che garantiscano la massima sicurezza di esercizio, anche nelle nuove modalità di funzionamento e con il nuovo syngas. Alcune di queste azioni appaiono indispensabili, quali la verifica della funzionalità della guardia idraulica esistente; l'inserimento di dischi di rottura in più punti a valle del reattore; il riesame delle procedure di gestione operativa e di quelle di manutenzione dell'impianto.
6. l'acquisizione di perlomeno due nuovi forni riscaldanti per il corpo reattore, per disporre in tempi brevi di eventuali ricambi che garantiscano che l'attività sperimentale non subisca interruzioni prolungate.
7. UVAN ha assistito e collaborato al commissioning di tutte le modifiche impiantistiche (in particolare quelle relative alla sostituzione completa della sezione di pulizia del syngas), testate con successo dai tecnici Sotacarbo nel mese di dicembre 2024.
8. Le attività di questo semestre hanno portato a:
9. la pubblicazione di ulteriori due articoli su riviste internazionale:
 - a. A. Sebastiani, F. Parrillo, F. Ardolino, U. Arena, S. Iannello, M. Materazzi. 2025. Modelling of oxygen-steam gasification of waste feedstock in industrial fluidized bed reactors. Chemical Engineering Journal, 159763. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.159763>

- b. F. Parrillo, F. Ardolino, C. Boccia, G. Calì, A. Pettinau, U. Arena. 2024. Mixed plastic waste gasification in a large pilot-scale fluidized bed reactor operated with oxygen-enriched air and steam. *Energy&Fuels.* 38/22. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c04280>
10. la presentazione di un contributo a una conferenza internazionale:
- a. Parrillo F., Calì G., Arena U., Materazzi M., Pettinau A., Ardolino F., Sebastiani A. Plastic waste gasification using oxygen-enriched air and steam: pilot plant performance and model results. *WastEng24. 10th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation.* Sendai, Giappone, 20-23 agosto 2024.

LA 1.16: Progettazione di processo di un nuovo sistema di pulizia a caldo del syngas [UVAN]

È stata completata la campagna sperimentale prevista su un apparato in scala da laboratorio presso il “Laboratorio di Impiantistica Chimica Ambientale” del DiSTABiF di UVAN e la fase di commissioning a caldo del nuovo sistema di pulizia a caldo del syngas. A tal fine, UVAN ha:

1. concluso la sperimentazione nel Laboratorio di Impiantistica Chimica Ambientale del DiSTABiF di UVAN, utilizzando il naftalene come tar modello. Questo ha consentito di validare ulteriormente la costante cinetica alla base della progettazione di processo della linea di pulizia a caldo del syngas;
2. analizzato le possibili resistenze diffusive, interne ed esterne applicando rispettivamente i criteri di Weisz-Prater e Mears. Le resistenze sono risultate trascurabili per le condizioni di interesse;
3. proposto una serie di azioni da intraprendere in fase di commissioning.

Questa fase ha portato a:

- un articolo su rivista internazionale che è in fase di avanzata revisione: Arconati V., Boccia C., Ardolino F., Ruoppolo G., Arena U., Parrillo F. Design of a tar catalytic cracker based on hot syngas clean-up tests. *Chemical Engineering Research and Design* (in revisione).
- la presentazione di un contributo a una conferenza internazionale: Arconati V., Boccia C., Parrillo F., Ardolino F., Ruoppolo G., Arena U. Hot syngas clean-up by catalytic cracking of tars: the effect of main parameters. *Venice2024. 10th International Symposium on energy from biomass and waste.* Venezia, 25-27 novembre 2024.

LA 1.18: Produzione di idrogeno da gassificazione delle biomasse: realizzazione e caratterizzazione di membrane ceramiche per la separazione di H₂ puro [RSE]

Realizzata e avviata la postazione di prova per test di permeazione su membrane HTM (*Hydrogen Transport Membrane*) in condizioni rappresentative di un processo di separazione di idrogeno puro da syngas prodotto da gassificazione di biomasse. Esiti dei test effettuati di caratterizzazione di membrane LWO ad alta temperatura, in ambiente secco e in ambiente umido.

LA 1.20 - Sviluppo e sostenibilità economico/ambientale di una cella di fotoelettrolisi per la produzione di idrogeno [CNR]

Nell’ultimo semestre le attività sono proseguiti con l’assemblaggio dei componenti e la realizzazione del prototipo (Cella con area attiva di 10 cm² costituita da: Fotoanodo a base di ematite drogata con titanio e fosforo; Fotocatodo a base di ossido cuprico; Co-catalizzatore per la promozione dell’evoluzione dell’idrogeno a base di NiCu; Substrato fotocatodico idrofobico; Elettrolita solido a base di membrana polimerica anionica Fumasep FAA3-50; Ionomero che funge da interfaccia elettrodo/elettrolita; Strato protettivo fotocatodico a base di titanio per limitare i fenomeni di instabilità).

Il prototipo è stato quindi caratterizzato elettrochimicamente al fine di valutare la photocorrente e l’efficienza di produzione di idrogeno. Inoltre, sono stati condotti brevi test di durata per valutare la stabilità del

dispositivo. Infine, tramite analisi gascromatografica è stata valutata la purezza del flusso di idrogeno sviluppato.

Parallelamente è stato finalizzato lo sviluppo di un modello di analisi dei costi interni e delle esternalità.

Sono state finalizzate le seguenti azioni volte alla promozione delle attività progettuali e dei principali risultati ottenuti:

- pubblicazione scientifica, relativa alla “progettazione, sviluppo e caratterizzazione elettrochimica di una cella di fotoelettrolisi in scala di laboratorio” è in fase di sottomissione alla rivista Solar Energy nell’ambito della Special Issue “Solar-to-X-Technologies”.
- pubblicazione accettata ed in fase di pubblicazione (Rivista: Energies MDPI, Identificativo manoscritto: energies-3474860, Titolo manoscritto: “Green Hydrogen Generation by Water Photoelectrolysis: Economic and Environmental Analysis”)
- Presentazione orale dal titolo “Economic and environmental sustainability of a photoelectrolysis cell for hydrogen production” alla conferenza 8° AIEE Energy Symposium Current and Future Challenges to Energy Security svolta a Padova (Italia) dal 28 al 30 novembre 2024.

LA 1.23 – Produzione di H2 diretta da fonte solare: prove sperimentali di celle prototipali ad area variabile con elettrodi photocatalitici [RSE]

Studio esplorativo su elettroliti con composizione derivanti da acque di scarto industriali di origine alimentare e loro riproduzione in laboratorio.

LA 1.24 - Sviluppo di metodologie e analisi di tecnologie per la certificazione dell'idrogeno verde [UPA]

Sono state condotte le attività di valutazione della sostenibilità economica del tracciamento mediante additivo e la definizione ed implementazione degli smart contract di classificazione dell'idrogeno contribuendo allo sviluppo di un prototipo di applicazione web per il tracciamento e la certificazione dell'idrogeno verde, utilizzando dati relativi alle metodologie studiate.

Durante l'ultimo semestre sono state finalizzate le seguenti azioni volte alla promozione delle attività progettuali e dei principali risultati ottenuti:

- Rehan, M., Cannizzaro, F. S., Capizzi, G., Gallo, P., Riva Sanseverino, E., & Santamaria, M. (in press). “Physical and digital traceability of green hydrogen with deuterium and blockchain”. Manuscript submitted for publication.
- Pierluigi Gallo, John Licari, Fabio Massaro, Alexander Micallef, Salvatore Ruffino, Cyril Spiteri Staines, “Certified renewable hydrogen production from reverse power flows in a medium voltage distribution network of Malta”

LA 2.1: Upgrading, sperimentazione e integrazione dei processi Power to Gas presso l'impianto MENHIR [ENEA]

È stata completata la campagna sperimentale avviata nel semestre precedente. È stato inoltre ultimato il progetto definitivo del sistema di separazione idrogeno-metano basato su tecnologia a membrana ed avviata la procedura per la sua realizzazione.

LA 2.3: Analisi e modellazione dell'integrazione dei processi di metanazione biologica e catalitica per applicazioni Power to Gas [URM1-DICMA]

Le attività di progetto si sono concentrate sullo sviluppo, la simulazione e la validazione di un sistema ibrido di metanazione biologica e catalitica per la produzione di gas naturale sintetico (SNG) da idrogeno verde e CO₂, conforme agli standard UNI TS 11537:2019. L'obiettivo è stato la realizzazione di un modello simulativo

in Aspen Plus capace di descrivere in modo dinamico e stazionario l'intero processo, valutandone le prestazioni e la stabilità operativa. Le principali attività hanno riguardato: (1) un'analisi critica della letteratura scientifica sui modelli cinetici per i processi di metanazione e il loro accoppiamento; (2) la definizione di ipotesi operative per l'integrazione tra le sezioni biologica e catalitica; (3) lo sviluppo del modello dinamico di biometanazione e la sua validazione tramite dati di letteratura; (4) la simulazione dell'accoppiamento dei due sistemi, con particolare attenzione al controllo dei transitori legati alle variazioni del flusso di idrogeno. Sono state condotte simulazioni in Aspen Plus e Aspen Dynamics per analizzare la risposta del sistema a variazioni del carico di H₂ ($\pm 10\text{--}20\%$), evidenziando la necessità di un controllo ottimizzato per mantenere la stabilità e ridurre la dipendenza da serbatoi di accumulo. Parallelamente, è stato sviluppato un modello di reattore catalitico di tipo trickle bed, più idoneo per applicazioni industriali grazie all'elevata efficienza di conversione e alla buona gestione termica. Sul fronte sperimentale, è stato realizzato e testato un impianto pilota con reattore "plug-flow" a base di nichel, dotato di circuito a olio diatermico per il controllo termico. Le prove, condotte per 10 ore operative, hanno raggiunto una conversione della CO₂ di circa il 70% e una produzione di CH₄ pari al 63,4% in volume. I risultati hanno confermato l'affidabilità dei modelli simulativi e la validità del concetto di accoppiamento biologico-catalitico.

LA 2.5: LA Power to gas bioelettrochimico: test sperimentali di biometanazione con reattore a gocciolamento e individuazione di ambiti applicativi per uno scaling-up dei processi di elettrometanogenesi microbica [RSE]

Biometanazione. Risultati dei test effettuati con il reattore di metanazione biologica "2" volti a raggiungere le condizioni stazionarie che massimizzano la produzione di metano.

Elettrometanogenesi. Dati ottenuti durante i test in campo e in laboratorio funzionali agli studi per l'elettrometanogenesi.

LA 2.7: Realizzazione e sperimentazione di un sistema di captazione di CO₂ da suolo in scala da laboratorio per applicazioni Power to Gas [ENEA]

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.

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.

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 opportunatamente dimensionati e implementati nell'intero sistema di captazione della CO₂.

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.

Sono stati condotti test sperimentali in condizioni controllate di flusso, su due differenti tipologie di terreno (terriccio e tufo vulcanico) sia in condizioni sature che anidre.

Tuttavia, si sono verificati scostamenti temporali rispetto alle attività scientifiche pianificate, a causa di ritardi nelle consegne della strumentazione e dei materiali da parte dei fornitori. Questi ritardi hanno ridotto significativamente il tempo residuo per le campagne sperimentali, rendendo necessarie modifiche alla matrice di prove inizialmente prevista.

LA 2.9: Realizzazione e test sul campo di un sistema di captazione di CO₂ da suolo per applicazioni Power to Gas [URM1-DIAEE]

Sono state completate le attività di simulazione di captazione, sia con riferimento al prototipo mobile che a impianti fissi. Inoltre, è stato realizzato il prototipo, con prova di funzionamento positiva.

LA 2.10: Analisi delle tecnologie di separazione gas per l'applicazione al processo di separazione di miscele idrogeno e metano [UBO]

L'attività svolta ha interessato principalmente la valutazione delle proprietà di separazione di diversi materiali polimerici, tramite analisi della letteratura tecnica e scientifica e prove sperimentali dedicate di permeazione su polimeri commerciali attualmente già utilizzati per la realizzazione di membrane. I risultati ottenuti in termini di permeabilità di idrogeno e di selettività H₂/CH₄ hanno consentito l'identificazione delle polimmidi come classe di riferimento, in grado di conferire una sufficiente permeabilità e garantire una elevata selettività. La selettività può anche essere migliorata grazie allo sviluppo di sistemi nanostrutturati, quali ad esempio i materiali a base di ossido di grafene, sviluppati a livello di laboratorio, che hanno mostrato dai test dedicati un aumento di selettività molto significativo.

La valutazione delle energie di attivazione ha consentito poi di indentificare che è nelle basse temperature che si riesce ad ottenere la migliori efficacia di separazione, per cui si ritiene utile procedere con il processo a temperatura ambiente. L'effetto della pressione non sembra invece produrre effetti rilevanti sulle performance di separazione, vista la limitata condensabilità (e quindi solubilità) dei composti principali.

LA 2.11: Definizione e sperimentazione di configurazioni applicative per la separazione di miscele idrogeno-metano per applicazioni Power to Gas [UBO]

L'attività svolta è stata focalizzata principalmente sulla messa a punto di strumenti di modellazione per la descrizione del trasporto di gas in polimeri vetrosi e per l'analisi del processo e del funzionamento di unità di separazione a membrana.

Il particolare il modello NELF è stato utilizzato per valutare la solubilità di H₂ e CH₄, ma anche di CO₂ o N₂ in polimeri vetrosi, con un approccio di tipo termodinamica di non equilibrio valutando l'andamento di assorbimento con la temperatura e la pressione. Il trasporto di gas è invece stato valutato con l'approccio STM-GP che descrive l'andamento della permeabilità con la pressione di monte. Andamenti sostanzialmente costanti con la pressione si sono riscontrati per l'idrogeno, debolmente calanti per il metano, mentre effetti significativi si sono visti per la CO₂, gas significativamente più condensabile.

La modellazione di processo invece è partita dai valori disponibili di permeabilità dei diversi gas nei diversi polimeri ed è stata principalmente rivolta alla simulazione della separazione H₂/CH₄ nei casi di deblending o power to gas. Si è quindi messo in luce come i parametri operativi principali quali pressione di monte e area di membrana vanno ad influenzare l'efficacia del processo, considerando la separazione a membrana singolo o a doppio stadio. Diversi polimeri sono stati testati, in modo da poterne verificare l'adeguatezza alla separazione in esame.

LA 2.13: Definizione di una configurazione ibrida accumulo elettrico-elettrolizzatore per la produzione di idrogeno da fonti rinnovabili in un caso applicativo reale [UCA-DIEE]

L'attività si è concentrata sulla modellizzazione dell'elettrolizzatore installato a Casaccia e sullo sviluppo dei test sperimentali atti a validare il modello sviluppato. Le misure di qualità della corrente e di efficienza di conversione hanno permesso di fornire una rappresentazione energetica e dinamica del processo di conversione AC/DC installato e di corroborare la validità della proposta tecnologica sviluppata. Inoltre, nella parte finale del progetto l'attività di è concentrata sullo sviluppo di strategie di gestione e controllo del TAB

volte a garantire la distribuzione dei flussi di potenza tra PV, sistema di accumulo ed elettrolizzatore proposti nella LA2.12. Gli algoritmi sviluppati hanno dimostrato di essere particolarmente efficaci e funzionali all'implementazione della strategia di gestione proposta. Infine, sono state analizzate diverse topologie di connessione dei TAB per l'aumento dell'affidabilità e la scalabilità della configurazione proposta.

LA 2.14: Progettazione e sviluppo di energy storage per favorire l'integrazione tra rete elettrica e rete gas [UPAR]

Nel secondo semestre 2024 si è conclusa la fase di sperimentazione e validazione del sistema integrato di energy storage basato su idrogeno, completando il percorso di ricerca e sviluppo avviato nel triennio 2022–2024.

L'obiettivo dell'attività è stato quello di verificare le prestazioni del prototipo realizzato, analizzandone il comportamento in diverse condizioni operative e stagionali, e di validare i modelli numerici e termodinamici precedentemente sviluppati.

Nel corso del semestre è stata condotta un'ampia campagna di prove sperimentali presso i laboratori di ATENA Scarl, in collaborazione con Università Parthenope ed ENEA. Il sistema è stato testato in modalità power-to-fuel, con produzione e accumulo di idrogeno mediante energia fotovoltaica, e in modalità power-to-power, con riconversione dell'idrogeno in energia elettrica tramite fuel cell.

Le prove, svolte tra marzo e dicembre 2024, hanno consentito di monitorare la produzione e l'utilizzo dell'idrogeno in differenti scenari di esercizio, verificando la capacità del sistema di operare in modo autonomo e stabile.

I risultati sperimentali hanno mostrato che, nei mesi primaverili ed estivi, il sistema ha raggiunto la piena autonomia energetica, grazie alla maggiore disponibilità di energia solare, producendo fino a 136 kg di idrogeno al mese. Nei mesi autunnali e invernali, pur registrandosi una minore produzione fotovoltaica, il sistema ha mantenuto una gestione efficiente dei flussi energetici grazie all'interazione tra fuel cell, batteria e rete elettrica. La fuel cell ha garantito continuità di alimentazione durante le ore notturne e nei periodi di ridotta generazione rinnovabile, mentre la batteria ha contribuito alla stabilizzazione dei transitori e al bilanciamento di potenza.

Parallelamente, i dati acquisiti sono stati utilizzati per la validazione dei modelli di simulazione realizzati in Aspen Plus, Comsol e Matlab, confermando l'attendibilità delle previsioni energetiche e termiche. L'analisi comparativa tra modelli e prove reali ha permesso di identificare i margini di ottimizzazione delle strategie di controllo e di migliorare la gestione stagionale del sistema.

Nel complesso, il semestre ha permesso di confermare la piena funzionalità del sistema power-to-fuel-to-power, la stabilità operativa dei moduli a idruri metallici e l'efficacia dell'integrazione con l'impianto fotovoltaico. Il sistema ha operato in autonomia per oltre il 70% dell'anno, dimostrando la propria idoneità come soluzione per favorire l'integrazione tra rete elettrica e rete gas e per incrementare la flessibilità energetica locale.

Con queste attività si conclude positivamente il triennio di ricerca PTR 22–24, che ha portato alla realizzazione, validazione e dimostrazione di un prototipo pienamente operativo di sistema di energy storage a idrogeno, ponendo le basi per futuri sviluppi su scala pre-industriale.

LA 2.16: Modellistica di componenti per la separazione di miscele di idrogeno e metano integrati in sistemi Power to Gas [UCBM]

Nel sesto semestre, l'attività ha riguardato l'ottimizzazione e l'analisi dinamica del sistema di separazione a membrana.

Tramite il tool “Optimization” di Aspen Plus, è stata determinata l’area filtrante minima necessaria per garantire il rispetto del limite legislativo di idrogeno ($\leq 2\%$) nel SNG, sia su scala industriale sia pilota, considerando i materiali polistirene (PS) e poliimmide Matrimid (PI).

Successivamente, il modello è stato impiegato per la simulazione dinamica del comportamento del sistema a fronte di portate variabili di gas in ingresso, derivate dalle curve di funzionamento dell’elettrolizzatore alimentato da fonte fotovoltaica.

Le analisi hanno evidenziato la necessità di sistemi di stoccaggio dell’idrogeno per migliorare la risposta del sistema alle fluttuazioni di potenza.

Nel semestre si è inoltre partecipato a conferenze internazionali (Parigi e Londra, 2024) per la disseminazione dei risultati ottenuti.

LA 2.18: Sviluppo del modello completo in matlab/simulink e sua applicazione a differenti configurazioni e parametri per la variazione del costo dei gas rinnovabili nell'applicazione Power to Gas [UMAR]

Nel corso dell’ultimo semestre di attività, è stata consolidata la metodologia di analisi, parallelamente a un aggiornamento dei dati impiegati nelle simulazioni, al fine di adeguarli alle più recenti evoluzioni del mercato. In tale contesto, sono stati sviluppati tre modelli multi-parametrici in ambiente Matlab, basati su dati orari relativi alla produzione energetica da fonti rinnovabili e all’andamento dei costi dell’energia elettrica. Tali modelli consentono di ottimizzare il dimensionamento degli impianti e le strategie di gestione dell’idrogeno prodotto, perseguiendo come obiettivo primario la minimizzazione del costo livellato di produzione dei gas rinnovabili. L’analisi ha permesso di individuare i parametri maggiormente incidenti sul costo finale, fornendo la base per condurre valutazioni economico-finanziarie orientate a stimare la redditività degli investimenti e a identificare eventuali misure di incentivazione necessarie a garantirne la sostenibilità economica. La metodologia sviluppata è stata oggetto di confronto con altre linee di attività previste all’interno del WP2, in particolare con le attività LA2.01, LA2.35 e LA3.31, al fine di assicurare coerenza, complementarità e sinergia tra gli studi. Per lo scenario relativo all’idrogeno destinato alla mobilità, il LCOH ottimale è risultato pari a 11 €/kg, valore che può ridursi fino a 7,98 €/kg se si valorizza anche il surplus produttivo. Per ottenere un TIR del 10%, ritenuto adeguato a questo tipo di investimento, è necessario un incentivo in conto capitale pari a 6.257.136,74 €. Nel secondo scenario, relativo all’immissione del 2% di idrogeno nella rete del gas naturale, il LCOX ottimale risulta pari a 1,26 €/kg, corrispondente a 75,10 €/MWh. Considerando che il costo specifico dell’idrogeno rinnovabile è superiore dell’1,2% rispetto al gas naturale, è stato calcolato che un “premium price” di 0,88 €/MWh renderebbe l’operazione economicamente sostenibile. Il LCOX ottimale del biometano è stato stimato pari a 2,56 €/kg, corrispondenti a circa 184 €/MWh. Per garantire la redditività dell’investimento con un TIR del 10%, siano necessari incentivi in conto capitale pari a circa 43 milioni di euro.

LA 2.20: Sviluppo di casi tipici e scenari applicativi di sistemi di accumulo di idrogeno e trasporto di idrogeno e blend volta all’analisi e valutazione delle condizioni di rischio per sistemi ed ambienti esposti all’idrogeno [URM1-DICMA]

La valutazione del rischio svolta in questo semestre ha permesso di stimare la probabilità e le conseguenze di incidenti legati all’uso dell’idrogeno lungo la sua catena del valore. Per l’analisi è stato utilizzato il software HyRAM+ sviluppato presso i Sandia National Laboratories. Sono stati analizzati come casi tipici un impianto di produzione mediante elettrolisi (Hydrogen Demo Valley ENEA) e tre configurazioni di stazioni di rifornimento, con diverse modalità di fornitura: carro bombolaio, gasdotto e produzione on-site tramite elettrolisi.

LA 2.22: Intensificazione del processo di idrogenazione diretta della CO₂ a DME: Integrazione del catalizzatore multi-metallico con una matrice idrofila, finalizzato al raggiungimento di elevate conversioni di CO₂ per passaggio e adeguata stabilità nel tempo [CNR]

Nell'ultimo presente semestre l'attività svolta ha riguardato lo sviluppo di catalizzatori strutturati basati su una formulazione catalitica di riferimento (CuZnAl) mediante l'utilizzo di un robot cartesiano. Successivamente alla definizione della metodologia di stampa più adatta per la produzione di catalizzatori 3D destinati alla conversione dell'anidride carbonica in dimetiletere (DME), i catalizzatori sono stati integrati con un materiale adsorbente per l'acqua (Zeolite LTA),

configurato in una struttura a "ZEBRA". Questa configurazione alterna strati di catalizzatore ibrido e materiale adsorbente, ottimizzando il processo mediante la rimozione dell'acqua dal mezzo di reazione. I sistemi sviluppati sono stati infine testati e validati in un impianto di laboratorio per il processo diretto di conversione della CO₂ a DME, evidenziando un significativo miglioramento delle proprietà catalitiche.

Durante l'ultimo semestre sono state finalizzate le seguenti azioni volte alla promozione delle attività progettuali e dei principali risultati ottenuti:

- Seminario sui combustibili di sintesi (e-fuels) - Accademia de' Lincei (3-4/10/2024)
- Partecipazione a Fiera Roma (16-18/10/2024) - ZERO EMISSION MEDITERRANEAN 2024

LA 2.23: Power to fuels: ottimizzazione dell'impianto Power to fuels (P2G/L) e sperimentazione a supporto [SOTACARBO]

A seguito della progettazione esecutiva, della realizzazione e del collaudo funzionale e idraulico del nuovo sistema di riscaldamento del fluido diatermico dell'unità prototipale P2G/L, avvenuta nel semestre precedente, nel corso del periodo oggetto della presente nota l'attività è stata definitivamente completata con l'installazione del componente comprensiva di tutte le modifiche meccaniche ed elettriche. Il nuovo riscaldatore, essenziale solo nei processi a più alta temperatura, in particolare per l'attivazione dei catalizzatori dedicati all'idrogenazione della CO₂ a metano, è stato installato solo a fine progetto per consentire il completamento delle prove sperimentali di sintesi del metanolo, principale obiettivo di ricerca sull'impianto P2G/L.

LA 2.24: Power to fuels: sviluppo sperimentale di nuovi materiali e processi [SOTACARBO]

L'attività sperimentale condotta nel periodo di riferimento ha riguardato estensive campagne sperimentali sia a livello di laboratorio (con l'impianto bench-scale XtL), che su scala pilota (con il prototipo sperimentale P2G/L). Per quel che concerne il processo di sintesi del metanolo, il catalizzatore oggetto di scale-up precedentemente selezionato, oggetto della linea di attività LA 2.23, è stato dapprima sintetizzato (oggetto della LA 2.25), e poi granulato (oggetto della LA 2.24); i test catalitici preliminari sono stati effettuati sull'impianto XtL e lo sviluppo sperimentale del processo è stato completato con ulteriori test sull'impianto P2G/L. In tale prospettiva, l'attività è stata focalizzata sui seguenti aspetti:

- Selezione del metodo di formatura più appropriato. In base al tipo e alla dimensione di reattore installato sull'unità prototipale P2G/L (a letto fisso) si è stabilito che la forma di granuli o sfere di dimensione ridotte, dell'ordine dai 3 ai 5 mm, sia la più adatta e soddisfi il compromesso tra il favorire l'attività catalitica e il non causare elevate perdite di carico. È stata condotta un'attenta valutazione circa le attrezzature più idonee a processare micro-lotti del catalizzatore oggetto di scale-up ed effettuate le verifiche sperimentali di compatibilità della polvere in oggetto con una serie di leganti e additivi organici necessari per la formatura.
- Selezione del miglior processo di granulazione: nel caso del materiale sviluppato nella presente linea di attività (LA 2.24) si è optato per l'impiego della granulazione ad umido.

- Selezione del legante più appropriato.
- Caratterizzazione pre- e post-granulazione attraverso analisi XRD, BET-BJH, TG e TPR per avere un confronto anche con i materiali precedentemente prodotti in piccola scala.

La sperimentazione è stata inoltre condotta anche su materiali alternativi preparati utilizzando differenti metodi di sintesi. In particolare, sono stati preparati e testati sei nuovi catalizzatori preparati attraverso la tecnica della “self-combustion”, le cui prestazioni catalitiche sono state messe a confronto con un catalizzatore ottenuto con la tecnica convenzionale di co-precipitazione.

Per il processo di sintesi del metano, i sistemi catalitici più promettenti sintetizzati dal gruppo di Chimica Industriale dell'Università di Cagliari (LA 2.25) sono stati testati sull'impianto bench-scale presso Sotacarbo. Il risultato primario della ricerca è stato quello di aver sviluppato un catalizzatore che ha consentito di ottenere buone prestazioni anche in condizioni operative meno severe (temperature inferiori a 300 °C) e a velocità spaziali più sfavorevoli, se messo a confronto con il catalizzatore commerciale.

A seguito delle prove sperimentali precedentemente condotte sull'unità prototipale P2G/L che saranno riportate nel report tecnico relativo alla linea di attività LA 2.23, le campagne sperimentali portate avanti nel presente semestre hanno avuto il molteplice obiettivo di:

- studiare l'effetto della diversa conformazione del letto catalitico impiegando il catalizzatore a base di rame disponibile commercialmente in associazione allo studio sull'effetto del volume del letto catalitico;
- studiare il processo di produzione del dimetiletere con l'obiettivo di massimizzare il contatto tra i siti deputati all'attivazione della CO₂, all'idrogenazione e alla disidratazione del metanolo;
- studiare le diverse variabili di processo in termini di temperatura, pressione e velocità spaziale, impiegando il catalizzatore a base di rame disponibile commercialmente;
- valutare il comportamento catalitico con il catalizzatore oggetto dello scale-up testandolo nelle condizioni più semplici in merito alla conformazione e al volume del letto catalitico.

Relativamente all'integrazione dell'impianto customizzato Power-to-Hydrogen (sistema di elettrolisi di piccola taglia) con relativi sistemi di gestione e controllo, all'impianto da banco di conversione catalitica di CO₂ in combustibili liquidi (X-to-Liquids), in questo semestre è stata realizzata l'installazione del sistema che ha incluso la realizzazione di tutte le linee di tubazioni necessarie per il corretto trasporto dei fluidi tra i componenti del sistema (linee di distribuzione dell'idrogeno, linea di scarico o vent per idrogeno e ossigeno, linee per il trasporto dell'acqua, installazione di un tubo di ventilazione).

LA 2.25: Power to fuels: sintesi e caratterizzazione chimico-fisica di nuovi materiali [UCA-DSCG]

Nell'ultimo semestre l'attività si è concentrata sui sistemi catalitici di cui erano state in precedenza selezionate le composizioni e che erano stati consegnati a Sotacarbo per effettuare le prove catalitiche in pressione. Sono state ripetute le sintesi sia dell'ossido misto CuO ZnO-Al₂O₃-ZrO₂, da utilizzare per l'idrogenazione di CO₂ a metanolo, che dei sistemi NiO-CeO₂, da utilizzare per l'idrogenazione di CO₂ a metano. Ciò con lo scopo innanzitutto di confermare la riproducibilità delle procedure sintetiche, ma anche di permettere l'effettuazione delle caratterizzazioni chimico-fisiche e di ulteriori test catalitici. Le tecniche di caratterizzazione utilizzate sono state la spettroscopia ad emissione ottica, la diffrazione di raggi X, il fisisorbimento di azoto, l'analisi termogravimetrica e la riduzione a temperatura programmata. In particolare, nel caso del sistema CuO ZnO-Al₂O₃-ZrO₂, le proprietà della polvere sintetizzata sono state confrontate con quelle del materiale ottenuto dopo la formatura, effettuata presso Sotacarbo e necessaria per l'utilizzo del sistema catalitico nell'impianto pilota P2G/L.

LA 2.26: Sviluppo di un sistema integrato reversibile rSOFC bidirezionale per l'upgrading di syngas/biogas/metano (es. Da biomasse) [CNR]

Lo stack SOFC/SOE è accoppiato al reattore catalitico di metanazione ad alta temperatura contenente un catalizzatore strutturato in forma di schiuma di SiC attivata con 25wt% Ni/20CeO₂-55ZrO₂, progettato per operare in condizioni reversibili, alternando tra produzione di syngas (reforming) e metanazione e un reattore di metanazione a bassa temperatura (350-450°C) multitubolare per massimizzare la produzione di metano fino a circa 1Nm³/h. Il sistema, quindi, è in grado di funzionare in due configurazioni operative principali: modalità SOEC/metanazione e modalità Reforming/SOFC.

A causa di un problema che ha compromesso l'utilizzo dello stack SOE/SOFC le prove in modalità SOE del sistema integrato (con reformer bidirezionale) sono state condotte con miscele gassose sintetiche, simulando la composizione attesa all'uscita della SOE.

La validità funzionale della soluzione (sistema integrato con funzionalità reversibile) è stata comunque verificata.

I risultati ottenuti evidenziano il potenziale del sistema integrato nel realizzare un ciclo chiuso di accumulo e conversione dell'energia, combinando power-to-gas e gas-to-power in un'unica piattaforma tecnologica. Nel complesso, lo studio conferma la fattibilità tecnica del sistema reversibile e la sua elevata flessibilità operativa, apre prospettive per l'integrazione con le reti energetiche rinnovabili e lo stoccaggio dell'energia sotto forma di combustibili sintetici.

LA 2.27: Modellazione finalizzata allo scale-up di un sistema Power-to-Gas-to-Power basato su r-SOFC e reattore di metanazione bidirezionale [UBO]

Durante l'ultimo semestre sono state condotte le seguenti attività:

- Sviluppo modellazione per previsione comportamento a carico variabile. Risultato è un set di curve di polarizzazione con Simulink e di prestazione del componente e del sistema complessivo al variare del carico.
- Analisi tecnico-economica parametrica del sistema, in previsione dello scale-up. Mediante il modello energetico del sistema, sono state ottenute previsioni delle prestazioni annuali e in contesti con vincoli e scenari economici diversi.

La seguente pubblicazione scientifica open access in lingua inglese è stata prodotta nell'ambito della ricerca svolta:

M. A. Ancona, A. De Pascale, F. Ferrari, T. Santangelo, G. Brunaccini, M. Ferraro, C. Italiano, A. Vita. Performance Analysis of a Power-to-Gas Storage System based on a reversible Solid Oxide Cell. Journal of Physics: Conference Series, Volume 2893,. J. Phys.: Conf. Ser. 2893 012051. DOI 10.1088/1742-6596/2893/1/012051.

LA 2.28: Modellazione della velocità di reazione e dei trasferimenti di materia ed energia in un reattore-scambiatore catalitico per la reazione di metanazione/reforming [USA]

Il modello cinetico è stato implementato in una simulazione CFD (Comsol Multiphysics) per la descrizione del trasporto di quantità di moto e di materia in una schiuma a celle aperte in SiC caricata con Ni/CeO₂-ZrO₂. È stato osservato un ottimo accordo tra i valori sperimentali e quelli del modello CFD.

LA 2.29: Sperimentazione e monitoraggio di componenti e apparecchiature per il trasporto e la distribuzione del gas con miscele di idrogeno e metano presso campo prova rete gas [ENEA]

Nel corso del VI semestre di attività, è stato completato l'adeguamento del campo prove di Centria all'utilizzo di miscele HENG (Hydrogen Enriched Natural Gas). Tale campo è stato utilizzato per le prime prove sulle

tematiche ritenute più urgenti nell'ipotesi di immissione di idrogeno nell'attuale rete gas: conformità dell'attuale strumentazione di misura fiscale del volume di gas erogato agli standard normativi, possibili fenomeni di de-miscelazione dell'idrogeno, compatibilità degli attuali sistemi di rilevazione fughe gas.

Il sistema completo, realizzato in conformità alla normativa vigente sulla sicurezza di impianti a pressione con miscele infiammabili (DPR 151/2011) comprende:

1. baia di carico per stoccaggio bombole con miscela HENG e connessione alla rete del campo prove con valvole per riduzione di pressione
2. meter di riferimento costituito da misuratore di portata ad ultrasuoni "hydrogen ready"
3. stazione di test per contatori calibro G4 collegati in serie, con bypass e valvole
4. due tratti di condotte verticali in linea che simulano le colonne montanti nelle reti di distribuzione domestica
5. collegamento della linea di misura alla condotta fugante
6. strumentazione della rete con sensori di temperatura, di pressione e di composizione del gas (gascromatografo) e sistema di acquisizione dati con datalogger

Il sistema è stato quindi utilizzato per effettuare le tre campagne di misura previste con HENG al 2%vol. e 10%vol.:

- test su misuratori gas calibro G4
- test di stratificazione della miscela in tratti di rete verticali conseguente ad interruzione di flusso
- test su dispositivi di ricerca di dispersioni gas

In parallelo all'attività sperimentale è stata svolta un' analisi sull'adeguatezza dell'attuale rete gas nazionale all'utilizzo con miscele HENG: revisione Standard tecnici, relativi a tubature, componenti e strumentazione rete gas, adeguamento livello massimo di idrogeno permesso nel gas naturale nella rete nazionale; normativa sulla sicurezza; panoramica progetti in corso su trasporto e distribuzione HENG in Italia ed Europa.

LA 2.30: Studio della compatibilità delle utenze per l'uso di diverse miscele di idrogeno-metano allacciate alla rete gas [UCAS]

In questo semestre si è proceduto alla realizzazione delle prove sperimentali di combustione con miscele di gas naturale di rete, metano puro (bombola certificata), metano-idrogeno al 23% (bombola) e metano-idrogeno al 35% (bombola). Le prove sono state finalizzate alla determinazione della temperatura e del contenuto di CO₂, O₂, CO, NO e NO₂ nei fumi per la validazione del modello teorico sviluppato. I risultati teorici ottenuti hanno mostrato una ottima consistenza con i dati sperimentali misurati. E' stato inoltre sviluppato un modello teorico per la valutazione della produzione di energia termica per riscaldamento e per cottura. I risultati hanno mostrato che il mix di metano e idrogeno fino al 23% non altera significativamente comfort e consumi e consente una significativa riduzione della CO₂ emessa (mediamente circa pari al 10%). Analogamente, anche l'impatto sull'uso cottura appare limitato. Sono state infine completate le prove sperimentali per valutare l'impatto dell'iniezione di idrogeno su gas naturale di rete sull'accuratezza dei sistemi di misura della concentrazione di odorizzante. Le prove effettuate hanno confermato la tendenza a sovrastimare la concentrazione di odorizzante quando è presente idrogeno al 5% e 20%. E' stato infine completato lo sviluppo del modello numerico per la valutazione degli effetti di stratificazione dell'idrogeno in una derivazione di utenza.

LA 2.31: Supporto e analisi delle misure sperimentali inerenti l'iniezione di idrogeno nelle reti di distribuzione gas [UFI]

Nel secondo semestre del 2024, le attività si sono concentrate interamente sull'analisi approfondita e l'interpretazione dei dati sperimentali acquisiti, sulla finalizzazione delle simulazioni numeriche e sulla stesura dei Rapporti Tecnici Finali (R2.31-1 a R2.31-5), tutti conclusi a Dicembre 2024.

Sono state svolte le seguenti attività:

- Valutazione della Stabilità della Miscela (Stratificazione): è stata completata l'analisi di 2302 misurazioni acquisite, filtrando un sottoinsieme valido di dati (serie giornaliera e settimanale). L'analisi statistica (coefficienti di Pearson, Spearman e Grey Relational Grade) ha confermato la sostanziale stabilità della miscela GN-H₂ e l'assenza di fenomeni di stratificazione verticale apprezzabili entro la sensibilità strumentale. La differenza media di concentrazione tra i punti estremi della colonna (Pt.1 e Pt.3) è risultata estremamente contenuta.
- Valutazione della Risposta Strumentale (Contatori e Fughe):
 - Contatori Gas: L'analisi comparativa tra i dati di campo (con miscela H₂) e i test di laboratorio (con metano puro) è stata completata. I risultati hanno evidenziato che i contatori a ultrasuoni (US) e a membrana (D) operano ampiamente all'interno dei limiti di errore (MPE) in presenza di miscele H₂. Al contrario, il contatore massico-termico (TM) ha mostrato una significativa deriva dell'accuratezza, con l'errore medio che è aumentato da -7.82% (GN puro) a -17.88% (10% H₂), uscendo dai limiti di MPE di servizio ($\pm 6\%$).
 - Rilevamento Fughe: L'elaborazione finale dei dati ha mostrato che, alle basse concentrazioni di idrogeno testate, non è presente alcuna variazione significativa nell'efficacia degli strumenti di ricerca fughe, se non fluttuazioni di natura stocastica attribuibili al vento. Si è concluso che la configurazione sperimentale in ambiente aperto non ha permesso di costruire correlazioni robuste tra la composizione della miscela e la risposta strumentale.
- Analisi Fluidodinamica (LA2.31.2): La verifica dei parametri qualitativi del gas è stata finalizzata. Le simulazioni hanno confermato che l'Indice di Wobbe (WI) risulta tollerabile (fino al 20% H₂), ma il vincolo più stringente è la Densità Specifica (SG), che supera i limiti di accettabilità già a concentrazioni inferiori al 5% di idrogeno in miscela. L'integrazione dell'idrogeno consente una riduzione annuale delle emissioni di CO₂ stimata fino a 517.9 t/anno con miscele al 20% H₂.
- Valutazione Economica Preliminare (LA2.31.5): È stata finalizzata l'ottimizzazione dello scenario grid-connected per la produzione di idrogeno verde. Per rispettare il vincolo europeo sul Green Index (<3.0 kgCO₂/kgH₂) è stato necessario sovradimensionare l'impianto fotovoltaico (PV da 55.4 MWp). La configurazione ottimale con vincolo sulle emissioni ha portato a un costo LCOH di 10.63 €/kgH₂ e una riduzione delle emissioni del 60% rispetto al caso di riferimento. I principali contributi all'LCOH sono risultati essere il CAPEX di PV e elettrolizzatore e l'acquisto di elettricità da rete, mentre lo stoccaggio ha avuto un impatto minimo (essendo dimensionato per breve termine).
- Stesura e pubblicazione dei 5 Rapporti Tecnici Finali e di 4 pubblicazioni scientifiche su rivista.

LA 2.32: Studi di sostenibilità ambientale e socioeconomica [USI]

Nel sesto semestre è stato sviluppato un modello LCA tecno-economico per processi P2G, sulla base dei tre scenari definiti in coerenza con la LA 2.17. I risultati hanno permesso di evidenziare i punti critici dei vari sistemi indagati e, in particolare, i benefici delle performance energetiche al crescere della quota di rinnovabili e una forte incidenza degli elettrolizzatori sui costi. Sulla base delle analisi effettuate è stato possibile fornire indicazioni per l'ottimizzazione futura delle configurazioni P2G nel contesto italiano.

LA 2.33: Mappatura e censimento di caratteristiche di reti di trasporto e distribuzione del gas e analisi della compatibilità dei materiali con l'uso di miscele idrogeno-metano [UNA1]

Sono stati effettuati gli adeguamenti necessari alle linee gas per garantire la sicurezza durante le prove di contatto tra i campioni e le miscele metano/idrogeno ad elevata pressione.

Successivamente, sono stati eseguiti i test di contatto tra il materiale e le miscele di metano/idrogeno alla pressione di 40 bar, utilizzando un reattore cilindrico in lega metallica a base di acciaio resistente all'idrogeno. Le specifiche del reattore sono le seguenti:

- Volume interno: 1,0 L
- Fornace esterna per il riscaldamento e sistema di controllo della temperatura
- Pmax: 300 bar @ Tmax: 350 °C

Le prove sono state condotte esponendo i campioni per un periodo di due settimane ad atmosfere CH4/H2, con concentrazioni di idrogeno rispettivamente al 5% e al 10%.

Al termine dell'esposizione, è stata effettuata la caratterizzazione dei campioni tramite tecniche di Diffrazione a Raggi X (XRD), Microscopia Ottica e a scansione elettronica e Spettroscopia a dispersione di elettroni (SEM-EDX).

Infine, è stato effettuato un confronto tra la caratterizzazione del materiale non esposto e quella dei campioni esposti alle miscele di CH4/H2. I risultati di tale confronto non hanno evidenziato differenze significative tra il materiale tal quale e quello sottoposto a esposizione a miscele di CH4/H2, sia al 5% che al 10% di H₂.

LA 2.34: Analisi della fattibilità per l'immissione di idrogeno in reti di distribuzione gas naturale in aree urbane (Caso studio) [UPA]

Lo studio di fattibilità si è basato sullo svolgimento di simulazioni fluidodinamiche in alcune sottoreti di distribuzione mediante l'adattamento di un software sviluppato per reti di trasmissione svolto in collaborazione con Forschungszentrum Jülich. Le simulazioni hanno consentito di individuare i limiti operativi e normativi ed i parametri chiave per classificare le sottoreti in cluster omogenei.

Per ciascun cluster si sono individuati gli interventi per l'immissione di idrogeno in tre diversi scenari di penetrazione. In collaborazione con il gruppo di ricerca della Linea di Attività 2.31 (UNIFI), è stato condotto un confronto sui risultati ottenuti con il software NWGsolver e si è quindi validato il modello grazie alla coerenza dei risultati di pressione, portata e velocità.

Le simulazioni dettagliate condotte con GasNetSim hanno permesso di quantificare l'impatto operativo della miscelazione di idrogeno nella rete esistente.

Le simulazioni hanno consentito non solo di verificare la compatibilità della rete in relazione alla qualità del gas miscelato e alle condizioni di esercizio nei diversi nodi in relazione limiti imposti dalle normative tecniche ma anche di individuare i parametri chiave da considerare per una classificazione delle sottoreti in cluster omogenei per i quali individuare i necessari interventi.

Si è quindi proceduto ad una analisi dell'intera rete urbana.

Durante il semestre sono state finalizzate le seguenti azioni volte alla promozione delle attività progettuali e dei principali risultati ottenuti:

- B. A. Baby, F. L. A. Munafò, T. Testasecca, M. Beccali, M. Ferraro, and G. Poma. Digitalizing Pipeline Network for Hydrogen-Blended Natural Gas Distribution Assessments. In: 2024 IEEE International Workshop on Metrology for Living Environment (MetroLivEnv). IEEE, 2024. p. 349-354.
- B. A. Baby, F. L. A. Munafò, T. Testasecca, Y. Lu, A. Benigni, G. Poma, M. Ferraro and M. Beccali "User-Focused Evaluation of Hydrogen Integration for a Gas Distribution Network in Southern Italy". SyNERGY MED 2024, 21-23 October, The 3rd International Conference on Energy Transition in the Mediterranean Area. In Press.

LA 2.35: Studio della produzione di idrogeno verde da immettere nella rete gas esistente in funzione di possibili scenari nazionali [UPM]

L'attività di ricerca ha riguardato l'esecuzione sistematica delle ottimizzazioni e delle analisi di sensitività, nonché la valutazione comparativa dei risultati. Sono state determinate le taglie ottimali degli elettrolizzatori per le diverse zone di mercato, esplorando l'impatto dei costi CAPEX/OPEX e dei livelli di blend sul LCOH, inclusi gli scenari di convergenza tra tecnologie alcaline e PEM e il caso con blend ridotto al 5%. Parallelamente è stata estesa l'analisi ai casi con vincoli mensili e con integrazione di impianti rinnovabili dedicati (PV/eolico e storage), valutando le condizioni di maggiore competitività delle varie configurazioni. Il semestre si è concluso con la sintesi dei risultati e la definizione delle configurazioni ottimali per l'integrazione dell'idrogeno verde nella rete gas nazionale.

LA 2.37: Trasporto e stoccaggio dell'idrogeno puro e in miscela: aspetti di sicurezza e normativa per l'immissione in rete [RSE]

Sicurezza. Risultati delle simulazioni CFD sulle conseguenze nell'ipotesi di una rottura catastrofica del condotto che collega la caverna salina alla superficie e valutazione quantitativa del livello di rischio. *Normativa.* Formulate proposte a supporto di una regolamentazione sull'interoperabilità delle reti di trasporto dell'idrogeno.

LA 2.39: Stoccaggio geologico dell'idrogeno puro e in miscela: test sperimentali, modellazione casi studio e benchmark, avvio della realizzazione del database [RSE]

Studi modellistici Risultati dell'analisi modellistica sul caso benchmark.

Realizzazione del database. Prodotto database contenente informazioni di utilità per lo stoccaggio geologico dell'idrogeno, popolato con i dati di interesse per le applicazioni in corso.

LA 3.1 - Celle a combustibile sustainable by design: Design di piatto e stampa 3D [CNR]

L'impiego di stampanti di tipo industriale infatti è in grado di ovviare agli inconvenienti riscontrati. Si è avviata, quindi, un'indagine di mercato per individuare un fornitore industriale in grado di supportare la fase finale dello sviluppo del piatto. Sono state contattate circa 11 aziende italiane ed estere e condotta un'intensa attività fatta di riunioni a distanza, invio di file per la verifica della stampabilità e preventivazione identificando il fornitore. Dopo numerosi contatti e riunioni e l'invio dei file esecutivi 3D, l'azienda ha suggerito alcune migliorie di progettazione della versione 3 del piatto.

LA 3.2: Celle a combustibile sustainable by design: Prototipo di stack con piatti di stampa 3D, manifattura e test [CNR]

Le difficoltà riscontrate nell'ottenimento di un piatto stampabile non hanno permesso di completare le attività di manifatture e test.

In conclusione, anche se parziale, il risultato raggiunto ha gettato le basi per una nuova possibile generazione di celle a combustibile.

Il risultato ottenuto può favorire la diffusione delle unità a celle a combustibile in vista di un impiego estensivo dell'idrogeno come vettore energetico nel sistema elettrico nazionale, implementando metodi innovativi, meno costosi e a più basso impatto ambientale, per la produzione dei piatti bipolarari per stack fuel cell.

LA 3.4 - Celle a combustibile sustainable by design: definizione del layout della linea produttiva, studio tempi e costi [CNR]

Nel semestre conclusivo è stato realizzato il sistema di assemblaggio degli stack PEM e la successiva ottimizzazione dei tempi e le modalità operative. In particolare, sono stati sviluppati e realizzati:

- Algoritmi di Visione Artificiale: Utilizzati per il riconoscimento degli oggetti e la stima del movimento. Gli algoritmi di deep learning e reti neurali convoluzionali (CNN) sono stati impiegati per migliorare la precisione del riconoscimento e del posizionamento dei componenti.
- Prototipo dell'Interfaccia Grafica: Sviluppato per testare la connessione tra il computer, il manipolatore robotico e il sistema di presa. Questa interfaccia grafica permette di monitorare e controllare in tempo reale il processo di assemblaggio, facilitando l'interazione tra l'operatore umano e il sistema robotico.

Durante il semestre sono state finalizzate le seguenti azioni volte alla promozione delle attività progettuali e dei principali risultati ottenuti:

- Mineo, C., Infantino, I., Barbera, O., Giacoppo, G., & Montinaro, N. (2024). Sustainable by Design: Advancing Hydrogen Fuel Cell Production through Automation. In MATEC Web of Conferences (Vol. 401, p. 12001). EDP Sciences.
- Infantino, I., Mineo, C., Enhancing Interaction in Industrial Collaborative Robots with Advanced AI Solutions, 23rd International Conference of the Italian Association for Artificial Intelligence (AI*IA 2024).
- La Scienza nel festino (Area della Ricerca di Palermo, 8-10 Ottobre 2024). Nell'ambito del calendario di eventi per i festeggiamenti per Santa Rosalia i ricercatori del CNR, con l'evento "La Scienza nel festino", hanno raccontato giovani come l'attività di ricerca può contribuire a migliorare la salute e la qualità della vita dei cittadini in generale e di Palermo in particolare. ICAR-CNR ha dimostrato il sistema robotico sviluppato.

LA 3.5: Test di EGR emulato su impianto AGATUR [ENEA]

ENEA ha ricevuto da ANSALDO il nuovo combustore prototipo ARI 100. Dopo aver eseguito alcuni primi test di accensione, si è passati ai test finali con EGR emulato sulla microturbina TURBEC T100 dell'impianto AGATUR e alla scrittura del rapporto tecnico.

LA 3.7: Sviluppo e realizzazione di prototipi di combustori fuel-flexible per la microturbina TURBEC T100 [ENEA]

È stato realizzato il recuperatore necessario per preriscaldare l'aria per i test del prototipo completo finale. È stato consegnato il prototipo finale di bruciatore fuel-flexible, su cui sono stati eseguiti, nella LA3.8) i test del bruciatore centrale e del sistema a corona. Infine, è stato scritto il rapporto tecnico, focalizzato sui test eseguiti sul prototipo intermedio, relativo al bruciatore tipo del sistema a corona.

LA 3.8: Test dei prototipi di combustori fuel-flexible per impianto AGATUR in assetto EGR [ENEA]

Sono stati eseguiti i test del bruciatore completo accoppiato con il recuperatore progettato e realizzato internamente in ENEA (non previsto nel capitolato). I test sono stati relativi inizialmente al bruciatore centrale ed il pilota; successivamente, sono stati testati alcuni dei bruciatori del sistema a corona (identici a quelli del prototipo intermedio studiato nella LA 3.7). Infine, è stato scritto il rapporto tecnico.

LA 3.9: Sviluppo di un software di analisi spazio-temporale del mescolamento e caratterizzazione di bruciatori [URM3]

URM3 ha analizzato i dati delle simulazioni LES non reattive del bruciatore prototipo fornite da URM1-DIMA (LA3.10): le analisi condotte a risultati interessanti con prospettive di poter applicare la tecnica in ambito progettuale. Infine, è stato scritto il rapporto tecnico, revisionato anche dal personale ENEA addetto alla sperimentazione e simulazione.

LA 3.10: Sviluppo di software di analisi termo-fluidodinamica per architetture GPU e CPU-MPI/GPU [URM1-DIMA]

Sono state concluse le attività di ottimizzazione delle routine modificate nel codice HeaRT, e sono stati conclusi i test di verifica delle prestazioni ottenute con l'accelerazione GPU. Infine, è stato scritto il rapporto tecnico, revisionato anche dal personale ENEA addetto alle simulazioni.

LA 3.12: Effetto dell'idrogeno in miscela con gas naturale su componenti e impianti alimentati a gas: esiti della sperimentazione su motore cogenerativo [RSE]

Dati di caratterizzazione energetico/ambientale derivanti dalla sperimentazione del motore con miscele NG/H₂ a rapporto variabile.

LA 4.1: Disseminazione e comunicazione dei risultati [CNR]

Promozione e divulgazione dei risultati conseguiti, aggiornamento continuo delle pagine web dedicate sul sito del CNR-DIITET, la partecipazione al comitato di redazione di Res Magazine, organizzazione e partecipazione ai Workshop di progetto.

LA 4.2: Disseminazione e comunicazione dei risultati [ENEA]

Le principali attività svolte riguardano:

- Workshop online (12 dicembre 2024) a partecipazione aperta (previa registrazione) articolato in due sessioni tematiche: Sicurezza e normativa per l'idrogeno, e Trasporto di idrogeno nella rete gas. Partendo dalle attività di ricerca svolte nell'ambito del Progetto Integrato Tecnologie dell'Idrogeno e coinvolgendo nella discussione stakeholder nazionali del settore (SNAM, Corpo Nazionale Vigili del Fuoco, Società Gasdotti Italia SpA, Centria Srl), il workshop è stato un'occasione per discutere lo stato e le prospettive della ricerca nazionale, contribuendo ad identificare le priorità per il futuro. Il workshop è stato promosso dagli affidatari attraverso i propri siti istituzionali e attraverso post su social network. Durante l'evento sono state registrate 87 connessioni uniche di partecipanti, tra cui rappresentanti dell'industria, dell'università e ricercatori degli enti affidatari non direttamente coinvolti nel progetto.
- Workshop finale del progetto, Roma, 19-20 dicembre 2024, ospitato da ENEA, con 68 partecipanti, di cui 24 in presenza e 44 da remoto.
- Partecipazione agli incontri degli Executive Committee e dei Task dei programmi di collaborazione tecnologica IEA Hydrogen, e IEA Advanced Fuel Cells
- Partecipazione ai seguenti convegni:
 - European Turbine Network, Workshop, Stuttgart (Germania), D. Cecere, 8-10/10/2024.
 - AIVELA, Congresso, Forlì (Italia), G. Troiani, 19-20/12/2024.
- Preparazione di articoli scientifici su rivista e atti di convegno

LA 4.3: Disseminazione e comunicazione dei risultati [SOTACARBO]

Le attività di comunicazione e diffusione dei risultati (relativi alle linee di ricerca 1.11, 1.12, 1.13, 2.23, 2.24) svolte nel secondo semestre del 2024 hanno riguardato:

- la partecipazione alla conferenza internazionale GHGT-17, organizzata dalle IEA, sulle prospettive di sviluppo delle tecnologie CCUS, con oltre mille esperti provenienti da tutto il mondo (Calgary 20-24.10.2024);
- la partecipazione al Workshop conclusivo del progetto integrato 1.3 (36 mesi) presso la sede di Enea di Casaccia per presentare i risultati finali relativi alle linee di ricerca (Roma 19-12.12.2024).
- la pubblicazione di n.5 articoli originali di taglio divulgativo sulla rivista digitale Onlynaturalenergy.com:
 - “CO₂ Misleading Narratives” (02.09.2024);
 - “Renewable Energy Projects and their Impact on Communities” (02.09.2024);
 - “Sugarcane by the Sea for Ketone Biofuel Production” (02.09.2024);
 - “Divide and Conquer” (01.10.2024);
 - “The power of wastewater” (01.10.2024).

Dal punto di vista della produzione scientifica, è stato pubblicato l'articolo:

Francesco Parrillo, Filomena Ardolino, Carmine Boccia, Gabriele Calì, Alberto Pettinau, Umberto Arena, Mixed Plastic Waste Gasification in a Large Pilot-Scale Fluidized Bed Reactor Operated with Oxygen-Enriched Air and Steam, Energy & Fuels, Volume 38, Issue 22, 07 November 2024, pages 22172–22181, <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c04280>.

LA 4.5: Disseminazione e comunicazione dei risultati (RSE, dal mese 19 al mese 36) [RSE]

Presentazione di 4 memorie a congressi, workshop, seminari e riunioni. Presentazioni (2) in occasioni di iniziative didattiche e culturali. Partecipazione al gruppo di lavoro IEA-TCP-Task 42 Undeground Hydrogen Storage. Partecipazione all'azione EuroMIC-COST sulla corrosione microbiologica, alla Federazione Europea di Corrosione, presidenza WP10, Microbial corrosion. Partecipazione all'attività normativa del Comitato Italiano Gas e UNI/CT 056. Contatti con stakeholder (Enel Green Power). Partecipazione del progetto all'iniziativa promossa e realizzata da RSE “La ricerca RSE on the road - Viaggio immersivo nel mondo dell'energia e della sostenibilità” volto a favorire la disseminazione delle tematiche di ricerca e dei risultati oggetto del PTR22-24 di RdS.