

## 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 V - 01/01/2024 – 30/06/2024

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]

L'attività condotta è stata volta allo studio e testing di differenti catalizzatori primari per la gassificazione delle scorze di agrumi. Sono stati sintetizzati e caratterizzati catalizzatori di Nichel supportato su ossidi di diversa natura (allumina, dolomite ed olivina).

Differenti catalizzatori con fase metallica di nichel (Ni) sono stati preparati utilizzando il metodo: "wet impregnation". È stato utilizzato come precursore metallico Nickel (II) nitrate hexahydrate disiolto in una soluzione acquosa, ciò al fine di ottenere un egual carico del 5 wt% di Ni sui diversi sistemi catalitici sintetizzati. Ossidi diversi, quali: g-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (AKZO-NOBEL 001-3P), dolomite ed olivina sono stati invece utilizzati quali supporti dei catalizzatori. Tutti i catalizzatori sono stati sottoposti ad analisi di caratterizzazione per tutti i catalizzatori preparati.

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

Nel semestre di attività sono state messe a punto delle formulazioni catalitiche e selezionate alcune metodiche di preparazione che hanno portato alla realizzazione e allo studio di quattro catalizzatori, di cui due di tipo "metallo-supportato" e due di tipo "bulk" in cui la fase attiva è dispersa e generata all'interno della struttura. I sistemi catalitici sono stati preparati circa al 20% in peso di ferro, depositando una fase attiva bi-metallica (Fe/Cu) su γ-allumina microcristallina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 20552/30, Engelhard, E15).

Parallelamente alle attività sperimentali di realizzazione e studio dei catalizzatori, sono state svolte le attività di set-up della stazione di prova e del sistema analitico necessarie alla realizzazione di un protocollo per le misure catalitiche e all'esecuzione delle campagne di prove sperimentali dei catalizzatori nelle reazioni di deidrogenazione. Le misure catalitiche nelle reazioni di deidrogenazione sono state eseguite utilizzando molecole organiche "modello", tutte derivabili da rifiuti liquidi da cicli di lavorazione industriale di oli vegetali.

**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 sperimentale per lo studio della reazione di pirolisi del biogas/biometano in bagni fusi è stato assemblato presso il Centro Ricerche ENEA della Casaccia ed inizialmente testato rispetto ad ogni suo componente (circuito gas, circuito elettrico, loop di acquisizione dati e controllo). È stato realizzato in parallelo il sistema per eseguire prove statiche di corrosione per immersione, impiegando un contenitore inerte per i metalli e/o sali fusi da utilizzare, nonché un sistema di riscaldamento capace di operare fino a 1000°C.

**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]**

È stata svolta una campagna di simulazioni CFD sulla performance di un reattore su scala pilota (diametro 1m, altezza 1-2 m) in diverse condizioni di temperatura e di portata. Il confronto tra processo su scala di laboratorio (sviluppato nella precedente L.A. 1.7) ha evidenziato una minore sensibilità della performance rispetto a fattori geometrici (rapporto d'aspetto del bagno, rapporto tra diametro dello sparger e diametro del reattore) e operativi (portata dell'alimentazione e pressione di esercizio del reattore). Questi risultati possono essere interpretati meccanicisticamente osservando come l'elevato numero di Reynolds (di ordine 10000-70000 per le condizioni considerate) garantisca condizioni di distribuzione volumetrica del gas pressoché uniforme nel bagno di reazione e quindi il massimo tempo di residenza compatibile con una assegnata dimensione media delle bolle (per la relazione tra distribuzione del gas e tempo di residenza medio delle bolle si veda il rapporto tecnico della L.A. 1.7)

**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 NAST dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" ha riguardato l'inizio della caratterizzazione sia dei provini vergini prima di essere sottoposti a prove di compatibilità con cloruri fusi da ENEA nell'ambito della linea LA 1.6, che sono stati lavati, asciugati, pesati e caratterizzati attraverso analisi SEM/EDS e XRD e inviati ad ENEA per essere sottoposti alle prove. A seguito del primo campionamento effettuato da ENEA dopo 100 ore, 12 provini sono stati quindi post caratterizzati con le stesse modalità di analisi.

**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 svolta dall' Università Campus Bio-Medico di Roma ha riguardato una la definizione e messa a punto di tutte le tecniche di preparativa dei campioni prodotti nella LA 1.6 per le analisi da realizzare, la definizione di protocolli precisi per la preparativa dei campioni è basilare sia per la corretta acquisizione dei dati dalla strumentazione, senza la presenza di artefatti o modifiche che possano alterare il risultato ottenuto, sia per avere un sistema ripetibile che renda anche un confronto tra i campioni realizzati possibile e significativo. UCBM ha anche attivamente collaborato con ENEA nell'identificazione delle condizioni di preparazione dei campioni che fossero conformi alle necessità suddette.

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

Sono state progettate e realizzate parte delle modifiche impiantistiche previste che hanno permesso di effettuare dei test sperimentali di gassificazione con ossigeno e vapore; in particolare, la concentrazione di

ossigeno è stata aumentata fino al 70%. Le suddette attività sperimentali sono state svolte in accordo con la progettazione di processo effettuata da UVAN e secondo le analisi da loro svolte. Nello specifico sono state eseguite le seguenti attività:

1. è stata installata la nuova caldaia di produzione vapore con conseguente modifica del circuito di adduzione vapore al gassificatore; il sistema è stato collaudato a freddo e a caldo;
2. sono stati effettuati 15 nuovi test sperimentali, con un secondo combustibile derivato da scarti plastici (Blu-C) in cui è stata alimentata aria arricchita in ossigeno fino ad una concentrazione del 70%. La portata di vapore necessaria per il contenimento della temperatura è stata aumentata fino a circa 55-60 kg/h grazie al funzionamento della nuova caldaia;
3. sono state individuate le modifiche alla strumentazione di analisi del syngas per le nuove esigenze sperimentali;
4. è stata avviata un'indagine preliminare per l'affidamento dell'analisi del rischio per l'impianto Faber;
5. 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 articolo su una rivista internazionale Q1: Parrillo F., Ardolino F., Calì G., Pettinau A., Materazzi, M., Sebastiani, A., Arena U., 2024. Plastic waste gasification using oxygen-enriched air and steam: Experimental and model results from a large pilot-scale reactor, Waste Management, 183, 53-62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2024.04.045> e alla presentazione di due contributi a conferenze internazionali:

- Parrillo F., Calì G., Arena U., Materazzi, M., Pettinau A., Ardolino F., Sebastiani, A., 2024. Experimental and Modelling Results of Steam-Oxygen Gasification of Plastic Waste in a Pilot Scale Fluidized Bed Reactor, ChemRec24\_I, Engineering Conference International, Malaga, Spain, 29 aprile 2024
- Parrillo F., Boccia, C., Ardolino, F., Calì G., Meloni, S., Pettinau A., Arena, U., 2024. Gasification by O<sub>2</sub>-Enriched Air and Steam of Two Mixed Plastic Wastes in a Large Pilot Scale Fluidized Bed Gasifier, 46th Meeting of The Italian Section of The Combustion Institute, Towards Net-Zero Carbon Society, Bari, Italy, 2-5 giugno 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 avviata da Sotacarbo la progettazione esecutiva. A tal fine Sotacarbo ha effettuato le seguenti attività:

1. è stata avviata la progettazione esecutiva, con la previsione delle modifiche dell'impianto;
2. a seguito di indagine preliminare è stata affidata l'attività per l'analisi del rischio legata all'inserimento sull'impianto Faber della sezione di pulizia a caldo del syngas;
3. sono state individuate le modifiche alla strumentazione di analisi del syngas e del campionamento del tar per le nuove esigenze sperimentali.

Con riferimento alle suddette attività sono state avviate le procedure per l'acquisizione delle sezioni di impianto e delle strumentazioni necessarie per la realizzazione del nuovo sistema di pulizia a caldo.

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

Sono stati stimati i campi dei valori dei parametri operativi da usare nella gassificazione con ossigeno e vapore del reattore FABER. A tal fine UVAN ha:

1. Completato la progettazione di processo, fornendo anche tabelle e diagrammi di funzionamento del gassificatore FABER in condizioni autotermiche con ossigeno e vapore, che individuano i valori dei

principali parametri operativi (portate di vapore, ossigeno e scarto plastico; velocità di fluidizzazione; rapporto di equivalenza e rapporto vapore-carbonio) per i quali il reattore di gassificazione può essere esercito.

2. Individuato e condiviso con i tecnici Sotacarbo le azioni da intraprendere per l'upgrading di alcune sezioni (principalmente, quelle di alimentazione vapore, monitoraggio composizione del syngas, pulizia del syngas, sistema di acquisizione e controllo dati, sicurezza dell'esercizio) del gassificatore Faber di Sotacarbo.
3. Programmato nuove prove con un secondo scarto plastico da raccolta differenziata (Blu-C).
4. Processato e interpretato i risultati di queste 15 nuove prove, eseguite tra gennaio e aprile 2024, alla presenza dei ricercatori UVAN.

Questa fase ha portato alla pubblicazione di un articolo su una rivista internazionale Q1: Parrillo F., Ardolino F., Calì G., Pettinau A., Materazzi, M., Sebastiani, A., Arena U., 2024. Plastic waste gasification using oxygen-enriched air and steam: Experimental and model results from a large pilot-scale reactor, *Waste Management*, 183, 53-62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2024.04.045> e alla presentazione di due contributi a conferenze internazionali:

- Parrillo F., Calì G., Arena U., Materazzi, M., Pettinau A., Ardolino F., Sebastiani, A., 2024. Experimental and Modelling Results of Steam-Oxygen Gasification of Plastic Waste in a Pilot Scale Fluidized Bed Reactor, *ChemRec24\_I*, Engineering Conference International, Malaga, Spain, 29 aprile 2024
- Parrillo F., Boccia, C., Ardolino, F., Calì G., Meloni, S., Pettinau A., Arena, U., 2024. Gasification by O<sub>2</sub>-Enriched Air and Steam of Two Mixed Plastic Wastes in a Large Pilot Scale Fluidized Bed Gasifier, 46th Meeting of The Italian Section of The Combustion Institute, Towards Net-Zero Carbon Society, Bari, Italy, 2-5 giugno 2024

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

Si è proceduto a un dimensionamento preliminare e a una proposta di configurazione dell'unità di tar cracking da installare sul gassificatore pilota FABER. A tal fine UVAN ha:

1. Proseguito la sperimentazione nel Laboratorio di Impiantistica Ambientale del DiSTABiF di UVAN, definendo il gas vettore, la concentrazione di naftalene e i tempi di residenza del gas nel reattore, per acquisire dati utili alla progettazione di processo sulla base del catalizzatore Fe-γ-allumina.
2. Stabilito la portata nominale di syngas che la nuova unità di cracking dovrà trattare e le prestazioni attese. Ha quindi definito e condiviso con Sotacarbo le linee guida necessarie alla progettazione della unità di cracking affinché possa essere alimentata con un'aliquota del syngas reale all'uscita dal gassificatore pilota, con composizione e concentrazione di tar variabili.
3. Stimato, con criteri dell'ingegneria delle reazioni chimiche, la costante cinetica delle reazioni complessive di cracking dei tar, nelle diverse condizioni operative testate, necessaria al dimensionamento geometrico del reattore di tar cracking.
4. Definito le caratteristiche peculiari del reattore di tar cracking catalitico, assieme ai principali componenti ausiliari, e allo schema di flusso completo dei punti di misura e controllo di temperatura, pressione e composizione del syngas.

Questa fase ha portato alla pubblicazione di un articolo su una rivista internazionale Q1: Parrillo F., Ardolino F., Boccia, C., Arconati, V., Ruoppolo, G., Arena U., 2024. Waste-Derived Catalysts for Tar Cracking in Hot Syngas Cleaning, *Waste Management*, 179, 163-174. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2024.03.006>; inoltre, è stato presentato un contributo a conferenza internazionale: Arconati, V., Boccia, C., Parrillo F., Ardolino, F., Ruoppolo, G., Arena, U., 2024. An experimental study on the catalytic cracking of tar: the effect of gas residence time, 46th Meeting of The Italian Section of The Combustion Institute, Towards Net-Zero Carbon Society, Bari, Italy, 2-5 giugno 2024.

**LA 1.18: Produzione di idrogeno da gassificazione delle biomasse: realizzazione e caratterizzazione di membrane ceramiche per la separazione di H<sub>2</sub> puro [RSE]**

È proseguita la realizzazione di campioni di membrana con struttura asimmetrica con materiale ceramico LWO. Sviluppate membrane innovative a fase doppia combinando LWO con perovskiti ( $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-\delta}$  e  $\text{SrTi}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ ).

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

Nel semestre sono state completate le attività di progettazione della cella fotoelettrochimica con particolare riferimento all'housing (che svolge un ruolo cruciale nel garantire l'efficienza e la durata del dispositivo) e avviate le attività di realizzazione (acquisizione e realizzazione componenti).

Parallelamente sono state portate a termine le attività di raccolta dei dati di input necessari alle analisi di sostenibilità economica ed ambientale con particolare riferimento alla definizione del processo produttivo, con individuazione dei costi (Capex e Opex) e delle esternalità ambientali nel ciclo di vita “cradle to gate”.

**LA 1.23 – Produzione di H<sub>2</sub> diretta da fonte solare: prove sperimentali di celle prototipali ad area variabile con elettrodi photocatalitici [RSE]**

Individuate tecniche per la deposizione di anodi fino a una superficie di 5 cm<sup>2</sup> e di catodi con nuova geometria fino a 2000 cm<sup>2</sup>. Realizzato un prototipo di cella fotoelettrocatalitica in grado di interfacciarsi con il micro-gascromatografo e/o a strumenti di misura a bassi flussi di gas.

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

Sono proseguiti le attività per la definizione e sperimentazione sui marker per l'identificazione ed il tracciamento dell'idrogeno mediante traccianti e parallelamente la definizione ed implementazione del prototipo di piattaforma di certificazione basata su blockchain per la raccolta dei dati dai vari attori.

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

L'attività svolta nel semestre ha visto l'esecuzione di test sperimentali sull'impianto di metanazione in differenti condizioni operative, volti a verificare il funzionamento dell'impianto.

In primo luogo, sono state verificate e ottimizzate le procedure operative per l'avvio, l'inertizzazione, la produzione e l'arresto del sistema, interloquendo a più riprese con i fornitori dell'impianto. In secondo luogo, sono state testate le funzionalità di controllo remoto dello stesso sia tramite pannello remoto che tramite protocolli di basso livello. Inoltre, sono state simulate situazioni di spegnimento di emergenza dell'impianto sia in presenza di un operatore che in remoto con supervisione locale. Infine, sono state condotte le prime sperimentazioni di produzione. In particolare, operando con catalizzatori a base di nichel si sono variate le portate dei gas reagenti, la pressione operativa. Particolare attenzione durante i test è stata indirizzata al regime termico dei vari stadi del reattore e al circuito ad olio diatermico, analizzando la capacità del sistema di fornire e smaltire il calore durante le fasi del processo. Relativamente al sistema di separazione dell'idrogeno dal metano sintetico, sono state definite le specifiche tecniche dell'impianto e lo schema di processo, andando ad individuare la configurazione più idonea in relazione al numero di stadi di membrane da installare, alla configurazione serie e parallelo dei medesimi e al sistema di controllo dell'impianto.

Sono proseguiti le acquisizioni di componentistica a corredo dell'elettrolizzatore, tra cui: un sistema di analisi del contenuto di O<sub>2</sub> in H<sub>2</sub> e del dew point dell'H<sub>2</sub>, un nuovo misuratore di portata idrogeno in uscita

dall'impianto, un analizzatore di rete trifase posto sul quadro principale di alimentazione, ed è stato eseguito il montaggio meccanico di tale componentistica.

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

Nella presente attività è stata dimostrata l'efficacia di Aspen Plus come strumento di simulazione per i processi di biometanazione, un'applicazione finora non documentata in letteratura. Lo stato stazionario è stato analizzato utilizzando i dati sperimentali di Schill et al., sviluppando un modello cinetico empirico, mentre la reazione di metanazione è stata simulata attraverso un modello cinetico integrato, che considera come reagente limitante la concentrazione di idrogeno disciolto nella fase liquida. Attraverso il simulatore, è stato possibile ottimizzare il processo, stimare le velocità di reazione, il grado di conversione e l'efficienza complessiva del processo. Il principale vincolo riscontrato nel processo di biometanazione è legato al trasferimento di massa dell'idrogeno dalla fase gassosa a quella liquida, che risulta significativamente inferiore rispetto a quello della CO<sub>2</sub>. In conformità alla legge di Henry, la solubilità dei gas nella fase liquida dipende dalla temperatura e dalla pressione parziale del gas: abbassare la temperatura del reattore potrebbe incrementare la concentrazione di H<sub>2</sub> disciolto, ma ciò comprometterebbe i requisiti termici necessari per la crescita dei microrganismi. Un'efficienza di produzione di metano superiore all'80% indica che la metanogenesi biologica rappresenta una valida alternativa alla conversione chimica, offrendo una maggiore tolleranza alle impurità. Dopo aver apportato le necessarie modifiche allo stato stazionario, si è proceduto con l'analisi dinamica del processo, utilizzando lo strumento di simulazione Aspen Dynamics. In questo modo, è stato implementato un sistema di controllo che regola il processo in base alle variazioni delle condizioni d'ingresso dei reagenti. In particolare, sono stati condotti test di variazione del carico di idrogeno alimentato al sistema. Durante i test, il sistema di controllo ha regolato in tempo reale le condizioni operative del bioreattore, compensando le fluttuazioni nel flusso di idrogeno e garantendo una conversione ottimale. I risultati hanno dimostrato l'efficacia del sistema di controllo nel mantenere la continuità della produzione di metano, evidenziando al contempo la flessibilità del sistema di biometanazione in condizioni operative variabili. La regolazione della temperatura del reattore costituisce un fattore critico in caso di variazioni più ampie nel carico di H<sub>2</sub>, poiché all'interno del reattore potrebbero verificarsi temperature dannose per i microrganismi coinvolti nel processo. Dal punto di vista della gestione termica, una possibile soluzione potrebbe essere l'inserimento di un serpantino all'interno del reattore. Questa opzione risulta necessaria, poiché l'adozione di una camicia di riscaldamento o raffreddamento non è praticabile, in quanto il reattore CSTR considerato nella simulazione rappresenta, in realtà, una vasca priva di camicia esterna. Al fine di rispettare i requisiti normativi relativi alla concentrazione di metano nel gas prodotto, si potrebbe considerare, l'integrazione di un processo di metanazione catalitica a valle del processo di biometanazione. Questa soluzione consentirebbe di aumentare la purezza del metano e di soddisfare i requisiti minimi richiesti per l'immissione nella rete del gas naturale. Considerate le limitazioni emerse, ulteriori studi potrebbero esplorare nuove strategie per migliorare l'efficienza del processo e il relativo controllo. In particolare, sarà necessario approfondire l'accoppiamento tra biometanazione e metanazione catalitica, dato l'elevato tempo di residenza nel reattore e l'impossibilità di ottenere una conversione completa nella biometanazione.

#### **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. Dati ottenuti durante le campagne sperimentali condotte con i reattori di metanazione biologica.

Elettrometanogenesi. Realizzazione di prototipi di sistemi di elettrometanogenesi per il monitoraggio delle emissioni di gas dal sottosuolo e l'attività microbica.

**LA 2.7: Realizzazione e sperimentazione di un sistema di captazione di CO<sub>2</sub> da suolo in scala da laboratorio per applicazioni Power to Gas [ENEA]**

Sono stati identificati i componenti necessari per l'implementazione e la riproduzione del sistema di captazione della CO<sub>2</sub> da suolo a scala di laboratorio. Sono state concluse le procedure amministrative per l'acquisto di apparecchiature di inventario e per la fornitura dei beni di consumo.

In particolare, sono stati individuati i sensori per la misura e il monitoraggio termico e gassoso, la pompa a membrana sottovuoto per l'aspirazione del gas, le componenti impiantistiche accessorie di raccordo a corredo e il materiale elettrico per l'acquisizione dei dati di misura, tutti necessari per la realizzazione del sistema di captazione.

È in corso la redazione del disegno tecnico del captatore che verrà successivamente riprodotto mediante stampa 3D, sul quale saranno integrati i sensori per le misurazioni e il monitoraggio del gas e tutte le componenti accessorie, consentendo l'esecuzione di test, in laboratorio, su diverse tipologie di terreno, sia in condizioni sature che insature.

**LA 2.9: Realizzazione e test sul campo di un sistema di captazione di CO<sub>2</sub> da suolo per applicazioni Power to Gas [URM1-DIAEE]**

Sono stati individuati i fornitori per la realizzazione del prototipo di captazione CO<sub>2</sub>. Sono stati concordati dettagli della fornitura che è in corso di perfezionamento per le questioni amministrative.

Inoltre, sono state realizzate le prime simulazioni dell'interazione della diffusione di gas attraverso il terreno con il modello sviluppato, valutando le possibili modalità di interazione del sistema di captazione con il campo di diffusione delle esalazioni gassose nel terreno.

**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 l'analisi della letteratura in merito a valori di permeabilità di diversi gas in polimeri di diverse classi, considerando polimeri gommosi ad alta permeabilità, polimeri vetrosi convenzionali, polimmidi e vetri ad alto volume libero. Sono state valutate le performance attese sulla base di quanto riportato in letteratura, principalmente in termini di permeabilità di idrogeno e selettività H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>, confrontando tali dati con i limiti empirici indicati dal limite di Robeson (upper-bound).

L'analisi ha consentito di identificare polimeri vetrosi, e polimmidi in particolare, come i sistemi più interessanti per tale applicazione, con valori buoni di permeabilità e selettività eccellenti, adeguati quindi per l'applicazione.

Sono inoltre presi in esame gli andamenti principali della permeabilità dei gas in funzione di pressione e temperatura, nell'idea di identificare le condizioni di processo più adeguate alla separazione. È stato quindi possibile valutare in particolare l'energia di attivazione di permeabilità per i vari gas nei vari polimeri e identificare che la permeabilità di H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> varia in modo limitato con la pressione, almeno nei range indicati per la separazione in esame.

**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 ha interessato principalmente la caratterizzazione di polimeri commerciali e innovativi per la separazione di gas, con un funzionamento del tipo setaccio molecolare, particolarmente adatti quindi alla

separazione H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>. Sono stati identificati e acquisiti alcuni polimeri commerciali potenzialmente idonei per realizzare membrane per questa separazione, è stato sviluppato un protocollo per la preparazione di film (e di coating sottili) e sono stati caratterizzati dal punto di vista sperimentale come permeazione di gas. Si è inoltre proceduto allo sviluppo di sistemi innovativi, a base di nanomateriali, per garantire extra-prestazioni e un aumento di permeabilità, realizzando coating ultra-sottili a base di ossido di grafene, caratterizzandoli dal punto di vista morfologico e di trasporto di gas.

Parallelamente si è iniziata la messa a punto del modello di assorbimento (NELF) e di trasporto di gas (STM-GP) in polimeri, per i casi di interesse, che viene accoppiata ad un modello di processo che descrive il funzionamento della separazione a membrana, per valutarne le condizioni più adeguate per il funzionamento.

#### **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 sullo sviluppo della modellizzazione in ambiente Plecs del componente critico rappresentato dal trasformatore in alta frequenza. Sulla base delle misure effettuate su un prototipo realizzato allo scopo e su specifiche indicate sono stati determinati i parametri circuitali equivalenti ed il modello è stato validato sperimentalmente consentendo di garantire i livelli di disaccoppiamento richiesti per l'applicazione proposta. Il trasformatore a tre avvolgimenti è stato successivamente modellizzato nel suo complesso, realizzando la topologia di conversione DC/DC a tre vie proposta, inserendo degli opportuni algoritmi di controllo di tensione. Il sistema è stato infine validato sperimentalmente su un prototipo in scala, fornendo risultati perfettamente coerenti, ripetibili e con un elevato grado di accuratezza.

Nel semestre, è stata inoltre pianificata l'attività di caratterizzazione dell'impianto di elettrolisi installato a Casaccia e la definizione delle procedure di test in stretta collaborazione con i ricercatori di ENEA e Sardegna Ricerche.

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

Nel primo semestre 2024 sono state completate le attività di progettazione definitiva e avviate quelle di realizzazione fisica del prototipo di sistema di energy storage basato su idrogeno, finalizzato all'integrazione con fonti rinnovabili e reti elettriche locali.

L'obiettivo dell'attività è stato quello di passare dalla fase di modellazione e simulazione, completata nel 2023, alla costruzione e integrazione del sistema prototipale, in modo da verificare sul campo le prestazioni previste dai modelli numerici e termodinamici sviluppati.

Durante il semestre è stata completata la progettazione esecutiva del sistema di energy storage e definite le specifiche tecniche di tutti i sottosistemi: elettrolizzatore PEM da 10 Nm<sup>3</sup>/h; sistema di accumulo a idruri metallici; cella a combustibile PEM da 4–5 kW; sistemi di conversione DC/AC, unità di controllo e supervisione e sottosistemi ausiliari.

Il semestre ha visto la realizzazione dei serbatoi ad idruri metallici, ottimizzati in base alle simulazioni precedenti.

Presso i laboratori di ATENA Scarl, in collaborazione con Università Parthenope ed ENEA, è stato assemblato il prototipo completo del sistema, comprendente: elettrolizzatore, fuel cell e moduli di stoccaggio a idruri; interfaccia di conversione DC/AC; connessione all'impianto fotovoltaico (80 kW) e predisposizione per i test in condizioni operative reali; sviluppo di un'interfaccia grafica per il monitoraggio e la gestione dei flussi energetici.

Nel corso del semestre è stata completata la realizzazione e integrazione del prototipo completo, verificandone la coerenza con i modelli di progetto e la piena funzionalità dei sottosistemi. Sono stati inoltre

definiti i protocolli di prova e messa a punto i sistemi di misura e sensoristica, consentendo l'avvio delle prime prove sperimentali in ambiente controllato per la validazione preliminare del sistema.

Il sistema è risultato conforme alle specifiche progettuali e pronto per la campagna di test in condizioni operative reali prevista per il secondo semestre 2024.

Il prossimo periodo sarà dedicato alla sperimentazione estesa, alla validazione energetica e termica e alla valutazione della round-trip efficiency del sistema integrato.

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

Le attività si sono concentrate sulla modellazione e simulazione di un modulo a membrana polimerica di tipo cross-flow mediante il software Aspen Custom Modeler (ACM).

Il modello sviluppato è stato validato confrontando i risultati con dati di letteratura, ottenendo un'elevata correlazione. Successivamente, il modulo è stato integrato in Aspen Plus V10, consentendo la simulazione di diverse configurazioni del sistema a membrana (singolo stadio, doppio stadio in serie e configurazioni in cascata). Sono stati inoltre definiti gli input di simulazione in scala pilota e industriale, sulla base dei parametri di conversione del reattore di metanazione e delle portate in uscita dall'impianto di biogas.

Tali risultati hanno permesso di individuare la configurazione con due membrane in serie e una terza in cascata come la più performante.

#### **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 del quinto semestre dall'avvio delle attività di progetto, è stato intrapreso un processo di collaborazione con l'Università di Siena, beneficiaria della linea di attività LA 2.32. L'obiettivo di questa collaborazione è valutare e condividere gli scenari oggetto di studio, con particolare attenzione ai risultati emersi dalla linea di attività LA 2.17. Tale scambio si configura come un'opportunità per confrontare i casi studio, i dati di input per tali analisi, nonché le metodologie, arricchendo il quadro complessivo della ricerca. In particolare, l'analisi si focalizzerà sulla valutazione dei costi di impianto per la produzione di idrogeno destinato alla mobilità, prodotto tramite elettrolisi accoppiato a un sistema fotovoltaico. Ulteriori approfondimenti riguarderanno i costi della produzione di idrogeno generato mediante elettrolisi collegato alla rete elettrica e successivamente miscelato nella rete del gas naturale. Un terzo scenario sarà dedicato all'analisi di un impianto per la produzione di biometano, in cui l'idrogeno, prodotto da elettrolisi alimentato da energia fotovoltaica, reagisce con l'anidride carbonica derivante dal trattamento del biogas. Parallelamente, in linea con le previsioni della linea di attività LA 2.18, è stata avviata la definizione della metodologia e dei parametri di contorno per lo sviluppo dei modelli in Matlab. Questo processo include anche la determinazione della tipologia di analisi di sensitività che verranno effettuate, con l'obiettivo di raggiungere i risultati prefissati.

#### **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]**

L'attività svolta ha riguardato la scelta dei casi tipici su cui svolgere l'analisi di rischio. In particolare, per la produzione di idrogeno è stata considerata la produzione mediante elettrolisi, sono stati analizzate le diverse configurazioni di elettrolizzatore presenti sul mercato e sono stati individuati i componenti critici dal punto di vista della sicurezza. Per il trasporto di idrogeno invece sono state individuate le dimensioni tipiche delle condotte e le tipiche condizioni operative (pressione) in cui condurre la valutazione del rischio.

**LA 2.21: Intensificazione del processo di idrogenazione diretta della CO<sub>2</sub> a DME mediante sviluppo di sistemi catalitici ibridi combinati con matrici idrofile assorbenti: Preparazione mediante robocasting di un sistema catalitico multi-metallico di riferimento in grado di attivare la CO<sub>2</sub> a bassa temperatura [CNR]**

L'attività si è conclusa al M30 con il design e lo sviluppo di catalizzatori strutturati basati su una formulazione catalitica di riferimento (CuZnAl) mediante l'utilizzo di un robot cartesiano. I sistemi preparati, sono stati caratterizzati dal punto vista chimico-fisico e validati in un impianto di laboratorio in condizioni d'idrogenazione della CO<sub>2</sub>, dimostrando il grande potenziale della metodologia di stampa nella realizzazione di strutture catalitiche tridimensionali aventi proprietà opportunamente scelte e una facile riproducibilità al contrario delle principali tecniche di preparazione convenzionali.

**LA 2.22: Intensificazione del processo di idrogenazione diretta della CO<sub>2</sub> a DME: Integrazione del catalizzatore multi-metallico con una matrice idrofila, finalizzato al raggiungimento di elevate conversioni di CO<sub>2</sub> per passaggio ed adeguata stabilità nel tempo [CNR]**

Nel presente semestre è stata effettuata una intensiva campagna di caratterizzazione chimico-fisica sui materiali preparati in modo da poter definire con più accuratezza gli sviluppi successivi del catalizzatore ibrido da utilizzare in condizioni di processo.

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

Nell'ambito del quinto semestre si è proceduto, a seguito della progettazione esecutiva e di dettaglio, alla realizzazione e consegna del nuovo sistema di riscaldamento del fluido diatermico dell'unità prototipale P2G/L. Questo consiste in uno scambiatore di calore che rappresenta la soluzione ideale nel riscaldamento dei fluidi in convezione forzata. Esso sfrutta il principio degli scambiatori fluido/fluido impiegando resistenze elettriche corazzate a diretto contatto del fluido da riscaldare. Lo scambio termico è garantito dall'impiego di setti opportunamente progettati per sfruttare al massimo il calore prodotto dalle resistenze elettriche. Questo sistema consente di minimizzare l'inerzia termica, di ottenere una risposta veloce alle esigenze del processo ed una temperatura precisa in uscita, grazie alla gestione tramite sistema di controllo basato su SCR (Solid Control Relais). Nel periodo di riferimento è stato inoltre condotto un attento studio delle modifiche meccaniche ed elettriche da effettuare per consentire l'installazione del nuovo sistema di riscaldamento. Si è comunque optato per posticipare l'installazione del nuovo riscaldatore elettrico al termine del progetto in quanto sono stati riscontrati alcuni limiti in termini di raggiungimento di elevate temperature operative (superiori a 400 °C), necessarie solamente per l'attivazione dei catalizzatori dedicati all'idrogenazione della CO<sub>2</sub> a metano e non per l'idrogenazione a 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 il completamento della messa a punto della metodologia analitica più adatta per l'analisi del processo di metanazione nell'impianto bench scale XtL. A seguito dell'attività parallela condotta nella LA 2.25 in cui si sta procedendo alla messa a punto dei sistemi catalitici a base nichel-cerio per la produzione di metano a partire da CO<sub>2</sub>, i materiali più promettenti saranno testati sull'impianto da banco XtL. Obiettivo della ricerca è quello di sviluppare nuovi materiali che consentano di ottenere buone prestazioni anche in condizioni operative meno severe (temperature inferiori a 300 °C) e/o velocità spaziali più sfavorevoli. A tal scopo, la sperimentazione nel presente semestre ha previsto lo studio in un ampio intervallo di condizioni operative, in termini di temperatura, pressione e velocità spaziale, sondando le condizioni limite attraverso l'uso di un catalizzatore commerciale a base di nichel. Parallelamente sono proseguiti le integrazioni dei componenti al fine di

rendere l'impianto P2G/L ancora più flessibile e performante; a tal proposito sono stati installati dei nuovi elementi scaldanti nel sistema di riscaldamento dell'olio e del gas di processo costituiti da cavi scaldanti corazzati in isolamento minerale e guaina in acciaio inox. È stata inoltre realizzata una nuova spirale di riscaldamento posizionata in uscita dalla pompa di rilancio del fluido diatermico, insieme alla realizzazione di nuovi alloggiamenti coibentati per garantire un miglior isolamento termico. A seguito di un malfunzionamento del modulo di comunicazione seriale che ha impedito l'utilizzo dell'unità prototipale, si è proceduto con la sostituzione del suddetto modulo. Per il processo di sintesi del metanolo, il catalizzatore oggetto di scale-up, precedentemente selezionato (LA 2.23) e di cui sono stati sintetizzati circa 900 g di materiale in forma di polvere (LA 2.25), è stato testato nei laboratori Sotacarbo con l'obiettivo di definire, metodologia e tipologia di legante per la successiva formatura e granulazione. Il materiale così formato sarà testato nell'unità prototipale P2G/L una volta definite le condizioni ottimali di processo.

Relativamente all'integrazione dell'impianto customizzato Power-to-Hydrogen di piccola taglia con relativi sistemi di gestione e controllo, all'impianto da banco di conversione catalitica di CO<sub>2</sub> in combustibili liquidi (X-to-Liquids), a seguito della progettazione condotta da Sotacarbo, è stata affidata la realizzazione a una società di ingegneria specializzata nello sviluppo e implementazione di impianti a idrogeno personalizzati. Il sistema customizzato di elettrolisi individuato è costituito da un elettrolizzatore PEM (Proton Exchange Membrane) e un elettrolizzatore AEM (Anion Exchange Membrane) opportunamente integrati con un unico BOP (Balance of Plant) per entrambe le tecnologie di elettrolisi e comprensivi di sistemi di stoccaggio. Tale sistema permetterà di svolgere attività sperimentale sull'analisi del processo di produzione di idrogeno verde, confrontando le due tecnologie di elettrolisi proposte e sullo studio delle interazioni tra la produzione di idrogeno verde e la sua successiva conversione in combustibili rinnovabili nell'impianto XtL.

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

L'attività si è concentrata soprattutto sulla sintesi di un sistema catalitico per l'idrogenazione di CO<sub>2</sub> a metanolo, in quantità tali da permetterne l'utilizzo nell'impianto pilota P2G/L presso Sotacarbo (LA 2.24). Sulla base dei risultati catalitici forniti da Sotacarbo, ottenuti nell'impianto da banco XtL sui sistemi CuO ZnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> precedentemente sintetizzati e consegnati, è stata definita la composizione del sistema catalitico da sintetizzare. Dopo aver verificato la riproducibilità e scalabilità della procedura, sono stati sintetizzati diversi batch con la stessa composizione, e solo dopo averne verificato la coincidenza nelle caratteristiche chimico fisiche (determinate mediante ICP-OES, XRD e fisisorbimento di N<sub>2</sub>) i diversi campioni sono stati miscelati, ottenendo in questo modo circa 900 g di materiale che è stato messo a disposizione di Sotacarbo per la successiva formatura e quindi l'utilizzo nell'impianto pilota P2G/L.

Inoltre, in base ai risultati dello screening precedentemente effettuato nel microimpianto catalitico a pressione atmosferica, sono stati individuati alcuni sistemi NiO/CeO<sub>2</sub> particolarmente promettenti come catalizzatori per l'idrogenazione di CO<sub>2</sub> a metano. In previsione della conduzione delle prove catalitiche nell'impianto da banco XtL di Sotacarbo, è stata ripetuta la sintesi di due campioni con composizioni selezionate, che sono stati sottoposti ad una caratterizzazione preliminare. "

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

Durante il periodo di interesse è stato sviluppato lo schema di un sistema integrato per la metanazione e il reforming (1. Sezione di Alimentazione dei Reagenti, 2. Reattori Catalitici, 3. Sistemi di Controllo Termico, 4. Sezione di Analisi e Monitoraggio, 5. Sezione di Uscita e Integrazione con SOFC/SOE). Successivamente è stata condotta l'integrazione fisica di tutti i sottosistemi sviluppati e realizzato il prototipo. La stazione di prova integrata è in grado di mettere in comunicazione in maniera bidirezionale il reattore di metanazione/reforming e la cella rSOFC durante il funzionamento in modalità Reforming/SOFC e

SOE/Metanazione, inoltre nella configurazione SOE/Metanazione lo stream in uscita dal metanatore ad alta temperatura viene processato nel reattore multitubolare di metanazione a bassa temperatura per raggiungere i target di produzione (1Nm<sup>3</sup>/h di CH<sub>4</sub>). Gli impianti integrati sono collegati in linea con sistemi di analisi gas (Analizzatore IR e Gas Cromatografo) e sistemi per l'alimentazione delle specie di reazione in fase gassosa. Tutta una serie di accorgimenti e configurazioni sono state fatte per condurre in modo efficace e in sicurezza le prove funzionali e di validazione di tutti gli elementi. Le azioni principali per la predisposizione del laboratorio e le stazioni di prova hanno riguardato: - Il collegamento meccanico tra i tubi del gas dell'impianto e la linea del gas del sistema di alimentazione del laboratorio; - L'integrazione elettrica tra il sistema e l'impianto; - L'identificazione e organizzazione della strategia di emergenza; - L'acquisto delle bombole e delle taniche d'acqua necessarie per l'alimentazione del sistema durante tutta la durata delle prove.

**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]**

È stato sviluppato un modello a parametri concentrati di un sistema energetico comprendente un dispositivo elettrochimico r-SOC e un reattore reversibile per la metanazione accoppiato termicamente all'r-SOC. Il modello è stato messo a punto mediante dati sperimentali al variare delle condizioni operative dell'r-SOC e del reattore di metanazione (da test CNR in lab).

**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]**

Partendo dalle prove sperimentali condotte sul campione 25%Ni/CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>, testato tra 200 e 450°C, alimentando una corrente di H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> di 4:1:5 ad una GHSV=26,539 h<sup>-1</sup> (dati sperimentali forniti dal CNRITAE), è stato sviluppato un modello cinetico volto a predire la distribuzione dei prodotti in uscita dal reattore di metanazione.

Il set di reazioni contemplato dal modello Xu-Froment (metanazione di CO, metanazione di CO<sub>2</sub> e Reverse Water Gas Shift) è stato individuato come il migliore in grado di descrivere il meccanismo. Lo studio è stato condotto attraverso il metodo di Eulero (Excel tools) e ha consentito di individuare, attraverso l'applicazione della legge di Arrhenius, i parametri cinetici per le 3 reazioni.

**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]**

Sono state completate le attività di progettazione preliminare ed esecutiva per gli adeguamenti nel Campo Prove, con realizzazione e parziali collaudi entro la scadenza. La progettazione ha identificato le aree per il nuovo banco prove e lo stoccaggio delle bombole contenenti gas naturale e idrogeno, ponendo particolare attenzione alla sicurezza, data la presenza di un serbatoio interrato di gas naturale.

È stata definita una piazzola di stazionamento, evitando sovrapposizioni con il serbatoio, e il volume massimo di stoccaggio è stato fissato a 750 litri per conformarsi alle normative vigenti. Sono state installate tubazioni che collegano il deposito ai dispositivi di test, utilizzando materiali specifici per garantire sicurezza e efficienza. I dispositivi di test, inclusi quattro contatori di gas, sono stati collocati in un manufatto protetto.

I lavori sono stati completati a maggio, consentendo di iniziare i collaudi a giugno. Il collaudo ha consistito nelle seguenti operazioni:

- Alimentazione e prove elettriche degli apparati installati;
- Prova di tenuta in pressione con aria compressa di tutte le parti di impianto;
- Prova di tenuta in pressione con gas naturale;

- Accensione della caldaia e del sistema aerotermo per la dissipazione di calore.

Parallelamente, sono stati prelevati quattro misuratori di gas dai magazzini per testare diverse tecnologie di misurazione, successivamente inviati a un laboratorio per verifiche metrologiche.

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

Si è proceduto alla validazione dei risultati ottenuti nelle simulazioni svolte usando il meccanismo di combustione GRIMECH3.0, mediante dati disponibili in letteratura, evidenziando alcuni disallineamenti per alcuni parametri (e.g., la velocità laminare di fiamma) in alcune specifiche condizioni operative. Si è così proceduto a selezionare un nuovo meccanismo cinetico da usare nelle simulazioni, il CRECK\_2003 (sviluppato al Politecnico di Milano nel 2020). Il confronto dei risultati ottenuti con GRIMECH30 con CRECK\_2003 (che necessita di maggiore potenza di calcolo) ha confermato la migliore aderenza di quest'ultimo ai dati disponibili. La sistematica simulazione nelle varie condizioni operative (f, %H<sub>2</sub> e flusso massico in alimentazione) ha permesso di ricavare le informazioni richieste in merito ai parametri termodinamici della combustione, ai parametri della fiamma e alle emissioni inquinanti (per MJ di energia prodotta). È proseguita, inoltre, la fase di validazione dei nuovi risultati ricavati con CRECK\_2003 con dati disponibili in letteratura. Relativamente all'analisi degli effetti dell'iniezione di idrogeno nel gas naturale sull'efficacia dei sistemi di odorizzazione è stata sviluppata una simulazione numerica per un tratto limitato di rete rappresentativo di una derivazione di utenza, con lo scopo di verificare la presenza di eventuali effetti di stratificazione alle diverse condizioni di prelievo.

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

Le attività si sono concentrate sull'esecuzione operativa della complessa campagna sperimentale e sull'avvio della fase di elaborazione preliminare dei dati acquisiti presso il campo prove CENTRIA S.r.l. di Arezzo. Questa fase ha rappresentato la traduzione pratica della progettazione e definizione del protocollo sperimentale oggetto del Rapporto R2.31-1. Nello specifico, sono state eseguite le seguenti attività relative a componenti critici:

- Prove sulle prestazioni metrologiche dei contatori del gas (G4)
- Prove sulla stratificazione della miscela nelle colonne montanti (Sezione Verticale)
- Valutazione dell'efficacia dei sistemi di rilevamento fughe

Parallelamente alle attività sperimentali, si è proceduto con la consolidazione dei risultati e la preparazione delle analisi finali sui modelli sviluppati nei semestri precedenti:

- **Simulazioni Fluidodinamiche (Stato Stazionario):** I risultati dettagliati dell'impatto fluidodinamico dell'iniezione di H<sub>2</sub> (fino al 20% in volume) sulla rete di distribuzione di Arezzo (MP/BP) sono stati consolidati. Le analisi hanno confermato che l'aumento della concentrazione di H<sub>2</sub> non altera significativamente la distribuzione della pressione in MP, e in BP le pressioni minime rimangono al di sopra del limite regolatorio di 19 mbar. Tuttavia, è emersa l'importanza dell'influenza altimetrica.
- **Analisi Tecno-Economica (Scenari Off-grid/Grid-connected):** È stata avviata la fase di ottimizzazione finale per la valutazione del costo livellato dell'idrogeno (LCOH) e del Green Index (GI). Le analisi iniziali hanno evidenziato la criticità dello scenario *off-grid* a causa dell'elevato sistema di stoccaggio richiesto (250 t) dovuto al disaccoppiamento stagionale tra domanda (inverno) e produzione PV (estate).

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

Nel quinto semestre di attività sono stati definiti i tre scenari per la costruzione dei modelli LCA. Questi scenari sono in linea con lo studio tecnico-economico per applicazioni Power-to-Gas (PtG) della LA 2.17. Inoltre, è stata eseguita la raccolta dati per la costruzione dell'inventario per ogni scenario, acquisendo dati della letteratura e utilizzando modelli di scale-up/down per materiali e consumi energetici, necessari per lo svolgimento della LCA.

#### **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]**

Nel corso del quinto semestre di attività (gennaio-giugno 2024) si è provveduto a reperire il materiale in precedenza individuato come conforme alla normativa. Questo è stato quindi tagliato in campioni quadrati 2x2cm, per garantire l'omogeneità e la ripetibilità delle prove sperimentali. La scelta della dimensione dei campioni è stata effettuata in modo da garantire che questi potessero essere gestiti negli strumenti analitici necessari alla caratterizzazione.

Sui campioni sono stati effettuate analisi preliminari al fine di settare i riferimenti per i successivi confronti post esposizione ad atmosfera di metano/idrogeno. Queste analisi rappresentano un passaggio cruciale, in quanto permettono di stabilire uno "stato zero" dei campioni, ovvero una condizione di partenza che fungerà da base per valutare l'impatto delle condizioni sperimentali sugli stessi. In particolare, allo stato attuale sono state effettuate XRD e SEM-EDX.

Parallelamente a queste attività di caratterizzazione del materiale, è stata avviata la progettazione degli adeguamenti necessari alle linee gas per poter condurre le prove di contatto tra i campioni e le miscele metano/idrogeno ad elevata pressione, in sicurezza.

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

I dati sulla consistenza e natura della rete, nonché dei consumi sono stati acquisiti e riorganizzati secondo procedure automatizzate, definendo una metodologia il più possibile replicabile in altri contesti. I risultati attesi sono stati conseguiti attraverso un lavoro di elaborazione di una rilevante mole di dati relativi al caso studio. La gestione di questi dati si è rivelata particolarmente complessa: le informazioni erano fortemente disaggregate e memorizzate in database distinti e non direttamente interoperabili. È stato pertanto necessario procedere alla geolocalizzazione completa dei 168.000 PdR della rete cittadina e all'integrazione dei dati topologici con quelli di consumo. Contestualmente, è stata integrata anche l'informazione altimetrica dei punti di rete. A tal fine è stato sviluppato un algoritmo Python che, sfruttando l'API OpenTopoData, ha restituito il profilo altimetrico completo, assegnando una coordinata Z ai nodi della rete. Le operazioni di elaborazione, mappatura e conversione GIS sono state eseguite mediante QGIS, rendendo la procedura compatibile con l'esportazione di dati per i software di simulazione.

La collaborazione con in DSO si è svolta nell'ambito di un accordo di cooperazione in essere con UNIPA e di uno specifico NDA.

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

Ben Alex Baby, Yifei Lu, Marco Beccali, Andrea Benigni, Santi Bonanno, Marco Ferraro, Germana Poma, Hydrogen-Blended Natural Gas in a Distribution Network - An Italian Case Study Analysis, 2024 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2024 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), 2024/11, doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope61470.2024.10751613

B. A. Baby, F. L. A. Munafò, M. Ferraro, M. Beccali, Mapping Research Trends and Future Direction of Hydrogen Transport, Storage and Distribution in City Networks- Perspectives on the Role of Hydrogen Blended Natural Gas. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 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 si è concentrata sulla formalizzazione completa degli scenari di analisi e sull'implementazione operativa della metodologia di ottimizzazione. In particolare sono stati definiti i macro-scenari (consumo da rete e consumo con quota di autoconsumo da rinnovabili), le articolazioni annuali e mensili della domanda di idrogeno, i tre scenari gas (LT, Fit-for-55, G7) e i livelli di blend (5–20%), oltre ai parametri tecnico-economici per le tecnologie di elettrolisi considerate. È stata quindi implementata la procedura di calcolo del LCOH e sviluppato il framework per l'ottimizzazione della taglia degli elettrolizzatori, distinguendo tra casi con solo prelievo da rete e casi con vincoli temporali sulla produzione.

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

*Sicurezza.* Prodotta una panoramica sulle principali problematiche di sicurezza legate al trasporto dell'idrogeno nella rete gas.

*Normativa.* Risultati dell'indagine condotta sulle sperimentazioni in atto a livello nazionale ed europeo sul tema del trasporto dell'idrogeno in rete gas.

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

*Laboratorio idrogeno.* Risultati dei test sperimentali effettuati sui campioni di roccia nelle condizioni di temperatura e pressione tipiche per lo stoccaggio dell'idrogeno in depositi sotterranei.

*Studi modellistici.* Risultati delle simulazioni numeriche per un caso sintetico identificato.

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

Tenendo in considerazione i vincoli di stampa è stato ridisegnato il piatto in due differenti versioni. Definite le geometrie dei piatti, si è tentato di stampare la versione 2 del piatto presso il CNR-ITAE.

Per limitare le deformazioni sono stati utilizzati supporti multipli con i piatti stampati in posizione inclinata. Si sono riscontrati alcuni difetti di stampa e un lieve difetto di planarità. I risultati sono stati ritenuti soddisfacenti, visto il progresso fatto rispetto alla prima versione e considerato che è stata utilizzata una stampante con piano di lavoro e compartimento di stampa non riscaldabili.

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

Nel corso dell'attività si è provveduto alla progettazione esecutiva di sue versioni dello stack previsto che adottano le differenti tipologie di piatto bipolare studiate.

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

Nel semestre sono state finalizzate le simulazioni e il gemello digitale dell'ambiente virtuale (creato con CoppeliaSim) per simulare il processo di assemblaggio. Questo ambiente ha permesso di testare e ottimizzare le fasi di assemblaggio in un contesto controllato, riducendo il rischio di errori nel sistema reale investigando

le possibili soluzioni per la manipolazione dei componenti dello stack, identificando la soluzione più promettente e concettualizzando l'architettura del software di controllo per l'applicazione reale.

In particolare è stata avviata la progettazione e la seguente realizzazione del sistema di "afferraggio" (gripping tool) per la manipolazione dei piatti.

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

Il combustore ARI100 della microturbina dell'impianto AGATUR è un prototipo realizzato da ANSALDO ENERGIA in grado di bruciare elevate percentuali di idrogeno: esso è assolutamente necessario per eseguire i test di EGR con idrogeno. ANSALDO è stata contattata per acquisire il secondo prototipo esistente di ARI100. Nel mentre, il combustore ARI100 è stato sostituito nella macchina con quello standard a gas naturale, in modo da effettuare test di EGR emulato con solo gas naturale.

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

A partire dalle varie soluzioni prospettate per effettuare il riscaldamento dell'aria comburente fino a temperature superiori ai 500°C, e sulla base dei risultati incoraggianti ottenuti per mezzo di una serpentina realizzata in ENEA, in rame, posta sopra la fiamma ed in cui fluisce l'aria, si è deciso di puntare ad uno scambiatore con diverse serpentine. Nel mentre, la serpentina con cui sono stati effettuati i test, ha consentito di valutare il funzionamento del primo prototipo di bruciatore in alcune condizioni, anche in pressione. Sono proseguiti le riunioni tecniche con la ditta realizzatrice del prototipo, in modo da arrivare alla definizione del disegno finale per la costruzione meccanica.

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

Per le attività sperimentali di questa LA sul prototipo finale di bruciatore, è assolutamente necessario lo scambiatore di calore (recuperatore) con diverse serpentine per poter riscaldare l'aria comburente a temperature superiori ai 500°C. Il costo realizzativo attraverso una ditta esterna è risultato alto; di conseguenza, si è deciso di realizzare il sistema in ENEA, limitando le spese alla raccorderia necessaria (il cui ordine è uscito da ENEA).

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

Sono proseguiti le attività di analisi wavelet di dati LES di un reattore MILD alimentato ad idrogeno che hanno condotto a risultati interessanti con prospettive di poter applicare la tecnica in ambito progettuale. URM3 ha inoltre ricevuto da URM1-DIMA (LA3.10) i dati delle simulazioni LES non reattive del bruciatore prototipo, per una loro analisi secondo la stessa tecnica.

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

Sono proseguiti le attività di ottimizzazione delle routine modificate nel codice HeaRT; altre routine sono state modificate per implementare l'accelerazione con GPU. Al tempo stesso, sono proseguiti le simulazioni LES del prototipo di bruciatore per elevati contenuti di idrogeno (sistema a corona) sviluppato nella LA3.6 e realizzato nella LA3.7. URM1-DIMA ha inoltre fornito i dati delle simulazioni LES non reattive a URM3 per l'analisi wavelet.

### **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/H<sub>2</sub> a rapporto costante (H<sub>2</sub> al 10 e 12% in vol.).

### **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:

- Terzo Workshop di progetto, Carbonia, 14, maggio 2024 presso Sotacarbo. Questo workshop è stato svolto in concomitanza con la presentazione del SAL e con la visita ispettiva da parte della commissione di esperti incaricata della valutazione del progetto.
- 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:
  - 20th European Turbine Network Annual General Meeting and Workshop, Leiden (Paesi Bassi), 20-21/03/2024.
  - K.EY-ENERGY, The Energy Transition Expo, Hydrogen Arena: Combustione e Transizione Energetica, Rimini Fiera, 27-28/02/2024.
- 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 svolte nel primo semestre del 2024 hanno riguardato:

1. la partecipazione al World Electrolysis Congress, organizzato dal World Hydrogen Leaders, per approfondire le tematiche riguardanti le tecnologie di elettrolisi e del mercato degli elettrolizzatori, per effettuare le valutazioni tecniche ed economiche sugli impianti di produzione di idrogeno e di combustibili liquidi da esso derivati (Düsseldorf 3-6.03.2024);
2. la partecipazione al convegno RENMAD H2 Italia 2024, sulle tecnologie dell'idrogeno e le possibilità di innovazione (Roma 11-12.06.2024);
3. la pubblicazione di n° 9 articoli originali di taglio divulgativo sulla rivista digitale Onlynaturalenergy.com:
  - a. “Tax Driver” (01.01.2024);
  - b. “Roads or Us” (01.01.2024);
  - c. “The European Hydrogen Bank’s risk bet” (01.01.2024);
  - d. “Kelly” (01.01.2024);
  - e. “KlimaSeniorinnen” (01.04.2024);
  - f. “A few more roads to nowhere” (01.04.2024);
  - g. “Iran’s gas resources in the Caspian Sea” (01.04.2024);
  - h. “Solar as an asset class in a high-interest rate environment” (01.04.2024);
  - i. “Argentiera” (01.04.2024).

Nello stesso periodo si è svolta (14.05.2024) presso il Centro Ricerche Sotacarbo, Grande Miniera Serbariu, Carbonia, la riunione per l'accertamento tecnico – amministrativo del Progetto 1.3 nel corso della quale sono state illustrate le attività e gli stati di avanzamento che per Sotacarbo hanno riguardato le linee LA 1.11, LA 1.12, LA 1.13, LA 2.23, LA 2.24. A valle della riunione sono stati anche visitati i laboratori e la piattaforma pilota del centro Ricerche.

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

"Francesco Parrillo, Filomena Ardolino, Gabriele Calì, Alberto Pettinai, Massimiliano Materazzi, Alex Sebastiani, Umberto Arena, Plastic waste gasification using oxygen-enriched air and steam: Experimental and model results from a large pilot-scale reactor, Waste Management, Volume 183, 30 June 2024, Pages 53-62, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.04.045>;

che ha prodotto la partecipazione ai seguenti convegni:

- Parrillo F., Calì G., Arena U., Materazzi, M., Pettinai A., Ardolino F., Sebastiani, A., 2024. Experimental and Modelling Results of Steam-Oxygen Gasification of Plastic Waste in a Pilot Scale Fluidized Bed Reactor, ChemRec24\_I, Engineering Conference International, Malaga, Spain, 29 aprile 2024
- Parrillo F., Boccia, C., Ardolino, F., Calì G., Meloni, S., Pettinai A., Arena, U., 2024. Gasification by O<sub>2</sub>-Enriched Air and Steam of Two Mixed Plastic Wastes in a Large Pilot Scale Fluidized Bed Gasifier, 46th Meeting of The Italian Section of The Combustion Institute, Towards Net-Zero Carbon Society, Bari, Italy, 2-5 giugno 2024. "

#### **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. 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).