

**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 III - 01/01/2023 – 30/06/2023**

**LA 1.1: Definizione-caratterizzazione del rifiuto agroindustriale da valorizzare energeticamente ai fini della produzione di gas di sintesi e idrogeno e test di conversione termochimica [CNR]**

Sono state condotte misure di gassificazione delle bucce di agrumi esauste, in presenza di materiale inerte e preliminarmente con materiale catalitico, a 1023K, 1bar, valori di E/Rin costante ed S/Bin variabile. I risultati hanno dimostrato che i valori di resa a H<sub>2</sub> del processo sono aumentati in presenza di materiale catalitico rispetto ai risultati ottenuti con sabbia silicea (H<sub>2</sub> Yield: da 0,65 Nm<sup>3</sup>/kg rifiuto a 0,97 Nm<sup>3</sup>/kg rifiuto nell'intervallo S/Bin da 0,5 wt/wt a 1,25 wt/wt).

**LA 1.3: Studio analitico e selezione di oli vegetali esausti e/o soluzioni di scarto contenenti acidi grassi liberi, per la produzione di idrogeno "green" mediante processi catalitici di de-idrogenazione di substrati organici (analisi e criticità) [CNR]**

L'attività sperimentale del terzo semestre ha riguardato la definizione dei trattamenti (i.e. pre e post) necessari per l'utilizzo dei liquidi vegetali, precedentemente selezionati, ai fini del processo catalitico di de-idrogenazione. Infatti, la composizione e le proprietà chimico-fisiche dei campioni, sia di UCO che di CTO, rendono necessari processi di trattamento, al fine di rendere queste cariche idonee ad essere alimentate nell'impianto di de-idrogenazione. Nello specifico, l'UCO necessita maggiormente di un processo di "cleaning" efficace, mentre, per il processo catalitico del CTO si rende necessaria un'operazione di "frazionamento" e/o di "blending", a causa della maggiore e troppo elevata viscosità e della bassa miscibilità. Entrambi i liquidi vegetali si dimostrano idonei ad essere convertiti in idrogeno. In particolare, la massima resa di H<sub>2</sub> ottenibile è per UCO di 143m<sup>3</sup>H<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>UCO e per CTO di 300m<sup>3</sup>H<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>CTO. Dunque, sono state anche individuate le frazioni/molecole più idonee all'accumulo chimico dell'idrogeno (LOHC). Difatti, alcuni prodotti delle reazioni catalitiche costituiscono idrocarburi insaturi a medio-lunga catena, che potrebbero essere carrier dell'idrogeno (LOHC).

**LA 1.5 - Produzione di idrogeno da pirolisi di biogas/biometano in bagni fusi: analisi preliminare del processo e definizione di un setup sperimentale su scala di laboratorio [ENEA]**

Viste le alte temperature di utilizzo dei bagni di sali fusi, sono stati effettuati dei test sperimentali per confrontare le volatilità relative di varie miscele, prendendo come riferimento l'eutettico NaCl/KCl. I risultati hanno evidenziato l'effetto negativo del catione Zn<sup>2+</sup> riguardo questo parametro, e quindi la necessità di limitarne la quantità, sempre mantenendo un punto di congelamento non superiore ai 500°C.

Un altro parametro importante per la selezione delle miscele da utilizzare per il processo di pirolisi in bagni fusi è la densità delle miscele utilizzate. Questa infatti dovrebbe essere abbastanza alta da consentire la segregazione delle sostanze carboniose prodotte sulla superficie del fuso, senza raggiungere valori troppo elevati, per ridurre la sovrappressione dovuta al battente di liquido nel reattore.

Un'analisi modellistica è stata quindi portata avanti, ed ha mostrato la necessità di aggiungere un metallo di trazione ( $Mn^{2+}$ ), in maniera da ottenere bagni sufficientemente densi, senza dovere aumentare la presenza di  $Zn^{2+}$  che, come valutato nelle precedenti attività, avrebbe un effetto negativo sulla volatilità delle miscele. L'utilizzo del manganese è già stato dimostrato per questo tipo di reazioni in altre miscela, e non presenta problemi di compatibilità con idrogeno e/o metano.

Vista l'utilità di utilizzare anche biogas come alimentazione per la pirolisi nei bagni fusi, è stata valutata la stabilità termodinamica dei cloruri allo stato liquido con la  $CO_2$ . Pochi dati sono disponibili per le alte temperature in oggetto, e da questi si può dedurre una possibile compatibilità chimica, comunque da confermare.

È stata svolto uno studio di processo per valutare la possibilità di operare il processo a temperature inferiori ai 600 °C, combinando step di reazione e separazione dell'idrogeno prodotto, in modo da raggiungere conversioni soddisfacenti.

Inoltre, è stato avviato lo sviluppo del progetto del reattore in quarzo da utilizzare nel setup sperimentale per lo studio del processo di pirolisi in bagni fusi. I risultati finali dell'attività svolta da URM1-DICMA nella parallela LA 1.7 si sono rivelati indispensabili per completare il progetto del reattore; pertanto, è stato necessario estendere le attività della LA 1.5 di tre mesi.

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

Le attività sono cominciate dalla preparazione delle prove di corrosione volte ad individuare materiali adatti costruttivi per i reattori di pirolisi a sali fusi. A tal fine, sono stati selezionati i seguenti possibili materiali di contenimento per cloruri fusi:

- Ha C-276
- Hastelloy N
- Tungsteno e acciai inox austenitici con coating di allumina

È stata avvita la procedura di acquisizione della muffola per effettuare i test fino a 900°C e in atmosfera inerte e la predisposizione del laboratorio per lo svolgimento delle prove.

#### **LA 1.7 - Produzione di idrogeno da pirolisi di biogas/biometano in bagni fusi: modellazione a supporto dello sviluppo di un sistema sperimentale su scala di laboratorio [URM1-DICMA]**

Sviluppo di un modello CFD di trasporto bifase turbolento (approccio 'bubbly flow turbolento') atto a determinare l'impatto del moto di ricircolazione del liquido sul tempo medio di residenza del gas e quindi - in combinazione con il modello di conversione nella singola bolla - sulla conversione efficace nel volume di reazione. Oltre alla geometria fissata (3 x 20 cm), è stato anche considerato un reattore di diametro doppio al fine di determinare l'effetto di variazione dei parametri geometrici. Per entrambe le geometrie è stata effettuata una campagna di simulazioni variando la dimensione relativa (diametro dello sparger)/(diametro del reattore), le portate di gas (da 10 a 100 NmL/min) e l'altezza del bagno (da 3 a 20 cm). Tenendo anche conto di aspetti relativi a salute e sicurezza, come materiali rappresentativi di sali e metalli fusi sono stati considerati rispettivamente il KBr ed il gallio.

## **LA 1.11 – Sperimentazione a supporto della progettazione delle modifiche impiantistiche del gassificatore a letto fluido bollente [SOTACARBO]**

Nell'ultimo semestre della LA 1.11 "Sperimentazione a supporto della progettazione delle modifiche impiantistiche del gassificatore a letto fluido bollente", è stata effettuata la campagna sperimentale sull'impianto di gassificazione FABER, programmata da UVAN e condivisa da Sotacarbo, in condizioni autotermiche, con vapore ed aria arricchita, usando tenori di ossigeno dal 21% al 39%. I test programmati sono stati 16 test così suddivisi:

- set di prove con Blupolymer L (scarto plastico da raccolta differenziata): nei primi 9 test sperimentali il rapporto di equivalenza è stato mantenuto costante ed è variata la concentrazione di ossigeno nel mezzo gassificante. Questi test hanno consentito di identificare gli attuali limiti di FABER, dettati principalmente dalle potenzialità della caldaia.
- set di prove di co-gassificazione Blupolymer L-Eucaliptus: nei successivi 4 test si è valutata la flessibilità dell'impianto e analizzato un ulteriore parametro operativo (il rapporto di miscelazione tra i due combustibili o *blending ratio*).
- set di prove con Blupolymer L: negli ultimi 3 test sperimentali con solo Blu L, dopo alcuni piccoli adeguamenti tecnici alla linea vapore, è stato leggermente aumentato il rapporto di equivalenza.

I test programmati sono stati effettuati, col supporto tecnico di UVAN, entro giugno 2023, con alcune poche modifiche alle condizioni operative sulla base dell'effettiva risposta del reattore Faber. Sotacarbo ha eseguito: (i) le analisi di laboratorio prima e dopo i test sperimentali; (ii) la raccolta, l'analisi e la prima elaborazione dei dati sperimentali; (iii) la preparazione dell'impianto prima e dopo i test.

Sulla base della sperimentazione effettuata e dall'analisi ed elaborazione dei dati, sono stati effettuati alcuni interventi sull'impianto:

- modifica della linea di adduzione vapore al gassificatore: questa attività è stata indispensabile al fine di ottimizzare il controllo della maggiore portata di vapore che sarà necessaria, e per aumentare la temperatura del vapore inviato al gassificatore;
- realizzazione di una nuova linea di adduzione di CO<sub>2</sub> al gassificatore: questa attività potrebbe essere utile per ridurre ulteriormente la quantità di azoto inviata al gassificatore;
- modifiche al sistema di analisi syngas: queste attività sono state indispensabili per garantire una corretta analisi in presenza dell'elevate concentrazioni di vapore nel syngas che condensano lungo le linee di campionamento;
- modifiche elettriche: tali attività sono indispensabili per il collegamento e la messa in funzione delle nuove strumentazioni che saranno installate;
- modifiche al sistema di regolazione e controllo: queste attività sono state indispensabili per il funzionamento e la registrazione dei dati legati alle modifiche che andranno effettuate.

È stato presentato un contributo al convegno internazionale SARDINIA 2023-19th Int. Symp. on Waste Management, resource recovery and Sustainable Landfilling (9-13 ottobre 2023): G. Calì, F. Parrillo, C. Boccia, F. Ardolino, A. Pettinau, U. Arena, *Performance characteristics of a pilot-scale plastics waste gasifier using oxygen-enriched air and steam*.

#### **LA 1.14 – Supporto tecnico scientifico alle modifiche impiantistiche del gassificatore a letto fluido bollente [UVAN]**

È stato definito un programma di test sperimentali con il gassificatore FABER, in condizioni autotermiche, con vapore ed aria arricchita, usando tenori di ossigeno dal 21% al 39%. L'obiettivo era l'acquisizione di informazioni per rendere FABER esercibile con ossigeno puro e vapore, perché nella configurazione attuale, quando alimentato con rifiuti plastici, tende a valori di temperatura non accettabili per un esercizio in sicurezza.

Tutti i test sono stati realizzati entro giugno 2023, alimentando uno scarto plastico da raccolta differenziata (Blu-L). UVAN ha fornito supporto tecnico-scientifico, anche presenziando ai test, e ha elaborato i dati e le analisi prodotte.

È stato presentato un contributo al convegno internazionale SARDINIA 2023-19th Int. Symp. on Waste Management, resource recovery and Sustainable Landfilling (9-13 ottobre 2023): G. Cali, F. Parrillo, C. Boccia, F. Ardolino, A. Pettinau, U. Arena, Performance characteristics of a pilot-scale plastics waste gasifier using oxygen-enriched air and steam.

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

Nei primi 3 mesi di attività, sono stati sviluppati bilanci di materia ed energia sul reattore FABER, per le condizioni di gassificazione autotermica con ossigeno e vapore, tenendo in conto le principali relazioni della *fluidization engineering*. È stata inoltre avviata un'attività modellistica del comportamento del reattore FABER, con l'ausilio di un modello cinetico disponibile in letteratura, messo a punto dalla UCL di Londra, adattato alle condizioni dei test condotti nella L.A. 1.14.

#### **LA 1.17 - Produzione di H<sub>2</sub> da gassificazione delle biomasse: identificazione di possibili sistemi innovativi di separazione a membrane inorganiche [RSE]**

Sono stati selezionati i materiali da utilizzare per la realizzazione delle membrane ed è stata avviata una prima caratterizzazione (SEM, XRD, BET). Eseguite prove preliminari di sintesi a stato solido di polveri di La<sub>6-x</sub>WO<sub>12-δ</sub> (LWO) e successiva realizzazione di membrane tramite pressatura uniassiale e sinterizzazione. Ottenute membrane costituite da fase pura LWO e microstruttura sufficientemente densa. Inoltre, è stata progettata la postazione per i test di permeazione di H<sub>2</sub> ad alta temperatura.

#### **LA 1.19 - Sviluppo di materiali e componenti per processi fotoelettrochimici per la produzione di idrogeno [CNR]**

È stata assemblata e caratterizzata elettrochimicamente una cella elementare (fotoanodo/membrana/fotocatodo) di fotoelettrolisi con una area attiva di 1 cm<sup>2</sup>, utilizzando materiali e componenti sviluppati nei semestri precedenti.

#### **LA 1.22 - Produzione di H<sub>2</sub> diretta da fonte solare: studio della chimica degli elettrodi e primo prototipo di cella fotoelettrocatalitica [RSE]**

Prime prove di sintesi dei materiali anodici individuati (ossido di tungsteno, ossido di zinco e biossido di titanio), caratterizzazione morfologica strutturale ed elettrochimica dei materiali prodotti. Lo studio dei materiali catodici è proseguito con la sintesi e caratterizzazione dei composti a base di C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> e solfuri di metalli di transizione. Sono iniziati gli studi di preparazione delle polveri di C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> accoppiato a nanoparticelle di platino. Realizzazione della cella prototipale a finestre variabili.

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

E' iniziata la definizione delle metodologie per l'identificazione dell'idrogeno mediante una opportuna fingerprinting, con elementi additivi corrispondenti alla classificazione sulla base dei parametri di qualità. Sono state iniziate le attività di selezione della piattaforma blockchain per l'attestazione dei dati e la relativa validazione.

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

Nel terzo semestre della LA si è concluso il progetto esecutivo dell'impianto prototipale di metanazione e si è portata a compimento la realizzazione dell'impianto che è stato collaudato presso il costruttore a Maggio 2023 ed è stato consegnato presso il C.R. Casaccia a Giugno 2023.

Si è dato altresì corso alla definizione degli interventi di upgrade del sistema elettrolizzatore.

## **LA 2.2 – Analisi e modellazione del processo di metanazione biologica per applicazioni Power To Gas [URM1-DICMA]**

I modelli e i flowsheet sviluppati nei precedenti semestri sono stati utilizzati per un'ottimizzazione ed un'analisi di sensibilità del processo.

In particolare, l'analisi di sensibilità si è rivelata uno strumento prezioso per migliorare il bilanciamento elementare dei bioprocessi, stimando velocità di reazione, conversione ed efficienza. È stata, inoltre, utile per l'identificazione dei parametri operativi e l'ottimizzazione del processo.

L'efficienza superiore al 70% ha dimostrato che la metanogenesi biologica è un'alternativa promettente alla trasformazione chimica, con maggiore tolleranza alle impurità.

Questo approccio ha permesso di combinare la simulazione di Aspen Plus con l'indagine fisiologica in condizioni di bioreattore per lo scale-up dei bioprocessi.

## **LA 2.4 - 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.* Test sul reattore 2 e sua predisposizione per il funzionamento ad alta pressione. Ottimizzazione della fornitura di nutrienti al reattore 1 e ottenimento dei valori di picco per la produzione di metano (Methane Production Rate - MPR).

*Elettrometanogenesi.* Completamento delle prove sperimentali su diversi tipi di elettrodi multicompositi. Sperimentazione di un tipo di sonda multiparametrica avanzata e ottimizzata, in grado di raggruppare, con un unico disegno di cella elettrochimica, diverse informazioni relative ai parametri chimico-fisici del suolo.

## **LA 2.6 - Definizione di un sistema di captazione di CO2 da suolo in scala da laboratorio per applicazioni Power to Gas [ENEA]**

È stato definito il concept e lo schema funzionale del sistema di captazione a scala di laboratorio.

Il captatore di gas da suolo sarà opportunamente realizzato con sistemi che prevedono il contenimento del flusso gassoso proveniente da fenomeni di degassamento naturale dai suoli in un ambiente confinato, allo scopo di convogliare il gas nella successiva sezione di trattamento. In particolare, sul captatore, si prevede un sistema di aspirazione del gas, un'unità di trattamento dei gas aspirati, e un sistema di misuratori dei principali parametri caratteristici del processo.

È stato redatto il rapporto tecnico della LA previsto da capitolato.

### **LA 2.8 - Integrazione delle tecnologie di captazione e trattamento di gas da suolo e progetto di massima di un prototipo di captazione CO<sub>2</sub> per applicazioni Power to Gas [URM1-DIAEE]**

È stato sviluppato il progetto esecutivo del prototipo di captazione CO<sub>2</sub> proveniente da emissioni spontanee del terreno, con minima contaminazione di aria atmosferica. La capacità di captazione è stata valutata in relazione alle portate minime gestibili con macchine (ventilatori, compressori, ecc.) disponibili. Il prototipo è stato previsto per il funzionamento autonomo, senza collegamento ai successivi componenti dell'impianto Power to Gas. Del prototipo è stato formulato il bilancio energetico, individuando i fabbisogni dei singoli componenti.

Inoltre, è stato redatto il rapporto tecnico "Tecnologie di captazione di gas da suolo e progetto di massima di un prototipo di captazione CO<sub>2</sub> proveniente da emissioni spontanee del terreno".

### **LA 2.12 - Studio dell'integrazione di tecnologie di accumulo elettrico e di produzione di idrogeno elettrolitico per la definizione di sistemi ibridi alimentati da fonti rinnovabili [UCA-DIEE]**

Nel terzo semestre è stata sviluppata la topologia e la proposta di configurazione impiantistica da analizzare per l'implementazione della strategia di gestione proposta. Nello specifico è emersa la necessità di poter disporre di un sistema di conversione DC/DC di tipo bidirezionale idoneo alla gestione di 4 porte in DC caratterizzati da livelli di tensione differenti e isolati galvanicamente. La soluzione più appropriata è stata quella di ricorrere a sistemi tipo Multi Active Bridge. Questi, infatti, garantiscono un ampio range di variazione della tensione un flusso di potenza bidirezionale per tutte le porte in DC ed un isolamento galvanico. Tuttavia, la presenza di un unico sistema di accoppiamento magnetico ad alta frequenza introduce dei fenomeni di interdipendenza nella gestione delle grandezze elettriche a seconda delle dinamiche dei flussi di potenza nelle diverse porte che richiedono un ulteriore approfondimento. Questo ha lo scopo di definire le strategie di controllo idonee a garantire il disaccoppiamento tra le grandezze elettriche e a valutare la disponibilità sul mercato di fornitori di sistemi di trasformazione ad alta frequenza caratterizzati da quattro porte di uscita. L'indisponibilità di risorse umane da dedicare a tale attività non ha consentito di concludere la valutazione di fattibilità e quindi le attività previste per questa LA entro il termine previsto del mese 18; pertanto la LA è stata estesa fino al mese 24.

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

È stata portata avanti l'attività di modellazione del sistema di stoccaggio con idruri metallici. Al fine di definire la configurazione ottimale, le prestazioni sono state valutate mediante simulazione numerica 2D della sezione trasversale di un singolo modulo. L'analisi è stata effettuata mediante il software agli elementi finiti Comsol Multiphysics v.5.6. Sono state effettuate numerose simulazioni, al fine di valutare sia la geometria del cilindro (aspect ratio), sia il tipo di condizionamento termico impiegato. Per quanto riguarda quest'ultimo, sono state prese in esame diverse tipologie, prevedendo sia un condizionamento interno, mediante canali passanti all'interno del cilindro lungo la direzione assiale, che esterno, o contemporaneamente interno ed esterno. Inoltre, è stata valutata la possibilità di impiegare diversi sistemi di scambio termico (convezione/conduzione) con diversi fluidi refrigeranti (aria, acqua, freon). In particolare, circa il condizionamento termico interno, sono state effettuate simulazioni con:

- elementi cilindrici coassiali;

- condotti interni nei quali scorra aria o acqua (a temperature e con velocità che sono state fatte variare in test differenti);
- rivestimento con tubi di freon per mantenere costante la temperatura di parete.
- aggiunta di grafite naturale espansa (ENG) alla lega metallica, per migliorarne la conducibilità termica.

Per quanto riguarda il condizionamento termico esterno, invece, sono state effettuate simulazioni nelle quali è stata considerata:

- sola convezione naturale all'esterno dei serbatoi (senza nessun effettivo condizionamento);
- flusso di aria o acqua (a temperature e con velocità che sono state fatte variare in test differenti).
- rivestimento con tubi di freon per mantenere costante la temperatura di parete.

In aggiunta, anche le fasi di svuotamento/riempimento sono state simulate sia ipotizzando che l'idrogeno venga rilasciato/prelevato da una valvola posta ad una estremità del serbatoio, sia ipotizzando che questo fluisca all'interno di un condotto centrale in materiale metallico poroso, al fine di valutare: i) possibili effetti di diffusione all'interno del materiale, ii) l'effetto della convezione forzata legato al flusso di idrogeno sulle prestazioni termiche del sistema.

I modelli sviluppati sono stati quindi impiegati per valutare le prestazioni di diverse geometrie in diverse condizioni operative.

#### **LA 2.15 - Modellistica di componenti per la produzione ed il trattamento di idrogeno elettrolitico basato sulla tecnologia alcalina [UCBM]**

È stata acquisita una curva di potenza fornita da un impianto fotovoltaico (PV) reale presente in ENEA Casaccia con potenza nominale 25 kW. Sulla base di questa curva è stata costruita una performance dinamica dell'elettrolizzatore come serie di stati stazionari per ciascuno dei quali è stato usato il modello suddetto. Il profilo di potenza da PV è stato integrato nella simulazione Aspen così da poter variare manualmente l'input di potenza in ingresso ed ottenere la relativa simulazione dell'intero BoP non a pieno a carico, in modo da valutare le relative performance. Inoltre, è stato sviluppato anche un codice Matlab che riceve in input il profilo di potenza del fotovoltaico (input orario per un anno intero) e restituisce in output il corrispondente profilo di idrogeno prodotto dallo stack elettrolitico reale opportunamente caratterizzato come suddetto. Altri output del codice sono due grafici significativi: un primo con la produzione giornaliera di idrogeno lungo l'intero anno ed un secondo grafico con un confronto tra una produzione oraria in una giornata media dell'anno, in una giornata media ad agosto ed in una giornata media a gennaio.

È possibile usufruire di questo modello anche fornendo profili di potenza in ingresso diversi ed ovviamente variare i parametri operative dello stack per valutarne altri.

#### **LA 2.17 - Definizione e sviluppo del modello in excel e, per i componenti elettrolizzatore, stoccaggio idrogeno e suo uso nella mobilità, del modello in matlab/simulink per lo studio parametrico della variazione del costo dei gas rinnovabili nell'applicazione Power to Gas [UMAR]**

È stato avviato il processo di sviluppo di un modello in Excel. Questo strumento è stato progettato per consentire una facile e diretta modifica delle ipotesi di lavoro e dei dati di input selezionati. Il tool è stato strutturato utilizzando fogli di calcolo separati per ciascun caso studio, i quali sono stati collegati al foglio di lavoro principale contenente i dati di input fondamentali.

Successivamente, sono stati elaborati i risultati ottenuti dal modello e sono stati identificati i parametri più rilevanti per condurre uno studio parametrico accurato. Questo processo ha permesso di comprendere meglio l'impatto delle variazioni dei parametri sulle proiezioni e sulle analisi effettuate, fornendo così una base solida per la valutazione dei risultati.

#### **LA.2.19 - Metodologie e strumenti volti alla valutazione e mitigazione del rischio di sistemi di accumulo e trasporto di idrogeno e blend [URM1-DICMA]**

È stato effettuato un confronto tra le proprietà fisiche del gas naturale e dell'idrogeno, con particolare attenzione alle differenze che possono essere importanti ai fini della sicurezza. Inoltre, è stata condotta una revisione della letteratura sullo stato attuale delle conoscenze sul comportamento di rilasci di miscele idrogeno-gas naturale, in particolare per quanto riguarda la dispersione e i jet fire a seguito della accensione immediata della miscela.

Inoltre, è stata analizzata una valutazione comparativa semi-quantitativa del rischio per gasdotti ad alta pressione per il trasporto di idrogeno e metano, con l'obiettivo di stabilire un livello di rischio e dimostrare i diversi rischi associati all'idrogeno rispetto al gas naturale.

Infine, è stato redatto il rapporto tecnico "Metodologie e strumenti volti alla valutazione e mitigazione del rischio di sistemi di accumulo e trasporto di idrogeno e blend".

#### **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]**

È stata finalizzata l'individuazione di una formulazione catalitica ibrida CuZnAl/HZSM-5 da utilizzare come riferimento nell'attività di linea LA 2.22 ai fini dell'intensificazione di processo.

Per le misure sperimentali è stata individuata una formulazione catalitica ibrida di riferimento a base di ossidi misti di Cu, Zn e Al (CZA) e una zeolite commerciale H-ZSM5 (Si/Al, 23:1). Per la preparazione delle paste catalitiche da estrarre è stato utilizzato un mulino planetario, passaggio fondamentale per garantire l'estrusione attraverso l'ugello della siringa. Le paste catalitiche dopo asciugatura e calcinazione sono state caratterizzate in termini di area superficiale mediante metodo BET, la struttura è stata analizzata mediante diffrazione a raggi X e la formulazione attraverso fluorescenza a raggi X.

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

L'attività nel presente semestre è stata focalizzata su uno studio con l'obiettivo di definire, metodologia di sintesi e composizione chimica di un catalizzatore per la sintesi del metanolo a partire da CO<sub>2</sub>, per il successivo scale-up (oggetto della LA 2.24) e successivo test catalitico sull'impianto prototipale P2G/L. Avendo ricevuto da parte del Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche - Università di Cagliari (oggetto della LA 2.25) i primi catalizzatori sintetizzati a base di CuO e ZnO (in rapporto 2:1) e in presenza di diverse quantità di Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e ZrO<sub>2</sub>, questi sono stati preliminarmente testati al fine di determinarne l'attività e la selettività. Parallelamente sono proseguite le integrazioni dei componenti al fine di rendere l'impianto P2G/L ancora più flessibile e completamente indipendente; in tale contesto è stata avviata la progettazione e successiva realizzazione di una torcia indipendente (preliminarmente veniva impiegata quella comune a tutti gli impianti della piattaforma pilota Sotacarbo) come sistema di combustione dei gas in uscita. È stato poi affrontato uno studio al

fine di definire il layout impiantistico ottimale dell'impianto P2G/L per poter testare i catalizzatori appositamente sintetizzati per il processo di produzione del metanolo mediante idrogenazione catalitica della CO<sub>2</sub> a seguito dello scale-up del materiale. L'attività teorica degli studi LCA è proseguita con un'analisi di sensitività che ha consentito di verificare l'influenza dei limiti e delle ipotesi scelti, e di identificare le strade e opzioni di miglioramento. Le analisi di sensitività realizzate in questo studio vertono sia su parametri tecnico-operativi delle tecnologie innovative, sia sulla variazione futura del mix elettrico nazionale prevista al 2030, 2040 e 2050. Per studiare le potenzialità massime delle unità, è stato infine deciso di includere uno scenario "best case", che contenesse l'azione sinergica di tutti i parametri studiati nelle analisi di sensitività.

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

In base alle evidenze della semestralità precedente sono state contattate alcune ditte per la realizzazione del prototipo con le quali sono stati condivisi e discussi i documenti descrittivi del sistema. Ciò ha consentito di avviare uno screening dei componenti selezionabili per il controllo delle condizioni di lavoro del prototipo e di possibili soluzioni implementative per l'integrazione elettromeccanica in uno skid sperimentale. Inoltre, sono stati forniti a USA e UBO dataset sperimentali.

#### **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-DIN]**

Nell'ottica dello sviluppo di una modellazione delle prestazioni energetiche a parametri concentrati in via preliminare si è proceduto, integrandosi con le attività sperimentali CNR, ad una raccolta dati relativi ai componenti del sistema e le condizioni al contorno necessarie per lo sviluppo del modello di calcolo del sistema stesso. Sono stati elaborati i dati sperimentali dai banchi prova su reattori di metanazione e reforming di tipo reversibile, in sperimentazione presso il CNR. Inoltre, sulla base del background disponibile da precedenti progetti e della letteratura di settore sono state definite le condizioni caratteristiche di funzionamento del dispositivo elettrochimico r-SOE, da integrare nel modello termodinamico del sistema in oggetto. Sono stati quindi definiti gli strumenti di modellazione più idonei in ambiente ASPEN HYSYS.

#### **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 avviate attività relative allo studio del fenomeno della stratificazione, partendo da un'analisi approfondita dello stato dell'arte. Sebbene la stratificazione di idrogeno e metano, come gas puri in miscela con aria, sia ben documentata in letteratura, si è riscontrato una mancanza di informazioni riguardanti il comportamento delle miscele di idrogeno, metano e aria. In altre parole, non esistono studi che evidenzino la diversa stratificazione di idrogeno e metano all'interno della stessa miscela. È comune in letteratura considerare questa miscela come ideale, presumendo l'assenza di gradienti di concentrazione a causa dei brevi tempi di osservazione. Tuttavia, la situazione potrebbe essere diversa per tempi di permanenza molto lunghi in serbatoi o ambienti confinati contenenti una miscela di idrogeno e metano; in tali circostanze, potrebbe verificarsi la stratificazione dei due gas. Le attività svolte in questo semestre hanno riguardato:

- Studio della stratificazione della miscela in ambienti chiusi: Questo studio si è concentrato sulla comprensione del comportamento della miscela in ambienti confinati, sia con che senza ventilazione naturale.
- Studio sulla propensione della miscela alla stratificazione differenziata: Si è analizzata la tendenza della miscela a stratificare i suoi costituenti (idrogeno e metano) durante lunghi periodi di stazionamento.
- Individuazione di metodologie di testing e strumentazione: Sono state identificate metodologie di testing e la relativa strumentazione necessaria per misurare la stratificazione in miscele con rapporti in volume di H<sub>2</sub>/NG del 2%, 5%, 10%.

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

Relativamente all'analisi degli effetti del blending su caldaie e bruciatori civile e/o industriali, in questo semestre sono state effettuate diverse simulazioni di fiamma, utilizzando il modello "Burner Flame" (incorporato in Cantera 3.0, usato in ambiente Python 3.10), che simula la fiamma stabilizzata su un bruciatore alimentato con reagenti premiscelati in flusso laminare, a 300 K e 1 atm. Le simulazioni sono state svolte alle seguenti condizioni chimico-fisiche: i) gas naturale di riferimento (i.e., 91% CH<sub>4</sub>, 5% C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, 4% N<sub>2</sub>, famiglia H EN 437) e percentuali di iniezione di idrogeno (i.e., 5, 10, 15, 20, 25 e 30 %vol); ii) rapporto di equivalenza variato tra 0.6 e 1.6 a step di 0.2 unità; iii) flusso di massa inviato al bruciatore pari a  $k \cdot \rho \cdot S_L$  (dove:  $\rho$  è la densità della miscela reagente,  $S_L$  la velocità laminare di fiamma calcolata con "Freeflame" di Cantera, e  $k$  posto pari a 1.5, 1, 0.5, 0.1, 0.01); iv) meccanismo cinetico grimech3.0. In tutte le condizioni è stata ricavata la struttura di fiamma completa. I primi risultati indicano che non ci sono differenze significative nella struttura della fiamma tra il gas naturale e le sue miscele con idrogeno, nei limiti delle concentrazioni studiate.

### **LA 2.31 – Iniezione di idrogeno nelle reti di distribuzione del gas: supporto alla sperimentazione e analisi ed elaborazione dei dati rilevati [UFI]**

Nel Primo semestre del 2023, principalmente, sono state condotte attività inerenti a:

- Modellazione delle reti di distribuzione del gas naturale con iniezione di idrogeno in condizioni dinamiche
- Creazione di modelli per svolgere analisi energetiche ed economiche della produzione dell'idrogeno.

Relativamente alla modellazione di reti, per prima cosa è stata condotta una ricerca bibliografica sulle simulazioni delle reti di distribuzione del gas naturale e sui modelli fluidodinamici per risolvere una rete fluidodinamica in condizioni dinamiche (unsteady). Così identificate le equazioni fluidodinamiche monodimensionali non-stazionarie, sono state discretizzate alle differenze finite sia nel tempo che nello spazio. Nello stesso periodo sono stati presentati due articoli a conferenze inerenti alle reti gas legate alla rete elettrica.

Relativamente alla creazione di modelli, dopo aver condotto una ricerca bibliografica sulla filiera per la produzione di idrogeno verde, sono stati sviluppati i modelli black box per simulare la produzione dell'idrogeno da fonti rinnovabili nell'intero arco dell'anno. In particolare, campo solare PV, elettrolizzatore e serbatoio.

Per quanto riguarda l'elettrolizzatore, per valutare la sua capacità è stato utilizzato un modello originale di elettrolizzatore alcalino tarato su un dispositivo commerciale. A causa del funzionamento intermittente che il modulo a cui è sottoposto il modulo, il modello considera la variazione del fattore

di conversione  $\varphi$ , che caratterizza l'elettrolizzatore, l'efficienza di conversione dall'energia elettrica in ingresso all'idrogeno verde in uscita.

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

Sono state studiate le tecnologie Power to Gas (PtG) collegate alla produzione d'idrogeno. Parallelamente sono stati analizzati i diversi scenari che prevedono il collegamento delle tecnologie PtG al sistema gassoso di stoccaggio dell'energia, valutando la costruzione di nuove reti di distribuzione o l'adeguamento delle reti esistenti (manutenzione oppure dismissione).

#### **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 individuati i materiali delle condotte operanti fino a medie pressioni.

L'individuazione dei materiali costituenti l'infrastruttura di distribuzione si è basata su una Specifica Tecnica di Valutazione e di Fornitura e di Collaudo (S.T.V.F.C) 15AA300\_1, rilasciata da ITALGAS, che definisce i requisiti minimi dei tubi saldati di acciaio non legato.

La rete di distribuzione nazionale lavora in un ampio intervallo di pressione, una volta individuati e caratterizzati i materiali delle condotte operanti a basse pressioni si è passato alla caratterizzazione di quelli operanti fino a medie pressioni, pressioni operative (OP)  $OP \leq 12$  bar. Si sono individuate e caratterizzate due classi di condotte:

- Tubo PSL 1 Grado L210 con estremità lisce e rivestimento esterno di PE, che deve essere conforme alla UNI EN ISO 3183 e possedere le seguenti caratteristiche:
  - Acciaio deve essere di Grado L210;
  - Carico unitario di snervamento  $R_{t0,5 \text{ min.}} = 210$  Mpa;
  - Presenza di un rivestimento esterno in polietilene a triplo strato conforme alla norma UNI 9099.
- Tubo PSL 1 Grado L210 con estremità lisce, grezzo, che presenta caratteristiche metallurgiche uguali a quello rivestito esternamente con PE.

#### **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 è consistita nell'individuazione della metodologia da utilizzare e nella individuazione dei dati di ingresso. Per quanto riguarda i dati di ingresso, sarebbe opportuno avere i dati di gas trasportato nelle varie zone di mercato. Qualora questo dato non fosse disponibile, sono state identificate delle possibili soluzioni per ripartire il dato del volume di gas naturale trasmesso a livello nazionale, nelle varie zone di mercato. Per quanto riguarda la metodologia, l'attività si è concentrata sullo strumento di simulazione/ottimizzazione da poter utilizzare.

#### **LA 2.36 - Trasporto e stoccaggio dell'idrogeno puro e in miscela: aspetti di sicurezza e normativa per l'immissione in rete [RSE]**

*Sicurezza.* Analisi critica dei risultati delle simulazioni CFD aventi per oggetto il rilascio, dispersione e combustione dell'idrogeno da depositi sotterranei. Impostazione delle analisi per lo studio del rilascio, dispersione e combustione di una miscela H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>S da deposito sotterraneo.

*Normativa.* Analisi e sintesi dei riscontri prevenuti al questionario. Partecipazione ai lavori CIG.

#### **LA 2.38 - Stoccaggio geologico dell'idrogeno puro e in miscela: protocolli sperimentali, definizione casi studio e benchmark, impostazione del database [RSE]**

*Laboratorio idrogeno.* Reperimento dell'ultimo campione ed esecuzione delle analisi SEM, XRD e BET.

*Studi modellistici.* E' stata definita la metodologia di lavoro (modello geologico, simulazioni fluidodinamiche e geomeccaniche, analisi della stabilità delle faglie). Sono state impostate le simulazioni dei casi sintetici.

*Realizzazione del database.* Definizione dei contenuti del nuovo database e scelta del software per la sua implementazione.

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

La geometria adottata è stata tradotta in file utili per la fase di stampa, sono stati condotti diversi tentativi e si è potuta constatare una pronunciata tendenza alla deformazione planare dei piatti. Più in dettaglio, il piatto ha mostrato un elevato livello di inflessione nel senso del suo lato maggiore, utilizzando una tecnica di stampa con il pezzo posto in verticale e adottando differenti strategie di "ritenzione" del piatto (costole di sostegno, zattera alla base per la dispersione del calore) Sono state stabilite nuove e diverse strategie di stampa valutando anche la possibilità di stampare il pezzo in posizione orizzontale. L'attività è in ritardo a causa dei risultati parziali ottenuti nello sviluppo della stampa 3D per i piatti bipolari. L'attività proseguirà anche nel semestre successivo senza modifica temporale della LA 3.2.

### **LA 3.3 - Celle a combustibile sustainable by design: analisi preliminare della linea produttiva [CNR]**

Studio del mercato per identificare il sistema di presa più appropriato a soddisfare i requisiti del progetto. Esistono diversi tipi di pinze robotiche e sistemi di afferraggio (gripping tools o grippers) tra cui scegliere quando si automatizza un'applicazione di movimentazione dei materiali. Poiché tutte le parti di uno stack PEFC sono piastre di piccolo spessore (rispetto alle altre dimensioni), si è ritenuto opportuno restringere la ricerca del sistema di presa migliore al campo dei grippers a vuoto. Inizio della creazione dei moduli software del framework concettualizzato. Al fine di sviluppare e testare l'ambiente digitale e la comunicazione tra il computer e l'hardware vero e proprio si è deciso lavorare con un caso applicativo semplificato, basato su un kit MECCANO. Nella LA3.4, questa interfaccia grafica verrà adattata al sistema di assemblaggio dello stack PEFC, integrando tutti i componenti del sistema.

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

È stato effettuato il primo carico di CO<sub>2</sub> liquida nel relativo sistema di stoccaggio dell'impianto AGATUR. Sono state effettuate le prime prove di gestione e flussaggio del sistema.

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

Sono proseguite le simulazioni numeriche RANS del bruciatore definito nella LA 3.6, per caratterizzare altre condizioni operative. Sono iniziati gli scambi con la ditta individuata nella LA 3.6 per effettuare la progettazione meccanica della geometria di bruciatore sviluppata.

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

È stato avviato lo sviluppo del software di analisi wavelet di dati non stazionari provenienti da simulazioni Large Eddy Simulation. In questa fase ci si è focalizzati sull'analisi di serie temporali

monodimensionali, acquisite in un punto preciso di campionamento, definito nel dominio spaziale di calcolo.

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

In una prima fase, è stato effettuato uno studio della letteratura ed è stata effettuata la scelta della tecnica di accelerazione: direttive OpenACC su architetture Nvidia. Un primo test è stato effettuato sull'equazione di Laplace per la trasmissione del calore in una piastra metallica. Sono poi state individuate le regioni critiche del codice HeaRT da accelerare con l'utilizzo delle direttive OpenACC; è stato avviato il porting del codice originale per CPU a una piattaforma basata su GPU con nuovo compilatore nvfortran; sono state implementate le direttive OpenACC nella subroutine di cinetica chimica.

### **LA 3.11 - Effetto dell'idrogeno in miscela con gas naturale su componenti e impianti alimentati a gas: caratterizzazioni iniziali e primi test sperimentali [RSE]**

Prove di caratterizzazione a metano e con miscele metano idrogeno (<8%) del motore cogenerativo ASJA.

### **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 Workshop di progetto.

Nel mese di giugno 2023, è stato svolto il primo workshop di progetto presso la sede CNR di Messina.

### **LA 4.2 - Disseminazione e comunicazione dei risultati [ENEA]**

Le attività si sono principalmente concentrate sull'organizzazione di riunioni di coordinamento tra affidatari e cobeneficiari. Si è inoltre partecipato a meeting del programma di collaborazione tecnologica IEA Hydrogen, dell'Agenzia Internazionale per l'Energia. Nel mese di giugno 2023, è stato svolto il primo workshop di progetto presso la sede CNR di Messina.

### **LA 4.3 - Disseminazione e comunicazione dei risultati [SOTACARBO]**

Le attività di comunicazione e diffusione dei risultati hanno riguardato:

- la partecipazione al 20th ICCDU2023 con la presentazione di un poster dal titolo *"Pilot-scale development of e-fuels synthesis for hard-to-abate applications"* in cui viene descritto il progetto, con particolare attenzione alla configurazione dell'impianto e una descrizione dei risultati sperimentali preliminari (Bari 26-29.06.2023);
- la partecipazione al workshop semestrale organizzato dagli affidatari: in occasione dell'incontro tecnico presso il CNR di Messina sono stati condivisi i principali risultati raggiunti nelle LA del progetto 1.3 e verificato lo stato di avanzamento per ogni linea tematica (26.06.2023);
- la pubblicazione di n° 2 articoli originali di taglio divulgativo pubblicati sul sito Sotacarbo.it:
  - Combustibili sostenibili per l'aviazione: gli obiettivi Ue (data di pubblicazione: 08.05.2023);
  - Produzione di idrogeno da gassificazione (data di pubblicazione: 07.06.2023);
- la pubblicazione di n° 11 articoli originali di taglio divulgativo sulla rivista digitale Onlynaturalenergy.com:
  - "Copper lock" (01.01.2023)

- “Commodity bonds as a development tool” (01.01.2023)
- “Looking backward to move forward: sustainable alternatives to automobiles?” (01.01.2023);
- “The role of coal power in China’s energy transition” (01.01.2023);
- “Rossdale Power Plant” (01.01.2023);
- “New routes for hydrogen storage” (01.01.2023);
- “No justice without credibility” (01.04.2023);
- “A Criminal Lexicon for Climate Change” (01.04.2023);
- “More Biomass with Irrigation from the Sea” (01.04.2023);
- “Ahouli” (01.04.2023);
- “Direct Air Capture: Is it finally gaining momentum?” (01.04.2023).

#### **LA 4.4 - Disseminazione e comunicazione dei risultati (RSE, dal mese 1 al mese 18) [RSE]**

Le attività di disseminazione hanno visto la presentazione di: 4 pubblicazioni su riviste, 4 memorie a congressi e convegni e 1 presentazione in occasione di iniziative didattiche e culturali. Ha visto, altresì, la partecipazione ai lavori del tavolo IEA TCP-42 Underground Hydrogen Storage, la presentazione libro ANIE-RSE sull'idrogeno, tenutasi a Milano il 1°/03/2023, la partecipazione al 1° Workshop del progetto Integrato 1.3 Tecnologie dell'Idrogeno organizzato da CNR e tenutosi a Messina, che ha visto la partecipazione dei 3 enti affidatari.