

# PIANO TRIENNALE DI REALIZZAZIONE 2025-2027 DELLA RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE

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

## Tema di ricerca 1.3

### Titolo del progetto

#### Progetto Integrato Tecnologie e usi finali dell'Idrogeno

- Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile [ENEA]
- Consiglio Nazionale delle Ricerche [CNR]
- Ricerca sul Sistema Energetico [RSE]
- Alma Mater Studiorum – Università di Bologna [UBO-DIN]
- Alma Mater Studiorum Università di Bologna – Dipartimento di Chimica Industriale “Toso Montanari” [UBO-CHIMIND]
- Sapienza Università di Roma - Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali Ambiente [URM1-DICMA]
- SAPIENZA UNIVERSITA' DI ROMA - DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E AEROSPAZIALE [URM1-DIMA]
- Sotacarbo – Società Tecnologie Avanzate Low Carbon SpA [SOTACARBO]
- Università "Campus Bio-medico" di Roma [UCBM-DI]
- Università Campus Bio-medico di Roma [UCBM]
- Università degli Studi di Messina [UME-CBFA]
- Università degli Studi di Napoli Federico II [UNA-DII]
- Università degli Studi di Salerno - Dipartimento di Ingegneria Industriale [USA]
- Università degli Studi Roma Tre – Dip. Ingegneria Industriale, Elettronica e Meccanica [URM3-DIEM]
- UNIVERSITA' DEGLI STUDI NICCOLO' CUSANO [UCUS]
- UNIVERSITA' DEGLI STUDI ROMA TRE – DIPARTIMENTO DI

- INGEGNERIA CIVILE, INFORMATICA E DELLE TECNOLOGIE AERONAUTICHE [URM3-DICITA]

**Durata del progetto: 36 mesi**

**Costo proposto: 17.591.667,00 €**

## 2. DATI GENERALI DEL PROGETTO

### 2.1 Dati progetto

**Titolo del progetto**

Progetto Integrato Tecnologie e usi finali dell'Idrogeno

**Durata del progetto**

36 mesi

### 2.2 Descrizione progetto

**Abstract del progetto**

In linea con le attività portate avanti nel precedente triennio e con l'ambizione di contribuire al raggiungimento degli obiettivi delle dimensioni decarbonizzazione, sicurezza energetica e ricerca, innovazione e competitività del PNIEC, il presente progetto propone un vasto e articolato programma di ricerca che tratta, a diversi livelli, molteplici tecnologie lungo tutta la catena del valore dell'idrogeno. Le attività si concentrano su tecnologie innovative, con un grado di maturità medio-basso (TRL3-5).

Il programma di lavoro è organizzato in 3 WP tecnici ed 1 WP dedicato alla disseminazione e comunicazione dei risultati.

Il WP1 è dedicato allo sviluppo di tecnologie per la produzione di idrogeno sostenibile e allo studio del loro accoppiamento con fonti di energia rinnovabile.

Per quanto riguarda lo sviluppo di tecnologie di produzione, in continuità con le attività del triennio precedente, l'attenzione è posta su processi innovativi, alternativi alle opzioni al momento più mature (elettrolisi alcalina e PEM). Sono considerati sia processi di water splitting (elettrolisi, fotoelettrocatalisi, termolisi diretta), che processi che utilizzano feedstock carboniosi rinnovabili (e.g., biogas) o di recupero, in grado di combinare, in un'ottica di economia circolare, la produzione di idrogeno con servizi aggiuntivi, quali la gestione/recupero/valorizzazione di rifiuti di varia natura.

Relativamente all'alimentazione dei processi con fonti energetiche rinnovabili, oltre allo studio dell'accoppiamento di elettrolizzatori con impianti fotovoltaici, è prevista un'analisi sistematica dell'accoppiamento dei processi termo(elettro)chimici sviluppati nel progetto con impianti solari termici a concentrazione in grado di fornire il calore e/o l'elettricità richiesta dal processo con continuità, grazie alla disponibilità di soluzioni per l'accumulo termico.

Le attività del WP sono completate da analisi di ciclo di vita applicate ad una selezione dei processi proposti.

Le attività di ricerca previste nel WP2 hanno l'obiettivo di sviluppare tecnologie, metodologie e processi per l'accumulo e il trasporto dell'idrogeno, anche attraverso l'impiego di vettori organici liquidi (LOHC) e dell'ammoniaca, la diffusione di tecnologie power-to-gas (metanazione) e power-to-fuel (produzione di combustibili da fonti rinnovabili e CO<sub>2</sub>), processi catalitici di idrogenazione su larga scala (produzione di dimetiletere). L'elevata domanda d'energia, unita alle problematiche connesse con l'emissione in atmosfera di gas ad effetto serra, impone l'adozione di fonti energetiche rinnovabili e lo sviluppo di efficienti sistemi per immagazzinare e distribuire energia pulita, garantendo una fornitura continua e una elevata resilienza al sistema energetico. In questo contesto, le attività di ricerca del WP2 intendono favorire la penetrazione dell'idrogeno verde e dei suoi derivati, attraverso la promozione di nuovi materiali e processi basati sull'impiego di materie prime economiche e rispettose dell'ambiente e al consolidamento delle conoscenze sullo stoccaggio su larga scala e sul trasporto in sicurezza in blend con gas naturale. In prospettiva, la proposta progettuale può contribuire alla riconversione di alcuni settori industriali (es. raffinerie), ridurre l'impiego dei combustibili fossili (es. trasporti pesanti) e delle emissioni attraverso il riutilizzo della CO<sub>2</sub>, favorendo al contempo il superamento degli attuali limiti di sviluppo della filiera idrogeno legati alla sostenibilità dei costi e alla sicurezza di approvvigionamento.

Le attività ricomprese nel WP3 concorrono allo sviluppo di tecnologie, metodologie e processi per l'utilizzo di idrogeno e di suoi vettori (ammoniaca e metanolo) per gli usi finali con particolare riguardo alle applicazioni nei settori della generazione di energia elettrica e hard-to-abate, attraverso lo sviluppo di innovativi generatori a celle a combustibile, lo sviluppo di sistemi ad alimentazione flessibile tra le quali microturbine alimentate a miscele metano/idrogeno e ammoniaca/idrogeno, e di sistemi di combustione MILD di miscele ammoniaca/idrogeno (inclusa l'analisi del comportamento esplosivo di miscele ammoniaca/idrogeno), l'investigazione dello sfruttamento del metanolo in applicazioni portuali.

L'elevata domanda d'energia, unita alle problematiche connesse con l'emissione in atmosfera di gas ad effetto serra, impone l'adozione di fonti energetiche rinnovabili e lo sviluppo di tecnologie per l'adozione dell'idrogeno verde (e suoi vettori) negli usi finali, garantendo una fornitura continua e una elevata resilienza al sistema energetico. In questo contesto, le attività di ricerca del WP3 intendono favorire la

penetrazione dell'idrogeno verde e suoi vettori attraverso la promozione di dispositivi e processi con costi ridotti rispetto allo stato dell'arte (per esempio automatizzando la produzione di celle a combustibile o utilizzando tecnologie più mature quali le microturbine). In prospettiva, la proposta progettuale può contribuire all'adozione delle tecnologie connesse all'idrogeno in alcuni settori industriali (es. hard-to-abate e infrastrutture portuali), ridurre l'impiego dei combustibili fossili attraverso il superamento degli attuali limiti di sviluppo della filiera idrogeno legati ad aspetti economici e logistici (attraverso l'utilizzo di vettori).

Il progetto mira a fornire soluzioni concrete a supporto del sistema energetico italiano, a beneficio della sua sostenibilità e resilienza, contribuendo al contempo al raggiungimento degli obiettivi di sicurezza energetica.

#### **Abstract del progetto ENG**

In line with the activities carried out in the previous three-year period and with the ambition to contribute to the achievement of the objectives of the "decarbonization", "energy security" and "research, innovation and competitiveness" dimensions of the Italian National Energy and Climate Plan, this project proposes a vast and articulated research program that deals, at different levels, with multiple technologies along the entire hydrogen value chain. The focus is on innovative technologies, with a medium-to-low maturity level (TRL 3-5).

The work program is organized into 3 technical WPs and 1 WP dedicated to the dissemination and communication of results.

WP1 is dedicated to the development of technologies for the production of sustainable hydrogen and the study of their coupling with renewable energy sources.

Regarding the development of production technologies, the focus is on innovative processes, alternative to the currently more mature options (alkaline and PEM electrolysis). Both water splitting processes (electrolysis, photoelectro-catalysis, direct thermolysis) and processes that use renewable (e.g., biogas) or recycled carbonaceous feedstocks are considered. In particular, these latter processes are chosen in view of combining, in a circular economy perspective, hydrogen production with additional services, such as the management/recovery/valorization of different types of waste.

With regard to the powering of processes with renewable energy sources, in addition to the study of the coupling of electrolyzers with photovoltaic plants, the project envisages a systematic analysis of the coupling of the thermo(electro)chemical processes developed with concentrated solar thermal plants. This option allows to ensure a continuous heat and/or electricity supply to the process, thanks to the availability of solutions for thermal storage.

The activities of the WP are completed by life cycle analyses applied to a selection of the proposed processes.

The research activities planned in WP2 aim to develop technologies, methodologies and processes for the storage and transport of hydrogen, also through the use of liquid organic hydrogen carriers (LOHC) and ammonia, the diffusion of power-to-gas (methanation) and power-to-fuel (production of fuels from renewable sources and CO<sub>2</sub>) technologies, catalytic hydrogenation processes on a large scale (production of dimethylether). The high energy demand, combined with the problems connected with the emission of greenhouse gases into the atmosphere, requires the adoption of renewable energy sources and the development of efficient systems to store and distribute clean energy, guaranteeing a continuous supply and high resilience to the energy system. In this context, the research activities of WP2 aim at promoting the penetration of green hydrogen and its derivatives through the development of new materials and processes based on the use of economic and environmentally friendly raw materials, to consolidate knowledge on large-scale storage and safe transport in blends with natural gas. In perspective, the project proposal can contribute to the reconversion of some industrial sectors (e.g. refineries), reduce the use of fossil fuels (e.g. heavy transport) and emissions through the reuse of CO<sub>2</sub>, while favoring the overcoming of the current development limits of the hydrogen chain linked to cost sustainability and security of supply.

The activities included in WP3 contribute to the development of technologies, methodologies and processes for the use of hydrogen and its carriers (ammonia and methanol) for end uses, with particular regard to applications in the electricity generation and hard-to-abate sectors, through the development of innovative fuel cell generators, the development of flexible power supply systems, including microturbines powered by methane/hydrogen and ammonia/hydrogen mixtures, and MILD combustion systems of ammonia/hydrogen mixtures (including the analysis of the explosive behavior of ammonia/hydrogen mixtures), the investigation of the exploitation of methanol in port applications.

The high energy demand, combined with the problems connected with the emission of greenhouse gases into the atmosphere, requires the adoption of renewable energy sources and the development of technologies for the adoption of green hydrogen (and its vectors) in end uses, guaranteeing a continuous supply and high resilience to the energy system. In this context, the research activities of WP3 intend to promote the penetration of green hydrogen and its vectors through the promotion of devices and processes based on reduced costs

compared to the state of the art (for example by automating the production of fuel cells or using more mature technologies such as microturbines). In perspective, the project proposal can contribute to the adoption of hydrogen-related technologies in some industrial sectors (e.g. hard-to-abate and port infrastructures), reduce the use of fossil fuels by overcoming the current development limits of the hydrogen chain linked to the sustainability of costs and hydrogen logistics (through the use of vectors).

The project aims to provide concrete solutions to support the Italian energy system, for the benefit of its sustainability and resilience, while contributing to the achievement of energy security objectives.

## 2.3 TRL progetto

TRL iniziale: 3

TRL finale: 5

In linea con la visione che ha caratterizzato il precedente triennio, anche il presente progetto si focalizza principalmente su tecnologie di carattere innovativo e livelli di maturità medio-bassi.

Alla luce della vasta gamma di tecnologie ed innovazioni considerate, che si collocano in diversi punti della catena del valore dell'idrogeno (dalla produzione agli usi finali), ciascuna con un diverso grado attuale di sviluppo e per le quali sono previste attività di tipo differente, permane la difficoltà di individuare valori di TRL iniziale e finale unici per l'intero progetto. Si può comunque affermare che la maggior parte delle attività si muova nel range di TRL tra 3 e 5, arrivando a validare le tecnologie in ambiente e condizioni operative rilevanti, mediante l'uso di impianti prototipali di scala significativa già disponibili o sviluppati nell'ambito del progetto.

Rispetto al range di TRL preponderante descritto sopra, è comunque necessario sottolineare che, per alcuni dei temi più innovativi proposti, il TRL di partenza è più basso (TRL 2), mentre per alcune delle tecnologie sviluppate già a partire del precedente triennio, è previsto il raggiungimento di un grado di maturità tecnologica anche più alto (TRL 6), arrivando alla dimostrazione in un contesto rilevante.

Tra le attività con TRL di partenza più basso, si evidenziano alcuni degli studi sui sistemi fotoelettrochimici per la produzione di idrogeno, relativi all'ottimizzazione dei materiali fotoelettrodi anodici e all'identificazione di un nuovo materiale catodico per la cella fotoelettrocatalitica.

Tra i temi su cui si ambisce a raggiungere la TRL più elevata (5-6), si evidenziano i seguenti:

- Produzione di idrogeno da rifiuti agro-industriali mediante reforming in fase acquosa
- Produzione di idrogeno da gassificazione di materiali plastici non riciclabili (testing del processo e delle nuove unità sviluppate utilizzando l'impianto Faber e l'infrastruttura sperimentale di Sotacarbo)
- Reforming solare del biogas (sviluppo di un reattore e testing on-sun nella fornace solare del C.R Ricerche ENEA Portici);
- Integrazione della biometanazione in processi di depurazione delle acque (monitoraggio di un impianto pilota di biometanazione alimentato a biogas e ottimizzazione dei parametri operativi. L'efficienza e l'affidabilità del sistema saranno validate nel contesto operativo rilevante);
- Alimentazione flessibile di microturbine a gas con miscele idrogeno-metano e idrogeno-ammoniaca (test condotti sull'impianto prototipale AGATUR, equipaggiato con una microturbina)

Alle suddette attività, sono inoltre affiancate attività di modellazione, oltre che di analisi di scenari, casi di studio e aspetti normativi, alle quali non è possibile associare un livello di TRL, ma che costituiscono un elemento fondamentale per valutare in modo preliminare l'impatto della futura applicazione delle tecnologie proposte nel sistema energetico nazionale, evidenziando eventuali criticità. Tra queste, si citano in particolare attività volte a studiare ed ottimizzare l'accoppiamento di alcune tecnologie con fonti energetiche rinnovabili termiche e/o elettriche, e analisi di sostenibilità di tipo "Life Cycle Assessment".

## 2.4 Inquadramento del progetto nello stato dell'arte

### a) Stato dell'arte nazionale e internazionale relativamente alle attività previste nel progetto

L'idrogeno rinnovabile è un vettore energetico sostenibile e versatile, ormai ampiamente riconosciuto come un elemento funzionale alla transizione energetica (si veda, ad esempio, lo studio "MODELLI DI BUSINESS per l'utilizzo dell'H2 e lo sviluppo della Filiera in Italia", Confindustria, 2024), con particolare riferimento al suo utilizzo per la decarbonizzazione dei settori hard to abate, trasporti e residenziale dove l'elettrificazione (totale o parziale) risulta difficile da realizzare o dove non sono possibili alternative di decarbonizzazione più

efficienti, nonché come elemento di interconnessione tra le reti elettriche e gas al fine di fornire flessibilità al sistema energetico. Il blending di idrogeno nella rete esistente di gas naturale rappresenta una soluzione ottimale di breve-medio termine da utilizzare in parallelo alla realizzazione della European Hydrogen Backbone (inclusi gli stoccaggi geologici).

Il raggiungimento dei target europei, settati dal RepowerEU sia per la produzione domestica di idrogeno (10 Mton/anno) che per l'import di idrogeno da paesi terzi (ulteriori 10 Mton/anno), non può prescindere da una strategia di implementazione di tecnologie ed infrastrutture capaci di promuovere l'importazione di idrogeno (e suoi vettori quali ammoniaca, metano, ecc.).

Lo sviluppo delle tecnologie dell'idrogeno può facilitare lo sfruttamento delle fonti energetiche rinnovabili e fornire un elemento chiave anche in termini di sicurezza e indipendenza energetica, favorendo la diversificazione delle fonti e la riduzione dei consumi del gas naturale e diversificando le potenziali fonti di importazione. In 19 paesi europei le importazioni coprono più del 50% del fabbisogno energetico (EUROSTAT 2024) ed in Italia tale percentuale al 79,2%. Questi aspetti appaiono ancora più importanti nel contesto attuale, in cui il prezzo del gas è nuovamente in crescita, trascinando il costo dell'energia elettrica e impattando sulla ripresa della produzione industriale, oltre che sulle utenze domestiche.

Il PNIEC identifica l'idrogeno tra gli ambiti tecnologici prioritari per il sistema di ricerca italiano e allinea gli obiettivi nazionali in questo ambito con quelli europei definiti dal documento "Strategic Research and Innovation Agenda 2021 – 2027" della Clean Hydrogen Partnership, evidenziando come le iniziative R&S in corso siano strutturate con l'obiettivo di sostenere l'intera filiera industriale.

Inoltre, a novembre 2024 è stata pubblicata la strategia nazionale per l'idrogeno nella quale si identificano i principali settori industriali nei quali, per contribuire alla loro decarbonizzazione, potrebbe essere utilizzato l'idrogeno: siderurgia e trasformazione dell'acciaio, fonderia (acciaio, ghisa e metalli non ferrosi), cemento, vetro, ceramica, carta, feedstock (raffinerie e chimica) dove il gas naturale (o altre fonti fossili) può essere sostituito da idrogeno, con tecnologie di combustione di idrogeno e di miscele di gas naturale e idrogeno.

Per il medio-lungo termine, la promozione di filiere tecnologiche nazionali e il supporto allo sviluppo della European Hydrogen Backbone passa anche attraverso attività di ricerca volte a sviluppare processi e tecnologie dell'idrogeno.

Nel luglio 2024 la Strategic Research and Innovation Agenda della Clean Hydrogen Partnership è stata emendata sottolineando la rilevanza dei seguenti topic:

- circolarità nella progettazione dei materiali e dei processi di produzione, riducendo al minimo l'impatto ambientale del ciclo di vita degli elettrolizzatori, aumentando i tassi di riciclaggio dei materiali critici e ottimizzando l'uso dell'acqua potabile;
- ricerche per sviluppare metodologie affidabili per valutare gli impatti ambientali, economici e sociali delle tecnologie basate sull'idrogeno e delle relative catene del valore, compresi gli impatti ambientali dell'intero ciclo di vita, la circolarità e la sostenibilità;
- termolisi per la produzione di idrogeno rinnovabile e carbonio solido e/o altri sottoprodotti da rifiuti biogenici;
- ricerca e innovazione per l'automazione dei processi di produzione di componenti per tecnologie dell'idrogeno pulito;

Inoltre, è stata riconosciuta l'importanza dell'idrogeno geologico/naturale come potenziale via per ridurre le emissioni di gas serra nella produzione di idrogeno e interrotto il supporto (per il periodo di programmazione 2025-2027) di attività relative alla miscelazione dell'idrogeno nella rete del gas.

In questo contesto, e in continuità con il lavoro svolto nel precedente triennio RdS, questo progetto presenta un ampio piano di lavoro che punta allo sviluppo di innovazioni lungo tutta la catena del valore dell'idrogeno. Le attività sono organizzate in 3 WP tecnici (più uno dedicato alla disseminazione dei risultati), che coprono rispettivamente tecnologie legate alla produzione, al trasporto e accumulo, e agli usi finali dell'idrogeno (e suoi vettori). All'interno dei WP, le attività sono ulteriormente strutturate organicamente in macrotemi e temi coerenti con le strategie Europea e nazionale, come illustrato nel dettaglio nella sezione 2.6.

Al fine di facilitare la lettura della proposta progettuale e la comprensione del posizionamento delle attività di ricerca nel quadro dello stato dell'arte e i progressi attesi, queste sezioni introduttive sono organizzate per work package e temi di ricerca sviluppati nel progetto.

#### ----- WP1 PRODUZIONE -----

L'elettrolisi dell'acqua con tecnologie PEM o alcalina alimentate da fonti energetiche rinnovabili costituisce oggi l'opzione maggiormente consolidata e tecnologicamente matura per la produzione di idrogeno verde. Tuttavia, esistono diversi altri processi di produzione di idrogeno sostenibile, basati sull'uso di diverse combinazioni fonti energetiche sostenibili o di recupero, anche di tipo termico. Tali processi, principalmente di tipo termochimico, ibrido termo-elettro-chimico o fotoelettrochimico, potranno, dopo il 2030, affiancarsi gli impianti di elettrolisi dell'acqua basati sulle tecnologie oggi mature, per soddisfare la crescente domanda di idrogeno in modo flessibile e a costi competitivi.

Nello specifico, nel presente progetto vengono considerati processi di produzione di idrogeno da acqua mediante water splitting e processi che utilizzano feedstock carboniose rinnovabili (e.g., biogas) o di recupero (e.g., scarti e rifiuti di varia natura). Relativamente al water splitting, gli approcci considerati sono quello elettrochimico (elettrolisi dell'acqua e del vapore, con particolare riferimento all'accoppiamento con fonti energetiche rinnovabili o di recupero), quello fotoelettrochimico e quello termochimico (termolisi diretta dell'acqua). Relativamente ai processi termochimici a partire da feedstock carboniose, viene considerata un'ampia gamma di processi che include gassificazione (in gas o in acqua supercritica), reforming (in fase gassosa e acquosa), deidrogenazione catalitica, pirolisi. Grande rilevanza è data allo studio dell'accoppiamento dei processi con fonti rinnovabili termiche e/o elettriche e allo studio della loro sostenibilità con un approccio al ciclo di vita.

## MACROTEMA 1.A: IDROGENO DA WATER SPLITTING

### 1.A.1 Elettrolisi (vapore – integrazione con FER)

L'elettrolisi ad ossidi solidi (SOE) è emersa come una tecnologia promettente per la produzione stazionaria e su larga scala di idrogeno grazie alla sua elevata efficienza. Rispetto ad altre alternative come gli elettrolizzatori alcalini e a membrana elettrolitica polimerica (PEM), gli elettrolizzatori SOE presentano numerosi vantaggi: innanzitutto operano a temperature elevate (oltre 700 °C), con velocità di reazione più rapide ed efficienze più elevate fino all'80%. Negli ultimi anni, diversi studi hanno valutato la fattibilità dell'utilizzo dei SOE per la produzione e lo stoccaggio dell'idrogeno (ad es. produzione di idrogeno utilizzando SOE con recupero del calore di scarto dall'industria del cemento integrato con il ciclo Rankine; sistema ibrido basato su SOE alimentato da solare fotovoltaico e collettore solare; produzione di idrogeno utilizzando SOE alimentato da collettore parabolico e accumulo di energia termica (TES)). Studi recenti hanno evidenziato anche che l'uso simultaneo di SOE e SOFC per la produzione efficiente di idrogeno ed energia elettrica (Bianchi et al. [<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120657>]) hanno dimostrato una potenziale RTE del 49%, identificando nell'elevato consumo energetico richiesto per la generazione di vapore per l'elettrolisi SOE rappresenta un ostacolo sostanziale al raggiungimento di RTE più elevate.

Le attività progettuali mirano ad indagare l'integrazione della tecnologia di elettrolisi SOE (eventualmente reversibile) in accoppiamento con soluzioni di cicli di potenza, con accumulo e/o recupero del calore, che apportino un beneficio dal punto di vista prestazionale e comportino una riduzione dei costi specifici di produzione dell'idrogeno. Si indagherà la possibilità di integrare sistemi avanzati di desalinizzazione dell'acqua di mare che sfruttino gli stessi cicli termici.

In particolare, l'accumulo di energia termica con tecnologia ad adsorbimento (Sorption Thermal Energy Storage, STES) si distingue come una delle tecnologie più promettenti anche per applicazioni tipo Power-to-X-to-Power (P2X2P), grazie ad elevate densità energetiche, perdite termiche minime nel tempo ed una significativa flessibilità operativa. Inoltre, la medesima tecnologia permette lo sfruttamento del calore rinnovabile o di scarto per la desalinazione dell'acqua di mare con vantaggi enormi per quei sistemi per la produzione di idrogeno basati su elettrolizzatori (K. C. Ng et al., Adsorption desalination: an emerging low-cost thermal desalination method.

Desalination, 308, 161-179, 2013). Spesso questi sistemi combinano l'accumulo TES basato sull'adsorbimento con tecnologie di accumulo complementari (ad esempio, accumulo di calore latente o sensibile) per ottimizzare le prestazioni su diverse gamme di temperature. Tali sistemi si configurano quindi quali potenziali tecnologie abilitanti di sistemi integranti SOE/SOFC con fonti energetiche rinnovabili (sia elettriche che termiche) e con la produzione di idrogeno da acqua di mare (desalinizzazione). La combinazione di desalinizzazione ad adsorbimento con tecnologie di stoccaggio termico avanzate (come STES) potrà favorire un funzionamento più flessibile e continuo degli elettrolizzatori, attenuando le fluttuazioni tipiche delle fonti rinnovabili. Queste soluzioni integrate risultano quindi particolarmente adatte per applicazioni off-grid o per contesti industriali in cui sia necessario ottimizzare il bilancio energetico e idrico, contribuendo al tempo stesso alla riduzione dell'impatto ambientale complessivo del processo di produzione dell'idrogeno.

I sistemi di desalinizzazione ad adsorbimento riducono il consumo di energia rispetto ai processi tradizionali come l'osmosi inversa ed offrono un'elevata sostenibilità ambientale, rendendoli ideali per applicazioni in regioni dove l'accesso a risorse energetiche convenzionali è limitato e l'impiego di acqua potabili per la produzione di idrogeno potrebbe essere critico.

### 1.A.1b. Elettrolisi (acqua - integrazione con FER)

L'alimentazione diretta dei dispositivi di elettrolisi con fonti rinnovabili (FER) non programmabili, è una applicazione comunemente accettata per tutte le tecnologie di elettrolisi a bassa temperatura (principalmente ALK, PEM). Se da un lato la tecnologia presenta ancora alcune criticità (es. ridotti rendimenti per trasformazione e rettificazione del segnale elettrico in ingresso in presenza di carichi ridotti), unita a una disponibilità parziale di dati (es. sulla vita utile e l'eventuale usura dei dispositivi a causa di una alimentazione a carico variabile), allo stato attuale ancora problematica è la modellazione numerico-fisica del comportamento dell'elettrolizzatore alimentato da FER. Infatti, molti studi sono ancora basati sull'assunzione di un comportamento steady-state o quasi-steady-state dell'elettrolizzatore e rari sono gli esempi di simulazione dinamica con un approccio multi-physics del sistema validato sperimentalmente.

### 1.A.2 Water splitting foto(elettro)chimico

L'attività di ricerca finalizzata alla produzione di idrogeno tramite foto-elettro-scissione dell'acqua è ben documentata in letteratura con sperimentazioni a livello di laboratorio, tuttavia nel campo di celle fotoelettrochimiche per la produzione diretta di idrogeno da luce solare "bias-assisted", sono riportati dati relativi all'utilizzo di materiali non abbondanti sulla crosta terrestre e/o potenzialmente nocivi e/o ad elevato costo, ad esempio la coppia BiVO<sub>4</sub> (Vanadato di Bismuto) + Ag<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (Fosfato di argento) all'anodo e Pt (Platino) al catodo. Inoltre, i dati che si trovano sono sempre riferiti a caratterizzazioni in semicella o su celle con area attiva di massimo 1 cm<sup>2</sup>.

Lo stadio di sviluppo di questa tecnologia, rispetto alle principali alternative già affermate a livello industriale, è attualmente assai limitato causa il degrado dei materiali elettro-catalitici utilizzati nel processo e alle loro basse prestazioni. Gli sviluppi futuri saranno quindi indirizzati a migliorare le performance dei materiali concentrando l'attenzione sulla stabilità degli stessi in condizioni operative.

In particolare, la presente proposta si differenzia dallo stato dell'arte grazie alla combinazione di diverse strategie innovative, tra queste: Elettrofilatura (utilizzo dell'elettrofilatura per la preparazione di fotoanodi e fotocatodi con elevata area superficiale e struttura porosa controllata), drogaggio mirato (ottimizzazione delle proprietà dei materiali tramite drogaggio controllato con diversi elementi), materiali compositi (utilizzo di materiali compositi come promotori dell'evoluzione dell'ossigeno e dell'idrogeno per migliorare le prestazioni catalitiche).

Inoltre, non si identificano in letteratura, allo stato dell'arte, prototipi di cella di fotoelettrolisi in cui siano presenti contemporaneamente un serbatoio di acqua, un sistema di gestione dei flussi liquidi/gassosi, un sistema di connessione elettrica. Dal punto di vista commerciale la tecnologia non è presente sul mercato.

#### 1.A.3 Termolisi diretta dell'acqua (sviluppo di membrane per la separazione di O<sub>2</sub> ad alta temperatura)

L'utilizzo di membrane ceramiche per realizzare reattori per la termoscissione dell'acqua è riportato in diversi lavori di letteratura, nei quali è dimostrata, su scala di laboratorio, la possibilità di ottenere idrogeno. La competitività di questa tecnologia rispetto alle principali alternative già affermate a livello industriale è attualmente limitata sia dagli scarsi flussi di idrogeno prodotti, sia dal degrado dei materiali di membrana quando esposti per lungo tempo alle condizioni operative del processo. La ricerca è quindi attiva su due fronti: da un lato, si cerca di migliorare le prestazioni di permeazione delle membrane ottimizzandone la struttura e identificando i ceramici più performanti, dall'altro viene posta notevole attenzione allo sviluppo di materiali più resistenti nelle condizioni di esercizio dei reattori.

### MACROTEMA 1.B: IDROGENO DA FEEDSTOCK CARBONIOSI RINNOVABILI O DI RECUPERO

#### 1.B.1a Idrogeno da rifiuti agroindustriali mediante gassificazione in acqua supercritica

I residui e i sottoprodotti del settore primario e delle industrie di trasformazione di prodotti agricoli sono costituiti da grandi quantità di materiale organico (carboidrati, proteine, grassi, oli ecc.) con elevati valori di BOD, COD e solidi sospesi. Per l'alto contenuto di nutrienti, tali scarti agroindustriali sono causa di importanti problemi di inquinamento, se non adeguatamente gestiti o smaltiti, ma, allo stesso tempo, possono rappresentare una nuova risorsa se opportunamente recuperati e trasformati in prodotti a più alto valore aggiunto, secondo il concetto di bioraffineria. In particolare, lo sviluppo di processi e tecnologie basati sulla conversione dei residui di scarto in combustibili alternativi, come biometano o bioidrogeno, è una delle priorità dell'Europa, come dimostrano i numerosi bandi di ricerca promossi dall'industria europea. Tuttavia, persistono significative difficoltà nello sviluppo di filiere agroindustriali-bioenergia soprattutto nel caso di biomassa umida caratterizzata da basso potere calorifico, deperibilità e difficoltà di stoccaggio.

Recentemente la reazione di gassificazione in acqua supercritica ha ricevuto particolare attenzione come alternativa ai metodi convenzionali.

Ad oggi, risultano limitati gli esempi di utilizzo di catalizzatori solidi per la gassificazione supercritica di reflui e i pochi esempi presenti riferiscono peraltro l'impiego di formulazioni a base di metalli nobili per l'ottenimento di rese significative a H<sub>2</sub> [Su, et al. *Supercritical water gasification of food waste: Effect of parameters on hydrogen production*, *International Journal of Hydrogen energy*, 2020, 45 (29)]. Sebbene il proof of concept per la SCWG esista già, questa tecnologia non è completamente validata in ambiente di laboratorio a causa di diversi ostacoli tecnologici. Attualmente, i processi in condizioni supercritiche sono tipicamente implementati a bassi livelli di maturità tecnologica (TRL < 4) e senza controllo di selettività (processi non catalitici), comportando la formazione di sottoprodotti che complicano le fasi di purificazione e influiscono negativamente sull'economia del processo. Le attività di ricerca qui proposte intendono affrontare queste problematiche integrando le potenzialità della tecnologia dell'acqua supercritica con l'efficienza di un catalizzatore 3D, capace di controllare accuratamente la velocità di idrolisi, la solubilità dei componenti organici e favorire percorsi chimici ed energetici più vantaggiosi per la produzione di bio-combustibili gassosi. La presenza di un catalizzatore attivo nella SCWG è essenziale per ridurre le rese di char, diminuire la dimensione del reattore (fondamentale in un'ottica di produzione decentralizzata) e aumentare la conversione del carbonio. Tuttavia, pochi studi in letteratura trattano applicazioni catalitiche della SCWG, evidenziando principalmente l'uso di catalizzatori omogenei e costosi a base di metalli nobili (es. Rh, Ru) per il trattamento di singoli composti modello, con forti limitazioni nell'applicazione a materie prime reali a causa delle condizioni gravose e della formazione di materiali inorganici che causano la disattivazione del catalizzatore [H. Su et al., *Recent advances in supercritical water gasification of biowaste catalyzed by transition metal-based catalysts for hydrogen production*, *Renewable and Sustainable Energy Review*, 2022]. Sia i reflui acquosi agroindustriali che la fase solida finale ottenuta dopo il processo contengono prodotti ad alto valore aggiunto che possono essere recuperati per aumentare la sostenibilità economica dell'intero processo. A tal proposito ad oggi l'estrazione di sostanze organiche avviene mediante l'impiego di tradizionali solventi organici, con evidente impatto ambientale. Per questo la sintesi di nuovi solventi green e procedure innovative che integrano l'estrazione con la sonicazione miglioreranno i tempi di recupero e le rese dei composti [Balu, A. M. et al., *Valorisation of orange peel residues: waste to biochemicals and nanoporous materials*. *ChemSusChem*, 5(9), 2020]. I flussi acquosi derivanti dalla SCWG possono essere nuovamente riciclati nel reattore o, se necessario, trattati.

L'applicazione di metodologie di sintesi innovative basate sulla stampa 3D di materiali supportati con metalli non nobili (es. Ni, Fe e Mn), permetterà inoltre di sviluppare catalizzatori eterogenei con caratteristiche modulabili, resistenti a fenomeni di sinterizzazione del metallo, degradazione del supporto, ostruzioni a causa dei depositi di Sali presenti negli stream reali o disattivazione a causa delle condizioni di reazioni caratterizzate da alte pressioni e temperature [S. Danaci et al., *Scaling up of 3D printed and Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coated reactors for CO<sub>2</sub> methanation*, *Reaction Chemistry & Engineering*, 2019].

Alla luce di quanto sopra, la validazione sperimentale di una tecnologia catalitica di gassificazione in acqua supercritica richiede avanzamenti nei catalizzatori, nei materiali e nei sistemi integrati. Lo studio qui riportato focalizza l'attenzione sullo sviluppo di catalizzatori solidi a base di metalli "non nobili" e robusti meccanicamente nelle condizioni di processo, con un profilo positivo di attività-selettività e velocità di conversione della massa organica apprezzabili a più bassa temperatura mediante impiego di reattori progettati "ad hoc" per l'impiego di catalizzatori sia in fase polverosa che strutturati e il loro recupero, funzionale al reimpiego.

### 1.B.1b Idrogeno da rifiuti agroindustriali mediante integrazione di HTC e APR

Attualmente, a livello nazionale e internazionale, la produzione di idrogeno tramite l'integrazione del processo di HTC (Hydro Thermal Carbonization) e APR (Aqueous Phase Reforming) rappresenta un campo di ricerca emergente e promettente, ma ancora in fase di sviluppo. Recenti studi hanno dimostrato la potenzialità dell'HTC di trasformare scarti agro-industriali in materiali carboniosi e frazioni liquide ricche di composti organici utili per la produzione di idrogeno. L'APR è una tecnologia emergente per la produzione di idrogeno grazie alle più basse temperature di processo e a un'efficienza tecnologica relativamente più elevata, con conseguenti minori costi operativi. Particolarmente interessante è la valorizzazione degli scarti agroindustriali mediante APR che necessita dell'integrazione di una fase di pretrattamento al fine di ottenere una frazione idrosolubile. In questo senso, diventa fondamentale l'integrazione con il processo di HTC per mantenere sia un elevato contenuto di materia organica che una composizione favorevole all'APR nell'acqua di processo. Attualmente, la sfida principale nell'APR è associata alla realizzazione di catalizzatori stabili ed economici (rispetto a quelli tradizionali) e del supporto, elemento cruciale per ottenere un'elevata conversione del substrato e un'elevata selettività verso l'idrogeno.

### 1.B.2 Idrogeno da rifiuti dell'industria chimica

Nell'ambito delle bioraffinerie vi è una buona disponibilità di (poli)alcoli, sia come prodotti, come il bioetanolo, sia come sottoprodotti, come il glicerolo grezzo, che, per ragioni differenti, possono essere valorizzati per la produzione di idrogeno [Y. Liu et al., Recovery and utilization of crude glycerol, a biodiesel byproduct, RSC Adv 12 (2022) 27997–28008]. Il processo proposto in questa LA mira a produrre una corrente ricca di idrogeno a partire da (poli)alcoli di interesse delle bioraffinerie e consiste in un'operazione ciclica in reattori batch operanti a medie temperature ( $\leq 300$  °C), con aggiunte alternate di bioalcol e acqua al metaborato di sodio. Il processo consente la produzione simultanea di un gas ricco di idrogeno e di preziosi sottoprodotti a base di carbonio, valorizzando il carbonio alimentato con il bioalcol. Rispetto ai tipici processi di produzione di idrogeno, opera in condizioni più moderate in termini di temperatura (rispetto allo SR) o di pressione (rispetto all'APR) e utilizza un materiale di basso pregio, quale, appunto, il metaborato di sodio. In precedenti studi condotti dal CNR [A. Di Nardo et al., Unlocking glycerol Potential: Novel pathway for hydrogen production and Value-Added chemicals, Chemical Engineering Journal 500 (2024)], sono stati evidenziati i seguenti vantaggi:

Condizioni operative blande (temperatura  $\leq 300$  °C; pressione iniziale prossima a quella atmosferica, pressione finale  $\leq 50$  bar);

Utilizzo di un materiale di basso pregio (metaborato di sodio), al posto di catalizzatori a base di nichel o metalli nobili;

Produzione di sottoprodotti ad elevato valore aggiunto, il cui valore può contribuire alla riduzione del costo dell'idrogeno e della potenza elettrica da esso prodotta;

Produzione di idrogeno in concentrazioni superiori a quelle ottenibili attraverso lo SR e l'APR, richiedendo, quindi, processi di separazione di dimensioni ridotte.

### 1.B.3 Idrogeno da rifiuti domestici tramite deidrogenazione catalitica

Le ricerche attuali nel campo della produzione di idrogeno mediante deidrogenazione parziale di composti organici sono rivolte all'utilizzo di idrocarburi naturali a lunga catena, provenienti da scarti liquidi vegetali, allo sviluppo del catalizzatore e al miglioramento delle prestazioni catalitiche, attraverso la realizzazione di nuovi materiali catalitici più efficienti in grado di operare in condizioni processuali più favorevoli.

Ad oggi, non vi sono brevetti o sperimentazioni in scala industriale nella produzione catalitica di idrogeno da scarti liquidi organici. Difatti, il processo di deidrogenazione è ancora noto solo a livello di studi scientifici, molti di tipo catalitico di base e pochi a livello di modelli cinetici e termodinamici. Le molecole investigate ai fini della produzione di idrogeno sono principalmente etanolo, acido formico e ciclo-alcani, in ragione della relativamente alta resa in idrogeno e della bassa tossicità di queste molecole. L'utilizzo di oli, con il loro contenuto in acidi grassi, ovvero a lunga catena, risulta potenzialmente più promettente rispetto agli acidi ed alcoli leggeri.

Esistono diversi studi riguardanti lo sviluppo di catalizzatori per la deidrogenazione degli idrocarburi. I catalizzatori a base di metalli nobili sono i sistemi catalitici più investigati nel tempo nella reazione di deidrogenazione, in special modo a base di platino. Inoltre, molti dei lavori presenti sull'argomento, affrontano il processo di idrogenazione su piccola scala di laboratorio, utilizzando reattori tipo autoclave (CSTR) ed alimentazione discontinua, in condizioni quindi che si discostano molto dalla reale pratica industriale.

L'attività proposta è volta, invece, allo studio di formulazioni catalitiche innovative a base di metalli di transizione (i.e. combinazioni o leghe di Fe, Co, Ni, Pt, Ir Mo, Ce, Zn, Cu, e Mn), nonché sulla base delle proprietà chimico-fisiche e di tessitura degli stessi. Tra i metalli "non nobili" cataliticamente attivi nella reazione di idrogenazione, il ferro è di particolare interesse perché in grado di "polarizzare" efficacemente il legame carbonio-idrogeno, oltre ad essere un metallo economico e non presenta criticità di approvvigionamento perché di facile reperibilità (ovvero appartiene alla classe dei materiali non critici, NO-Critical-Raw-Material), dunque anche reperibile facilmente attraverso gli attuali canali di recupero dei materiali ferrosi. L'utilizzo di ferro in combinazione con altri metalli, quali ad esempio nichel e rame, rappresenta un'ipotesi percorribile per aumentare significativamente la selettività verso il rilascio di idrogeno e diminuire l'attività di scissione del legame C-C.

### 1.B.4 Idrogeno da rifiuti plastici mediante gassificazione

La richiesta di materie plastiche, ampiamente utilizzate in molti settori industriali e non (elettronica, edilizia, sanità, agricoltura, ecc.) è

significativamente cresciuta dal 1990 a oggi. Nel 2020 la produzione globale ammontava a 367 milioni di tonnellate con proiezioni di crescita fino a 590 milioni di tonnellate entro il 2050. Solo il 10% dei rifiuti di plastica è riciclato e oltre il 60% è relegato in discarica: ne consegue una dispersione incontrollata di contaminanti (microplastiche e additivi) con il correlato e drammatico aumento degli impatti sull'ambiente e sulla salute. In questo allarmante quadro, i processi di conversione termo-chimica, tra cui pirolisi e gassificazione, rappresentano potenziali alternative all'incenerimento dei rifiuti di plastica [Zhang S. et al., 2024 (<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122975>); Parrillo F. et al., 2024 (<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c04280>); Nanda S. et al., 2021 (<https://doi.org/10.1007/s10311-020-01094-7>)].

In particolare, la gassificazione appare un metodo flessibile per gestire rifiuti di plastica, anche miscelati, e altre tipologie di rifiuti urbani, per valorizzarli attraverso la conversione in altri prodotti chimici e altre fonti di energia (idrogeno), nonché per ridurre l'inquinamento ambientale [Midilli A. et al., 2022 (<https://doi.org/10.1002/er.7498>); Han S.W. et al., 2022 (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121944>)]. Tra questi, il processo a letto fluido con l'utilizzo di soli vapore e ossigeno come agenti gassificanti ha il vantaggio di contribuire ad un aumento della concentrazione dell'idrogeno nella miscela del syngas (grazie all'utilizzo del vapore) ed eliminare l'azoto dal syngas, per poter arrivare a un vettore energetico con elevata concentrazione di idrogeno.

L'ostacolo principale dello sviluppo della gassificazione applicata alle plastiche è la presenza di elevate quantità di catrame (tar) nel syngas. Il tar è una miscela di idrocarburi più pesanti [Rios M. L. V. et al., 2018 (<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.12.002>)] con elevata viscosità, che può intasare le parti del reattore e comportare costose operazioni di pulizia a valle [Guo F. et al., 2020 (<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122263>)]. Tuttavia, le molecole di idrocarburi pesanti possono essere ridotte "crackizzate" ad idrocarburi più leggeri, sia gassificando a più alte temperature (> 900°C), sia attraverso l'impiego di materiali catalitici [Abu El-Rub Z. et al., 2024 (<https://doi.org/10.1021/ie0498403>)].

I catalizzatori possono svolgere un ruolo essenziale nella degradazione dei rifiuti plastici permettendo maggiori efficienza e selettività oltre che un minor consumo energetico. L'utilizzo di catalizzatori dopati con metalli (Ni, Fe, Ce) e con miscele di vapore e CO<sub>2</sub>, hanno mostrato come sia possibile aumentare la resa del processo a favore della produzione di idrogeno. Questo anche grazie all'ottimizzazione di parametri di processo, come temperatura, rapporto di vapore e tempo di residenza [Sancho J.A. et al., 2008 (<https://doi.org/10.1021/ie071023q>)].

Sotacarbo e UniVAN hanno condotto esperimenti su due tipologie di rifiuti (uno con poliolefine, l'altro con un rapporto plastica biomassa 4:1) in un reattore a letto fluido bollente. L'olivina è stata utilizzata come materiale del letto per la rimozione del catrame, ma ha mostrato una ridotta prestazione di cracking del catrame con 59 g/Nm<sup>3</sup> e 34 g/Nm<sup>3</sup> rispettivamente solo per la plastica e per la miscela plastica-biomassa. Inoltre, i risultati hanno mostrato che un gas di sintesi di alta qualità con efficienze di conversione del carbonio del 76-86% sembra sia possibile da ottenere [Parrillo F. et al., 2023 (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127220>)].

In sintesi, a seconda dei monomeri e delle proprietà fisico-chimiche della tipologia di plastici, vi è un grado di alterazione nella qualità e distribuzione del prodotto di gassificazione variabile con diversi agenti di gassificazione e catalizzatori per la purificazione del tar. La progettazione e la preparazione di catalizzatori altamente attivi e stabili rimangono, quindi, le principali sfide pratiche per l'impiego industriale dei processi termo-chimici per la gestione dei rifiuti di plastica.

Un'ulteriore soluzione alternativa all'inserimento dei catalizzatori all'interno del reattore di gassificazione è lo sviluppo di un reattore catalitico a letto fisso (sezione di Hot gas Cleaning), a valle del gassificatore. Questa soluzione permette di far avvenire il cracking del tar presente nel syngas in un ambiente controllato dal punto di vista del processo, con consumo minore di catalizzatore e con la possibilità di preservare i catalizzatori dal contatto con ceneri e polveri che ridurrebbero il loro effetto. Inoltre, la riduzione della concentrazione del tar prevista all'interno del reattore di Hot gas Cleaning, può permettere lo sviluppo dei processi a valle (a membrane o con filtri molecolari) indispensabili per arrivare a produrre una corrente con elevate concentrazioni di idrogeno.

#### 1.B.5a Idrogeno da biogas/biometano mediante pirolisi in bagni fusi

Negli ultimi anni, la pirolisi di miscele contenenti metano (ad es. gas naturale, biogas, biometano) è stata oggetto di un crescente interesse da parte dell'industria e della ricerca come processo per la produzione di idrogeno ad emissioni nulle.

L'interesse per il processo risiede principalmente nella possibilità di separare e catturare facilmente il carbonio prodotto in forma solida; inoltre, la possibilità di recuperare prodotti carboniosi valorizzabili sul mercato, offre una prospettiva di superamento della semplice carbon sequestration (e delle relative problematiche) in favore di una vera e propria carbon utilization. Per evidenziare questi vantaggi, l'idrogeno prodotto da pirolisi del gas naturale viene denominato "turchese", per distinguerlo da quello "blu" ottenuto da steam reforming combinato a CCS; se invece il processo è alimentato con energia e materie prime rinnovabili (e.g., biometano o biogas) l'idrogeno prodotto può essere considerato "verde".

La pirolisi del metano fa parte degli obiettivi di innovazione definiti dall'agenda strategiche di ricerca e innovazione (SRIA) al 2050 definita dal partenariato pubblico-privato europeo Processes4Planet (in precedenza SPIRE); inoltre, nel giugno del 2024 la Clean Hydrogen Partnership ha aggiornato la propria SRIA nel 2024 includendo la "termolisi per la produzione di idrogeno e carbone da rifiuti biogenici" tra i processi di interesse. A questo si aggiunge l'interesse di importanti gruppi industriali come BASF e ENI, che hanno avviato negli ultimi anni programmi di ricerca e sviluppo industriale relativi a questo processo.

Ad oggi, sono stati considerati diversi approcci: processi termochimici catalitici e non-catalitici, processi al plasma termico o non-termico, utilizzo di bagni di metalli liquidi o sali fusi, ognuno con diversi vantaggi, svantaggi e livello di maturità tecnologica [Schneider et al., 2020,

<https://doi.org/10.1002/cite.202000021>). Nel 2021 sono entrati in esercizio i primi impianti di taglia commerciale basati sull'uso di reattori al plasma, mentre i processi in bagni fusi sono ancora oggetto di studi meno avanzati, principalmente su scala di laboratorio. Le temperature operative attualmente considerate sono molto elevate ( $\geq 1000^\circ\text{C}$ ), con lo scopo di ottenere elevate rese di reazione. A seconda del processo e delle condizioni operative utilizzate, è possibile ottenere prodotti carboniosi di diverso valore commerciale e strategico. I processi ad oggi più maturi consentono principalmente di recuperare prodotti amorfi come il coke, adatto ad esempio per l'alimentazione delle fornaci siderurgiche, o prodotti più sofisticati come il carbon black, che trovano impiego nell'industria della gomma, delle vernici o nella produzione di batterie. Studi preliminari, hanno dimostrato che è possibile modulare le condizioni operative di alcuni processi basati sull'uso di bagni liquidi per ottenere un materiale critico come la grafite, che trova impiego, ad esempio, nella produzione di componenti per batterie.

Relativamente al processo in bagni fusi qui considerato, la letteratura è poco estesa e prevalentemente caratterizzata da studi su apparati di laboratorio di dimensioni molto limitate (Lang et al., 2024, <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c03860>), volti più a dimostrare la fattibilità del processo, che ad acquisire informazioni utili per lo scaleup e l'implementazione industriale. C'è quindi ancora molto spazio per sviluppare know-how utile, anche considerando materiali e condizioni operative già precedentemente esplorate. Inoltre, in ragione della termodinamica della reazione, l'attenzione è attualmente concentrata su temperature operative intorno o al di sopra dei  $1000^\circ\text{C}$ , con evidenti sfide per l'implementazione industriale dal punto di vista impiantistico, dei materiali e della sicurezza. Lo sviluppo di soluzioni tecnologiche per condurre il processo a temperature inferiori a quelle attualmente considerate è quindi di particolare interesse, anche in vista della possibilità di alimentare il processo con calore rinnovabile prodotto, ad esempio, da impianti solari termici a concentrazione. A tal fine, è necessario identificare materiali, sia costruttivi che per i bagni fusi, che permettano di operare a temperature inferiori in modo sicuro ed efficiente, ottenendo prodotti carboniosi valorizzabili sul mercato; inoltre, vanno valutate configurazioni di processo che, combinando operazioni di reazione e separazione, permettano di raggiungere rese di reazione elevate nonostante le più basse temperature operative.

#### 1.B.5b Idrogeno da biogas/biometano (mediante reforming solare del biogas)

La possibilità di sostenere termicamente il processo di produzione di idrogeno da reforming di biometano o biogas mediante un impianto solare termico a concentrazione (CST), ottenendo un syngas pienamente sostenibile in quanto prodotto a partire da materie prime e fonti energetiche rinnovabili, è stata più volte investigata dal punto di vista teorico/modellistico nella letteratura scientifica. Tuttavia, molto rari sono i sistemi dimostrativi, su scala pre-pilota o pilota, che hanno validato tale tecnologia, specialmente in condizioni reali di esercizio on-sun, includendo il balance of plant necessario ai recuperi termici dagli effluenti gassosi.

Sulla base delle temperature operative, nelle attività dimostrative documentate in letteratura si distinguono due approcci fondamentali: condurre il processo alle temperature convenzionali del reforming degli idrocarburi ( $> 700^\circ\text{C}$ ) o a temperature notevolmente più basse ( $< 600^\circ\text{C}$ ), normalmente evitate nella pratica industriale perché associate a livelli di conversione dei reagenti eccessivamente basse.

Il processo a bassa temperatura può essere alimentato termicamente utilizzando impianti CST a concentrazione lineare, riscaldando il reattore indirettamente con liquidi termovettori sostenibili e dalle ottime proprietà termiche, oltre a poter contare su soluzioni per l'accumulo termico già consolidate che consentono di operare in modo continuo e stabile. Tuttavia, per raggiungere conversioni accettabili alle basse temperature, occorre operare con reattori a membrana che, pur essendo una tecnologia che si è dimostrata estremamente promettente in questo contesto, ancora risentono di problemi legati alla disponibilità di membrane per la separazione di idrogeno stabili e durature.

Il processo ad alta temperatura è fattibile con l'uso di un sistema CST a concentrazione puntuale e non richiede l'uso di un reattore a membrana, ma presenta maggiori criticità per l'accoppiamento con l'impianto solare. Da questo punto di vista, l'approccio più seguito consiste nell'irraggiamento diretto, ovvero nello sviluppo di reattori/ricevitori che vengono alloggiati nel fuoco del sistema di concentrazione e direttamente esposti alla radiazione solare concentrata. Se da un lato questa scelta consente di raggiungere temperature più elevate, dall'altro espone il processo a forti fluttuazioni nella potenza termica fornita e rende estremamente complesso l'accoppiamento con un sistema di accumulo termico. Il riscaldamento indiretto del reattore utilizzando aria come fluido termovettore, che è l'approccio considerato in questo progetto, potrebbe risolvere questi problemi, ma è ancora necessaria una più estensiva validazione della tecnologia in condizioni rilevanti di esercizio.

#### MACROTEMA 1.C: ACCOPPIAMENTO DI PROCESSI TERMO(ELETTRO)CHIMICI CON IMPIANTI CST

Diversi sono i processi di produzione o conversione dell'idrogeno, lungo tutta la catena del valore, che necessitano di calore e/o elettricità. È chiaro che tali processi debbano essere alimentati con energia sostenibile affinché le tecnologie dell'idrogeno possano effettivamente svolgere un ruolo chiave nella transizione energetica. Questo pone diverse sfide, principalmente legate alla scelta dei migliori punti di integrazione, alla gestione del comportamento dinamico del sistema e al disallineamento tra i profili di generazione e consumo dell'energia. La simulazione numerica di sistema è un valido supporto per affrontare queste sfide e per valutare la performance tecnico economica del processo nel suo insieme. Relativamente allo studio dell'accoppiamento tra elettrolizzatori e sistemi fotovoltaici, la letteratura è piuttosto vasta ed esistono diversi strumenti disponibili per la simulazione numerica. Diverso è il quadro nel caso di processi che richiedono calore ad alta temperatura, eventualmente in combinazione con energia elettrica, che possono essere accoppiati con impianti solari termici a concentrazione (CST). In questo caso, relativamente alla sola parte solare del sistema, sono stati sviluppati diversi

strumenti nel corso degli anni. Ad esempio, il National Renewable Energy Laboratory (NREL) ha sviluppato SAM, un applicativo desktop per l'analisi tecno-economica di impianti rinnovabili, inclusi sistemi CST. Con la stessa impostazione, il DLR, centro Aerospaziale Tedesco, ha sviluppato Greenius e strumenti analoghi sono stati realizzati dagli enti di ricerca e le università maggiormente coinvolti nel settore CST. Sebbene questi strumenti siano ormai consolidati, essi non risultano particolarmente indicati per simulare sistemi CST (o CST/PV) accoppiati con processi chimici, dove si richiede un elevato grado di personalizzazione del modello numerico, anche in funzione del processo considerato.

#### MACROTEMA 1.D: ANALISI DI SOSTENIBILITA'

L'LCA dei processi di produzione dell'idrogeno è uno strumento essenziale per quantificare gli impatti ambientali di diverse tecnologie e supportare decisioni orientate alla sostenibilità. Finora, la letteratura si è concentrata principalmente sull'analisi di processi convenzionali, come il reforming del gas naturale con e senza cattura della CO<sub>2</sub>, la gassificazione del carbone e, in misura minore, l'elettrolisi alimentata dalla rete elettrica. Tuttavia, con l'evoluzione delle tecnologie per la produzione di idrogeno, diventa cruciale estendere l'LCA a nuovi processi innovativi, come i processi avanzati di water splitting o processi basati sull'utilizzo di feedstock carboniose rinnovabili di recupero. In tal modo, è possibile valutare con precisione il loro potenziale di riduzione delle emissioni di gas serra rispetto alle tecnologie tradizionali, tenendo conto di fattori quali l'efficienza energetica, il consumo di materie prime, l'uso del suolo e la gestione dei sottoprodotti. Inoltre, l'LCA permette di identificare le principali criticità ambientali lungo l'intero ciclo di vita, al fine di soddisfare i requisiti di sostenibilità sempre più stringenti dettati dalle normative. Infine, l'analisi LCA è essenziale anche per valutare la scalabilità dei nuovi processi, aiutando a comprendere il reale potenziale di espansione di queste tecnologie e identificando le soluzioni più efficienti e sostenibili per una produzione su larga scala. In sintesi, mentre la letteratura esistente si è concentrata principalmente sui processi tradizionali, le attività qui previste sono mirate allo studio dei processi emergenti studiati nel progetto, fornendo dati fondamentali per la transizione verso un'economia dell'idrogeno più sostenibile e in linea con le nuove normative ambientali.

#### ----- WP2 TRASPORTO E ACCUMULO -----

Il trasporto dell'idrogeno dai siti di produzione agli utenti finali, nonché la sua importazione quale componente del mix energetico nazionale, potrà avvenire attraverso la sua conversione in metano, sfruttando l'infrastruttura di trasporto e distribuzione esistente, ovvero anche attraverso l'uso di carrier diversificati (ad es., ammoniaca, LOHC) che permetteranno di superare i limiti geografici di tale infrastruttura. In questo ambito, risulta fondamentale massimizzare l'efficienza dei processi di sintesi dei carrier e di riconversione degli stessi in idrogeno, indagando sugli aspetti tecnologici, economici ed ecologici dei vettori alternativi oltre all'ammoniaca. Lo stoccaggio di grandi volumi di idrogeno sarà inoltre di fondamentale importanza per sostenere la sempre maggiore penetrazione delle fonti rinnovabili non programmabili, nell'ottica di migliorare la sicurezza e la resilienza del sistema energetico. Tra le modalità di stoccaggio, quella geologica offre sicuramente le migliori prospettive anche se esistono ancora aspetti tecnologici che richiedono opportuni approfondimenti nell'ambito della ricerca. Le attività proposte per il WP2 hanno l'obiettivo di rispondere a queste sfide e sono articolate in cinque macrotemi: power-to-X, vettori liquidi dell'idrogeno, immissione in rete, idrogeno bianco e stoccaggio geologico.

#### MACROTEMA 2.A: POWER-TO-X

##### 2.A.1 Power-to-gas (metanazione)

I sistemi bioelettrochimici sono a oggi studiati nei laboratori di tutto il mondo ed attraggono sempre maggiore attenzione. Tuttavia, non sono ancora stati sviluppati impianti industriali rilevanti a piena scala. L'elettrometanogenesi, in particolare, è un processo già ben sperimentato in Italia e all'estero a livello di laboratorio (in Italia da RSE e da Università di Roma La Sapienza) e la comunità scientifica sta conducendo diversi studi finalizzati alla realizzazione di impianti pilota (es. in Spagna). Soluzioni innovative che prevedono l'uso della CO<sub>2</sub> di origine geotermica (da siti caratterizzati da importanti emissioni naturali) e la sperimentazione di dispositivi di elettrometanogenesi installati presso impianti geotermici sono di particolare interesse, non essendo tali soluzioni mai state proposte in passato. Sempre nell'ambito del power-to-gas, gli studi sulla biometanazione sono stati indirizzati all'ottimizzazione del processo al fine di aumentarne efficienza e stabilità; tuttavia, le soluzioni disponibili, seppur relativamente mature, presentano ancora notevoli margini di miglioramento. Al momento, non sono disponibili studi scientifici, basati su dati ottenuti a scala pilota o attraverso modelli matematici, su impianti in cui sia stata validata l'integrazione della biometanazione con il processo di depurazione acque.

##### 2.A.2 Power-to-fuels

Per le tecnologie power-to-fuel, ossia la produzione di combustibili quali metano, metanolo, dimetiletere, ecc., da idrogeno rinnovabile e CO<sub>2</sub>, si è riscontrato, negli ultimi anni, un crescente interesse che ha portato al lancio di importanti iniziative e numerose attività di ricerca. Tuttavia, permane la necessità di sviluppare processi, materiali e componenti impiantistici per rendere le tecnologie sostenibili dal punto di vista ambientale, economico e sociale. Da questo punto di vista, la comunità scientifica si sta progressivamente affidando a principi che mirano a prevenire la produzione di rifiuti piuttosto che a trattarli o smaltirli, promuovendo l'uso di materie prime rinnovabili, riducendo l'uso di sostanze tossiche e migliorando l'efficienza energetica dei processi chimici. Tra questi obiettivi, la promozione di tecniche di produzione sostenibili riveste un'importanza cruciale. A tal fine, l'impiego delle metodologie di sintesi basate sulle microonde,

in grado di ottimizzare il riscaldamento delle miscele di reazione e ridurre drasticamente il consumo di energia e sulla meccanochimica attraverso vibromulini, in grado di eliminare totalmente l'uso di solventi permettendo la sintesi in fase solida attraverso l'azione meccanica, offrono numerosi vantaggi di carattere sia economico che di sostenibilità ambientale. In entrambi i casi è possibile ottenere materiali dalle caratteristiche paragonabili ai metodi di sintesi tradizionali con processi a singolo stadio e/o one-pot, con riduzione notevole dei tempi di reazione (da giorni ad ore) e con rimarcabile aumento della produttività di materiale.

## MACROTEMA 2.B: VETTORI LIQUIDI DI H<sub>2</sub>

### 2.B.1 Ammoniaca

Nell'ambito di sviluppo di sistemi per la sintesi dei carrier dell'idrogeno, la produzione sostenibile di ammoniaca è di rilevante importanza. L'ammoniaca si presenta come una valida soluzione, agendo da mezzo indiretto per lo stoccaggio e il trasporto sicuro ed efficiente dell'idrogeno. La sua capacità di essere facilmente liquefatta e trasportata ne fa un'opzione promettente per la distribuzione di H<sub>2</sub> su larga scala. Attualmente, su scala commerciale l'ammoniaca viene prodotta dal processo Haber-Bosch, in cui l'N<sub>2</sub> dall'atmosfera viene combinata con l'H<sub>2</sub> (in sistemi a letti impaccati) ottenuto tramite reforming del metano ad alta temperatura (circa 500° C) ed elevata pressione (circa 200 bar) impiegando catalizzatori a base di ferro in reattori a letti impaccati di grande taglia. Per produrre ammoniaca green, utilizzando l'idrogeno prodotto dall'elettrolisi dell'acqua, è necessario operare un "down size" del processo di sintesi commerciale al fine di rispettare la taglia associata alla produzione di idrogeno da fonte rinnovabile, e ottimizzarne le prestazioni al fine di massimizzare la resa energetica. Lo sviluppo di nuovi processi per la sintesi dell'ammoniaca richiede lo sviluppo di una nuova generazione di catalizzatori e reattori per affrontare l'intensificazione del processo e ridurre le dimensioni dei sistemi a letto impaccato convenzionali, attualmente utilizzati solo per applicazioni centralizzate e su larga scala.

Relativamente alla produzione di idrogeno via cracking dell'ammoniaca, a livello industriale, la decomposizione dell'ammoniaca viene realizzata in reattori a letto compatto riscaldati elettricamente, operanti a temperature elevate (800-900 °C) e utilizzando catalizzatori a base di nichel (Ni). Successivamente, un sistema PSA (Pressure Swing Adsorption) rimuove l'azoto (N<sub>2</sub>) e l'NH<sub>3</sub> non reagito, producendo H<sub>2</sub> con elevata purezza, destinato all'alimentazione delle celle a combustibile PEM. Tuttavia, l'efficienza di questi reattori è limitata da fattori termodinamici, dalla necessità di elevate temperature operative e dalla bassa velocità di assorbimento del calore [Z.D. Abd Ali et al., Ammonia as hydrogen storage media, sustainable method to hydrogen evolution, J. Phys. Conf. Ser. 1032 (2018) 012062].

Anche per la decomposizione dell'ammoniaca si rende necessario, quindi, lo sviluppo di sistemi catalitici più flessibili, meno costosi, efficienti e compatti con un elevato rapporto superficie-volume, che consentano un controllo termico più preciso e una migliore gestione dei flussi di reagenti, rendendo possibile una produzione di idrogeno più modulare e adattabile a diverse scale applicative. Inoltre, l'utilizzo di un reattore a membrana a letto impaccato (PBMR, Packed Bed Membrane Reactor) offre significativi vantaggi: superamento dell'equilibrio termodinamico, per cui, la reazione può procedere fino al completamento a temperature più basse; elevata efficienza di separazione dell'H<sub>2</sub>; e integrazione del processo in un'unica unità; infine la maggiore velocità di assorbimento del calore: migliora l'efficienza complessiva del sistema [T. Xie, S. Xia, R. Kong, P. Li, C. Wang, Performance analysis of ammonia decomposition endothermic membrane reactor heated by trough solar collector, Energy Rep. 8 (2022) 526]-[K. Omata, K. Sato, K. Nagaoka, H. Yukawa, Y. Matsumoto, T. Nambu, Direct high-purity hydrogen production from ammonia by using a membrane reactor combining V-10mol%Fe hydrogen permeable alloy membrane with Ru/Cs<sub>2</sub>O/Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> ammonia decomposition catalyst, Int. J. Hydrogen Energy 47 (2022) 8372].

### 2.B.2 Vettori organici liquidi (LOHC)

Tra i sistemi di accumulo reversibile dell'idrogeno, l'uso dei LOHCs (Liquid Organic Hydrogen Carriers) attraverso processi catalitici di idrogenazione e deidrogenazione, rivestono particolare interesse. Le principali molecole organiche studiate in letteratura per lo stoccaggio reversibile ed il trasporto dell'idrogeno includono: Dibenzotoluene (DBT), N-etilcarbazolo (NEC), Toluene/Metilcicloesano, Naftalene/Decalina [S. Dürr et al., Experimental determination of the hydrogenation/dehydrogenation - Equilibrium of the LOHC system H<sub>0</sub>/H<sub>18</sub>-dibenzyltoluene, International Journal of Hydrogen Energy 46 (64), 2021][Tae Wan Kim et al., State-of-the-art Catalysts for Hydrogen Storage in Liquid Organic Hydrogen Carriers, Chemistry Letters 51 (3) 2022].

Studi recenti puntano sull'utilizzo di molecole di origine biologica. L'uso di biomassa, di oli vegetali e loro derivati come fonte per LOHC (ad esempio, la peridro-trisferidina ha mostrato una capacità di stoccaggio di circa il 5,9% in peso e un'entalpia di deidrogenazione favorevole, rendendola un candidato interessante per applicazioni future [Chunguang Tang et al., Natural liquid organic hydrogen carrier with low dehydrogenation energy: A first principles study, International Journal of Hydrogen Energy 45 (56), 2020]) rappresentano una promettente alternativa per ridurre l'impatto ambientale, ma richiede ulteriori sviluppi tecnologici. Le maggiori problematiche tecnologiche nell'impiego di LOHCs sono dovute al fatto che, attualmente, le reazioni di idrogenazione/deidrogenazione sono condotte ad alta temperatura e che il costo di acquisto degli LOHC oggi in commercio è estremamente elevato. Inoltre, la disattivazione dei catalizzatori dovuta al coking e alla formazione di sottoprodotti rimane un problema importante. L'utilizzo per LOHC di molecole a basso costo di origine biologica e lo sviluppo di catalizzatori in grado di operare il processo di idrogenazione in condizioni meno severe, rispetto alle attuali, sono tra i principali temi affrontati nel progetto.

### 2.B.3 Dimetiletere

Il dimetiletere (DME) rappresenta una delle molecole organiche più interessanti, in considerazione del fatto che può essere utilizzato

come combustibile alternativo, quale succedaneo del diesel di natura fossile, o più semplicemente come vettore di idrogeno, con il vantaggio di un trasporto in fase liquida a bassa pressione e nessuna necessità di nuove infrastrutture dal momento che può essere gestito come il GPL. Attualmente la produzione di DME da stream gassosi ricchi di CO<sub>2</sub> o direttamente da CO<sub>2</sub> è limitata a processi convenzionali a doppio stadio, che prevedono l'accoppiamento del processo di sintesi del metanolo con il processo di disidratazione del metanolo a DME, ciascuno dei due processi essendo condotto in condizioni e con sistemi catalitici differenti tra loro. Recentemente si sono moltiplicati gli sforzi per la dimostrazione di fattibilità di un processo diretto di sintesi di DME mediante idrogenazione catalitica di CO<sub>2</sub> in un unico stadio, ma lo sviluppo di un catalizzatore attivo, selettivo e stabile in condizione di reazione al momento limita lo scale-up tecnologico. La formazione di acqua nel corso del processo e la gestione efficiente del vapore rimangono un importante collo di bottiglia ai fini di un'operatività a lungo termine dell'impianto compatibile con quella di un processo industriale. In questo contesto, la sintesi di DME potenziata da assorbimento, che combina la catalisi eterogenea con l'adsorbimento di acqua in situ, è una promettente strategia di intensificazione del processo per la produzione diretta di DME da CO<sub>2</sub>. Recenti studi indicano che un'elevata conversione dei reagenti e selettività del carbonio in DME possono essere ottenute con un miglioramento dell'assorbimento indipendentemente dal rapporto CO/CO<sub>2</sub> di alimentazione e l'importanza della gestione del calore, dimostrando che si osserva una forte perdita nella resa del DME quando si opera in condizioni adiabatiche anziché isoterme, a causa della perdita di capacità di adsorbimento all'aumento delle temperature [J. van Kampen, et al., Sorption enhanced dimethyl ether synthesis for high efficiency carbon conversion: Modelling and cycle design. *J. CO<sub>2</sub> Util.*, 37, 2020]. Nel progetto si persegue l'obiettivo di intensificazione del processo attraverso lo sviluppo di un catalizzatore ibrido strutturato innovativo (3D) e una configurazione reattoristica tubolare adeguata alla sintesi diretta di DME da miscela CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>.

#### MACROTEMA 2.C: IMMISSIONE IN RETE (SICUREZZA)

In letteratura gli approcci per la valutazione quantitativa dell'impatto di eventi naturali sul rischio chimico, come quello associato al trasporto di miscele combustibili nella rete gas (Natural Hazard Triggering Technological Disasters - Natech), si basano sull'estensione dell'analisi quantitativa del rischio (QRA) effettuata attraverso approcci che usano modelli di vulnerabilità semplificati, aventi un ambito di applicazione limitato, concentrandosi prevalentemente su condizioni stazionarie, sorgenti puntiformi e non su sorgenti di rischio "lineari" quali le condotte. A ciò si aggiunge che l'utilizzo di modelli empirici per la valutazione delle conseguenze porta, in molti casi, a sottostimare il rischio associato al rilascio di gas dalle condutture. Inoltre, l'influenza dell'additivazione dell'idrogeno al metano, sul processo di combustione della miscela, non è, a tutt'oggi, del tutto chiara. In particolare, è ancora oggetto di ricerca lo sviluppo di adeguati modelli numerici in grado di descrivere l'effetto dell'idrogeno su fenomeni di combustione con transizione deflagrazione-detonazione (DDT).

#### MACROTEMA 2.D: IDROGENO BIANCO

Nell'ambito impegno dell'idrogeno quale vettore energetico, la produzione naturale di idrogeno (idrogeno bianco) è un tema di ricerca di frontiera nel panorama internazionale, causa l'impatto significativo che l'eventuale accumulo di idrogeno nel sottosuolo, in quantità economicamente sfruttabili, potrebbe avere sulle politiche di transizione energetica. Sebbene vi siano molti progetti noti nel mondo per lo sfruttamento dell'idrogeno naturale, i meccanismi all'origine della formazione e dell'accumulo della risorsa non sono ancora chiari alla comunità scientifica. In generale, la metodologia attualmente seguita per studiare i serbatoi di idrogeno implica un approccio multisettoriale con carotaggi, log di pozzo e analisi geochimiche per caratterizzare in modo completo queste formazioni geologiche uniche.

#### MACROTEMA 2.E: STOCCAGGIO GEOLOGICO

Il problema dell'accumulo di grosse quantità di idrogeno può essere affrontato, ove possibile, attraverso lo stoccaggio geologico. Esistono studi e sperimentazioni in corso su questo tema, ma ulteriori ricerche sono necessarie per approfondire i fenomeni connessi allo stoccaggio geologico, non ultimi quelli legati alla sicurezza. Da questo punto di vista, la disponibilità di dati sulla fratturazione del reservoir, sulla porosità e sulla modalità di circolazione dei fluidi al suo interno, sono di fondamentale importanza per la definizione, ai fini della sicurezza, del comportamento idromeccanico del serbatoio nelle zone di faglia. Normalmente, queste informazioni sono estrapolate a partire da dati spazialmente puntuali rispetto alla scala del reservoir e pertanto non sempre rappresentativi. Per tale motivo ci si serve di analoghi affioranti in cui la fratturazione può essere studiata per estensioni spaziali maggiori e a diverse scale al fine di alimentare un modello discreto di fratturazione (denominato DFN - Discrete Fracture Network). Studi hanno mostrato come la costruzione di DFN, unendo dati raccolti sul terreno con analisi effettuate mediante modelli virtuali di affioramento, abbia fornito risultati promettenti per la caratterizzazione della circolazione dei fluidi nel sottosuolo e per la definizione del comportamento idromeccanico in zone di faglia. Anche gli effetti dell'attività antropica di prelievo e iniezione di fluidi nel sottosuolo per fini energetici (fenomeni di subsidenza, up-lift e/o sismicità indotta) sono oggetto di dibattito nella comunità scientifica. Le evidenze al momento disponibili riguardano casi connessi alla coltivazione di serbatoi geotermici o di campi oil & gas. Un'incognita ancora tutta da esplorare riguarda l'entità della deformazione che potrebbe essere connessa allo stoccaggio e prelievo di idrogeno, per esempio, da acquiferi profondi o da giacimenti di gas depleti. Per quanto concerne i pozzi, studi recenti hanno inoltre dimostrato come la valutazione quantitativa del rischio, attraverso l'uso modelli empirici, sia inadeguata nel caso dell'idrogeno a causa delle specifiche proprietà fisiche di tale gas. Questa limitazione può essere superata

attraverso l'utilizzo di modelli dettagliati di tipo CFD, per la simulazione del fenomeno di dispersione transitoria di miscele di idrogeno, metano e idrogeno solforato, dell'incendio (jet fire) o dell'esplosione, a seguito del rilascio accidentale dal condotto che collega il deposito alla superficie.

#### ----- WP3 USI FINALI -----

Il WP3 è volto allo studio di tecnologie e processi per l'utilizzo dell'idrogeno (verde) e suoi vettori (quali ammoniaca e metanolo) negli usi finali (produzione di energia elettrica e calore anche in specifiche applicazioni quali hard-to-abate e cold ironing in infrastrutture portuali) e comprende attività sul manufacturing di celle a combustibile ad elettrolita polimerico, (alimentate ad idrogeno), sulla combustione fuel-flexible (sia di miscele di idrogeno che di ammoniaca, per microturbine a gas e sistemi hard-to-abate; sicurezza di miscele ammoniaca-idrogeno), e sull'impiego del metanolo quale vettore dell'idrogeno per la generazione di energia elettrica.

#### MACROTEMA 3.A: CELLE A COMBUSTIBILE

L'utilizzo di idrogeno in celle a combustibile è connesso alla disponibilità di tecnologia sufficientemente matura per essere adottata su larga scala.

Lo stato della tecnologia delle celle a combustibile a membrana a scambio protonico (PEFC) è giunto ad un buon livello di maturità; sul mercato sono presenti stack e moduli completi (anche composti da 2 o più stack) con potenze variabili dai 3 kW fino al MW e numero di celle per stack che può superare le 300 unità. Nonostante il livello di maturità raggiunto, ci sono ancora prospettive di miglioramento. La ricerca punta verso modalità di progettazione sempre più sofisticate sia dello stack che del sistema, con l'adozione di materiali innovativi, tecniche di ottimizzazione avanzate e strategie di gestione dell'energia intelligenti, per raggiungere elevate prestazioni, elevata durata e maggiore economicità. L'interazione tra i diversi aspetti, dall'ottimizzazione dei materiali e delle strutture alla gestione dei sottosistemi e all'integrazione del sistema, è fondamentale per promuoverne la commercializzazione su larga scala per applicazioni in vari settori. Attraverso l'utilizzo di sistemi di manifattura avanzata (stampa 3D, fusione laser selettiva e automazione assistita da IA) è possibile ingegnerizzare processi produttivi su grande scala che possano beneficiare di disegni complessi aumentando sia le prestazioni dei dispositivi prodotti che delle relative linee produttive. Tecniche come la fusione laser selettiva permettono la creazione di geometrie complesse (es. l'ottimizzazione del design del flow-field mediante l'impiego di superfici tridimensionali), riducendo gli sprechi di materiale e i tempi di prototipazione, oltre a migliorare la flessibilità progettuale. L'integrazione di queste tecnologie con sistemi di assemblaggio robotico rappresenta un'area di ricerca promettente per migliorare ulteriormente l'efficienza e la qualità degli stack PEFC. Attualmente, l'ispezione delle superfici dei componenti degli stack PEFC viene eseguita principalmente attraverso metodi manuali o semi-automatici. Questi metodi presentano diverse criticità che ne limitano l'efficacia e l'efficienza. In primo luogo, l'ispezione manuale è soggetta a errori umani, che possono portare a una rilevazione incompleta o inaccurata dei difetti. Gli operatori umani possono facilmente trascurare difetti minori o difficili da individuare, compromettendo la qualità complessiva degli stack. In secondo luogo, i metodi semi-automatici, sebbene migliorino l'efficienza rispetto all'ispezione manuale, non sono sufficientemente precisi per garantire l'identificazione di tutti i difetti critici. Questi metodi spesso utilizzano tecnologie di visione artificiale di base, che non sono in grado di rilevare difetti complessi o di piccole dimensioni. Inoltre, l'integrazione di questi sistemi con i processi produttivi esistenti può essere complicata e costosa. Un'area di particolare interesse è relativa all'uso di estrusori robotizzati per il deposito di materiale viscoso sigillante per le guarnizioni degli stack PEFC: questo rappresenta un significativo avanzamento rispetto ai metodi tradizionali, che spesso richiedono l'uso di guarnizioni preformate. Un'altra innovazione chiave è l'uso di gemelli digitali per simulare e ottimizzare i processi di assemblaggio: essi permettono di testare e migliorare i processi in un ambiente virtuale prima della loro implementazione reale, riducendo i rischi e migliorando l'efficienza. Un'altra criticità significativa è rappresentata dalla mancanza di automazione completa nel processo di ispezione. L'assenza di un sistema completamente automatizzato limita la capacità di eseguire ispezioni continue e ad alta velocità, riducendo l'efficienza produttiva e aumentando i tempi di produzione. Inoltre, la mancanza di integrazione tra i sistemi di ispezione e i sistemi di controllo della qualità rende difficile il monitoraggio e l'analisi dei dati di ispezione, limitando la capacità di migliorare continuamente i processi produttivi. L'applicazione delle tecnologie di ispezione automatica agli stack PEFC è ancora in fase di sviluppo, ma promette di migliorare significativamente la qualità e l'affidabilità di questi componenti critici.

#### MACROTEMA 3.B: FUEL FLEXIBILITY (miscele CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> e NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>)

La generazione elettrica con turbine a gas è uno dei principali fornitori di flessibilità e una delle soluzioni di immediata applicazione per ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub>. Tuttavia, nonostante i notevoli sforzi ed investimenti degli ultimi anni da parte dei vari produttori, il loro funzionamento stabile dal 100% di gas naturale al 100% di idrogeno con contenuto di idrogeno variabile (fuel-flexibility), è una sfida ancora da superare. I sistemi di combustione di tipo diffusivo e con diluizione in azoto o vapore sono in grado di operare fino al 100% di H<sub>2</sub>, ma con perdite di efficienza rispetto ai sistemi senza diluizione, maggiori emissioni di NO<sub>x</sub> rispetto alla combustione premiscelata magra (Dry Low Emission), maggiore complessità impiantistica, più elevati CAPEX ed OPEX. Per questi motivi la tecnologia di combustione DLE è al centro dell'attenzione dei vari produttori di turbine a gas e della ricerca. Attualmente, gli impianti di generazione basati su turbine a gas DLE non possono operare con qualsiasi miscela di gas naturale e idrogeno alla loro massima efficienza e nel rispetto dei limiti delle emissioni, e per di più senza conoscere la composizione del gas combustibile in ingresso, come richiesto dagli utilizzatori; questo a causa di problematiche tecnologiche del sistema di combustione [ETN Global, Hydrogen Gas Turbines, The Path Towards a

Zero-Carbon Gas Turbine, 2020]. Il contenuto di H<sub>2</sub> (tipicamente espresso in volume) accettato dalle turbine a gas di tipo DLE dipende dalla temperatura di esercizio e dalle specifiche tecnologie di combustione adottate dai produttori: in media, considerando le macchine in commercio, si va dal 44-63% delle turbine di classe heavy duty (100-500 MWe), al 43-55% di quelle di uso industriale (30-100 MWe), per arrivare al 35% delle aero-derivate (1-30 MWe), e al 20-32% delle microturbine (0.1-1 MWe), come riportato nella Strategic Research and Innovation Agenda 2021-2027 (SRIA 2021-2027), redatta dalla Clean Hydrogen Partnership nel 2022. Al 2024, le macchine attualmente più flessibili sul mercato sono quelle di taglia media-grande, tra le quali emergono la NovalT (5-20 MWe) di Baker Hughes, in grado di raggiungere il 100% di H<sub>2</sub> con l'implementazione di un modulo de-NO<sub>x</sub> per limitare le emissioni, e la GT-36 (538 MWe) di Ansaldo Energia, certificata fino al 70% di H<sub>2</sub> senza necessità di depotenziamento, testata fino al 100% di H<sub>2</sub> ma a potenza ridotta per contenere gli NO<sub>x</sub>; per quanto riguarda le microturbine, ci sono esempi di test di combustione fino al 100% di H<sub>2</sub> (ad esempio, Ansaldo Energia fino all'80% per la AE-T100, il DLR fino al 100% su una TURBEC T100 PH modificata), ma lo stato dell'arte (commerciale) resta ancora il 20-32%. È importante osservare che il contenuto di H<sub>2</sub> accettato ed il livello di NO<sub>x</sub> emessi non sono i soli dati che stabiliscono l'effettiva flessibilità di una turbina a gas. Occorre anche considerare altri indicatori (Key Performance Indicators), come scritto nella SRIA 2021-2027: la massima riduzione di efficienza elettrica, il massimo contenuto di H<sub>2</sub> in fase di avvio, la minima velocità di rampa (rispetto alla potenza nominale), e la fluttuazione di H<sub>2</sub> accettata (% di H<sub>2</sub> in volume o massa al minuto rispetto al valore di ingresso). Gli ultimi tre indicatori contribuiscono alla flessibilità dinamica della turbina a gas: il loro stato dell'arte al 2020 era, rispettivamente, il 5% vol. di H<sub>2</sub>, il 10% del carico nominale al minuto (al 30% vol. di H<sub>2</sub>), il  $\pm 10\%$  vol. di H<sub>2</sub> al minuto; i target da raggiungere nel 2024 erano, il 20%, ancora il 10% (al 70% vol. di H<sub>2</sub>), ed il  $\pm 15\%$ ; quelli da raggiungere nel 2030 sono, il 100%, ancora il 10% (al 100% vol. di H<sub>2</sub>), ed il  $\pm 30\%$ . Il target indicato per le emissioni di NO<sub>x</sub> fino al 2030 è costante: 25 ppmv (al 15% O<sub>2</sub> secco). Si osserva che, in una recente riunione all'interno di Hydrogen Europe per l'aggiornamento della roadmap delle turbine a gas e dei precedenti KPI, si è constatato che i KPI del 2024 sono stati raggiunti; i nuovi dati saranno pubblicati nell'aggiornamento della SRIA 2021-2027.

La commercializzazione di macchine effettivamente flessibili richiede ancora del tempo: questo spiega la forte concorrenza internazionale tra i vari produttori nello sviluppare nuovi sistemi di combustione che possano operare in modo efficiente e pulito (basse emissioni) con il più ampio range di miscele di H<sub>2</sub> (in questo contesto si collocano le attività proposte sull'alimentazione flessibile di microturbine), ed anche di ammoniaca (considerata un promettente vettore di H<sub>2</sub>): per esempio, nel 2020 Kawasaki ha dimostrato di operare con il 100% di H<sub>2</sub> in una turbina DLE di piccola taglia per applicazioni CHP; nel 2021, Mitsubishi ha annunciato di commercializzare nel 2024 macchine da 40 MWe alimentate con 100% di ammoniaca; sempre nel 2021, la coreana Hanwha ha acquisito PSM e Thomassen Energy, e le loro proprietà intellettuali, esperienza e tecnologie (es. Flamesheet) sulla combustione pulita e stabile dell'idrogeno; parallelamente, altri produttori di turbine a gas, come Baker Hughes e Ansaldo Energia, stanno investendo molto nella ricerca di nuove tecnologie di combustione, intensificando i rapporti con università e centri di ricerca, e aumentando il loro coinvolgimento in progetti europei (degno di nota è il progetto Flex4H<sub>2</sub>).

L'ammoniaca sta assumendo una notevole rilevanza in diversi settori applicativi, sia come vettore di idrogeno che come combustibile. I principali vantaggi dell'ammoniaca rispetto all'idrogeno riguardano l'esistenza di infrastrutture consolidate per il suo trasporto e stoccaggio, dovuta all'utilizzo di ammoniaca su larga scala in molti processi ed applicazioni pratiche, come per esempio l'utilizzo come fertilizzante o come agente desolforante/De-NO<sub>x</sub> dei gas di combustione in caldaie/forni. Inoltre, l'ammoniaca ha un'elevata densità di energia volumetrica, un elevato numero di ottano e buone proprietà anti-detonanti. D'altro canto, la combustione dell'ammoniaca potrebbe potenzialmente causare elevate emissioni di NO<sub>x</sub>, come conseguenza del contenuto di azoto nel combustibile. L'uso dell'ammoniaca come vettore energetico nei sistemi di conversione termica è limitato principalmente dalle sue caratteristiche di combustione. Infatti, la sua bassa velocità di fiamma e un intervallo di infiammabilità molto più ristretto rispetto ai combustibili fossili ed all'idrogeno, rendono difficile sostenere il suo processo di conversione nelle condizioni tipiche dei sistemi di combustione tradizionale. Esistono molti studi sulla combustione diretta dell'ammoniaca in sistemi stazionari deflagrativi e diffusivi che esplorano potenziali soluzioni per la stabilizzazione di fiamma e riduzione degli NO<sub>x</sub>. Una soluzione alternativa è l'utilizzo di tecnologie di combustione innovative come la combustione diluita o combustione MILD, che ben si presta alla decarbonizzazione dei settori industriali hard-to-abate. Questo processo, sostanzialmente differente dai processi di combustione tradizionali, evolve in presenza di una elevata diluizione ed un elevato preriscaldamento locale, attraverso un processo di igni-diffusione di nuclei di miscela che igniscono, reagiscono e scompaiono evolvendosi indipendentemente l'uno dall'altro e occupando l'intero volume della camera di combustione [M. de Joannon et al., MILD combustion beyond energy transition, Volume 40, Issues 1-4, 2024]. Quindi, il processo non si basa sulla struttura diffusiva o deflagrativa tipica della diffusione o della fiamma premiscelata e non manifesta fronti di propagazione della reazione, dando luogo ad un processo di combustione "senza fiamma". Per quanto riguarda l'ammoniaca, è stato dimostrato che la combustione diluita non solo è in grado di stabilizzare la combustione di ammoniaca pura in un ampio campo dei parametri operativi ma consente di avere una emissione molto limitata di NO<sub>x</sub>, almeno un ordine di grandezza inferiore rispetto a quella che si ottiene nella combustione di ammoniaca in processi di combustione standard. Sebbene l'efficacia del processo di combustione diluita per la conversione termica dell'ammoniaca e di miscele ammoniaca/idrogeno sia stata verificata sperimentalmente in sistemi elementari e prototipi in scala di laboratorio [M. Cafiero et al., Enhancing pure NH<sub>3</sub> combustion: Impacts of O<sub>2</sub> enrichment under MILD conditions in a 20-kW semi-industrial scale furnace, Volume 40, Issues 1-4, 2024], non sono state ancora caratterizzate le strutture locali responsabili della stabilizzazione del processo sulla micro-scala. Per un efficace utilizzo di tali vettori energetici nei processi di combustione diluita è quindi necessario estendere tale caratterizzazione al caso in cui i combustibili siano idrogeno, ammoniaca o loro miscele. Tale caratterizzazione è fondamentale per l'identificazione delle

strutture di sotto-griglia da utilizzare per l'applicazione di metodologie numeriche di fluidodinamica reattiva per il dimensionamento di sistemi su scala applicativa e per lo sviluppo di digital twin per il monitoraggio ed il controllo di tali sistemi.

L'uso di ammoniaca come combustibile richiede la caratterizzazione del comportamento esplosivo delle miscele in cui è adottata, in particolare quelle NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>/Aria in quanto presenta alta energia di innesco e bassa reattività. L'arricchimento di NH<sub>3</sub> in H<sub>2</sub> consente di superare questi limiti, determinando inevitabilmente, come rovescio della medaglia, aumento del rischio di esplosione. La mitigazione di questo rischio, attraverso adeguate misure di protezione, richiede conoscenze sul comportamento esplosivo dei sistemi NH<sub>3</sub>+H<sub>2</sub>, conoscenze che, nonostante il crescente interesse applicativo verso queste miscele, restano ancora carenti. Se, da una parte, si può assumere che il comportamento esplosivo di NH<sub>3</sub>+H<sub>2</sub> sia compreso tra i comportamenti dei componenti puri, dall'altra, la quantificazione delle sue caratteristiche – massima pressione di esplosione, massima velocità di aumento della pressione di esplosione e indice di deflagrazione – in condizioni di interesse industriale resta ancora estremamente limitata [Cheng, J., Zhang, B. Experimental study on the explosion characteristics of ammonia-hydrogen-air mixtures. Fuel, Volume 363, 2024, Article number 131046. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131046>].

### MACROTEMA 3.C: IMPIEGO DI VETTORI DELL'IDROGENO IN UTENZE FINALI

Il metanolo si propone come un interessante vettore energetico e un'alternativa pratica per il trasporto e l'utilizzo dell'idrogeno. Diversi studi sono già in corso sull'impiego del metanolo sia nei motori a combustione interna [V.S. Erhelst et al., Methanol as a fuel for internal combustion engines. Progress in Energy and Combustion Science, 70, 2019] sia nelle fuel cell [N. Li et al., A review of reformed methanol-high temperature proton exchange membrane fuel cell systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 182, 2023]. Per ottimizzare l'efficienza del sistema e ridurre il consumo del motore termico, si propone di arricchire il metanolo con idrogeno, quest'ultimo prodotto tramite processi di reforming alimentati dal recupero del calore residuo (waste heat recovery) prodotto dai gas di scarico del motore stesso. Studi precedenti hanno già esplorato soluzioni analoghe, arricchendo combustibili con idrogeno tramite il reforming del metanolo in motori diesel convenzionali [Z. Yin et al., Effects of hydrogen-rich products from methanol steam reforming on the performance enhancement of a medium-speed marine engine. Energy, 256, 2022]. Tuttavia, l'analisi dell'utilizzo del metanolo nel contesto portuale (anche ai fini di applicazioni quali il cold ironing) non è stata valutata. La soluzione proposta prevede l'integrazione della rete elettrica terrestre con un gruppo elettrogeno alimentato a metanolo/idrogeno, collegato attraverso un sistema innovativo basato su un convertitore rotante. Nel caso di metanolo green, ossia non di origine fossile, si raggiungerebbe l'obiettivo "net-zero emission in port".

#### b) Attività svolte nel triennio precedente

Il presente progetto si pone in piena continuità con quello del triennio precedente. Molte delle attività proposte sono costruite a partire dai risultati ottenuti nel triennio 22-24, assicurando continuità alla ricerca, consolidandone i risultati e permettendo l'esplorazione di approcci alternativi particolarmente promettenti emersi durante l'implementazione delle attività progettuali. Nel seguito, si dà conto delle attività svolte in precedenza e dell'evoluzione prevista nel triennio corrente.

#### ----- WP 1 PRODUZIONE -----

##### MACROTEMA 1.A. H<sub>2</sub> DA WATER SPLITTING

###### 1.A.1a. Elettrolisi (vapore - integrazione con FER)

Nel triennio precedente sono state svolte delle attività di ricerca nell'ambito della RdS, con riferimento al macrotema Power-to-X. In particolare, sono state effettuate attività di simulazione delle prestazioni tecnico-economiche dei sistemi elettrochimici ad alta temperatura di tipologia r-SOC, in accoppiamento con dispositivi termochimici reversibili per la metanazione dell'idrogeno, prodotto in fase di carica, e per il reformer di metano in fase di scarica. Le precedenti attività hanno permesso di sviluppare competenze nell'ambito della modellazione a parametri concentrati dei dispositivi elettrochimici ad alta temperatura e delle sezioni di recupero termico. Tale attività si è integrata con le attività sperimentali aventi come oggetto il dispositivo di metanazione/reforming, portando all'implementazione di un modello prestazionale del sistema completo SOEC e reattore di metanazione bidirezionale, tarato con dati sperimentali.

Le attività proposte per il nuovo triennio possono partire dalle conoscenze e dalle attività di modellazione sviluppate in precedenza sui sistemi elettrochimici ad ossidi solidi che sono ritenute preliminari allo svolgimento delle attività indicate. Le suddette nuove attività si differenziano dalle precedenti in quanto affrontano l'integrazione di dispositivi SOE con tecnologie di recupero e accumulo del calore di diversa tipologia rispetto ai reattori per la metanazione. Il nuovo triennio intende infatti individuare nuove sinergie in termini di impianto, ottimizzando gli scambi energetici potenziali tra elettrolizzatori SOE, sistemi di accumulo e sistemi a ciclo termodinamico Rankine e/o Brayton, in combinazione con sorgenti termiche rinnovabili e/o sostenibili.

###### 1.A.2. Water splitting foto(elettro)chimico

Nel corso del precedente triennio di attività di ricerca RdS, RSE ha testato, sintetizzato e caratterizzato alcuni composti foto-elettrochimici anodici e catodici, di cui i primi rivelatesi particolarmente promettenti. Inoltre, sono stati portati avanti studi sia per la

deposizione di elettrodi di dimensioni progressivamente maggiori sia su diversi tipi di elettroliti, provenienti da acque di scarto industriali contenenti zuccheri, nell'ottica di un efficientamento delle risorse idriche.

Nello stesso periodo, da parte di CNR è stato realizzato un prototipo di cella fotoelettrochimica per la produzione di idrogeno verde in scala di laboratorio con una area attiva di 10 cm<sup>2</sup>. Sono stati sviluppati, tramite bagno chimico e spray coating, materiali elettrodici non critici ed a basso costo: semiconduttore a base di Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (drogato con Ti e P) per il fotoanodo e CuOX per il fotocatodo, che per limitare i fenomeni corrosivi è stato ricoperto da uno strato protettivo (TiO<sub>2</sub>). Per promuovere l'evoluzione di idrogeno è stato sviluppato un co-catalizzatore a base di NiCu. I materiali anodici sono stati depositati su vetro conduttivo; quelli catodici su un innovativo supporto poroso ed idrofobico, così da permettere la produzione diretta di idrogeno secco. Tramite test elettrochimici e analisi gascromatografiche, sono state valutate l'efficienza di produzione di idrogeno della cella e la purezza dell'idrogeno stesso. Con il suddetto prototipo si è ottenuta una efficienza di produzione di idrogeno del 5% (1 sun cioè potenza luminosa incidente 100 mW cm<sup>-2</sup>), in zona "bias-assisted" ad un potenziale di -1.3 V, ed una purezza del 99.95%.

Rispetto all'analisi economico-finanziaria, attraverso il modello di Environmental Life Cycle Costing (ELCC), sono stati individuati, valutati e quantificati i costi corrispondenti ad ogni fase del ciclo di vita di questo nuovo tipo di cella di fotoelettrolisi. Questa analisi ha consentito di rilevare i punti critici e verificare come incidono nel processo di industrializzazione. Oltre ai costi di investimento, operativi, di manutenzione e sostituzione, sono stati considerati anche le esternalità, prodotte lungo il ciclo di vita di un prodotto, in termini di eventuali costi ambientali. Infine è stata effettuata un'analisi finanziaria, calcolando il Net Present Value per valutare la possibile remunerabilità dell'investimento.

## MACROTEMA 1B. H2 DA FEEDSTOCK CARBONIOSI RINNOVABILI O DI RECUPERO

### 1.B.3. H2 da rifiuti domestici (deidrogenazione catalitica)

Nel precedente PTR 2022-2024 sono state realizzate due linee di attività propedeutiche alle attività qui proposte per il PTR 2025-2027, precisamente: 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)" e LA 1.4 "Studio catalitico per la produzione di idrogeno "green" mediante processi catalitici di de-idrogenazione di substrati organici". In particolare, come composti idonei alla produzione di idrogeno nella LA 1.3 sono stati selezionati e studiati alcuni campioni di olio usato di cucina (UCO) e di olio resinico dal processo di lavorazione della carta (Tallolo, CTO), sebbene necessitino di pretrattamenti specifici prima di essere sottoposti a processo di de-idrogenazione. In base agli studi svolti la massima resa di H<sub>2</sub> ottenibile è di 143m<sup>3</sup>H<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>UCO e di 300m<sup>3</sup>H<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>CTO. Inoltre, i prodotti della reazione, principalmente idrocarburi lineari a lunga catena e composti aromatici, possono essere successivamente impiegati quali LOHC. Le attività della LA 1.4 hanno riguardato lo sviluppo di alcune formulazioni catalitiche a base metalli "non" nobili e privi di CRM e lo svolgimento di test catalitici preliminari sulla deidrogenazione di molecole organiche modello a catena corta (<C<sub>9</sub>) che hanno dato prova sperimentale della produzione di idrogeno.

A partire da queste evidenze sperimentali, i nuovi studi che verranno svolti nel prossimo triennio riguarderanno in particolare la sintesi e lo studio di nuovi materiali catalitici, appositamente formulati ed ottimizzati per il processo di produzione dell'idrogeno da bio-derivati organici ottenuti dal trattamento di scarti liquidi vegetali. A ciò seguirà uno studio approfondito sulle tematiche di processo, eseguito su impianti catalitici di prova in scala di laboratorio, avente come obiettivo finale l'ottimizzazione delle condizioni operative del processo di deidrogenazione catalitica. Lo studio si baserà sui dati ottenibili attraverso l'esecuzione di una campagna mirata di prove catalitiche, eseguite in diverse condizioni operative (i.e. temperatura, pressione, portata, etc) e fluidodinamiche (es. a diverso numero di Reynolds). Successivamente, è auspicabile validare la tecnologia in un ambiente prevalentemente industriale (da stabilire il sito industriale), operando con capacità produttiva di 10-50m<sup>3</sup> di idrogeno per metro cubo di liquido vegetale.

### 1.B.4. H2 da rifiuti plastici

Le attività previste per il progetto integrato 2025-2027 rappresentano la continuazione delle attività effettuate nel precedente triennio. Infatti, le attività di ottimizzazione del processo di gassificazione di rifiuti plastici non riciclabili e del processo di trattamento a caldo del syngas seguono le attività condotte da Sotacarbo nel PTR 2022-2024 di progettazione, realizzazione e collaudo della nuova configurazione impiantistica dell'impianto Faber e dell'innovativo sistema di pulizia a caldo del syngas.

### 1.B.5a. H2 da biogas/biometano (Pirolisi)

Le attività di ricerca ENEA sulla pirolisi del biogas/biometano in bagni fusi sono state avviate nell'ambito del precedente triennio RdS, portando ad una prima selezione di bagni basati su miscele di sali fusi e allo sviluppo di un impianto sperimentale per lo studio del processo su scala di laboratorio. I risultati ottenuti nelle prime campagne sperimentali hanno mostrato che il processo è fattibile e promettente. Tuttavia, sono emerse diverse criticità, principalmente legate all'elevatissima corrosività delle miscele utilizzate e alla necessità di operare in condizioni estreme con reattori di quarzo estremamente fragili. Queste problematiche hanno reso complessa e onerosa l'acquisizione dei dati sperimentali e le attività del triennio 2025-27 sono in primo luogo dedicate ad un'ottimizzazione del setup sperimentale e della composizione dei bagni fusi volte a rendere più efficiente lo svolgimento di campagne sperimentali più estese in vista dello scaleup del processo. L'evoluzione della ricerca a partire dai risultati del precedente triennio è dettagliata nella descrizione delle LA 1.18 e 1.19

## ----- WP2 TRASPORTO E ACCUMULO -----

## MACROTEMA 2.A. POWER TO X

## 2.A.1. Power-to-gas (Metanazione)

Nell'ambito del power-to-gas, ed in particolare sul tema della elettrometanogenesi, le attività svolte nel precedente triennio RdS sono state indirizzate all'individuazione degli ambiti applicativi per lo scaling-up del processo. In particolare, questa tecnologia ha dimostrato la sua potenziale applicabilità presso alcuni siti del territorio nazionale, oggetto di emissioni naturali di CO<sub>2</sub>. A tal fine, è stata attivata una collaborazione con ENEL Green Power Larderello per il campionamento dei flussi di gas emessi dai terreni e per la sperimentazione di un piccolo dimostrativo. Relativamente alla tecnologia della biometanazione, il precedente triennio RdS, ha visto la progettazione, gestione, e sperimentazione di reattori di tipo a gocciolamento (TBR). La problematica dell'integrazione di questa tecnologia con i processi di trattamento delle acque è stata affrontata all'interno del progetto Sviluppo delle tecnologie dell'idrogeno in alcune filiere d'interesse: metanazione biologica, idrogeno da FER, recupero CO<sub>2</sub> da upgrading del biogas e riutilizzo dell'ossigeno, finanziato dal PNNR.

## 2.A.2. Power-to-fuels

Relativamente alla tematica del power-to-fuel, nel precedente triennio RdS è stata effettuata da Sotacarbo l'ottimizzazione del prototipo sperimentale P2G/L su scala pilota, l'integrazione del prototipo sperimentale XtL su scala da banco con un sistema di produzione dell'idrogeno verde ed è stata condotta la sintesi e la caratterizzazione di materiali per i processi di produzione dei combustibili da H<sub>2</sub> verde e CO<sub>2</sub> per la produzione di metano e metanolo. Per ciò che concerne la metodologia di sintesi per la preparazione dei catalizzatori e suo successivo passaggio di scala, è stata considerata la tecnica convenzionale di co-precipitazione.

MACROTEMA 2.B. VETTORI LIQUIDI DI H<sub>2</sub>

## 2.B.3. Dimetiletere

Sul tema del dimetiletere (DME) quale vettore liquido organico di idrogeno, l'attività condotta nel PTR 22-24 ha visto lo sviluppo di sistemi catalitici ibridi 3D per l'idrogenazione diretta della CO<sub>2</sub>. In particolare, l'attività ha portato allo sviluppo di sistemi monolitici attivi e selettivi nelle condizioni di processo, ma suscettibili alla formazione di acqua. Il risultato finale è stato quello di determinare un incremento significativo della produttività a DME, rispetto a processi condotti su catalizzatori in polvere, in cui l'acqua formata nel corso della reazione porta tuttavia ad un peggioramento del profilo di attività-selettività nel tempo a causa di una disattivazione progressiva del sistema catalitico.

## Sicurezza per l'immissione in rete / idrogeno bianco

Nell'ambito delle tematiche sulla sicurezza per l'immissione in rete dell'idrogeno, le attività di ricerca sviluppate nel precedente triennio RdS hanno consentito di approfondire, attraverso una campagna sperimentale, gli aspetti fenomenologici legati ai fenomeni di rilascio, dispersione e combustione in aria di una miscela idrogeno - metano. In particolare, i risultati sperimentali sono stati utilizzati per una prima messa a punto di uno strumento di calcolo di tipo "fast running", in uso presso RSE, per gli studi di sicurezza.

## MACROTEMA 2.E. STOCCAGGIO GEOLOGICO

Sul tema dello stoccaggio geologico, l'attività modellistica svolta nel precedente triennio RdS è stata indirizzata all'impostazione di alcuni casi sintetici, per comprendere gli effetti sulle strutture del sottosuolo (incluse eventuali sollecitazioni sismiche) dell'iniezione ed estrazione di idrogeno e alla realizzazione di un benchmark per la validazione del codice GEOSIAM in uso presso RSE, ai fini dello studio della produzione di idrogeno da depositi di idrocarburi depleti. Parallelamente a questa attività numerica è stata affiancata una sperimentale finalizzata all'esecuzione di test sperimentali, su campioni di diversa litologia, per valutare il comportamento e la tenuta del migliore sistema caprock-reservoir. L'attività svolta nel triennio ha visto, infine, la progettazione della struttura e a un primo popolamento di un database contenente informazioni di interesse per gli studi di carattere geologico-modellistico, utili per la ricerca applicata al sistema energetico. Per quanto il tema della sicurezza dei pozzi, sono stati sviluppati modelli CFD per il calcolo del livello di rischio associato al rilascio, dispersione ed ignizione di idrogeno e sue miscele (CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>S), a seguito della rottura del tubo di collegamento della caverna salina al terreno (worst-scenario).

## ----- WP3 USI FINALI -----

## MACROTEMA 3.A: Celle a combustibile

L'attività svolta dal CNR nell'ambito del PTR 22-24 ha consentito di sperimentare l'impiego della stampa 3D e dell'automazione robotizzata nella realizzazione di stack fuel cell a idrogeno.

In particolare, nell'ambito dell'attività LA3.1 sono state definite e progettate quattro tipologie di piatti bipolari dotati di differenti geometrie da produrre per stampa 3D mentre, nell'ambito dell'attività LA3.2, tutte le parti dello stack fuel cell, secondo una logica "sustainable by design". Le quattro tipologie di disegno sono di tipo "evolutivo" esse costituiscono il "cammino" concettuale svolto da un primo disegno di piatto, vicino a quelli standard in grafite fino alla quarta versione effettivamente stampabile.

Parallelamente si è giunti alla progettazione esecutiva di uno stack di celle a combustibile ad elettrolita polimerico della potenza di 2,5 kW a 37,5 V da 50 celle di area attiva pari a 75 cm<sup>2</sup>, dotato dell'ultima versione del piatto bipolare di stampa 3D. La geometria del piatto

bipolare così come di tutti gli elementi dello stack è stata concepita anche in funzione dell'assemblaggio automatizzato. Sono stati modellati e prototipati layout robotizzati per l'impilaggio delle parti degli stack. Tuttavia, non è stato possibile implementare un controllo di qualità non distruttivo dei componenti prima dell'assemblaggio. Il progetto ha portato a significativi progressi nell'assemblaggio robotico degli stack PEFC. Sono stati sviluppati e testati diversi prototipi di sistemi di assemblaggio robotico, utilizzando bracci robotici collaborativi e sistemi di visione artificiale. Questo layout ha permesso di automatizzare il processo di impilaggio dei componenti, riducendo significativamente il rischio di errori umani e migliorando l'efficienza produttiva. Inoltre, sono stati condotti test di validazione per verificare l'affidabilità e la precisione del sistema, con risultati promettenti.

#### MACROTEMA 3.B: Fuel flexibility (miscele CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> e NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>)

Nel precedente Piano triennale della RdS, ENEA ha svolto una serie di attività di ricerca sul tema della fuel-flexibility delle turbine a gas, che hanno portato, per mezzo di simulazioni fluidodinamiche e di test sperimentali, alla identificazione e prototipizzazione di una tecnologia di combustione fuel-flexible (NG/H<sub>2</sub>) e low-NO<sub>x</sub>, geometricamente adatta ad una microturbina da 100 kWe, ma scalabile. In particolare, sono stati raggiunti i seguenti KPI posti come obiettivo: KPI1, 20% H<sub>2</sub> vol. e trend tecnologico > 50%; KPI2, emissioni NO<sub>x</sub> < 25 ppm @50% H<sub>2</sub>; KPI3, massimo H<sub>2</sub> in accensione, almeno 20%; KPI4, fluttuazioni H<sub>2</sub> accettate, ±15% al minuto. Sono state svolte anche attività a TRL più elevato sulla microturbina a gas da 100 kWe dell'impianto AGATUR (Advanced GAs Turbine Rising) per valutare gli effetti dell'Exhaust Gas Recirculation (emulato tramite diluizione dell'aria con CO<sub>2</sub> all'aspirazione del compressore) sull'emissione di NO<sub>x</sub> anche a carichi diversi da quello nominale; la tecnica EGR offre inoltre interessanti prospettive per estendere la fuel-flexibility della soluzione prototipale raggiunta nel PTR22-24. Infine, sono stati fatti dei primi passi sull'analisi wavelet di dati fluidodinamici non stazionari provenienti da simulazioni LES, che hanno messo in luce alcune potenzialità dell'utilizzo di questo tipo di tecniche nell'ambito della progettazione di bruciatori. Queste attività troveranno seguito nell'attuale Piano Triennale.

#### c) Obiettivi scientifici e tecnologici e progressi attesi rispetto allo stato dell'arte

I principali elementi di innovatività del presente progetto possono essere sintetizzati a livello di WP come segue:

##### WP 1

La maggior parte delle tecnologie di produzione di idrogeno considerate nel WP1 ha un carattere altamente innovativo ed è caratterizzata da una bassa TRL: processi foto(elettro)catalitici, pirolisi di biogas/biometano in bagni fusi, combinazione di processi di reforming in fase acquosa con hydrothermal carbonization o gassificazione in acqua supercritica applicati a rifiuti agroindustriali. Per questi processi, le attività sono principalmente volte all'individuazione di condizioni operative e allo sviluppo di materiali elettrodi, catalitici o costruttivi idonei, che assicurino adeguata resistenza alla corrosione e prestazioni superiori rispetto allo stato dell'arte. Le attività mirano in generale a colmare le lacune di una letteratura ancora poco estesa e a sviluppare e testare (primi) dispositivi su scala di laboratorio, con lo scopo di raccogliere elementi per un successivo scaleup.

Sono inoltre considerate tecnologie caratterizzate da un maggiore grado di maturità. Gassificazione di rifiuti non riciclabili: la principale innovazione consiste nell'alimentazioni di ossigeno e vapore come agenti gassificanti (in luogo dell'aria) e nell'utilizzo di catalizzatori per migliorare le performance del processo. Si prevede così di ottenere un significativo progresso rispetto allo stato dell'arte e raggiungere la riduzione del tar fino al 55% ed un aumento della selettività del processo in termini di produzione H<sub>2</sub> in misura ≥10% rispetto alla gassificazione non catalitica. Sviluppo di un sistema integrato per la produzione di idrogeno da acqua di mare basata su elettrolisi ad alta temperatura: in questo caso, contrariamente a quanto si riscontra in letteratura ove si registra l'utilizzo di tecnologie operanti a bassa temperatura (PEM, AEM), le attività sono volte allo sfruttamento dell'integrazione tra elettrolizzatori SOE e innovativi sistemi termochimici per la desalinizzazione dell'acqua di mare e l'accumulo termico al fine di massimizzare l'accoppiamento con sorgenti di calore anche intermittenti (es. CSP). Si attendono benefici in termini di riduzione dei costi di produzione dell'idrogeno (< 5 €/kg) e in termini di impatto ambientale (es. utilizzo di acqua di mare riduce il fabbisogno di acqua dolce e l'utilizzo di sistemi di accumulo termico presentano eco-profilo potenzialmente migliore rispetto agli eco-profilo dei sistemi di accumulo elettrochimico).

Un altro aspetto caratterizzante delle attività di questo WP, che si pone come un rilevante elemento distintivo rispetto allo stato dell'arte, è l'analisi sistematica dell'accoppiamento dei processi studiati con fonti rinnovabili e l'analisi di sostenibilità di tipo LCA. In letteratura si trovano numerosi esempi di applicazione di questo tipo di analisi al caso di processi elettrolitici convenzionali alimentati con energia elettrica rinnovabile prodotta da impianti fotovoltaici o eolici. Molto meno frequenti sono le analisi che includono processi termochimici e il loro accoppiamento con impianti solari termici a concentrazione e, soprattutto, gli studi che affrontano con metodologie condivise e set di dati omogenei, il confronto di tecnologie di diverso tipo come quelle proposte in questo progetto.

##### WP 2

Al fine di favorire il sector coupling e l'interconnessione delle reti energetiche, la penetrazione delle fonti rinnovabili non programmabili e la decarbonizzazione dei settori hard-to-abate, le attività proposte nel WP2 si propongono di affrontare le principali problematiche legate al trasporto e accumulo in sicurezza dell'idrogeno, allo sviluppo di tecnologie Power-to-X, all'uso di carrier liquidi diversificati. L'obiettivo è quello di superare le barriere tecnologiche che impediscono la diffusione del vettore idrogeno, rendendo il suo impiego più sicuro, superando i limiti geografici legati all'infrastruttura di trasporto e distribuzione attraverso l'uso di carrier diversificati (ad es.,

ammoniaca), massimizzando l'efficienza dei processi di sintesi dei carrier e di riconversione degli stessi in idrogeno, indagando sugli aspetti tecnologici, economici ed ecologici dei vettori alternativi. Lo studio delle modalità più adatte per lo stoccaggio di grandi volumi di idrogeno sarà inoltre di fondamentale importanza per sostenere la sempre maggiore penetrazione delle FER non programmabili, nell'ottica di migliorare la sicurezza e la resilienza del sistema energetico nazionale.

### WP 3

Il WP3 "Usi Finali" mira a velocizzare l'integrazione dell'idrogeno nel sistema energetico, promuovendo lo sviluppo di tecnologie e processi relativi al suo utilizzo, che possano garantire flessibilità nell'adozione di miscele di gas naturale e idrogeno, ma anche di ammoniaca e idrogeno, e inoltre promuovere la diffusione delle unità a celle a combustibile attraverso lo sviluppo di processi automatizzati e l'utilizzo dell'additive manufacturing, definendo criteri di progettazione e produzione che ne favoriscano l'industrializzazione. La stampa 3D, per esempio, consente di realizzare piatti di serraggio innovativi in un unico blocco con canalizzazioni integrate permettendo di aggiungere percorsi di scambio termico tra il liquido di raffreddamento e i gas entranti o integrare sistemi per il rilascio del calore di scarto. La tecnologia di stampa additiva applicata ai piatti bipolari permette di realizzare percorsi gas tridimensionali innovativi. In particolare gli avanzamenti attesi sono:

- Incrementare l'efficienza del sistema a valori compresi tra il 55% e il 60%, (stato dell'arte: efficienze tipiche di sistema comprese tra il 45% e il 55%) grazie a una migliore distribuzione dei gas e una gestione ottimale dell'acqua nei nuovi flow-field tridimensionali;
- Limitare le deviazioni di tensione lungo lo stack a valori inferiori al 2%, (stato dell'arte pari a 5%) garantendo una migliore omogeneità grazie al design tridimensionale dei piatti bipolari.

Per quanto riguarda le microturbine a gas, l'obiettivo è garantire l'utilizzo di miscele con un contenuto minimo di idrogeno del 40% in volume (20-32% è l'attuale stato dell'arte per le microturbine) e dimostrare la possibilità di raggiungere un contenuto superiore al 70%, nel rispetto dei limiti emissivi (sia di NOx che di CO).

Nello specifico, il superamento dello stato dell'arte descritto nelle precedenti sezioni sarà raggiunto attraverso il perseguimento degli obiettivi scientifici dettagliati nel seguito a livello di tema affrontato nel progetto.

----- WP1 PRODUZIONE -----

#### MACROTEMA 1A. H2 DA WATER SPLITTING

##### 1.A.1a. Elettrolisi (vapore - integrazione con FER)

Sviluppo di prototipi avanzati per sistemi di accumulo di energia termica (TES) e desalinizzazione ad adsorbimento e l'integrazione con sistemi avanzati come elettrolizzatori a ossido solido (SOE): sistema TES con capacità di accumulo superiore a 1 kWh, tempi di ricarica inferiori a 2 ore, capacità di accumulo termico a lungo termine (oltre sette giorni con perdite inferiori al 5%). Scambiatori di calore e i letti adsorbenti ottimizzati per garantire un'efficienza di trasferimento termico superiore all'85% e perdite inferiori al 5% durante i cicli di funzionamento. SOE con potenza assorbita pari a 9 kW ed operante a pressione ambiente e temperatura fra 750-770 °C. Processo di desalinizzazione con produzione di almeno 2 litri di acqua all'ora con un'efficienza complessiva superiore all'80%.

Identificazione, per un dispositivo di tecnologia SOE, di almeno una possibile configurazione di integrazione termica tra SOE e ORC in fase di generazione dell'idrogeno, ed eventualmente una configurazione in fase di riconversione con il funzionamento SOFC, identificando l'assetto termodinamico ottimale del ciclo;

Quantificazione delle efficienze attese di conversione dell'energia rinnovabile in idrogeno, mediante le soluzioni di integrazione termica proposte, attraverso un modello termodinamico a parametri concentrati, facendo anche uso di dataset sperimentali su dispositivi elettrochimici ed eventualmente di accumulo termico disponibili;

Valutazione, sulla base delle attività di modellazione, delle prestazioni economiche dei sistemi di produzione dell'idrogeno proposti, basati sull'integrazione termica, in rapporto con le tecnologie convenzionali concorrenti, stimando il beneficio in termini di LCOH e/o costo di investimento differenziale.

##### 1.A.1b. Elettrolisi (acqua - integrazione con FER)

- acquisizione di dati sul funzionamento degli elettrolizzatori a bassa temperatura (ALK e PEM) in presenza di carichi di alimentazione dinamici (rendimento del dispositivo di elettrolisi, usura dei componenti, vita utile)
- miglioramento del rendimento degli elettrolizzatori interfacciati con FER attraverso lo sviluppo di specifiche logiche di controllo da realizzarsi attraverso la modellazione computazionale e successiva validazione sperimentale
- valutazione delle possibili applicazioni delle reti neurali (anche attraverso lo sviluppo di un database open-source per l'addestramento) e AI alle tecnologie di elettrolisi
- valutare l'applicazione di un sistema Digital-twin per grandi capacità installate.

##### 1.A.2. Water splitting foto(elettro)chimico

- Sviluppo di Materiali Elettrodici Innovativi: L'obiettivo principale è superare le limitazioni dei materiali elettrodici convenzionali (come l'ematite e il CuO) migliorandone le proprietà fotoelettrochimiche. In particolare lo sviluppo di materiali anodici in grado di produrre

1mA/cm<sup>2</sup> e lavorare per 50h e l'identificazione di un materiale catodico da ottimizzare e migliorarne le prestazioni di base

- implementazione di un metodo sperimentale per la misura diretta dell'idrogeno prodotto
- sviluppo di innovative tecniche di sintesi e deposizione ad alta scalabilità che permettano di aumentare notevolmente la quantità di produzione dei materiali fotoattivi (nello stato dell'arte e nel PTR precedente limiti sulla scalabilità dei materiali).

Saranno anche indagate tecniche di sintesi di nanomateriali tramite elettrodeposizione o elettrofilatura (tecnica facilmente scalabile per la produzione in grandi quantità mantenendo la qualità del materiale).

- Realizzazione di un prototipo di cella zero-gap tandem con area attiva di 40 cm<sup>2</sup> (nello stato dell'arte e nel PTR precedente l'area attiva era di 10 cm<sup>2</sup>) con un'efficienza di produzione (1 sun), in zona "bias-assisted", di idrogeno almeno del 10%, tramite lo sviluppo di materiali per elettrofilatura, su scala da 1 cm<sup>2</sup> e di almeno il 5% (in zona "bias assisted") su scala superiore ai 10 cm<sup>2</sup>. Un valore significativamente importante rispetto ai risultati ottenuti nel triennio precedente 8% (a -1.3 V) su scala da 1 cm<sup>2</sup> e 5% (a -1.3 V) su area attiva da 10 cm<sup>2</sup>. Inoltre, si prevede di ottenere celle con una durata operativa stimata, attraverso "accelerated stress test", superiore alle 100 ore, superando le limitazioni di stabilità delle celle esistenti. La scalabilità del processo di elettrofilatura fino a 10 cm<sup>2</sup> e di elettrodeposizione fino a 40 cm<sup>2</sup> dimostrerà la fattibilità della produzione su scala maggiore. Riduzione del livello di impatto ambientale dei materiali e dei processi. Riduzione dei costi di produzione dovuta dall'utilizzo dei materiali innovativi ed a tecniche di produzione più efficienti e flessibili.

### 1.A.3. Termolisi diretta dell'acqua

Sviluppare membrane innovative in grado di produrre elevati flussi di idrogeno tramite termoscissione dell'acqua. Per raggiungere tale obiettivo verrà investigata la stabilità chimico-fisica a lungo termine delle membrane in condizioni operative, rappresentative dell'esercizio di un reattore in un ambiente reale, e ottimizzati i materiali utilizzati per la realizzazione delle membrane e dei catalizzatori, al fine di ottenere un miglioramento, rispetto allo stato dell'arte.

## MACROTEMA 1B. H2 DA FEEDSTOCK CARBONIOSI RINNOVABILI O DI RECUPERO

### 1.B.1a. H2 da rifiuti agroindustriali (gassificazione in SCW)

Sviluppo di un processo industriale innovativo per la valorizzazione dei residui agroindustriali con produzione di combustibili alternativi e prodotti chimici ad alto valore aggiunto, con importanti vantaggi rispetto all'attuale stato dell'arte.

Di seguito una panoramica dei possibili progressi rispetto allo stato dell'arte:

- utilizzo di solventi innovativi come i NADES (Natural Deep Eutectic Solvent). Derivati da precursori naturali, hanno un impatto ambientale quasi nullo, un costo contenuto e una formulazione chimica modulabile (cloruro-colina, glicerolo, L-prolina) in funzione delle molecole da estrarre, come flavonoidi, polifenoli, D-limonene.
- integrazione di tecniche di estrazione con impiego di ultrasuoni o sonicazione con migliorata efficienza del processo. Questi approcci permettono reazione più veloci, mediante meccanismi di estrazione differenti con un uso ridotto di solventi.
- sviluppo di un reattore a mescolamento con catalizzatore strutturato (3D) fisso per la conversione di matrice organica da convertire in idrogeno in condizioni di acqua supercritica. Il progresso previsto rispetto allo stato dell'arte è la riduzione della formazione di sottoprodotti indesiderati (metano, coke) e aumento della resa di H<sub>2</sub> di almeno il 10-20% rispetto agli attuali benchmark
- introduzione di catalizzatori stabili non nobili e quindi meno costosi e resistenti alla deattivazione.

### 1.B.1b. H2 da rifiuti agroindustriali (reforming in fase acquosa)

- Valutazione dell'impatto delle variabili significative del processo HTC (temperatura, tempo di permanenza e rapporto solido-liquido) sulla composizione e le proprietà della frazione liquida, al fine di migliorare l'efficienza di conversione degli scarti agro-industriali in frazioni liquide e solide ad elevato valore aggiunto
- Progettazione e testing di almeno due nuovi catalizzatori a base di metalli non nobili e supporti a base di materiali carboniosi derivati dall'hydrochar (ottenuti con l'HTC), nell'ottica di migliorare la stabilità termica di questi componenti, aumentando la selettività e la resa di idrogeno
- ottimizzazione del carico organico, la temperatura, la quantità e il tipo di catalizzatore, al fine di massimizzare la resa in idrogeno (superiore a 50 mmolH<sub>2</sub>/gTOC), minimizzando il consumo energetico così da aumentare l'efficienza energetica del processo APR, superando le limitazioni di stabilità e selettività attuali
- ottenimento di una chiara visione della fattibilità e sostenibilità economico-ambientale del processo su scala industriale, attraverso un'analisi LCA completa dell'intero processo integrato HTC-APR.

### 1.B.2. H2 da rifiuti dell'industria chimica

- Comprendere i meccanismi di reazione che sovrintendono alla formazione dei differenti prodotti ed approfondire il ruolo del metabolato nei processi reattivi, al fine di poter sviluppare modelli cinetici che consentano di predire le prestazioni del processo in condizioni operative al di fuori degli intervalli studiati sperimentalmente
- Incrementare significativamente le prestazioni in termini di resa ad idrogeno (almeno il 10%), a solido e a composti organici ossigenati.
- Definire uno schema reattivo più approfondito di quello riportato in letteratura.

### 1.B.3. H2 da rifiuti domestici (deidrogenazione catalitica)

- Lo studio di formulazioni catalitiche innovative a base di metalli di transizione, sia comuni che preziosi.
- La realizzazione di almeno 3 innovativi sistemi catalitici di deidrogenazione, appositamente formulati al fine di raggiungere i livelli minimi di performance propedeutici e necessari ad uno sviluppo industriale della tecnologia catalitica, realizzati attraverso tecniche di sintesi recentemente brevettate dal CNR-ITAE
- la realizzazione di uno studio di caratterizzazione per determinare le proprietà chimico-fisiche dei catalizzatori sia in bulk che in superficie.
- La realizzazione di studi cinetici condotti sui tre sistemi catalitici nelle reazioni di deidrogenazione non ossidativa di cicloesano, scelta come molecola modello, per determinare "patterns" di reazione e costanti cinetiche mai determinate prima, oltre ai valori di attività, selettività dei catalizzatori appositamente realizzati.
- La realizzazione di test catalitici di lunga durata utilizzando bio-derivati da scarti liquidi vegetali per validare la stabilità dei catalizzatori nel processo. Questo tipo di studio oltre ad essere il primo realizzato, darebbe una risposta essenziale ad uno dei principali quesiti sulla fattibilità tecnologica.
- La selezione del catalizzatore più performante nel processo di produzione di idrogeno, in termini di attività (conversione maggiore del 5% per passaggio), selettività (selettività maggiore del 15% per passaggio) e stabilità catalitica (nessuna disattivazione dopo 36 ore di esercizio), ciò consentirebbe di validare in scala di laboratorio la fattibilità tecnico economica sia del catalizzatore che del processo, portando il valore di TRL di entrambi a 4, mai raggiunto prima.
- La definizione dei fattori di eventuale ottimizzazione nella formulazione catalitica.
- La definizione delle condizioni ottimali di processo per una preliminare ipotesi di dimensionamento e scale-up del processo, studio mai realizzato prima;
- Definizione di un possibile protocollo di riattivazione/rigenerazione del catalizzatore ed eventuale definizione/individuazione di un possibile sito industriale per una preliminare valutazione in ambito prevalentemente industriale (TRL 5).

### 1.B.4. H2 da rifiuti plastici

- ottimizzazione del processo di gassificazione a letto fluido bollente con soli ossigeno e vapore al fine di individuare i più favorevoli parametri di processo in termini di rapporto di equivalenza, rapporto vapore/ossigeno, rapporto carbonio/ossigeno, velocità di fluidizzazione, temperatura del letto di gassificazione;
- ottimizzazione del processo di pulizia a caldo del syngas al fine di individuare i più favorevoli parametri di processo (ad esempio temperatura di reazione del sistema) e i più promettenti catalizzatori, con l'obiettivo di conseguire una conversione del tar superiore al 95%.
- progettazione, realizzazione e collaudo di un nuovo componente prototipale (a membrane) a valle del sistema di pulizia a caldo per consentire la produzione di un vettore energetico a elevata concentrazione di idrogeno.
- nuove formulazioni catalitiche a base di bio-carboni attivi ottenuti dalla conversione di biomasse e/o materiali di scarto. Metalli quali: Nichel, Ferro, Cerio e/o ossidi di natura basica e/o acida saranno considerati per la deposizione sui supporti carboniosi utilizzando idonee tecniche di preparazione di catalizzatori (i.e. wet impregnation, co-precipitation ecc...)
- ottimizzazione del processo di carbonizzazione/attivazione di biomasse e/o materiali di scarto. sintesi di bio-carboni attivi ad alta area superficiale (> 2500 m<sup>2</sup>/g)
- intensificazione del processo di gassificazione applicato alle materie plastiche.

Si prevede di ottenere un significativo progresso rispetto allo stato dell'arte e raggiungere la riduzione del tar fino al 55% rispetto ai processi senza catalizzatori ed un aumento della selettività del processo in termini di produzione H2 in misura  $\geq 10\%$  rispetto alla gassificazione non catalitica.

### 1.B.5a. H2 da biogas/biometano (Pirolisi)

Partendo dai risultati ottenuti nel precedente triennio, l'obiettivo principale delle attività proposte in questo progetto è di creare le condizioni per uno scaleup del processo, affrontando in modo più sistematico le criticità che sono emerse nel corso della precedente attività sperimentale. Queste riguardano, in particolare, la gestione della volatilità e l'elevata corrosività dei bagni selezionati (basati su miscele di sali fusi) nelle condizioni di esercizio considerate. In particolare, per quanto riguarda gli aspetti legati alla corrosione e nell'ottica di individuare soluzioni per i materiali costruttivi che siano applicabili ai reattori in piena scala, è prevista la conduzione di prove di corrosione in condizioni di reazione in reattori in materiale metallico con rivestimento ceramico, e quindi raccogliere informazioni più significative rispetto ai test di corrosione condotti su provini metallici in condizioni statiche e in assenza di reazione.

### 1.B.5b. H2 da biogas/biometano (Reforming solare)

Si punta alla validazione in ambiente rilevante della tecnologia attraverso lo sviluppo e il testing on-sun di un reattore prototipale per il reforming del biogas operante a temperature superiori ai 700 °C. Il reattore sarà riscaldato indirettamente utilizzando aria come fluido termovettore ed una fornace solare a focalizzazione puntuale come sistema di concentrazione. Il sistema includerà il balance of plant

necessario per i recuperi termici e la campagna sperimentale consentirà di raccogliere informazioni utili alla gestione delle fluttuazioni della radiazione solare.

In prospettiva, si creeranno le condizioni per l'integrazione dell'impianto con il sistema di accumulo termico già presente presso il sito di installazione, ma il cui utilizzo non previsto nell'ambito del progetto) che consenta di esercire l'impianto in modo continuo e stabile.

#### MACROTEMA 1.C: ACCOPPIAMENTO DI PROCESSI TERMO(ELETTRO)CHIMICI CON IMPIANTI CST

L'obiettivo è svolgere una sistematica analisi dei processi di produzione di idrogeno considerati nel progetto per valutare diverse strategie di accoppiamento con fonti di energia rinnovabile. L'attenzione è posta in particolare sull'uso di impianti solari termici a concentrazione (CST), eventualmente in combinazione con impianti fotovoltaici, per fornire calore e/o elettricità ai processi in modo sostenibile. Una volta identificati almeno due scenari particolarmente interessanti sulla base di diversi criteri, tra cui grado di maturità tecnologica, disponibilità di informazioni consolidate sul processo, verrà sviluppato un modello di sistema per la stima della producibilità annuale di idrogeno.

#### MACROTEMA 1.D: ANALISI DI SOSTENIBILITA'

Come ribadito dall'aggiornata (2024) SRIA della Clean Hydrogen Partnership, l'analisi completa dell'impatto ambientale dell'intero ciclo di vita delle tecnologie dell'idrogeno è indispensabile per valutarne la loro effettiva sostenibilità. In linea con questo principio, l'obiettivo delle attività afferenti a questo macrotema è effettuare un'analisi sistematica di tutti i processi di produzione considerati nel progetto ed individuare almeno quattro scenari particolarmente rilevanti da sottoporre ad un'approfondita analisi LCA basata su un approccio omogeneo e condiviso tra i partner.

### ----- WP2 TRASPORTO E ACCUMULO -----

#### MACROTEMA 2.A: POWER-TO-X

##### 2.A.1. Power-to-gas (Metanazione)

Le attività proposte nell'ambito della elettrometanogenesi hanno l'obiettivo di sviluppare geometrie di celle che consentano una produzione di metano di almeno 1 m<sup>3</sup> al giorno; a tal fine verranno sviluppati catodi compositi, ad elevata superficie, che consentano la colonizzazione microbica in tre dimensioni al fine di minimizzare le resistenze dovute al trasporto di massa dei prodotti e dei reagenti. Relativamente ai sistemi bioelettrochimici, si intende approfondire le potenzialità dei sistemi ipertermofili con studi sperimentali a livello di laboratorio con l'obiettivo di comparare le rese di sistemi operanti in condizioni operative variabili nel tempo. In ambito biometanazione, gli obiettivi del presente progetto mirano ad incrementare le prestazioni del processo in reattori a gocciolamento e validarne l'integrazione con il ciclo di depurazione delle acque, valorizzandone le sinergie. Saranno in particolare consolidate, tramite dati sperimentali e modelli matematici, le potenzialità offerte dall'uso di flussi di scarto e dall'accoppiamento con altre unità del processo depurativo. Come ulteriore passo verso il TRL successivo, è inoltre previsto un scale-up delle dimensioni dei reattori permettendo al fine di acquisire dati sperimentali su scala diversa rispetto a quella fino ad ora sperimentata in RSE.

##### 2.A.2. Power-to-fuels

Relativamente al tema del power-to fuel, le attività proposte nel presente progetto sono indirizzate alla messa a punto della sintesi di catalizzatori innovativi inorganici nanostrutturati, sviluppati attraverso metodi ecosostenibili, e lo sviluppo sperimentale del processo per la conversione termochimica della CO<sub>2</sub> con idrogeno verde per la produzione di metano, metanolo e dimetiletere. L'attività prevede, inoltre, l'ottimizzazione dell'integrazione dell'impianto bench-scale X<sub>t</sub>L con il un sistema di elettrolisi a bassa temperatura alimentato da fonti rinnovabili, costituito da un elettrolizzatore PEM (Proton Exchange Membrane) e un elettrolizzatore AEM (Anion Exchange Membrane), analizzando le prestazioni del sistema globale al variare delle condizioni operative e inserendo un nuovo sistema di stoccaggio a idruri metallici. All'interno del progetto è previsto, infine, uno studio di fattibilità tecnico-economica finalizzato all'analisi del potenziale di sviluppo della catena del valore dell'idrogeno in Sardegna e dei combustibili da esso derivati.

#### MACROTEMA 2.B: VETTORI LIQUIDI DI IDROGENO

##### 2.B.1a. Ammoniaca (sintesi e decomposizione termochimiche)

- Sviluppo di catalizzatori innovativi capaci di operare a temperature  $\leq 500^{\circ}\text{C}$  e a pressioni (20-50bar) inferiori rispetto ai processi convenzionali (100 – 200bar) di sintesi dell'ammoniaca mantenendo allo stesso tempo una buona produttività (10 - 40 mmol NH<sub>3</sub> gcat.<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>) di ammoniaca sarà condotto attraverso l'ottimizzazione dell'utilizzo di perovskiti (di tipo ABO<sub>3</sub>) al fine di ridurre l'energia di attivazione per l'adsorbimento dissociativo dell'N<sub>2</sub> considerato lo step limitante della reazione di sintesi dell'ammoniaca, e l'utilizzo del rutenio quale catalizzatore grazie alla sua energia di attivazione inferiore rispetto ad altri metalli di transizione, come il ferro. L'utilizzo di dopanti dell'allumina contribuirà ad aumentare la densità elettronica sul rutenio attraverso un effetto di donazione elettronica,

facilitando l'adsorbimento e la dissociazione dell' $N_2$ . In particolare si attendono: un contenuto utilizzo di elementi critici (e.g. Ru  $\geq 50\text{wt}\%$  rispetto i catalizzatori convenzionali), capacità di operare a temperature più basse (400-600°C) rispetto ai processi di cracking convenzionali (800 – 900°C) mantenendo allo stesso tempo una buona produttività (2-10 mmolH<sub>2</sub>gcat.<sup>-1</sup>min<sup>-1</sup>) con conversioni dell'ammoniaca al variare della temperatura comprese tra 20 e 95%.

- Sviluppo di catalizzatori conduttivi metallici strutturati basati su geometrie TPMS caratterizzati da un elevato rapporto superficie volume (40-70 cm<sup>-1</sup>), un elevata porosità (50-70%) e dalla possibilità di lavorare a elevate velocità spaziali (>10000 h<sup>-1</sup>) sia per la sintesi che per la conversione dell'ammoniaca. L'utilizzo di catalizzatori metallici strutturati consente di migliorare i coefficienti di trasporto di massa e calore all'interno del letto catalitico superando le limitazioni tipiche dei letti impaccati che contribuiscono a ridurre la produttività del sistema catalitico. Lo sviluppo di sistemi catalitici strutturati dotati di una migliorata stabilità meccanica contribuisce ad aumentare la durata operativa del sistema, riducendo i costi di manutenzione. Il processo di coating sarà ottimizzato al fine di garantire un elevato carico di catalizzatore (0.2 – 0.3gcat./cm<sup>3</sup>), strati catalitici sottili con spessori compresi tra 20 e 70µm e stabilità meccanica (perdite in peso comprese tra 1 è 2% rispetto al peso totale del catalizzatore strutturato).
- Sviluppo di configurazioni reattoristiche più efficienti (tipo Heat Exchanger Reactor, HER) per la gestione della temperatura di reazione e l'eventuale integrazione con sorgenti di calore provenienti da fonti rinnovabili. Gli HER consentono un controllo termico più preciso grazie alla loro configurazione unica, che integra direttamente i flussi di calore con il processo chimico. Rispetto ai reattori tradizionali, che spesso soffrono di hotspot termici o gradienti di temperatura significativi, gli HER permettono di ottimizzare la resa del processo e ridurre la degradazione del catalizzatore. Il miglioramento nella gestione termica è particolarmente rilevante per processi chimici esotermici (come la sintesi dell'ammoniaca) ed endotermici (come la decomposizione dell'ammoniaca).

#### 2.B.1b. Ammoniaca (decomposizione elettrochimica)

Sviluppo di una compatta cella elettrochimica a membrana (EMR) per processi simultanei di decomposizione dell'ammoniaca e separazione dell'idrogeno. Questo nuovo sistema EMR presenta diversi vantaggi rispetto ai sistemi convenzionali:

- Conversione completa dell'ammoniaca mediante separazione simultanea dell'H<sub>2</sub>, sfruttando una membrana a conduzione protonica e l'applicazione di un campo elettrico, proposta come soluzione per rendere il processo controllabile su richiesta;
- Efficienza faradica del 100% per la produzione di H<sub>2</sub>, ottenuta applicando un campo elettrico proveniente da energia rinnovabile e impiegando una membrana a conduzione protonica, con un risparmio energetico del 65% nel processo;
- Produzione di H<sub>2</sub> ultra-puro (>99,99%) per le tecnologie a celle a combustibile downstream, che può essere controllata dalla tensione applicata in base alle esigenze richieste;
- Operazione a pressione atmosferica su un ampio intervallo di temperature (400-750 °C) rispetto ai sistemi PBMR, offrendo grandi opportunità per l'ottimizzazione della cella elettrochimica;
- Il retentato è costituito esclusivamente da N<sub>2</sub>, che può essere liberato direttamente nell'atmosfera senza la necessità di ulteriori trattamenti;
- Alta produttività volumetrica di H<sub>2</sub> (> 40 mol m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) rispetto ai sistemi convenzionali;
- Dispositivo compatto, per applicazioni energetiche e di trasporto, con una riduzione dell'impronta di carbonio fino al 75% o più, utilizzando elettricità e calore rinnovabili.

Gli obiettivi saranno perseguiti attraverso attività di sviluppo di formulazioni catalitiche innovative con perfezionate proprietà catalitiche, geometriche ed elettroniche e lo sviluppo di membrane innovative a conduzione protonica per la separazione selettiva dell'idrogeno. A conclusione delle attività sarà realizzato e dimostrato un Reattore Elettrochimico a Membrana (EMR) progettato per operare a pressione atmosferica in un ampio intervallo di temperature.

#### 2.B.1c. Ammoniaca (studio di scenari per il power-to-ammonia)

All'interno del progetto verrà, infine, svolta un'attività di tipo scenaristico volta a contestualizzare l'integrazione dell'ammoniaca, come vettore energetico nel panorama italiano, identificando le filiere produttive e/o gli utilizzatori finali più compatibili e ponendo quindi le basi tecniche per la futura regolamentazione ed incentivazione dell'ammoniaca ad usi energetici in Italia

#### 2.B.2. Vettori organici liquidi (LOHC)

Lo stoccaggio chimico dell'idrogeno in carrier organici liquidi rappresenta una tecnologia promettente per uno sfruttamento a più ampia scala dell'idrogeno, per applicazioni sia nel settore mobilità, che per la generazione di energia elettrica in impianti stazionari. Nonostante le potenzialità offerte da questa tecnologia, ad oggi, esistono ancora delle criticità che ne limitano uno sviluppo su larga scala e che sono legate principalmente a: i) necessità di materiali catalitici efficienti, ii) condizioni operative severe del processo e iii) caratteristiche e costi dei feedstock.

In tale ottica, le attività che verranno svolte nella linea di attività si prefiggono come obiettivo principale il superamento delle attuali limitazioni tecnologiche riguardanti lo stoccaggio chimico dell'idrogeno, mediante un approccio multidimensionale volto all'ottimizzazione sia del catalizzatore che del processo. Inoltre, quale fattore premiante del progetto, le attività riguarderanno anche la possibilità di utilizzare molecole organiche di origine vegetale e/o provenienti da scarti del settore agro-industriale (ad es. derivati degli oli vegetali e di olii resinici cellulósici) al fine di ridurre l'impatto ambientale e l'impronta carbonica della tecnologia.

Pertanto, gli obiettivi scientifici e tecnologici specifici della linea di attività riguarderanno:

1. Sintesi e caratterizzazione chimico-fisica di diverse formulazioni catalitiche potenzialmente attive e stabili nelle reazioni di accumulo di idrogeno utilizzando diverse metodiche di preparazione, che mirino ad ottenere catalizzatori solidi a maggiore sviluppo di area superficiale totale e di fase attiva in superficie.
2. Studio approfondito delle cariche "alternative" di origine vegetale potenzialmente idonee per l'accumulo di idrogeno, selezionando molecole modello aventi struttura chimica appropriata, al fine di simulare in maniera accurata il processo reale ed individuare ed analizzare approfonditamente l'effetto della presenza di eventuali "composti indesiderati" e di cariche complesse sulle rese e selettività del processo.
3. Realizzazione di studi cinetici mediante l'esecuzione di test catalitici nelle reazioni di idrogenazione di molecole modello, al fine di determinare i meccanismi di reazione e le costanti cinetiche delle reazioni di idrogenazione e di evidenziare il comportamento catalitico dei sistemi sintetizzati determinando i valori ottimali di conversione rispetto ai valori di selettività e stabilità del catalizzatore.
4. Valutazione delle performance catalitiche ed individuazione del/dei catalizzatore/i più efficiente/i nel processo di idrogenazione, ovvero con una capacità di idrogenazione non inferiore al 40% e stabilità rispetto ai fenomeni di disattivazione catalitica per fouling e coking di almeno 48 ore.

### 2.B.3. Dimetiletere

Nonostante i recenti sviluppi sul tema presenti allo stato dell'arte e i risultati preliminari raggiunti nel corso del PTR 22-24, risultano diverse le problematiche ancora aperte che richiedono ulteriori attività di R&D, quali:

- Necessità di temperature di esercizio più basse (< 240 °C) per maggiore selettività a DME (>60%);
- Individuazione di nuove formulazioni catalitiche ibride, stabili in condizioni di idrogenazione di CO<sub>2</sub> a DME (perdita di attività iniziale <10% dopo 24 h in esercizio);
- Screening di assorbenti solidi più efficienti (possibilità di rigenerazione dopo saturazione da acqua di reazione e possibilità di riutilizzo con ripristino dell'attività iniziale) per realizzare una intensificazione del processo di sintesi diretta.

Parte dell'attività sarà focalizzata proprio sull'architettura 3D dei sistemi multifase, secondo un design di tipo "zebra" con fasi alternate di catalizzatore ibrido e solido assorbente, con numero e spessore di strati variabili e geometria dei canali modulabile. La preparazione dei sistemi ibridi verrà effettuata utilizzando un robot cartesiano proprietario per la micro-estrusione su scala 3D di materiali multifunzionali, con il vantaggio rispetto alle procedure sintetiche classiche di una migliore interazione tra siti catalitici di varia natura a livello puntuale, oltre a una eccezionale riproducibilità e controllo dell'architettura strutturale e morfologica. La validazione del comportamento catalitico di questi sistemi sarà effettuata in un impianto da laboratorio, in una varietà di condizioni sperimentali, ottimizzate per la massima produttività catalitica.

Nel complesso, gli obiettivi scientifici e tecnologici misurabili e in grado di determinare progressi significativi rispetto allo stato dell'arte possono essere declinati come segue:

1. Profilo migliorato di attività e resa a DME, grazie ad una ottimizzazione del disegno 3D del catalizzatore "zebra" (numero di strati, spessore degli strati, ...):
  - Stato dell'Arte: PR= 30-50 bar, TR >250 °C, Conversione di CO<sub>2</sub> ≈20%, Resa a DME <10%.
  - Risultato quantitativo: PR= 30 bar, TR=240 °C, conversione di CO<sub>2</sub> >30%, Resa a DME >10%.
2. Configurazione impiantistica adeguata alla massima operatività in continuo (reattore multi-canale, impianto a riciclo, ...)
  - Stato dell'Arte: Perdita di attività nelle prime 12 h di reazione, con diminuzione di circa il 20% rispetto al dato iniziale.
  - Risultato quantitativo: Produttività oraria costante, con diminuzione <10% rispetto al dato iniziale oltre le 48 ore in esercizio.

### MACROTEMA 2.C: IMMISSIONE IN RETE

Per quanto concerne la sicurezza per l'immissione dell'idrogeno nella rete gas, il progetto prevede la valutazione del rischio derivante dall'utilizzo delle condotte di trasporto dell'idrogeno o della miscela metano/idrogeno (hythane) in aree urbane, considerando diversi eventi naturali come possibili cause della perdita di contenimento delle condotte (eventi Natech - Natural Hazard Triggering Technological Disasters), nell'ottica di produrre mappe di rischio in funzione della collocazione geografica delle infrastrutture. Verranno sviluppate le potenzialità di strumenti di calcolo per la simulazione del processo di combustione di miscele H<sub>2</sub>-GN ai fini della determinazione, anche in presenza di fenomeni DDT, dei principali parametri caratteristici di processo.

### MACROTEMA 2.D: IDROGENO BIANCO

Relativamente al tema dell'idrogeno bianco, verranno indagate le potenzialità delle metodologie attualmente disponibili per l'identificazione di possibili giacimenti nel sottosuolo e alla stima delle concentrazioni, basate su marker geofisici registrati dagli strumenti in pozzo.

### MACROTEMA 2.E: STOCCAGGIO GEOLOGICO

Gli obiettivi scientifici e tecnologici sul tema dello stoccaggio geologico sono indirizzati a sviluppare, attraverso attività sperimentali/modellistiche, maggiori capacità predittive relativamente al comportamento idromeccanico del sottosuolo nella zona di

faglia in risposta all'iniezione e produzione di fluidi. A tal fine verranno impiegate, a supporto, tecniche di rilevamento di un analogo affiorante, per lo studio di un sito idoneo allo stoccaggio di idrogeno nel sottosuolo. Le informazioni acquisite in questa fase saranno utilizzate per costruire un modello geologico statico tridimensionale del sottosuolo del sito scelto come caso studio. La costruzione del modello geologico statico sarà la base di partenza per la definizione di un workflow modellistico-numerico per lo studio della deformazione del sottosuolo indotta da iniezione e produzione di idrogeno dal sottosuolo. Altro tema affrontato è quello legato alla natura delle interazioni tra il rischio naturale (sismi, inondazioni) e quello chimico associato al rilascio in atmosfera dell'idrogeno (o di sue miscele) da un sito geologico di stoccaggio e delle eventuali misure di mitigazione da adottare al fine di migliorare la sicurezza e l'affidabilità della infrastruttura. Attraverso l'utilizzo di adeguati modelli CFD si valuterà, inoltre, la permeazione di idrogeno attraverso il suolo nel caso di danni strutturali alla caverna salina a seguito di un evento sismico.

----- WP3 USI FINALI -----

#### MACROTEMA 3.A: Celle a combustibile

Il progetto si propone di realizzare significativi avanzamenti rispetto allo stato dell'arte, sfruttando le conoscenze acquisite nel precedente PTR 22-24. Questi progressi sono il risultato di un lavoro che, già nel precedente PTR, ha portato alla concettualizzazione dei piatti bipolari per stampa 3D e alla definizione di un design ingegneristico compiuto. Tali risultati non solo dimostrano le potenzialità della manifattura additiva a letto di polveri metalliche fuse (LPBF), ma hanno anche posto le basi per lo sviluppo di soluzioni ancora più avanzate e innovative. Nel nuovo triennio, l'obiettivo principale è quello di consolidare e ampliare questi risultati, migliorando sia le capacità progettuali che produttive. In particolare, si intende perfezionare la tecnologia di stampa 3D per raggiungere tolleranze dimensionali comprese tra 0,05 e 0,02 mm, rendendo i piatti bipolari prodotti con questa tecnica pienamente competitivi con quelli attualmente disponibili sul mercato. Il raggiungimento di tolleranze più precise è essenziale per garantire la perfetta tenuta delle guarnizioni, evitando perdite di fluidi, e per assicurare l'uniformità della pressione di contatto, migliorando il funzionamento dello stack in termini di efficienza elettrica e meccanica.

Parallelamente, il progetto si concentrerà sulla sperimentazione di percorsi gas innovativi, basati su geometrie tridimensionali come le superfici minimali periodiche triplicemente (TPMS). Queste configurazioni, finora inesplorate nel contesto delle celle a combustibile, presentano caratteristiche geometriche uniche che permettono di ottenere un elevato rapporto superficie-volume. Grazie a tali proprietà, si prevede di migliorare sia il trasferimento di massa che la gestione termica all'interno delle celle, superando le limitazioni dei flow field convenzionali come quelli a serpentina o canali paralleli.

Complessivamente, il progetto mira a consolidare e ampliare lo stato dell'arte, contribuendo allo sviluppo di una nuova generazione di piatti bipolari prodotti con manifattura additiva. Questi progressi rappresentano un passo fondamentale verso una maggiore efficienza e affidabilità delle celle a combustibile, promuovendo al contempo l'applicazione di tecnologie innovative nel settore dell'idrogeno.

Nel precedente PTR le attività di automazione sono state concentrate sull'assemblaggio robotico, evidenziando alcune limitazioni che necessitano di ulteriori ottimizzazioni (per esempio, il tracking della posizione e orientamento delle piastre tramite camera RGBD non è ancora molto robusto ed accurato). Occorre migliorare la precisione con cui il sistema di visione genera le coordinate per correggere la posizione di presa e rilascio delle piastre sullo stack. Inoltre, il presente progetto si focalizza sull'ispezione automatica, un'area critica per garantire la qualità e l'affidabilità degli stack PEFC.

In conclusione, gli obiettivi scientifici e tecnologici di questo progetto consentiranno di conseguire un effettivo progresso rispetto allo stato dell'arte, migliorando la qualità e l'affidabilità degli stack PEFC, riducendo i tempi di produzione e i costi operativi, e aumentando l'efficienza complessiva del processo di assemblaggio. Questi progressi rappresentano un significativo passo avanti rispetto ai risultati raggiunti nel triennio precedente, contribuendo allo sviluppo di soluzioni innovative per le tecnologie dell'idrogeno e dell'automazione industriale.

#### MACROTEMA 3.B: FUEL FLEXIBILITY (MISCELE CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> e NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>)

L'obiettivo principale delle attività sulla fuel-flexibility delle turbine a gas è quello di sviluppare una tecnologia di combustione che consenta di bruciare miscele di gas naturale ed idrogeno (HENG, Hydrogen Enriched Natural Gas), potenzialmente nel range 0-100% di H<sub>2</sub>, con basse emissioni di NO<sub>x</sub> e CO. A partire dal bruciatore fuel-flexible sviluppato e realizzato a livello prototipale nello scorso triennio, le attività del nuovo piano triennale mirano a sviluppare un nuovo prototipo (caratterizzato anche acusticamente, mediante array di microfoni e software dedicati) che porti ad un miglioramento dei KPI raggiunti nel precedente triennio. Attraverso studi, simulazioni numeriche e test sperimentali, saranno proposte e testate (numericamente e/o sperimentalmente) modifiche della vecchia configurazione o soluzioni migliorative originali, mantenendo i vincoli geometrici ed operativi della microturbina TURBEC T100. In particolare, si vuole incrementare il contenuto in volume di H<sub>2</sub> accettato (KPI1), lasciando inalterati gli altri KPI: KPI1, vol. 40% H<sub>2</sub> e trend tecnologico > 70%; KPI2, emissioni NO<sub>x</sub> < 25 ppm @50% H<sub>2</sub>; KPI3, contenuto H<sub>2</sub> in accensione, almeno 20%; KPI4, fluttuazioni H<sub>2</sub> accettate, ±15% al minuto. In tal modo si supera lo stato dell'arte per le microturbine (20-32% vol. di H<sub>2</sub>). Il raggiungimento degli obiettivi consentirà, da un lato di testare una tecnologia di combustione innovativa, con risultati spendibili anche sulle turbine a gas di taglia più grande, e dall'altro di tracciare una strada, nel campo delle microturbine, per l'utilizzo di miscele con contenuto di H<sub>2</sub> maggiore dello stato dell'arte.

Di contorno, ci saranno anche obiettivi secondari. 1) Nel prototipo di bruciatore realizzato nel PTR22-24 era stato previsto

l'alloggiamento per una sonda per il monitoraggio della combustione: in questo nuovo triennio si vuole procedere con l'ingegnerizzazione della testa ottica per la sua futura integrazione nel prototipo. 2) Sfruttando il prototipo di bruciatore realizzato nel PTR22-24, opportunamente modificato per ottenere un combustore anulare multi-bruciatore, si vuole migliorare, attraverso attività numeriche e sperimentali, la comprensione dei meccanismi fisici che intervengono nell'interazione tra le diverse fiamme presenti e che potenzialmente possono eccitare dannose instabilità termoacustiche azimutali. 3) Si vuole migliorare la conoscenza della combustione di miscele di  $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{N}_2$ , sviluppare nuove strategie per bruciare tali miscele nelle turbine a gas, e ottimizzare le soluzioni tecnologiche attuali attraverso simulazioni avanzate e proposte di modifiche tecnologiche mirate, con particolare attenzione alle simulazioni del prototipo di bruciatore fuel-flexible sviluppato in questo nuovo piano triennale. 4) Si vuole ulteriormente investigare le potenzialità di alcune tecniche di analisi modale (POD, SPOD, stabilità lineare) di dati non stazionari, a supporto della progettazione di combustori (identificazione di soluzioni ottimali dal punto di vista delle geometrie e di altri parametri caratterizzanti il processo di combustione): sebbene ampiamente utilizzate nell'analisi di flussi turbolenti e in parte siano state utilizzate separatamente anche nella caratterizzazione di combustori, il loro impiego combinato per lo studio di campi reattivi, dove le interazioni tra le variabili sono estremamente complesse, è stato poco adottato in letteratura. 5) Per entrare nell'ambito della digitalizzazione, un ultimo obiettivo consiste nella realizzazione e validazione di un sistema di supervisione avanzata per l'impianto AGATUR di ENEA, utilizzando tecnologie di machine learning: questo permetterà di ottenere un sistema proattivo, in grado di adattarsi in modo dinamico alle esigenze operative della microturbina e delle altre parti dell'impianto. Per quanto concerne lo studio del comportamento delle miscele ammoniacale/idrogeno in processi di combustione diluita l'attività di ricerca è focalizzata sulla caratterizzazione delle strutture reattive responsabili della stabilizzazione del processo di combustione in condizioni diluite. Le condizioni tipiche della combustione diluita/MILD determinano un cambiamento radicale di tali strutture che, in questo caso, risultano distribuite su un dominio spaziale più esteso anche di due ordini di grandezza rispetto alle condizioni tradizionali, e spazialmente uniformi. È di fondamentale importanza nella messa a punto di modelli di CFD di tali sistemi, in particolare allorché si utilizzino nuovi vettori di energia come l'idrogeno e l'ammoniaca, che si identifichino e si elabori un modello almeno numerico dei parametri cruciali che determinano il passaggio al regime di combustione MILD e ne controllano caratteristiche e performance. In tal senso è essenziale costruire una profonda conoscenza della fisica e della chimica del processo sulla micro-scala e di come il processo si correli all'osservazione macroscopica delle condizioni in cui si passa da un regime di combustione tradizionale al regime caratteristico della combustione diluita. Gli obiettivi scientifici che rappresentano i punti nodali della ricerca possono essere così riassunti:

- 1) Caratterizzazione delle strutture reattive locali nella ossidazione di miscele ammoniacale/idrogeno in condizioni diluite in funzione della composizione della miscela reagente e da parametri di processo quali temperatura, pressione e velocità di stiramento.
- 2) Studio dell'effetto della diffusione differenziale dell'idrogeno sulle strutture nell'ossidazione diluita di ammoniacale/idrogeno in funzione dei parametri del processo
- 3) Identificazione dei campi di stabilità delle strutture locali con la identificazione dei regimi di transizione tra regimi di combustione tradizionale e diluita e dei limiti di estinzione al variare dei parametri.

Questi obiettivi scientifici costituiscono gli elementi di base necessari per la messa a punto di concetti, metodologie e strumenti di verifica per la realizzazione di impianti di conversione di ammoniacale, idrogeno e loro miscele che siano caratterizzati da elevata stabilità, ridottissime emissioni inquinanti (in particolare di ossidi di azoto e particolati). Questa modellizzazione numerico/matematica non solo può consentire di disegnare sistemi più efficienti e sostenibili ma, soprattutto, introduce la possibilità di disegnare digital twin degli impianti, costruiti a partire dalla stessa descrizione numerico-matematica utilizzata nella loro progettazione con un evidente vantaggio in termini di monitoraggio, gestione in tempo reale e manutenzione preventiva degli impianti. Questo risultato costituisce l'obiettivo tecnologico dell'attività che è quello di supportare la diffusione e l'utilizzo di ammoniacale, idrogeno e loro miscele in sistemi di combustione in aria diluita contribuendo alla costruzione del know-how necessario per la progettazione di tali sistemi e per lo sviluppo di digital twin per il loro monitoraggio e controllo.

La caratterizzazione estesa del comportamento esplosivo di miscele  $\text{NH}_3/\text{H}_2$  in condizioni di operando persegue l'obiettivo principale di quantificare i parametri per la corretta progettazione di misure per la protezione contro esplosioni (dischi di rottura, pannelli di sfogo, valvole di sicurezza ecc.).

### MACROTEMA 3.C: IMPIEGO DEI VETTORI DELL'IDROGENO IN UTENZE FINALI

Il progetto si propone di raggiungere un duplice obiettivo: migliorare l'efficienza energetica e ridurre l'impatto ambientale nelle aree portuali, grazie all'impiego combinato di gruppi elettrogeni alimentati a metanolo green/idrogeno e processi di recupero del calore dai motori stessi; e, contemporaneamente, assicurare una soluzione affidabile e sicura per il collegamento del sistema alla rete elettrica, in grado di soddisfare le esigenze energetiche delle principali utenze (navi) in porto. Inoltre, nelle ore di bassa richiesta di energia elettrica dovuta ad esempio all'assenza di navi in porto, il gruppo elettrogeno potrebbe essere impiegato per riversare energia sostenibile sulla rete terrestre.

L'integrazione di un sistema di steam reforming del metanolo green, che alimenti un generatore elettrico funzionante con miscela metanolo/idrogeno, offre importanti vantaggi: produzione in situ dell'idrogeno da metanolo, evitando i relativi problemi di approvvigionamento e stoccaggio nei porti; incremento significativo dell'efficienza complessiva del sistema di generazione elettrica grazie alle caratteristiche di combustione dell'idrogeno ed infine la valorizzazione del calore residuo nei gas di scarico del motore che viene così riutilizzato per alimentare il processo di reforming.

Per quanto riguarda il collegamento del motore a metanolo/idrogeno con la rete elettrica, l'obiettivo è sviluppare una soluzione innovativa di integrazione meccanica diretta con un convertitore rotante. Questa configurazione offre tre principali benefici:

- Incremento della sicurezza del sistema: il collegamento meccanico diretto elimina la necessità di componenti elettrici aggiuntivi, riducendo il rischio di guasti e semplificando la gestione operativa. Inoltre, la presenza del convertitore rotante garantisce il corretto funzionamento delle protezioni installate a bordo nave, a differenza di un sistema tradizionale con convertitori statici.
- Garanzia di alimentazione per le navi: il convertitore rotante permette di sopperire alle limitazioni della rete elettrica nazionale, fornendo la potenza necessaria anche in situazioni in cui la rete terrestre non sia in grado di soddisfare il fabbisogno energetico delle navi. In questo modo si realizza una più rapida espansione dei porti che possono garantire alimentazione da terra per le navi;
- Riduzione dei costi e ottimizzazione delle prestazioni: l'uso di un asse meccanico diretto tra il motore e il convertitore rotante riduce il numero di macchine elettriche richieste, diminuendo i costi di investimento e manutenzione.

#### d) Eventuali collegamenti con altri progetti relativamente alle attività previste nel progetto

L'azione del progetto si inserisce in modo complementare e sinergico nel quadro delle attività che gli affidatari portano avanti nell'ambito di altre importanti iniziative relative alla ricerca sulle tecnologie dell'idrogeno. Tra queste, le più significative a livello nazionale sono quelle

legate al PNRR, relativamente al piano operativo della ricerca (POR) "Ricerca e sviluppo di tecnologie per la filiera dell'idrogeno" (Investimento 3.5 - Ricerca e Sviluppo sull'Idrogeno), e il programma Mission Innovation, con il progetto "H2 demo Valley: infrastrutture polifunzionali per la sperimentazione e dimostrazione delle tecnologie dell'idrogeno". Si segnalano inoltre collegamenti con altri progetti nazionali (PRIN) e con altri progetti del PTR.

#### ----- WP1 PRODUZIONE -----

##### MACROTEMA 1A. H2 DA WATER SPLITTING

###### 1.A.1a. Elettrolisi (vapore - integrazione con FER)

Progetto PRIN 2022 "REHP-4-TUNE: Renewable Electric High-temperature Heat Pumps For Thermal Users in Neutral CO2 Environments", coordinato da UBO e in collaborazione con CNR ITAE, sul tema dell'efficientamento di processi industriali. Si analizza l'effetto del potenziale sfruttamento di cascami termici interni, valutando sinergie tra la sorgente termica industriale e fonti rinnovabili non programmabili, con tecnologie di cicli ORC e/o pompe di calore, per ridurre i consumi del sistema. Sono sviluppate attività di contorno alla presente proposta, rappresentate dalla modellazione di cicli ORC e di sistemi energetici complessi, tra loro integrati termicamente. Non si riscontrano sovrapposizioni complete in quanto il progetto PRIN non coinvolge tecnologie per la produzione di idrogeno. L'unità di ricerca dell'Università di Bologna ha in corso, inoltre, diverse attività di ricerca nell'ambito dei sistemi ORC per il recupero dei cascami termici, all'interno del progetto NEST - Network 4 Energy Sustainable Transition (D.D. 1243 02/08/2022, PE00000021) Spoke n. 5: Energy conversion, Piano PNRR, Missione 4, Componente 2 Investment 1.3, European Union - NextGeneration EU. Accordo di Programma MiTE-ENEA, PNRR M4C2 Inv. 3.5 - Ricerca e Sviluppo sull'Idrogeno. In particolare, una delle linee di attività di programma prevede lo sviluppo di un modulo SOE. L'attività sperimentale supporterà le attività di simulazione/modellizzazione e la realizzazione del prototipo.

###### 1.A.1b. Elettrolisi (acqua - integrazione con FER)

Lo studio svolto nell'ambito del progetto PNRR-PORH2 (WP1.1, LA 1.1.13: Test prestazionali stazionari e dinamici di elettrolizzatori innovativi nella test facility multienergy di RSE), il quale prevede una review delle problematiche in caso di asservimento di FER a dispositivi di elettrolisi, l'installazione di un elettrolizzatore nella facility RSE e la definizione di una campagna di prova sperimentale della durata di 300-500 ore volta a confermare le problematiche emerse dall'analisi di letteratura, fornirà le basi tecnico-scientifiche per le attività pianificate nel progetto RdS 1.03.

###### 1.A.3. Termolisi diretta dell'acqua

Si prevedono collegamenti con i progetti RdS "Efficienza Energetica" (PRO 1.06) e "Bioenergie" (PRO 1.10), nei quali sono inserite attività che prevedono la realizzazione e l'impiego di membrane ceramiche per applicazioni differenti dalla termoscissione dell'acqua. In particolare, verranno utilizzate le medesime attrezzature di laboratorio per la realizzazione dei campioni e le stesse tecniche di caratterizzazione. Le diverse attività verranno sviluppate in maniera sinergica e potranno reciprocamente beneficiare dei risultati ottenuti nei differenti ambiti.

##### MACROTEMA 1B. H2 DA FEEDSTOCK CARBONIOSI RINNOVABILI O DI RECUPERO

###### 1.B.1a. H2 da rifiuti agroindustriali (gassificazione in SCW)

Le attività relative alla gassificazione in acqua supercritica previste presentano alcuni punti di collegamento con alcune attività in corso di realizzazione nel progetto PRIN2022 AGROMET e nel progetto FIS2021 SUPERBIO. In entrambi i progetti le attività prevedono lo sviluppo di un sistema catalitico operante in condizioni di acqua supercritica per la conversione di frazioni organiche in biometano (a

temperature comprese tra 400 e 550°C) e lo studio di molecole modello che rappresentino il pastazzo o le acque di scarto prodotte nel processo di trasformazione delle olive.

Nella nuova attività proposta nel PT25-27 di RdS, le condizioni di reazione saranno diverse e funzionali a ottimizzare la produttività ad idrogeno. Peraltro, i catalizzatori presenteranno una composizione chimica differente e dovranno essere impiegati supporti particolarmente resistenti agli stress meccanici e termici. Gli studi preliminari condotti nei progetti in corso permetteranno di effettuare le scelte più opportune e di indirizzare la ricerca verso l'ottenimento dei risultati previsti.

## ----- WP2 TRASPORTO E ACCUMULO -----

### MACROTEMA 2.A. POWER TO X

#### 2.A.1. Power-to-gas (Metanazione)

Le attività proposte nel presente progetto presentano collegamenti con quelle dei nei seguenti progetti RdS e precisamente: PRO 1.04 "Materiali e dispositivi di frontiera per applicazioni energetiche" (problemi di degrado e corrosione degli elettrodi), PRO 2.06 "Resilienza e sicurezza del sistema energetico" (studio delle emissioni di CO<sub>2</sub> in ambito geotermico). Le attività sono, inoltre, strettamente collegate a quelle sviluppate all'interno del progetto PNRR Idrogeno (task 2.1.10) finalizzate ad ampliare le conoscenze sui processi biologici dei reattori di biometanazione attraverso l'installazione, presso i siti sperimentali di RSE, di un terzo reattore di tipo CSTR (a rimescolamento) e la realizzazione di un reattore a gocciolamento di grande scala (> 100 litri), integrato con l'impianto di depurazione di BrianzAcque.

#### 2.A.2. Power-to-fuels

Relativamente alle attività proposte nel presente progetto, sul tema del power-to-fuel, gli impianti presenti nell'attuale Centro Ricerche Sotacarbo vedranno l'implementazione di nuovi laboratori e prototipi realizzati nell'ambito di un progetto finanziato dall'Agenzia per la Coesione Territoriale con fondi PNC, al fine di sviluppare diverse tecnologie e la loro integrazione per la produzione e l'utilizzo dell'idrogeno. Con fondi PNRR si sta realizzando una Hydrogen Valley nel Sulcis a TRL significativo con finalità dimostrative. Infine, tramite alcuni progetti finanziati dalla Regione Autonoma della Sardegna si stanno sviluppando diversi materiali per la produzione di combustibili da fonti rinnovabili, alternativi a quelli proposti nel presente progetto e nuovi materiali per il processo di cattura della CO<sub>2</sub> direttamente dall'aria.

### MACROTEMA 2.B. VETTORI LIQUIDI DI H<sub>2</sub>

#### 2.B.1. Ammoniaca

L'attività proposta sul tema dello sviluppo di catalizzatori strutturati e reattori per la sintesi e la decomposizione dell'ammoniaca è in sinergia con il progetto ANDREAH (Ammonia basD membrane rEactor for green Hydrogen production), svolto nell'ambito dell'Horizon Europe Framework Programme, e finalizzato allo sviluppo di catalizzatori per la produzione di H<sub>2</sub> mediante decomposizione di NH<sub>3</sub> a bassa temperatura. In particolare, in questo progetto saranno sviluppati catalizzatori strutturati utilizzando supporti convenzionali (foam) e supporti stampati in 3D basati su geometrie POCS (Periodical Open Cellular Structures). Altro progetto collegato, sempre finanziato attraverso l'Horizon Europe Framework Programme è quello denominato AMBHER (Ammonia and MOF Based Hydrogen storagE for euRope), indirizzato allo sviluppo di un reattore a membrana per la sintesi di NH<sub>3</sub> a bassa temperatura e bassa pressione. Per quanto riguarda le attività di decomposizione di ammoniaca in reattore elettrochimico a membrana (EMR) per la produzione di H<sub>2</sub> ultra-puro, le attività proposte nel presente progetto sono collegate al progetto ANDREAH per l'approccio innovativo adottato nella produzione di idrogeno verde da ammoniaca, attraverso tecnologie più efficienti e sostenibili.

#### 2.B.3. Dimetiletere

Le attività proposte nel progetto hanno importanti punti di sinergia con quelle in corso di realizzazione nell'ambito dell'Accordo di Programma MiTE-ENEA, PNRR M4C2 Inv. 3.5 - Ricerca e Sviluppo sull'Idrogeno. In particolare, una delle linee di attività di tale programma prevede l'ottimizzazione del processo di sintesi del dimetiletere, a partire dallo sviluppo di una formulazione catalitica per la sintesi del metanolo e l'individuazione di una matrice acida per la disidratazione del metanolo a DME. I due sistemi dovrebbero integrarsi per quanto concerne la preparazione di un catalizzatore ibrido, attivo, selettivo e stabile in condizioni di idrogenazione di CO<sub>2</sub> a DME.

### MACROTEMA 2.C. IMMISSIONE IN RETE

Le attività in ambito sicurezza per l'immissione in rete presentano sinergie con quelle proposte all'interno del Progetto PNRR-PORH2 (Mission M2-C4, Investimento 3.5: Ricerca e sviluppo sull'idrogeno, LA 2.2.8 "Sviluppo e validazione di strumenti numerici per le analisi di rilascio, dispersione e combustione accidentale dell'idrogeno e di miscele idrogeno - metano") che prevedono di studiare, a partire da strumenti di calcolo già in uso e con il supporto di attività sperimentali, soluzioni di calcolo più efficaci/ottimizzate rispetto a quelle esistenti, per l'analisi del rilascio, dispersione e combustione di miscele di gas dalle reti di trasporto, distribuzione e stoccaggio.

### MACROTEMA 2.E. STOCCAGGIO GEOLOGICO

Le attività di ricerca proposte sul tema dello stoccaggio geologico trovano affinità con quelle attualmente in corso all'interno del progetto

SPIN in collaborazione con l'INGV e finanziato dal MASE, volte a comprendere gli effetti della produzione di gas offshore sulla riattivazione di faglie potenzialmente sismogenetiche, soprattutto dal punto di vista numerico-modellistico. Non sono previste comunque sovrapposizioni.

----- WP3 USI FINALI -----

### MACROTEMA 3.A. CELLE A COMBUSTIBILE

Lo studio delle metodiche di realizzazione tramite stampa 3D si riflette anche sul progetto PNRR "Ricerca e sviluppo sull'idrogeno" finanziato dall'Unione Europea – NextGenerationEU – M2C2 Investimento 3.5 nell'ambito del quale sono oggetto di investigazione nuove configurazioni di piatto bipolare.

### MACROTEMA 3.B. FUEL FLEXIBILITY (MISCELE CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> E NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>)

#### 3.B.1. Alimentazione flessibile di microturbine a gas

I modelli per le simulazioni termo-fluidodinamiche che saranno sviluppati nell'ambito del PNRR Investimento 3.5 "Ricerca e sviluppo sull'idrogeno", con il Progetto "Ricerca e sviluppo di tecnologie per la filiera dell'idrogeno", Obiettivo 2 "Tecnologie innovative per lo stoccaggio e il trasporto dell'idrogeno e la sua trasformazione in derivati ed e-fuels", WP2.2 "Ricerca e sviluppo di soluzioni per il trasporto, distribuzione e usi finali dell'idrogeno nelle reti del gas naturale", LA2.2.5 "Modellistica, simulazione e diagnostica sperimentale della combustione di miscele idrogenate e/o altri H<sub>2</sub>-carrier (NH<sub>3</sub>)", compatibilmente con le tempistiche dei progetti, potranno essere utilizzati per la definizione delle nuove configurazioni di bruciatori per microturbina previste in questo piano.

#### 3.B.2. Combustione diluita per sistemi hard-to-abate

PRIN 2022 PNRR "REACTANT" : P2022CCETM: tale progetto è finalizzato allo studio sperimentale e numerico della velocità laminare di fiamma di miscele ammoniacale/idrogeno. L'eventuale sinergia può essere trovata nel confronto dei modelli cinetici di ossidazione di ammoniacale/idrogeno utilizzati nei due progetti. Non esistono sovrapposizioni con le attività proposte in quanto il progetto REACTANT riguarda studi relativi a sistemi di combustione tradizionale

### MACROTEMA 3.C. IMPIEGO DEI VETTORI DELL'IDROGENO IN UTENZE FINALI

Le attività di simulazione numerica sui motori alimentati da combustibili alternativi sono affrontate nel programma di ricerca CN-MOST "Spoke 3" (Waterways), nell'ambito del WP2 inerente alla riduzione delle emissioni del trasporto navale. In particolare, l'Università degli Studi di Napoli Federico II è coordinatrice del WP2 e del relativo Task 2.1 intitolato "Models for Net-Zero emission marine engines". In tale attività si modellano i processi di combustione nei motori navali principalmente con miscele di gas/idrogeno oppure metanolo puro con combustione ad accensione comandata. Nel medesimo WP, il metanolo come combustibile navale è analizzato anche per l'alimentazione diretta di celle a combustibile ad alta temperatura.

## 2.5 Obiettivi e risultati

### a) Obiettivi finali del progetto

Gli specifici obiettivi scientifici e tecnologici dettagliati nella sezione 2.4.c concorrono al raggiungimento di un insieme di obiettivi generali del progetto, definiti in linea con la visione e gli obiettivi delle principali strategie e documenti programmatici europei e nazionali (PNIEC, SRIA Clean Hydrogen Partnership, SRIA Processes for Planet)

In termini generali, le attività del progetto mirano a sviluppare soluzioni che possano supportare la sostenibilità, la resilienza e la sicurezza del sistema energetico, con l'ambizione di incidere in modo particolare nei settori hard-to-abate.

#### OBIETTIVO GENERALE 1.1

Sviluppare processi altamente innovativi, alternativi all'elettrolisi alcalina e PEM (attualmente caratterizzate da un maggiore livello di maturità tecnologica), che potranno in futuro essere affiancati all'elettrolisi per soddisfare la crescente domanda di idrogeno verde ad un costo di produzione intorno ai 3 €/kg al 2030, in linea con il target fissato dalla strategic research and innovation agenda (SRIA) della Clean Hydrogen Partnership per le cosiddette "other routes of renewable hydrogen production". In particolare, l'attenzione è posta su processi di water splitting fotocatalitico e su processi termochimici in grado di combinare, in un'ottica di economia circolare, la produzione di idrogeno con servizi aggiuntivi, quali la gestione/recupero/valorizzazione di rifiuti o la co-produzione di materiali valorizzabili sul mercato.

Questo obiettivo generale resta sostanzialmente invariato rispetto al triennio precedente, in quanto molte delle attività che concorrono al suo raggiungimento proseguono nel triennio corrente.

**OBIETTIVO GENERALE 1.2**

Analizzare ed ottimizzare l'accoppiamento dei processi di produzione e conversione dell'idrogeno con fonti rinnovabili termiche e/o elettriche, con particolare riferimento all'uso di impianti solari termici a concentrazione (CST) e, in alternativa o in combinazione, impianti fotovoltaici

**OBIETTIVO GENERALE 2.1**

Favorire il sector coupling e l'interconnessione delle reti energetiche a beneficio della flessibilità del sistema energetico, della penetrazione delle fonti rinnovabili non programmabili e della decarbonizzazione dei settori hard-to-abate, sviluppando tecnologie power-to-X che permettano di convertire l'elettricità rinnovabile in idrogeno o combustibili rinnovabili prodotti utilizzando CO<sub>2</sub> di recupero.

**OBIETTIVO GENERALE 2.2**

Facilitare il trasporto dell'idrogeno dai siti di produzione agli utenti finali, nonché la sua importazione/esportazione attraverso l'uso di carrier liquidi diversificati.

**OBIETTIVO GENERALE 2.3**

Rendere disponibili soluzioni per l'accumulo energetico di lunga durata su larga scala tramite lo stoccaggio dell'idrogeno in siti geologici.

**OBIETTIVO GENERALE 3.1**

Ottimizzare ed efficientare il processo di produzione delle celle a combustibile attraverso l'automazione, favorendo la diffusione della tecnologia e la creazione di una filiera produttiva nazionale

**OBIETTIVO GENERALE 3.2**

Supportare la sostenibilità e la resilienza del sistema elettrico attraverso lo sviluppo di soluzioni che consentano la generazione elettrica flessibile e a emissioni di CO<sub>2</sub> ridotte o nulle.

**OBIETTIVO GENERALE 3.3**

Favorire la decarbonizzazione dei settori hard-to-abate attraverso lo sviluppo di nuovi generatori di calore flessibili per la combustione di idrogeno, vettori idrogeno e loro miscele

**OBIETTIVO GENERALE 4.1**

Generare rilevante know-how relativamente a tematiche di ricerca ad elevata priorità a livello internazionale, favorendo l'allineamento delle conoscenze, competenze ed infrastrutture dei principali attori del mondo della ricerca italiano allo stato dell'arte internazionale sulle tecnologie dell'idrogeno

**b) Principali risultati attesi/deliverable**

I risultati attesi ed i deliverable previsti sono dettagliati in coda alla descrizione di ogni LA nella sezione 3 e riepilogati nella sezione 4. Complessivamente, nell'arco del triennio, il progetto prevede la produzione di 114 deliverable, tra cui: 95 rapporti tecnici, 12 impianti/prototipi (inclusi prototipi di materiali sviluppati e prodotti) e 7 software/database.

Di seguito, si riporta un elenco dei deliverable diversi dai rapporti tecnici:

**PROTOTIPI**

[P1.05-1] Prototipo/modulo in scala di laboratorio di un dispositivo fotoelettrochimico per la produzione di idrogeno verde con area attiva di 40 cm<sup>2</sup> [CNR]

[P1.08-1] Produzione di anodi e materiali catodici per water splitting e realizzazione di un sistema per la quantificazione dell'idrogeno [RSE]

[P1.24-1] Impianto di reforming del biogas alimentato da calore solare ad alta temperatura [ENEA]

[P1.25-1] Catalizzatori strutturati in scala di laboratorio per il reforming di biogas/biometano [USA]

[P1.26-1] Elementi catalitici strutturati per il reattore di reforming solare del biogas [USA]

[P1.27-1] Campioni finali di catalizzatori per il reforming solare del biogas basato su chemical looping (scala di laboratorio) [UBO-CHIMIND]

[P2.03-1] Prototipo definitivo dell'impianto di elettrometanogenesi geotermica [RSE]

[P3.01-1] Prototipi di piatti per celle a combustibile ad elettrolita polimerico realizzati con strutture tipo TPMS o lattice [CNR]

[P3.03-1] Sistema di Assemblaggio Robotico di Stack PEFC [CNR]

[P3.04-1] Prototipo stack 5kW [CNR]

[P3.04-2] Prototipo sistema fuel cell-batterie integrato a banco [CNR]

[P3.06-1] Prototipo rappresentativo della configurazione di bruciatore fuel-flexible e low-NOx per turbine a gas [ENEA]

#### SOFTWARE/DATABASE

[S1.04-1] Database di dati acquisiti tramite campagne sperimentali su elettrolizzatori alimentati da fonti rinnovabili [RSE]

[S2.09-1] Modelli matematici per la reazione di sintesi e decomposizione dell'ammoniaca mediante catalizzatori strutturati [UBCM-DI]

[S3.10-1] Software MATLAB per l'analisi dati che include, oltre il "main", due subroutine, una per la Proper Orthogonal Decomposition, e l'altra per la Spectral Proper Orthogonal Decomposition [URM3-DICITA]

[S3.10-2] Software MATLAB per l'analisi di Stabilità Lineare [URM3-DICITA]

[S3.11-1] Software LabVIEW per l'acquisizione dei segnali provenienti da un array di microfoni [UCUS]

[S3.11-2] Software MATLAB per l'analisi dati provenienti da array di microfoni basato sulla space-time POD con la finalità di applicare l'analisi caotica anche ai dati sperimentali [UCUS]

[S3.12-1] Software del sistema di supervisione avanzata automatizzato, basato su LabVIEW, che applicherà tecnologie di Machine Learning per ottimizzare i processi operativi dell'impianto AGATUR [URM3-DIEM]

## 2.6 Fattibilità tecnico-scientifica

### a) Fattibilità tecnico-scientifica

Il progetto presenta un programma di ricerca vasto e ambizioso che tratta, a diversi livelli, molteplici tecnologie che interessano tutta la catena del valore dell'idrogeno.

L'azione è articolata in 78 linee di attività (LA) raggruppate in 4 work package (WP): 3 WP tecnici, che si focalizzano rispettivamente sulle tecnologie di produzione (WP1, 33 LA), di trasporto e accumulo (WP2, 23 LA) e degli usi finali (WP3, 16 LA) dell'idrogeno, e 1 WP dedicato alle attività di disseminazione e comunicazione dei risultati (WP4, 6 LA).

All'interno dei WP tecnici, le LA sono ulteriormente raggruppate in 12 macro-temi (e temi specifici) che definiscono in modo chiaro le aree di azione del progetto:

#### ----- WP1 PRODUZIONE

##### MACROTEMA 1A. H2 DA WATER SPLITTING [CNR, RSE]

1.A.1. Elettrolisi (integrazione con FER): a) SOE - LA 1.1-1.2; b) Alcalina e PEM - LA 1.3-1.4

1.A.2. Water splitting foto(elettro)chimico - LA 1.5-1.8

1.A.3. Termolisi diretta dell'acqua - LA 1.11-1.12

##### MACROTEMA 1B. H2 DA FEEDSTOCK CARBONIOSI RINNOVABILI O DI RECUPERO [CNR, ENEA, RSE, SOTACARBO]

1.B.1a. H2 da rifiuti agroindustriali tramite gassificazione in acqua supercritica - LA 1.9

1.B.1b. H2 da rifiuti agroindustriali tramite reforming in fase acquosa - LA 1.10-1.12

1.B.2. H2 da rifiuti dell'industria chimica tramite processo ciclico innovativo - LA 1.13

1.B.3. H2 da rifiuti domestici tramite deidrogenazione catalitica - LA 1.14

1.B.4. H2 da rifiuti plastici tramite gassificazione - LA 1.15-1.17

1.B.5. H2 da biogas/biometano tramite: a) Pirolisi in bagni fusi - LA 1.18-1.22; b) Reforming solare - LA 1.23-1.28

##### MACROTEMA 1C. Accoppiamento di processi termo(elettro)chimici con impianti CST [ENEA] - LA 1.29-1.30

##### MACROTEMA 1D. Analisi di sostenibilità [CNR, ENEA, RSE, SOTACARBO]

1.D.1. LCA di processi di produzione di idrogeno tramite water splitting - LA 1.31

1.D.2. LCA di processi di produzione di idrogeno da feedstock carboniosi rinnovabili o di recupero LA 1.12, 1.32-1.33

#### ----- WP2 TRASPORTO E ACCUMULO

##### MACROTEMA 2.A. POWER TO X [RSE, SOTACARBO]

2.A.1. Power-to-gas (Metanazione) - LA 2.1-2.4

2.A.2. Power-to-fuels - LA 2.5-2.6

##### MACROTEMA 2.B. VETTORI LIQUIDI DI H2 [CNR]

2.B.1. Ammoniaca: a) sintesi e decomposizione termochimiche - LA 2.7-2.10; b) decomposizione elettrochimica - LA 2.13-2.14; c)

Scenari per il power-to-ammonia - LA 2.15

2.B.2. Vettori organici liquidi (LOHC) - LA 2.16

2.B.3. Dimetiletere - LA 2.17

##### MACROTEMA 2.C. IMMISSIONE IN RETE [RSE] - LA 2.18-2.20

##### MACROTEMA 2.D. IDROGENO BIANCO [RSE] - LA 2.18-2.20

## MACROTEMA 2.E. STOCCAGGIO GEOLOGICO [RSE] - LA 2.21-2.23

----- WP3 USI FINALI

MACROTEMA 3.A. CELLE A COMBUSTIBILE [CNR] - LA 3.1-3.4

MACROTEMA 3.B. FUEL FLEXIBILITY (MISCELE CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> E NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>) [CNR, ENEA]

3.B.1. Alimentazione flessibile di microturbine a gas - LA 3.5-3.12

3.B.2. Combustione diluita per sistemi hard-to-abate - LA 3.13

3.B.3. Sicurezza di miscele ammoniacca-idrogeno - LA 3.14

MACROTEMA 3.C. IMPIEGO DEI VETTORI DELL'IDROGENO IN UTENZE FINALI [CNR] LA 3.15-3.16

Le attività portate avanti dai diversi partner sono ulteriormente collegate da 4 “temi trasversali” che abbracciano anche WP diversi:

- Sviluppo caratterizzazione e testing di catalizzatori per processi chimici legati alle tecnologie dell'idrogeno
- Studio dell'accoppiamento di processi di produzione e conversione dell'idrogeno con fonti energetiche rinnovabili termiche e/o elettriche
- Ammoniaca come vettore e combustibile derivato dall' idrogeno
- Analisi di sostenibilità con approccio a ciclo di vita

La stretta collaborazione su queste tematiche fornisce un ulteriore elemento di effettiva collaborazione tra affidatari, che offre interessanti opportunità di cooperazione e sinergia anche con altri progetti del PTR. Ad esempio, sulle analisi di sostenibilità sono impegnati, con un programma di lavoro condiviso e coordinato, tutti e tre gli affidatari e Sotacarbo, mentre lo studio dell'accoppiamento dei processi termochimici con impianti solari termici a concentrazione, anche se condotto da ENEA, richiederà la stretta collaborazione con tutti i ricercatori coinvolti nello sviluppo dei singoli tecnologie.

Per questo motivo, i “temi trasversali” saranno oggetto di incontri e workshop dedicati, a cui saranno, ove opportuno, invitati anche rappresentanti dei gruppi di lavoro di altri progetti del PTR. Nello specifico, i temi trasversali che offrono l'opportunità di sviluppare sinergie sono:

- Studio dell'accoppiamento di processi di produzione e conversione dell'idrogeno con fonti energetiche rinnovabili termiche e/o elettriche, con particolare riferimento all'accoppiamento di processi termo(elettro)chimici con impianti solari termici a concentrazione: si evidenzia un'affinità con il Progetto Solare Termodinamico (tema 1.9). Relativamente allo sviluppo e studio sperimentale di tecnologie innovative, il Progetto 1.9 si occupa di sistemi a concentrazione lineare, mentre il presente progetto include un unico tema che prevede l'uso di un sistema a concentrazione puntuale accoppiato con un reattore di reforming del biogas. Relativamente allo sviluppo di studi e analisi della producibilità di impianti solari a concentrazione, i due progetti si focalizzano su applicazioni di tipo diverso; tuttavia, si ritiene che la condivisione e discussione delle diverse metodologie per lo svolgimento di queste analisi possa essere uno dei principali argomenti per un workshop aperto alla partecipazione di esperti di entrambi i progetti.
- Sviluppo caratterizzazione e testing di catalizzatori per processi chimici legati alle tecnologie dell'idrogeno: in questo caso si evidenzia un'affinità con i Progetti Materiali e Dispositivi di Frontiera per Applicazioni Energetiche (tema 1.5). Anche se le applicazioni considerate nei progetti sono diverse, le tecniche di sintesi e produzione dei catalizzatori possono essere l'oggetto di un proficuo workshop che coinvolge esperti di entrambi i progetti.

Anche in questo triennio, le attività previste sono caratterizzate da una metodologia fortemente interdisciplinare e da una tipologia molto varia. Sono previste: caratterizzazione di materiali, realizzazione e testing di impianti sperimentali su scala di laboratorio e prototipale, sviluppo di software e database, sviluppo e validazione di modelli matematici a livello di componente e di sistema, analisi di scenari e di casi di studio, analisi di aspetti di sicurezza, analisi tecnico-economiche e di sostenibilità.

Nell'insieme, il progetto, a fronte di un investimento totale richiesto di circa 18,6 M€, consentirà di generare avanzamenti tecnologici con potenziali rilevanti ricadute sul sistema energetico nazionale in linea con gli obiettivi generali enunciati nella sezione 2.5.a.

In questo quadro altamente articolato, grande importanza è stata data al coordinamento e al monitoraggio delle attività durante la fase di implementazione e alla effettiva collaborazione tra i partecipanti. Gli affidatari collaboreranno in modo complementare e sinergico su diversi macro-temi di ricerca come descritto sopra.

Il coordinamento delle attività e la corretta implementazione del progetto saranno assicurati, oltre che da riunioni tecniche tra i soggetti coinvolti su specifici temi condivisi, da riunioni mensili dei referenti dei 3 affidatari, durante le quali verrà monitorato lo stato di avanzamento rispetto al raggiungimento dei risultati attesi e dei deliverable previsti per ciascuna delle LA attive nel periodo, valutando, ove necessario, opportune contromisure in caso di deviazioni dal programma di lavoro; a questo proposito, vale la pena ricordare che i risultati attesi ed i deliverable associati sono chiaramente indicati a valle della descrizione di ogni LA nella sezione 3 e riepilogati nella sezione 4, mentre nella sezione 6 sono definite preliminarmente le strategie di intervento rispetto ai principali rischi identificati sull'implementazione del progetto.

Il progetto prevede numerosi momenti di verifica intermedi prima della consuntivazione finale al mese 36, con SAL ai mesi 12 (RSE), 18 (CNR ed ENEA) e 24 (RSE). Inoltre, molti dei temi di ricerca proposti viene sviluppato in più linee di attività consecutive, collocate in SAL diversi, in modo che il raggiungimento dei risultati e la produzione dei deliverable previsti per una LA funga da milestone per la verifica

dello stato di avanzamento delle attività.

Infine, la condivisione dei risultati e il coordinamento e monitoraggio delle attività saranno garantite anche dall'attività di comunicazione interna al consorzio prevista nel WP4, che si esplicherà principalmente attraverso lo svolgimento di workshop tra gli affidatari, organizzati con cadenza semestrale, coinvolgendo, ove opportuno, rappresentanti dei cobeneficiari e selezionati esperti esterni. Queste azioni hanno lo scopo di favorire la massima condivisione tra Affidatari dei risultati conseguiti e un efficace coordinamento delle attività, ma anche quello di poter identificare, attraverso la condivisione con esterni, eventuali criticità nell'implementazione del progetto e ricevere suggerimenti per rendere l'azione del progetto ancora più efficace e allineata con le principali traiettorie di ricerca nazionali ed internazionali.

Resta inteso che questi momenti di verifica e condivisione non sostituiranno riunioni tecniche di coordinamento che si svolgeranno prevalentemente da remoto tra affidatari e cobeneficiari coinvolti su temi (di WP o trasversali) comuni.

Per quanto riguarda le risorse economiche richieste per lo svolgimento del progetto, la struttura del budget mostra una prevalenza dei costi di personale che, per i 3 WP tecnici costituiscono una quota tra il 60 % (WP1 e WP3) e il 70 % (WP2) del totale. Tale ripartizione risulta coerente con l'incremento di TRL prevista per il progetto, tenendo conto di quanto segue:

- Anche se si può affermare che la maggior parte delle attività del progetto si muove nel range di TRL tra 3 e 5, per alcuni temi è prevista una TRL di arrivo pari a 4 (validazione su scala di laboratorio), evidentemente associata con altri costi diretti più bassi.
- In un'ottica di ottimizzazione dell'uso delle risorse e di capitalizzazione dei risultati, nelle attività per le quali è prevista una TRL finale più elevata, si è previsto di sfruttare in larga parte infrastrutture sperimentali rilevanti che si trovano già nella disponibilità degli affidatari perché sviluppate nell'ambito di progetti di precedenti trienni RdS o in altri contesti. Operando eventuali opportune modifiche impiantistiche, tali infrastrutture costituiscono piattaforme in cui è possibile testare, in condizioni rilevanti di esercizio, innovazioni di processo o nuovi componenti prototipali sviluppati nel progetto, riducendo notevolmente i costi necessari. Alcuni esempi di queste infrastrutture sono la fornace solare presente presso il C.R. ENEA Portici, su cui verranno effettuate modifiche per consentire il collegamento di un prototipo di reattore per il reforming solare del biogas sviluppato nel progetto, o gli impianti FABER e Power-to-X utilizzati da Sotacarbo nell'ambito delle attività del WP1 e 2.

Relativamente ai costi per attività di consulenza, è opportuno inoltre considerare che l'affidatario RSE, per il quale non è previsto il coinvolgimento di co-beneficiari nel progetto, ha in alcuni casi, per mancata disponibilità delle facility, demandato l'attività sperimentale a università con le quali sono state attivate delle collaborazioni di tipo oneroso (costi D).

Per garantire la robustezza del piano di lavoro, sono state anzitutto le principali criticità relative a tutte le linee di attività ed è stato elaborato il piano di rischio, presentato nella sezione 6. I principali punti di forza e gli elementi di criticità possono essere riassunti a livello di WP come segue:

#### WP 1

La maggior parte delle attività sperimentali previste nell'ambito del WP1 (pirolisi in bagni fusi, gassificazione di rifiuti plastici non riciclabili, water splitting foto(elettro)catalitico, elettrolisi in celle SOE) si sviluppano a partire da attività portate avanti nell'ambito del precedente PTR. Questo costituisce un punto di forza, sia dal punto di vista della valorizzazione delle risorse impiegate, dei risultati ottenuti e delle infrastrutture sviluppate, sia dal punto di vista della gestione dei rischi nell'implementazione del progetto. Infatti, molte criticità imprevedibili che inevitabilmente emergono nelle attività di ricerca, sono già state identificate e almeno in parte risolte; inoltre, parte dell'infrastruttura necessaria per l'esecuzione delle prove sperimentali è già nella disponibilità degli affidatari, riducendo i rischi associati ai ritardi nelle forniture.

Ovviamente, questo riduce, ma non elimina, la possibilità di imprevisti, che sono stati valutati, identificando opportune contromisure. Data la specificità dei rischi per ogni tema trattato nel WP, si rimanda al Piano di Rischio riportato nella proposta progettuale per i dettagli.

#### WP 2

Tra i punti di forza delle attività proposte all'interno del WP2 si segnala la copresenza sia di tematiche di carattere prettamente teorico (sviluppo di modelli numerici e strumenti di simulazione) che di tipo esclusivamente sperimentale, andando a coprire molteplici aspetti della filiera legata al trasporto e accumulo dell'idrogeno puro o in blending. In entrambi gli approcci, particolare rilevanza è data l'innovatività delle proposte progettuali, alle potenziali ricadute sul sistema energetico in termini sia tecnologici che ambientali. Le attività di mitigazione del rischio implementate nelle singole LA si basano su un'attenta pianificazione delle singole attività e ove necessario in una loro ripianificazione, nel costante monitoraggio dei risultati ottenuti, nell'implementazione di soluzioni alternative che vanno dall'esecuzione di prove/test presso altri laboratori, in caso di indisponibilità di apparecchiature esistenti, al supporto di ditte esterne per l'esecuzione di specifiche prove in campo, all'impostazione del lavoro con approccio progressivo a complessità crescente.

#### WP 3

Si osserva che le attività del WP3 per quanto concerne lo sviluppo di celle a combustibile PEM e l'alimentazione flessibile delle turbine a gas si fondano sui risultati ottenuti nel precedente PTR22-24, e li sviluppano ulteriormente; inoltre, l'utilizzo di infrastrutture esistenti, sia

a livello di laboratori che di impianti, contribuisce ulteriormente a rafforzare il progetto proposto e a ridurre i rischi. Per le attività nuove (es. sviluppo di sistemi di visione per il robot collaborativo e lo sviluppo di un sistema di supervisione dell'impianto AGATUR), sono state individuate azioni di mitigazione dei rischi, dettagliate nell'apposita tabella del progetto.

Oltre che dalle strategie di gestione del progetto sopra descritte, la credibilità dei risultati previsti è supportata dalla comprovata esperienza posseduta dal gruppo dei partecipanti sui temi del progetto. Gli affidatari rappresentano tre dei principali punti di riferimento nazionali per la ricerca sulle tecnologie dell'idrogeno e possiedono una consolidata rete di infrastrutture di ricerca che va da laboratori scientifici a impianti dimostrativi di larga scala.

L'intero consorzio, che include anche Sotacarbo SpA e 8 istituti universitari italiani di rilievo, possiede un significativo track record sugli argomenti del progetto, dimostrato da pubblicazioni scientifiche e dalla partecipazione in importanti progetti di ricerca nazionali ed internazionali.

Inoltre, è stato elaborato un piano di rischio, presentato nella sezione

## 2.7 Impatto sul sistema energetico e benefici attesi

### a) Impatto e benefici sul sistema energetico

Come testimoniato dagli obiettivi generali enunciati nella sezione 2.5.a, l'intera azione del progetto è allineata alle priorità definite dal PNIEC e mirata a fornire soluzioni concrete a supporto del sistema energetico italiano, a beneficio della sua sostenibilità e resilienza, contribuendo al contempo al raggiungimento degli obiettivi di sicurezza energetica.

Il PNIEC individua chiaramente l'idrogeno come un elemento fondamentale della strategia per il raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione del sistema energetico, con contributi significativi nel settore termico (in modo particolare per applicazioni nei settori industriali hard-to-abate), e dei trasporti. Risulta infatti ormai evidente che la completa elettrificazione dei nostri consumi energetici finali non sarà possibile nel breve termine. La decarbonizzazione dei settori hard-to-abate, come le industrie ad alta intensità energetica e il trasporto pesante, richiederà quindi approcci alternativi. Oggi, a livello mondiale, l'industria rappresenta approssimativamente il 30% dei consumi energetici finali e gli attuali processi industriali necessitano per il 70% di energia sotto forma di calore a bassa, media e, soprattutto, alta temperatura. Soddisfare questa richiesta energetica in modo sostenibile è indispensabile e richiederà l'uso di una combinazione di diverse tecnologie e vettori energetici, che consentano di alimentare in modo flessibile le utenze finali, senza richiedere radicali trasformazioni nelle loro modalità di utilizzo dell'energia in tempi rapidi.

Per rispondere a questa sfida, nel progetto viene proposto lo sviluppo di nuovi generatori di calore flessibili per la combustione di idrogeno, vettori idrogeno e loro miscele. Inoltre, una parte molto significativa delle attività del progetto è finalizzata allo sviluppo, o al miglioramento della performance tecnico-economica, di processi di produzione di idrogeno rinnovabile e alla sua conversione in vettori liquidi, quali ammoniaca o DME, che possono essere anche utilizzati come combustibili rinnovabili di origine non biologica in utenze non elettrificabili.

Tali tecnologie possono inoltre contribuire al raggiungimento dei target fissati dal PNIEC per la quota di utilizzo, nel settore trasporti, di idrogeno prodotto da FER non biologiche (almeno pari al 2% dei consumi settoriali complessivi) o per la produzione di calore per l'industria (almeno 330 ktep nel 2030). Complessivamente, si stima che almeno l'80% della domanda di idrogeno al 2030 (0,25 Mton/a al 2030) sarà prodotta sul territorio nazionale, mentre la restante quota sarà importata; a tal fine, la possibilità di trasportare l'idrogeno nella rete gas in sicurezza e la disponibilità di tecnologie efficienti per la produzione e riconversione in idrogeno di vettori chimici diversificati e più facilmente trasportabili, potranno risultare determinanti. Per questo motivo, le attività proposte nel progetto si concentrano anche su questi aspetti.

Sul fronte della decarbonizzazione del settore elettrico, non è previsto un contributo diretto del progetto sulle tecnologie di generazione (anche sono previste attività di ricerca su celle a combustibile). Tuttavia, come già evidenziato, diverse delle tecnologie investigate nel progetto relative, ad esempio, all'immissione in rete e allo stoccaggio, ovvero alle applicazioni per la fuel-flexibility di turbine a gas, possono supportare la penetrazione delle rinnovabili non programmabili nel sistema elettrico, permettendo lo stoccaggio dell'overgeneration e contribuendo in modo sostenibile alla flessibilità della rete.

Relativamente al conseguimento degli obiettivi di sicurezza energetica definiti dal PNIEC, risultano fondamentali l'aumento di produzione interna di energia da fonte rinnovabile e la diversificazione dell'approvvigionamento.

Questo richiede soluzioni per la flessibilità e resilienza della rete elettrica, che permettano di aumentare in modo sostenibile la quota di rinnovabili non programmabili, ma anche lo sviluppo di filiere produttive di gas rinnovabili (tra cui il DME rinnovabile e l'idrogeno); inoltre, considerando che il gas continuerà a giocare un ruolo determinante per il sistema energetico nazionale durante il periodo di transizione e procederà ad integrarsi con i crescenti volumi disponibili di tali gas rinnovabili, favorire lo sviluppo di un sistema di trasporto del gas che possa essere idoneo anche per sviluppare una rete multivettoriale atta a trasportare sia gas naturale che idrogeno risulta altresì indispensabile. Tutti questi aspetti sono al centro degli obiettivi delle attività proposte nel progetto.

Un altro elemento fondamentale per garantire la sicurezza energetica sarà la realizzazione di una vasta capacità di accumulo e soluzioni di

stoccaggio che prevedano l'utilizzo dei vettori energetici alternativi (idrogeno/metano sintetico), forniranno un'adeguata risorsa di flessibilità. In quest'ottica, risultano particolarmente rilevanti le attività del progetto dedicate allo sviluppo dello stoccaggio geologico dell'idrogeno (puro o in miscela con metano), che può fornire una soluzione per l'accumulo di lunga durata e alta capacità a servizio della rete.

#### **b) Benefici per gli utenti**

I vantaggi ambientali derivanti dalla decarbonizzazione del sistema energetico descritti nella sezione precedente ricadono ovviamente in cascata sugli utenti e, più in generale, su tutta la cittadinanza.

Tuttavia, in caso di futura implementazione delle tecnologie qui proposte, i benefici tangibili nel breve periodo per gli utenti del sistema elettrico nazionale, sia domestici, che industriali, sarebbero verosimilmente quelli associati alla sicurezza energetica derivante dal significativo aumento della penetrazione delle rinnovabili nel settore elettrico (e del gas). Infatti, la riduzione della dipendenza dalle importazioni di energia, in particolare di combustibili fossili, ridurrebbe l'esposizione degli utenti alla volatilità dei prezzi, mettendoli al riparo da rapide variazioni dovute ad eventi di mercato o geopolitici. Questo appare come un aspetto molto significativo in un contesto di rapida crescita del costo dell'energia per i consumatori, con previsioni di aumento delle bollette anche fino al 10% nel 2025, sulla base di fonti ARERA.

Inoltre, come già evidenziato, le tecnologie studiate nel progetto contribuiscono alla flessibilità e resilienza della rete elettrica, riducendo il rischio di disservizi per l'utente finale.

#### **c) Previsione delle ricadute applicative**

Coerentemente con il PNIEC, dove è riportato che il Piano triennale 2025-2027 della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale si concentra nella ricerca fondamentale, e in linea con il progetto del precedente triennio, le attività di ricerca proposte hanno un carattere particolarmente innovativo e si concentrano su livelli di maturità tecnologica relativamente bassi. Pertanto, al termine del progetto, nella maggior parte dei casi, saranno richieste ulteriori attività di sviluppo prima di poter intraprendere un percorso di industrializzazione. Inoltre, la valutazione quantitativa delle ricadute che tecnologie a bassa TRL possono avere sul mercato e sulle filiere produttive presenta grandi difficoltà ed incertezze e la sua attendibilità è fortemente subordinata all'ottenimento di risultati sperimentali che confermino la fattibilità delle tecnologie e le stime relative alle performance.

Al netto di queste limitazioni, anche per questo triennio, la scelta delle tecnologie considerate nel progetto è stata fatta valutando, a lungo termine, le possibili ricadute applicative sul tessuto industriale italiano, e le prospettive di creazione di una filiera nazionale nel settore delle tecnologie dell'idrogeno.

L'attuale fabbisogno nazionale annuo di idrogeno si attesta a poco meno di 1,5 Mtep. Circa il 95% viene utilizzato nelle raffinerie e nell'industria petrolchimica, dove viene prodotto attraverso processi termochimici, primo tra tutti lo steam reforming del gas naturale, che copre il 70 % della produzione per il settore chimico. La produzione di idrogeno tramite processi termochimici costituisce quindi oggi un settore consolidato nell'industria italiana, che interessa una filiera industriale comprendente società di ingegneria, EPC, industrie oil&gas, chimiche e petrolchimiche, in possesso di un solido know-how per lo sviluppo e la gestione di questi processi, e che opera anche sui mercati esteri. Una significativa parte delle attività del WP1 è dedicata alla produzione sostenibile di idrogeno attraverso processi termochimici che ben si prestano ad essere industrializzati nel contesto della filiera (e delle competenze) esistenti. Un chiaro esempio di questi processi è il reforming solare del biogas. Per quantificare l'impatto effettivo che questo comporterebbe sul settore, occorrerebbe quantificare la quota di mercato di produzione di idrogeno che sarà coperta da questo tipo di processi.

Al momento, la quasi totalità (99 %) della produzione nazionale di idrogeno è destinata all'uso come materia prima. Con lo sviluppo dell'utilizzo dell'idrogeno in ambiti energetici ed in settori industriali nei quali non è attualmente utilizzato, il mercato è destinato ad espandersi notevolmente. La Strategia Nazionale Idrogeno elabora diversi scenari, secondo i quali i consumi lordi italiani di idrogeno al 2050 vanno da 6,39 (scenario più conservativo) a 11,93 (scenario "Alta diffusione") Mtp.

Secondo tutte le attuali previsioni, il mercato è quindi destinato a una forte espansione e l'elettrolisi alimentata da fonti rinnovabili soddisferà la maggior parte della domanda di idrogeno verde; tuttavia come riportato nel PNIEC "a questo si potrà aggiungere anche l'idrogeno prodotto con tecnologie diverse dall'elettrolisi, tecnologie basate su processi biologici, termochimici e biotermochimici (quali pirolisi, gassificazione, SMR biometano) che potrebbero presentare costi di produzione molto competitivi". Tuttavia, al momento risulta estremamente difficile stimare quale potrebbe essere effettivamente la quota di mercato che sarà coperta dai processi termochimici. Le attività sulla produzione di idrogeno da feedstock carboniose considerate nel progetto offrono inoltre una possibile soluzione, in un'ottica di economia circolare, per la gestione, recupero e valorizzazione di rifiuti associati a diverse attività produttive e domestiche. In conclusione, se da un lato risulta evidente la coerenza dei processi di produzione di idrogeno considerati nel progetto con le strategie nazionali ed è possibile identificare chiaramente settori che potrebbero beneficiare dello sviluppo di queste tecnologie, allo stato attuale risulta difficile quantificare l'entità dell'impatto che si potrebbe ottenere.

Relativamente alle attività di ricerca del WP2, queste intendono favorire la penetrazione dell'idrogeno verde e suoi derivati attraverso la promozione delle tecnologie Power-to-X, il consolidamento delle conoscenze sullo stoccaggio su larga scala e sul trasporto in sicurezza

dell'idrogeno in blend con gas naturale. Nello specifico, l'integrazione dei processi di produzione del metano per via biologica con il settore del trattamento acque reflue porterà a significativi benefici per gli operatori del settore e per gli sviluppatori di tecnologie ed impianti di produzione di biometano, migliorando l'efficienza energetica, riducendo i costi operativi e promuovendo la diffusione della tecnologia su altri impianti di depurazione. Lo sviluppo di metodologie modellistiche di tipo predittivo sul comportamento dei reservoir a fronte di ripetuti cicli di iniezione e produzione di idrogeno contribuirà a supportare le attività degli stakeholder del settore (società energetiche, enti regolatori, istituzioni (MASE, AREA,..) nella scelta e gestione in sicurezza degli impianti adibiti allo stoccaggio geologico. Studi sulla sicurezza del trasporto dell'idrogeno puro o in blending con il gas naturale nelle reti urbane possono essere un utile riferimento per le autorità di regolamentazione al fine di migliorare l'affidabilità delle infrastrutture esistenti e di quelle future, favorire lo sviluppo di nuove tecnologie e pratiche per la mitigazione del rischio, la pianificazione territoriale nonché lo sviluppo di linee guida per l'integrazione delle condutture in aree ad alto rischio.

Le attività sull'alimentazione flessibile delle turbine a gas proposte nel progetto sono allineate con l'interesse delle grandi industrie nazionali ed internazionali di sviluppare combustori fuel-flexible (sia per miscele di gas naturale e idrogeno, che di ammoniaca e idrogeno). Gli attori principali in Italia sono Baker Hughes ed Ansaldo Energia, con la prima focalizzata sulle turbine a gas di grande scala, e la seconda anche nel campo delle microturbine. Poiché le attività del PTR25-27 sulla fuel-flexibility puntano allo sviluppo di una tecnologia di combustione flessibile per microturbine, ma con caratteristiche di elevata scalabilità, le potenziali ricadute coprono sia la microgenerazione che quella di scala più grande. Si sottolinea che con l'incremento dell'installazione di capacità rinnovabile non programmabile, anche la capacità installata di turbine a gas è destinata a crescere, come evidenziato da quanto accaduto in Irlanda negli ultimi anni [1].

In base a quanto detto, il potenziale impatto delle attività di ricerca e sviluppo sulla fuel-flexibility nel settore delle turbine a gas è giustificato. Per quantificarlo, occorre considerare che la maggior parte delle attività previste nel PTR25-27 sull'alimentazione flessibile di microturbine a gas sono a TRL 3-4, e dunque il potenziale impatto riguarda solo il settore ricerca e sviluppo (R&S) del relativo comparto produttivo. Le aziende costruttrici di turbine a gas non forniscono dati dettagliati sugli investimenti in ricerca e sviluppo per ragioni di riservatezza competitiva e reporting aggregato. General Electric, Siemens Energy e Mitsubishi Power, ad esempio, dichiarano investimenti globali in innovazione senza specificare cifre per le turbine a gas. Inoltre, parte dei finanziamenti proviene da enti pubblici e consorzi come Horizon Europe e il Dipartimento dell'Energia USA, rendendo difficile isolare le somme destinate alle turbine a idrogeno. Tuttavia, alcune stime indicano che General Electric investirà oltre 400 M\$ per il miglioramento delle tecnologie a idrogeno [2], Siemens Energy oltre 500 M€ [3], e Mitsubishi Power circa 300 M\$ [4]; Ansaldo Energia ha ricevuto finanziamenti per oltre 200 M€ per lo sviluppo della combustione a idrogeno [5]. Complessivamente, il costo della R&S per la conversione delle turbine a gas all'idrogeno potrebbe variare tra 1,5 e 2,5 B\$ nel prossimo decennio.

Guardando oltre il settore delle tecnologie dell'idrogeno, promuovendo l'integrazione sinergica di sistemi e tecnologie diverse, le attività del progetto possono avere ricadute positive anche per altri ambiti tecnologici prioritari quali quello delle fonti rinnovabili, del nucleare e dei combustibili rinnovabili diversi dall'idrogeno. Infatti, grazie allo sviluppo di soluzioni a supporto della flessibilità e resilienza della rete elettrica, nell'ambito dell'immissione dell'idrogeno nella rete gas, dell'accumulo di grande capacità in siti geologici e della generazione elettrica flessibile da idrogeno, è possibile supportare una rapida e sostenibile espansione della capacità fotovoltaica; inoltre, tra i processi di produzione innovativi considerati, ampio spazio è dato a processi termo(elettro)chimici potenzialmente accoppiabili con impianti solari termici a concentrazione o con le tecnologie del nucleare sostenibile. Infine, i sistemi e le tecnologie per la produzione di vettori liquidi dell'idrogeno possono trovare impiego diretto anche nei processi di produzione degli e-fuels. Inoltre, l'industria di processo può beneficiare di tecniche di produzione di catalizzatori strutturati avanzati, anche customizzati con tecniche di stampa 3D, configurazioni reattoristiche innovative, metodologie e strategie per l'accoppiamento dei processi chimici con fonti rinnovabili termiche e/o elettriche.

Infine, si citano anche alcuni esempi di possibili ricadute di tipo socioeconomico e di promozione dello sviluppo territoriale. La presenza di impianti di elettrometanogenesi in zone a vocazione geotermica può agevolare lo sviluppo tecnologico ed industriale di aree attualmente poco sfruttate a causa del degrado causato dalle emissioni geologiche, mentre la valorizzazione degli scarti dell'industria agroalimentare per la produzione di idrogeno può promuovere un nuovo modello di sviluppo agricolo in aree attualmente svantaggiate.

Per quanto riguarda i proponenti, i principali benefici derivanti dall'implementazione di questa azione progettuale, restano la generazione o il consolidamento di rilevante know-how su un'ampia gamma di tecnologie dell'idrogeno ad elevata priorità a livello internazionale e l'aggiunta di nuove infrastrutture utili all'ulteriore sviluppo di tali tecnologie. Questi asset potranno costituire la base delle attività di un successivo triennio della RdS, un vantaggio utile per l'acquisizione di fondi competitivi nazionali ed europei o un elemento importante per attrarre finanziamenti di partner industriali interessati a collaborare nelle fasi successive di avanzamento, nella prospettiva dell'avvio di un percorso di industrializzazione dei risultati.

[1] Jan Emblemavag, "Wind energy is not sustainable when balanced by fossil energy", Applied Energy, vol. 305, pp 117748 (2022).

[2] [https://www.ge.com/sites/default/files/ge\\_ar2023\\_annualreport.pdf](https://www.ge.com/sites/default/files/ge_ar2023_annualreport.pdf)

[3] <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/investor-relations.html>

[4] <https://power.mhi.com/news/2023/0123.html>

[5] <https://hydronews.it/ansaldo-energia-nel-nuovo-piano-industriale-confermato-il-focus-sulle-tecnologie-per-lh2/>

## 2.8 Verifica dell'esito del progetto

### a) Oggetti e documentazione dei risultati finali

I deliverable di progetto (dettagliati nella sezione 4), costituiscono l'elemento per la verifica dell'esito del progetto e la documentazione del raggiungimento dei risultati attesi. Ognuna delle 81 linee di attività previste nel piano di lavoro è associata ad almeno un rapporto tecnico ed eventualmente altri deliverable, che possono essere altri rapporti tecnici, impianti/prototipi, software/database. Nel/i rapporto/i tecnico/i di ogni linea di attività viene documentato il raggiungimento degli specifici risultati attesi definiti in modo chiaro ed esplicito per ogni linea di attività a valle della descrizione della LA stessa e riepilogati nella tabella della sezione 4. Ove applicabile, il rapporto tecnico documenta anche la realizzazione di altri deliverable di tipo impianto o software, attraverso, ad esempio, la descrizione, la documentazione tecnica e fotografica dell'impianto, schemi, etc.

Tutte le attività dei cobeneficiari coinvolti nel progetto sono pienamente integrate e coordinate con quelle degli affidatari di riferimento nell'ambito degli specifici temi di ricerca in cui si inserisce la collaborazione. Nel caso dei temi trasversali, è in alcuni casi prevista anche prevista la collaborazione con altri affidatari, oltre a quelli di riferimento. In ogni caso, il coordinamento e il monitoraggio delle attività dei cobeneficiari sarà assicurato dall'affidatario di riferimento, principalmente attraverso l'organizzazione di riunioni periodiche da remoto. Riunioni tecniche di coordinamento in presenza saranno anche possibili, laddove è necessario un sopralluogo su impianti o fornire supporto durante l'installazione di un componente sviluppato dal cobeneficiario (ad esempio, elementi catalitici da installare all'interno di un reattore prototipale). Inoltre, i tempi e le modalità dell'esecuzione delle varie azioni previste da parte degli affidatari sono definite nella descrizione delle LA di loro competenza, facendo riferimento ai flussi di materiali (e.g., materiali sintetizzati o componenti realizzati) o informazioni (e.g., dati sperimentali, configurazioni impiantistiche) scambiati con le LA collegate per il raggiungimento degli obiettivi previsti.

Nonostante la forte integrazione delle proprie attività con quelle degli affidatari, i co-beneficiari svolgono le loro attività nell'ambito di linee di attività dedicate, affidate alla loro responsabilità. A tali linee di attività sono associati specifici risultati attesi, deliverable e criteri per la verifica dell'attività svolta, esplicitamente dichiarati nella proposta progettuale e interamente in capo ai cobeneficiari stessi. Non vi saranno quindi ambiguità nell'identificazione del contributo fornito dai cobeneficiari all'implementazione del progetto.