

PIANO TRIENNALE DI REALIZZAZIONE 2022-2024 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 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]
- Sapienza Università di Roma [URM1-DIAEE]
- Sapienza Università di Roma [URM1-DICMA]
- Sapienza Università di Roma [URM1-DIMA]
- Sotacarbo – Società Tecnologie Avanzate Low Carbon SpA [SOTACARBO]
- Università Campus Bio-Medico di Roma [UCBM]
- Università degli Studi di Cagliari [UCA-DIEE]
- Università degli Studi di Cagliari [UCA-DSCG]
- Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale [UCAS]
- Università degli Studi di Firenze [UFI]
- Università degli Studi di Messina [UME]
- Università degli Studi di Napoli Federico II [UNA1]
- Università degli Studi di Napoli Parthenope [UPAR]
- Università degli Studi di Palermo [UPA]
- Università degli Studi di Roma “Tor Vergata” [URM2]
- Università degli Studi Guglielmo Marconi [UMAR]
- Università degli Studi Roma Tre [URM3]
- Università della Campania “Luigi Vanvitelli” [UVAN]
- Università di Bologna [UBO-DICAM]

- Università di Bologna [UBO-DIN]
- Università di Salerno [USA]
- Università di Siena [USI]
- Università Politecnica delle Marche [UPM]

Durata del progetto: 36 mesi

Costo proposto: 17.895.391,01 €

2. DATI GENERALI DEL PROGETTO

2.1 Dati progetto

Titolo del progetto

Progetto Integrato Tecnologie dell'idrogeno

Durata del progetto

36 mesi

2.2 Descrizione progetto

Abstract del progetto

Il presente progetto propone un vasto e ambizioso programma di ricerca che tratta, a diversi livelli, molteplici tecnologie che interessano tutta la catena del valore dell'idrogeno, dalla produzione agli usi finali. Le attività di ricerca proposte hanno un carattere particolarmente innovativo e si concentrano su livelli di maturità tecnologica relativamente bassi.

Rispetto alla produzione di idrogeno, vengono considerati processi innovativi, alternativi all'elettrolisi dell'acqua e del vapore (attualmente caratterizzate da un maggiore livello di maturità tecnologica), che potranno in futuro essere affiancati all'elettrolisi per soddisfare la crescente domanda di idrogeno sostenibile 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 che usano un feedstock carbonioso rinnovabile o di riciclo, in grado di combinare, in un'ottica di economia circolare, la produzione di idrogeno con servizi aggiuntivi, quali la gestione/recupero di rifiuti non riciclabili o la co-produzione di materiali valorizzabili sul mercato. Nello specifico, verranno sviluppati materiali catalitici per processi di gassificazione di rifiuti agro-industriali e oli alimentari esausti, verrà studiato, su scala di laboratorio, il processo di pirolisi del biogas/biometano in bagni fusi ad alta temperatura e verranno sviluppate significative innovazioni di processo per la gassificazione in letto bollente di rifiuti plastici non riciclabili.

Inoltre, il progetto contribuisce allo sviluppo e alla diffusione delle tecnologie di accumulo e trasporto dell'idrogeno lungo le tre direttrici principali legate allo stoccaggio, trasporto e alle tecnologie PtX, che consentono la conversione dell'energia elettrica rinnovabile in combustibili verdi per lo stoccaggio in forma chimica dell'energia e per il supporto al processo di decarbonizzazione di settori "hard-to-abate", quali quello dei trasporti e dell'industria pesante, oggi profondamente legati all'impiego di combustibili di derivazione fossile e che difficilmente possono essere decarbonizzati con altre tecnologie più efficienti ed economiche. A livello internazionale, negli ultimi anni sono state avviate importanti iniziative e numerose attività di ricerca ma, a seconda della specifica applicazione, è ancora necessario sviluppare processi, materiali e componenti impiantistici per rendere le tecnologie sostenibili dal punto di vista ambientale, economico e sociale e determinare una più rapida ed efficace penetrazione dell'idrogeno come vettore energetico totalmente rinnovabile. L'attività di ricerca intende contribuire allo sviluppo del processo globale, effettuando studi e sperimentazioni sui processi e valutando anche l'integrazione di nuovi componenti e sistemi ausiliari volti ad aumentare le performance dei processi e la sostenibilità ambientale, riducendo in prospettiva i costi di investimento e operativi. Nello specifico, l'attività punta nel suo insieme a sviluppare ed analizzare diverse tecnologie da integrare nei diversi contesti applicativi, quali elementi dell'infrastruttura necessari a "disaccoppiare" temporalmente e geograficamente la produzione dell'idrogeno dal suo utilizzo. In questo ambito, si darà corso ad attività di analisi, modellazione, test e validazione di tecnologie PtG/L presso laboratori e impianti integrati e ad una serie di attività incentrate sulla conduzione di campagne sperimentali presso un "Campo Prove Reti Gas", che rappresenta un modello fisico, su scala ridotta, del sistema di trasporto/distribuzione del gas naturale, che verrà utilizzato, con gli opportuni adeguamenti, per caratterizzare e validare il comportamento e le prestazioni di materiali, dispositivi e strumenti, e definire linee guida e procedure operative relative alla gestione, alla manutenzione e alla sicurezza in presenza di idrogeno e blend con il gas naturale.

Infine, il progetto punta ad accelerare la penetrazione dell'idrogeno nel sistema energetico, stimolandone la domanda nel breve periodo in applicazioni a supporto della flessibilità (e quindi anche a supporto della penetrazione delle fonti rinnovabili non programmabili); a tale scopo, sono previste attività di sviluppo tecnologico e di processo, relative all'alimentazione flessibile di microturbine a gas con miscele gas naturale-idrogeno, e attività volte alla caratterizzazione degli effetti dell'utilizzo di tali miscele in motori a combustione interna (in particolare a pistoni). Inoltre, sono previste attività volte a favorire la diffusione delle unità a celle a combustibile, in vista di un impiego estensivo dell'idrogeno come vettore energetico nel settore dei trasporti e stazionario, attraverso lo sviluppo di processi innovativi per la produzione dei piatti bipolari per stack PEFC.

Per quanto riguarda l'alimentazione flessibile di microturbine a gas con miscele gas naturale-idrogeno, le attività saranno rivolte all'implementazione e alla verifica, sia in condizioni stazionarie che dinamiche, di tecnologie di combustione che consentano di contenere le emissioni di NOx utilizzando una miscela gas naturale-idrogeno con un contenuto di H₂ oltre il 50% in volume di H₂.

Saranno anche studiati gli effetti dell'utilizzo di miscele gas naturale-idrogeno sulle prestazioni energetico/ambientali dei motori a

combustione interna, in particolare quelli cogenerativi a pistoni, e sul degrado dei loro componenti nell'arco di tutta la vita utile. Le attività sullo sviluppo di processi innovativi per la produzione dei piatti bipolari per stack PEFC saranno basate sull'additive manufacturing e sull'utilizzo dei criteri di sustainability-by-design. In particolare, si interverrà sul design e sul processo di produzione con stampa 3D dello stack di celle a combustibile per abbatterne i costi (10-15%) e diminuire l'impatto ambientale, e sull'assemblaggio automatizzato con l'ausilio di robot che garantiscano elevate capacità di produzione in assenza di difetti con un abbattimento dei costi per unità di prodotto del 10-20%.

Abstract del progetto ENG

This wide and ambitious research project deals, at multiple levels, with several technologies covering the whole hydrogen value chain, from production to final uses. The proposed research activities are particularly innovative and focus on relatively low technology readiness levels.

Regarding hydrogen production, some innovative processes are considered, which are alternative to water and steam electrolysis (currently closer to market) and could, in the future, complement electrolysis in meeting the growing sustainable hydrogen demand at a production cost of 3 €/kg in 2030, in line with the target set by the strategic research and innovation agenda (SRIA) of the Clean Hydrogen Partnership for the so-called "other routes of hydrogen production". More in detail, the focus is on photo(electro)catalytic water-splitting processes and on thermochemical processes using renewable or recycled carbonaceous feedstocks, which combine, from a circular economy perspective, hydrogen production with additional services, such as waste managing/recovery or co-production of marketable materials. Specifically, catalysts for the gasification of agro-industrial waste and spent cooking oils will be developed, the process of biogas/biomethane pyrolysis in high-temperature molten baths will be investigated and tested on lab scale, and significant process innovations will be developed for bubbling fluidized bed gasification of non-recyclable plastics.

Furthermore, the project contributes to the development and deployment of hydrogen storage and transport technologies along the three main lines related to storage, transport and PtX technologies, which allow the conversion of renewable electricity into green fuels for the chemical storage of energy, and to support the decarbonization process of hard-to-abate sectors, such as transport and heavy industry, today that can hardly be decarbonised with other more efficient and economical technologies. At an international level, important initiatives and extensive research have been carried out in recent years, but, depending on the specific application, it is still necessary to develop processes, materials and plant components to make technologies sustainable from an environmental, economic and social point of view and determine a more rapid and effective penetration of hydrogen as a 100% renewable energy vector. This action aims at contributing to the development of the global process, by carrying out studies and experiments on the processes and also by evaluating the integration of new components and auxiliary systems aimed at increasing process performance and environmental sustainability, while reducing investment and operational costs in the future. Specifically, the action aims at developing and analyzing different technologies to be integrated in different application contexts, as elements of the infrastructure necessary to temporally and geographically "decouple" the production of hydrogen from its use. In this context, activities of analysis, modelling, testing and validation of PtG/L technologies will be carried out in integrated laboratories and plants and a series of activities focused on experimental campaigns at a gas network test field, which represents a physical model, on a small scale, of the natural gas transport/distribution system and will be used, with the appropriate adaptations, to characterize and validate the behavior and performance of materials, devices and tools, and define guidelines and operating procedures related to management, maintenance and safety in the presence of hydrogen and blends with natural gas.

Finally, the project aims at accelerating the penetration of hydrogen in the energy system, by stimulating the demand in the short term in applications supporting flexibility (and, therefore, penetration of non-programmable renewables); to that aim, process and technological development activities on flexible fuel mixing in gas microturbines with hydrogen-natural gas mixtures, and activities aimed at characterizing the effects of the use of such mixtures in internal combustion engines. Furthermore, activities aimed at favoring the diffusion of fuel cell units are envisaged, in view of the extensive use of hydrogen as an energy vector in the transport and stationary sector, through the development of innovative processes for the production of bipolar plates for PEFC stacks. As regards the flexible fueling of gas microturbines with natural gas-hydrogen mixtures, the activities will be aimed at the implementation and verification, both in stationary and dynamic conditions, of combustion technologies which allow NO_x emissions to be contained using a natural gas-hydrogen mixture with an H₂ content exceeding 50% by volume. The effects of the use of mixed natural gas-hydrogen on the energy/environmental performance of internal combustion engines, in particular cogeneration reciprocating engines, and on the degradation of their components over their lifetime will also be studied. The development of the innovative design and production processes for bipolar plates for PEFC stacks will be based on additive manufacturing and on the use of sustainability-by-design criteria. In particular, the new design and 3D-based production process of the fuel cell stack to reduce its costs (10-15%) and reduce the environmental impact, and on the automated assembly with the aid of robots which guarantee high production capacities without defects with a reduction of costs per unit of 10-20%.

2.3 TRL progetto

TRL iniziale: 2

TRL finale: 5

Le attività di ricerca proposte hanno un carattere particolarmente innovativo e si concentrano su livelli di maturità tecnologica relativamente bassi. Tuttavia, non è possibile identificare univocamente un TRL di partenza e di arrivo, in quanto il progetto copre una vasta gamma di tecnologie ed innovazioni, 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.

Complessivamente, partendo dal livello più basso a quello più alto che si prevede di raggiungere nel progetto, l'incremento è da TRL 2 a TRL 5. Tuttavia, le attività si collocano principalmente nel range di TRL 2-4, arrivando allo sviluppo di impianti che permettono la validazione delle tecnologie su scala di laboratorio. Per alcune delle innovazioni sviluppate, sono inoltre previste attività di testing preliminare anche a TRL 5, possibili grazie all'utilizzo di infrastrutture ed impianti pilota sviluppati nel precedente triennio della RdS, che permetteranno di validare le tecnologie in condizioni rilevanti di esercizio.

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.

2.4 Inquadramento del progetto nello stato dell'arte

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

L'idrogeno è un abilitatore imprescindibile della transizione energetica in linea con gli obiettivi del Green Deal Europeo. La strategia europea di lungo termine (COM UE 773-2018) prevede il raggiungimento della Carbon Neutrality al 2050, indicando tra le misure abilitanti l'adozione del PowerToX e dell'idrogeno verde o a basso tenore di carbonio, prevedendo un consumo complessivo al 2050 di circa 140 Mtoe di idrogeno. Anche l'"Hydrogen strategy for a climate-neutral Europe" prevede una crescita della percentuale di idrogeno verde o a basso tenore di carbonio, nel mix energetico europeo dall'attuale 2% al 13-14% al 2050, supportando l'installazione al 2024 di 6 GW di elettrolizzatori (1 mln di ton H₂), al 2030 40 GW (10 mln di ton di H₂). Oltre all'Europa, diversi Paesi e Agenzie Internazionali hanno definito roadmap al fine di favorire la penetrazione del vettore idrogeno in tutti i settori energetici.

Attualmente, l'Italia sta sviluppando la propria Strategia Nazionale Idrogeno, della quale, nel 2020, il Governo ha pubblicato le Linee Guida Preliminari, testo preparatorio alla pubblicazione di un più completo piano strategico. Il PNIEC italiano include l'idrogeno verde o a basso tenore di carbonio, tra gli obiettivi al 2030, con un contributo dell'1%, sul target di rinnovabili nei trasporti (21,6%), attraverso l'uso diretto o l'introduzione nella rete del GN. Lo studio "The Hydrogen Challenge", elaborato per SNAM da McKinsey, prevede una rapida crescita della domanda di idrogeno in Italia nei prossimi decenni: circa 29 TWh di idrogeno al 2030, con una riduzione delle emissioni pari a circa 8 MtCO₂eq.

Per supportare la penetrazione dell'idrogeno verde o a basso tenore di carbonio, nel sistema energetico e raggiungere questi obiettivi, è oggi fondamentale rimuovere ostacoli non tecnologici, come problemi di natura infrastrutturale, normativa e sociale, ma c'è anche grande spazio per la ricerca e lo sviluppo di innovazioni che migliorino la performance ed i costi delle tecnologie attualmente disponibili. In ogni caso, nell'affrontare problemi tecnologici e non, è fondamentale che l'azione interessi tutta la catena del valore dell'idrogeno, dalla produzione, fino agli utilizzi finali, per evitare la formazione di colli di bottiglia tecnologici, normativi e di mercato, che di fatto vanificano i risultati raggiunti in un singolo settore.

Relativamente alla produzione di idrogeno, è evidente che il vecchio modello produttivo dovrà essere abbandonato, in favore di nuove opzioni basate sull'uso di fonti energetiche e materie prime rinnovabili. Ad oggi, i processi più maturi per la produzione di idrogeno verde sono l'elettrolisi alcalina e PEM, alimentate da elettricità prodotta da impianti fotovoltaici o eolici. Tuttavia, esiste un'ampia gamma di processi alternativi e meno maturi, in grado di produrre idrogeno verde da diverse combinazioni di feedstock e fonti energetiche rinnovabili. Se opportunamente sviluppati, tali processi potranno affiancare l'elettrolisi nel soddisfacimento della crescente domanda di idrogeno verde o a basso tenore di carbonio, permettendo di sfruttare appieno la versatilità di questo vettore energetico in diversi contesti locali, a vantaggio della resilienza e flessibilità del sistema energetico. Inoltre, alcuni di questi processi combinano la produzione di idrogeno con la fornitura di servizi aggiuntivi, come lo smaltimento di rifiuti o la coproduzione di altri prodotti chimici valorizzabili sul mercato.

In questo ambito, nel WP1 "Produzione" del presente progetto, saranno oggetto di studio processi di water splitting fotoelettrochimico, che utilizzano acqua come feedstock e l'energia fotonica della radiazione solare, e processi di conversione termochimica di feedstock carboniosi rinnovabili (ad es. biomasse, biogas) o di recupero (ad es. rifiuti) alimentati da calore rinnovabile (prodotto, ad es., da impianti solari termici).

I sistemi fotocatalitici si basano su fotocatalizzatori anodici (a base di ossidi, calcogenuri od alogenuri metallici) e catodici (a base di biossido di titanio, nitrato di carbonio o calcogenuri metallici). La scissione della molecola d'acqua con un sistema solo fotonico ha dimostrato avere efficienze inferiori al 1%, ma efficienze più alte si possono raggiungere in presenza di elettroliti molto aggressivi o con

l'accoppiamento ad altre fonti energetiche. Attualmente, i test di laboratorio menzionati in letteratura riportano misure per lo sviluppo di idrogeno, sotto irraggiamento, con durata temporale massima non superiore alle 10 h consecutive.

Negli ultimi anni, la pirolisi di miscele contenenti metano (ad es. 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. Il processo di pirolisi del metano consiste nella decomposizione diretta ad alta temperatura della molecola di metano (gassoso) in idrogeno (gassoso) e carbonio (solido). In ragione della diversa fase dei prodotti di reazione, il processo consente di separare e catturare facilmente il carbonio prodotto senza l'implementazione di processi di cattura e sequestro (CCS) a valle, favorendone lo stoccaggio sotto 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. 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. L'entrata in esercizio dei primi impianti industriali basati sull'uso di reattori al plasma è prevista nel 2026, mentre i processi in bagni fusi sono ancora oggetto di studi meno avanzati, principalmente su scala di laboratorio.

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.

In tutti i casi, alimentando la reazione di pirolisi con energia rinnovabile elettrica (per i processi al plasma e termochimici, riscaldando elettricamente) o tramite calore rinnovabile ottenuto, ad esempio, da impianti solari termici a concentrazione (per i processi termochimici) le emissioni del processo vengono ulteriormente ridotte, fino ad arrivare alla produzione di idrogeno 100% rinnovabile ed emissioni potenzialmente negative nel caso di utilizzo di materie prime rinnovabili come biometano o biogas. A tal fine, sarebbe però auspicabile condurre il processo a temperature inferiori a quelle attualmente considerate, scendendo da 1000 °C (e oltre), a temperature inferiori ai 600 °C; ciò richiede l'identificazione di materiali per i bagni fusi che permettano di operare in queste condizioni, in modo sicuro ed efficiente, ottenendo prodotti carboniosi valorizzabili sul mercato.

Rimanendo nel campo di produzione di idrogeno da feedstock carboniose, esistono estese e importanti opportunità tecnologiche di valorizzazione dei materiali residuali attualmente sfruttate in misura solo marginale, da qui, la prospettiva di seguire i principi dell'economia circolare attraverso l'ottimizzazione delle tecnologie termochimiche per generare gas di sintesi e idrogeno da rifiuti e/o prodotti di scarto. Tra questi, alcune tipologie di rifiuti provenienti dal settore agroindustriale, rappresentano un costo di gestione rilevante per le aziende e, in alcuni casi, un problema ambientale dovuto al loro smaltimento illegale. Sebbene spesso siano state proposte alcune tipologie di trattamento (i.e. combustione, conversione biochimica), limitate sono invece le indagini in merito ad una potenziale conversione di tali rifiuti in idrogeno attraverso il processo di gassificazione. Anche i rifiuti plastici non riciclabili possono essere utilizzati come feedstock per la produzione di idrogeno; in questo ambito, la tecnologia di gassificazione a letto fluido bollente è ampiamente conosciuta e spesso utilizzata in progetti di ricerca ed industriali per la produzione di energia elettrica, ma necessita di approfondimenti per la produzione di syngas ad elevata concentrazione di idrogeno tramite l'utilizzo di vapore e ossigeno come agenti gassificanti in sostituzione dell'aria. Tra le varie criticità del processo, c'è la presenza di composti del Tar nel syngas, che richiede lo sviluppo di sistemi di pulizia del syngas a caldo a valle della sezione di gassificazione.

Data la composizione in acidi grassi degli oli vegetali (>95%) dall'elevato contenuto di idrogeno (>60% a livello di molecola), anche l'utilizzo di rifiuti quali gli oli vegetali esausti (UCO, Used Coking Oil) risulta oggi di particolare interesse per la generazione di idrogeno. Le maggiori criticità del processo di deidrogenazione degli acidi grassi sono l'energia richiesta dal processo, in quanto le reazioni coinvolte sono sensibilmente endotermiche e l'eventuale formazione di CO₂ come sottoprodotto del processo. La produzione annua di UCO da raccolta è di circa 100 mila tonnellate anno in Italia (consorzio CONOE 2018) e di circa 800 mila tonnellate in Europa. Attualmente, il maggior reimpiego dell'olio usato di cucina è quello della generazione diretta di energia elettrica e termica (utilizzo diretto dell'olio usato come combustibile), sebbene il suo impiego commerciale nella produzione di carburanti puliti stia assumendo un ruolo sempre più rilevante. Le maggiori criticità nell'utilizzo degli oli esausti sono legate all'estrema disomogeneità e variabilità della composizione di questi substrati organici e dalla presenza di elementi diversi che possono risultare dannosi ed inquinanti per il processo di produzione dell'idrogeno.

Per separare in modo selettivo l'idrogeno dagli altri prodotti di reazione presenti nel syngas da gassificazione della biomassa, è inoltre necessario disporre di sistemi efficienti ed economicamente sostenibili, come le membrane inorganiche, tuttora a livello di sperimentazione, che consentano di ottenere idrogeno puro dalle miscele di gas. Membrane realizzate in materiali ceramici a conduzione mista protonica-elettronica sembrano in grado di garantire ottima resistenza chimica e buone prestazioni nelle condizioni operative (es. resistenza all'esposizione a H₂S). Come evidenziato in letteratura, a tutt'oggi il maggiore interesse si concentra verso membrane a fase singola costituite da composti di lantanidi e tungsteno (Ln₆WO₁₂) e membrane a fase doppia ottenute abbinando un ossido a struttura perovskite e un ossido a struttura fluorite.

L'idrogeno può supportare la penetrazione delle energie rinnovabili nel sistema energetico, sia come elemento per lo stoccaggio e l'assorbimento di significative quantità di energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili in eccesso rispetto alla domanda istantanea

(anche per servizi di bilanciamento), sia come vettore per la fornitura di energia rinnovabile in applicazioni difficilmente elettrificabili, consentendo l'accoppiamento del settore elettrico e di quello dei combustibili, con quelli degli utilizzi industriali, della mobilità e del termico.

Affinché ciò sia possibile, è però indispensabile che siano disponibili tecnologie efficienti ed affidabili per lo stoccaggio e il trasporto dell'idrogeno, che sono oggetto del WP2 del presente progetto.

Sono strategiche in questo ambito le tecnologie di trasporto e accumulo dell'idrogeno declinate anche come sistemi Power to Gas e Power to Liquid (Power to Fuel o semplicemente E-Fuel) che possono in questa veste contribuire a conseguire gli obiettivi europei di riduzione delle emissioni garantendo al tempo stesso sicurezza, flessibilità, affidabilità e resilienza dell'approvvigionamento energetico.

Questo insieme di tecnologie prevede la conversione di energia elettrica in combustibili gassosi (metano di sintesi o idrogeno) o in combustibili liquidi, consentendo uno stoccaggio stabile di tipo "chimico" della fonte primaria rinnovabile. Nel caso tipico l'energia elettrica viene utilizzata per alimentare un elettrolizzatore che produce idrogeno dall'acqua; l'idrogeno viene poi stoccato tal quale, utilizzato in utenze di diverso tipo, riconvertito in elettricità nei periodi di deficit.

Altra possibilità è quella di combinare l'idrogeno prodotto con anidride carbonica in un processo, detto metanazione, che consente di produrre gas naturale sintetico; tale processo può essere attuato sia per via termo-catalitica che biologica in reattori rimescolati, a gocciolamento o elettrochimici.

Generalmente l'efficienza dei sistemi Power to Gas con produzione di SNG aumenta quando è utilizzato anche il calore rilasciato, per esempio in cicli di processo di tipo industriale, in impianti di teleriscaldamento o in impianti integrati con la tecnologia di cattura della CO₂ (ad esempio per la rigenerazione delle ammine). Tuttavia, il vantaggio principale del Power To Methane è che il metano così prodotto sarebbe iniettabile immediatamente e al 100% nella rete gas, potrebbe quindi essere facilmente trasportato attraverso l'infrastruttura di gas naturale esistente sfruttandone la grande capacità di accumulo. Il metano prodotto può essere utilizzato come combustibile immediatamente avendo a disposizione un insieme di utilizzatori finali già presente rispetto all'idrogeno e ne facilita pertanto la diffusione nel breve periodo. Le fonti di approvvigionamento della CO₂ si possono così individuare: recupero da upgrading del biogas prodotto per digestione di biomasse, syngas ottenuto per gassificazione di biomasse, recupero di CO₂ da punti di emissione di gas di suolo, cattura da processi industriali quali cementifici, impianti petrolchimici, o da impianti di combustione, emissioni delle centrali di produzione elettrica ecc. L'efficienza in termini di PCI di conversione dell'energia elettrica in prodotto finale delle differenti filiere varia in un range molto ampio, a seconda dei singoli step che la compongono e delle condizioni finali che possono prevedere la sezione di metanazione, e/o la compressione a specifiche.

Le rese energetiche del PtG (da elettricità a combustibile) sono dell'ordine del 52-70% nel caso della produzione elettrochimica di idrogeno (fino ad oltre l'80% nel caso di sviluppo di elettrolizzatori ad alta temperatura) e del 45-50% nel caso si arrivi fino alla produzione di metano di sintesi. Sia nel caso dell'elettrolisi ad alta temperatura, che della metanazione chimica, che è un processo esotermico, è possibile incrementare la resa del processo mediante recupero del calore rilasciato. Anche se il primo impianto è stato realizzato in Giappone dal Tohoku Institute of Technology nel 2003, attualmente la leadership tecnologica è europea con in testa paesi come la Germania, la Francia, la Svizzera e la Danimarca.

La metanazione biologica è un processo ben conosciuto attuato da microrganismi del dominio Archaea (archei), responsabili della produzione di metano negli impianti di biogas. Nell'ambito delle tecnologie power-to-gas, l'utilizzo dei consorzi microbici caratterizza le tecnologie "bioelettrochimiche" quali l'elettrometanogenesi (processo di metanazione autotrofa di tipo idrogenotrofo che metabolizza la CO₂ su biocatodi) e la biometanazione, in cui la produzione di CH₄ avviene in soluzione acquosa e in presenza di gas (CO₂ e H₂) per garantire la sopravvivenza dei microrganismi.

Le ricerche correnti sull'elettrometanogenesi si svolgono ancora, prevalentemente, in laboratori universitari con la finalità di studiare le condizioni più convenienti per scalare la tecnologia ad un livello precompetitivo. Un aspetto molto importante, tuttora da esplorare, è quello degli ambiti applicativi del processo di elettrometanogenesi; sotto questo profilo, le sorgenti naturali di gas dal sottosuolo distribuite sul territorio italiano appaiono essere ambiti promettenti dove esplorare l'applicazione di questa tecnologia con vantaggio competitivo e ambientale.

La tecnologia della metanazione biologica ha visto recentemente la realizzazione dei primi impianti basati su reattori CSTR a rimescolamento. Attualmente, l'aspetto principale limitante del processo è costituito dalla scarsa disponibilità dell'idrogeno gassoso ai microrganismi dovuta alla bassa solubilità del gas in acqua. Le ricerche in questo ambito mirano a ridurre i consumi ausiliari dell'impianto, ad aumentare l'efficienza di reazione con soluzioni tecnologiche per migliorare la diffusione dell'idrogeno o sviluppando ceppi di microrganismi più efficienti.

Un'ulteriore famiglia di processi consente la produzione di combustibili liquidi attraverso la reazione dell'idrogeno con anidride carbonica proveniente da processi industriali o da altre fonti. Tutte queste tecnologie sono sempre più spesso proposte come elementi importanti in un futuro sistema caratterizzato da una sempre più elevata penetrazione delle energie rinnovabili.

In prospettiva sostituendo i combustibili fossili con gli omologhi rinnovabili è possibile ridurre le emissioni di gas serra a partire dai settori della mobilità e in quelli dell'hard to abate. Certamente la domanda futura di sistemi Power-to-Liquid e lo stoccaggio di energia in sistemi Power-to-Gas rappresenta un mercato emergente per i sistemi di elettrolisi. Tutto ciò, a seconda della specifica applicazione e delle strategie operative, pone nuovi requisiti in materia di prestazioni dei sistemi in termini di capacità e quindi passaggio di taglia, efficienza, flessibilità anche a carico parziale e in stand-by, e costi. Sono in quest'ambito di particolare interesse i processi e i sistemi che possono

essere eserciti in maniera reversibile assommando in un unico componente funzionalità diverse dando luogo complessivamente ad una soluzione Power to Power. Il sistema è costituito da un componente elettrolizzatore/cella a combustibile (le cosiddette rSOFC: celle reversibili a ossidi solidi) e da un reattore catalitico che a seconda delle condizioni al contorno può operare da metanatore o da reformer per la produzione di idrogeno da gas naturale.

Il problema dell'accumulo di grosse quantità d'idrogeno può essere affrontato, ove possibile, attraverso lo stoccaggio geologico. Non esistono studi di dettaglio sull'accumulo geologico dell'idrogeno, ma solo analisi generiche con applicazioni sperimentali limitate alle caverne nelle miniere di sale. In letteratura sono documentati gli effetti che le reazioni tra l'idrogeno e i minerali presenti nel sottosuolo potrebbero avere sull'integrità della roccia di copertura e del reservoir, con possibile impatto sulla tenuta del deposito geologico (leakage dell'idrogeno). Un argomento ancora oggetto di studio è quello relativo all'attività microbica che potrebbe favorire la formazione di solfidi e acidi in grado di originare fenomeni di corrosione sui componenti del pozzo. Esistono, quindi, studi e sperimentazioni in corso su questi temi, ma ulteriori ricerche risultano necessarie per approfondire i fenomeni connessi allo stoccaggio geologico dell'idrogeno, non ultimi quelli legati agli aspetti della sicurezza.

Per quanto riguarda gli aspetti normativi e regolatori relativi all'impiego dell'idrogeno puro o in miscela (blending) con il gas naturale nella rete di trasporto, la normativa europea esistente (CEN) non presenta un quadro di riferimento univoco in termini di range di interoperabilità e standard di qualità del gas. Sperimentazioni in diversi paesi hanno evidenziato che il sistema infrastrutturale esistente può tollerare fino al 10%vol di idrogeno in miscela con il gas naturale, ma l'eventuale disallineamento su questo valore impone di monitorare questo processo a livello europeo e confrontare i risultati con quanto emerge dagli studi di carattere nazionale al fine di proporre standard comuni in materia.

Per favorire la penetrazione del vettore idrogeno, sarà inoltre necessario spingere sullo sviluppo tecnologico di sistemi che ne rappresentano la domanda, intervenendo sia sulla verifica e l'adeguamento di tecnologie esistenti al funzionamento con miscele metano/idrogeno o con idrogeno puro, sia attraverso lo sviluppo di tecnologie innovative. In tale contesto, il WP3 dedicato agli usi finali, si occuperà di celle a combustibile, a bassa ed alta temperatura, e dell'alimentazione flessibile di motori a combustione interna (microturbine e a piston) con miscele gas naturale-idrogeno.

I componenti principali che pesano maggiormente in termini di impatto ambientale e costi di produzione nel costituire uno stack di cella a combustibile sono i piatti bipolari, solitamente prodotti per fresatura CNC o iniezione (piatti in grafite composita) o, in alternativa, per stampaggio (piatti metallici). Ciò si comprende facilmente pensando che un'unità fuel cell è generalmente composta da solo due piatti di serraggio e, alle potenze commerciali, da un numero di piatti bipolari dell'ordine del centinaio o superiori, ciò implica che, pur se di piccolo spessore, il loro numero elevato consente al pacco dei piatti bipolari di superare facilmente il peso dei soli piatti di serraggio.

Allo stato attuale in ambito internazionale, i maggiori produttori di stack e di componenti per fuel cell stack utilizzano le tecniche prima menzionate

In ambito internazionale la ricerca sul design dei piatti bipolari e dello stack ha portato alla nascita di una economia di settore e alla produzione di stack dell'ordine di 1000 pz/anno per azienda, anche per applicazioni commerciali.

Si noti però che i componenti sono solitamente prodotti utilizzando metodi di fabbricazione di diretta derivazione laboratoriale, che non riescono a raggiungere né alti volumi, né il desiderato abbattimento dei costi.

Risulta perciò essenziale, nell'ottica della realizzazione di un sistema elettrico nazionale basato su fonti rinnovabili, implementare un'attività di ricerca scientifica volta a colmare il gap internazionale e promuovere la conoscenza sia nel campo dello stack design sia nel campo della produzione e assemblaggio del device.

Per ottenere l'abbattimento dei costi di produzione e dell'impatto ambientale, è necessario, quindi, dare un decisivo impulso alla ricerca e allo sviluppo sui metodi di produzione e di progettazione sostenibile (sustainable-by-design), come le tecnologie per la produzione ad alta velocità dei componenti dello stack, i processi automatizzati per il suo l'assemblaggio, design innovativi dei piatti bipolari (generative design).

La diffusione dell'idrogeno è anche legata alla verifica del funzionamento e delle prestazioni di tecnologie esistenti, come gli impianti di generazione di potenza o cogenerativi.

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 CO₂. Tuttavia, nonostante i notevoli sforzi ed investimenti degli ultimi anni da parte dei vari produttori, l'effettiva fuel-flexibility delle macchine, cioè il loro funzionamento stabile dal 100% di gas naturale al 100% di idrogeno con contenuto di idrogeno variabile, 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 H₂, ma con perdite di efficienza rispetto ai sistemi senza diluizione, maggiori emissioni di NO_x 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 a causa di problematiche tecnologiche del sistema di combustione. Il contenuto di H₂ in volume accettato dipende dalla temperatura di esercizio e dalle specifiche tecnologie di combustione adottate dai produttori: in media, si va dal 30-50% delle turbine di classe heavy duty, al 50-70% di quelle di taglia inferiore, fino al 20% delle microturbine, come riportato in "Hydrogen Gas Turbines", European Turbine Network, 2020. Non esistono tuttavia in commercio turbine a gas in grado di operare con

puro gas naturale, puro idrogeno, e loro miscele: è invece proprio questo che si richiede per accettare le potenziali future fluttuazioni nella fornitura di idrogeno. 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 H₂ (in questo contesto si collocano le attività proposte sull'alimentazione flessibile di microturbine), ed anche di ammoniacca (considerata un promettente vettore di H₂): per esempio, nel 2020 Kawasaki ha dimostrato di operare con il 100% di H₂ 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% ammoniacca; 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.

Occorre anche valutare gli effetti dell'idrogeno sui vari componenti degli impianti a gas. In letteratura, gli studi sull'impatto dell'idrogeno sugli utilizzatori finali sono limitati e, in particolare, pochi studi affrontano in modo sistematico le problematiche meccaniche e termiche legate all'impiego dell'idrogeno puro o in miscela con il metano (blending) nei motori a combustione interna, soprattutto per lunghi periodi di esercizio. Questi effetti, legati all'operatività delle macchine e agli interventi di manutenzione richiesti sui vari componenti, saranno valutati su motori di tipo alternativo (a pistoncini).

b) Attività svolte nel triennio precedente

Il tema di ricerca 1.3 "Tecnologie dell'idrogeno" non era previsto nel precedente piano triennale (19-21) della RdS. Tuttavia, alcune linee di ricerca proposte nel presente progetto si sviluppano a partire da (o comunque sono collegate a) attività svolte da affidatari e cobeneficiari nel PTR 19-21, con particolare riferimento al tema di ricerca 1.2 "Sistemi di accumulo, compresi elettrolitico e power to gas, e relative interfacce con le reti" - progetto di ricerca (work package) 3 "Power to gas". In particolare, i collegamenti con le attività del precedente triennio riguardano il WP2 "Trasporto e accumulo" ed il WP3 "Usi finali" del presente progetto.

Nello specifico, per quanto riguarda le tematiche relative al trasporto e accumulo di idrogeno, nel precedente triennio si è provveduto alla quantificazione di indicatori tecnico economici dei sistemi PtG, è stato progettato e realizzato l'impianto denominato "Power-to-Fuels", un prototipo P2G/L flessibile, versatile e di taglia significativa per la proiezione dei risultati su scala industriale. L'attività ha consentito di mettere in esercizio l'impianto pilota P2G/L ma, vista la complessità e la versatilità del prototipo, alcuni aspetti particolarmente importanti per lo sviluppo delle tecnologie necessitano ancora di ulteriori approfondimenti a TRL più basso.

Per la conversione dell'idrogeno elettrolitico in metano di sintesi, attraverso il processo di metanazione catalitica, è stato progettato un impianto di produzione di metano sintetico equipaggiato di un elettrolizzatore da 25 kWe. Sono state in quest'ambito analizzate e studiate nuove configurazioni, attraverso la definizione di strategie di controllo in condizioni di carico variabile. Relativamente alla produzione di metano sintetico mediante la metanazione biologica, si è realizzato un processo di metanazione in-situ in reattori a mescolamento (CSTR), in reattori a gocciolamento (tricklebed) e in elettro-reattori con azione microbica. Per approfondire i limiti alla commercializzazione di questa tecnologia, è stata altresì indagata, la sintesi diretta della CO₂ e dell'idrogeno a DME con catalizzatori bifunzionali solfonati, ed è stato sviluppato un prototipo da laboratorio di bioreattore di elettrometanogenesi a bassa e alta temperatura.

Si è inoltre dato corso alla predisposizione di linee guida a supporto di una regolamentazione sull'accumulo geologico dell'idrogeno puro o in miscela con gas naturale, verificando i dati disponibili nelle banche dati utilizzate per gli studi di giacimento e screening dei siti per lo studio di effetti corrosivi a strutture di pozzo dovuti alla presenza di idrogeno nel sottosuolo. È stato fornito un contributo alla redazione della Strategia Nazionale dell'Idrogeno e sono state fornite indicazioni per la definizione di struttura e contenuti di una piattaforma web per l'archiviazione organizzata di informazioni sul tema dell'idrogeno.

Per quanto riguarda i processi integrati e reversibili sono state condotte attività relative alla predisposizione di studi cinetici e modelli matematici e sono stati sviluppati materiali e componenti per reattori innovativi con l'integrazione del processo di co-elettrolisi di CO₂ e H₂O, attuato su elettrolizzatori ceramici (SOEC) e su reattori di metanazione ad alta e bassa temperatura.

Per quanto riguarda le attività connesse agli usi finali dell'idrogeno, nel precedente triennio si è lavorato sul tema della fuel-flexibility per microturbine a gas e motori a combustione interna. Relativamente alle microturbine, il tema è stato sviluppato tramite simulazioni fluidodinamiche, sperimentazioni su bruciatori in scala da laboratorio, e in scala reale sulla microturbina a gas da 100 kWe dell'impianto AGATUR (Advanced GAs TURbine Rising). In particolare, su tale impianto sono stati installati un sistema di accumulo di idrogeno e un sistema di erogazione che consente di alimentare la microturbina con portate di idrogeno variabili nel tempo per simulare l'effetto della variabilità del contenuto di H₂-green nella rete gas. La capacità di controllare le variazioni temporali del contenuto di idrogeno consente di indurre sulla microturbina a gas particolari condizioni di stress termomeccanico, di instabilità di combustione e di emissioni di inquinanti (in particolare, ossidi di azoto), da evitare per un funzionamento fuel-flexible sostenibile. La microturbina a gas è stata testata con successo per produrre energia elettrica con miscele gas naturale-idrogeno fino al 45% in volume di H₂. Tuttavia, il test è stato eseguito con un combustore dual-fuel (linee di alimentazione e bruciatori di metano ed idrogeno separati), che ha consentito di testare la macchina, il relativo sistema di controllo e gli impianti ausiliari, ma non è rappresentativo della tecnologia di combustione che deve prevedere un sistema di combustione unico e adattabile a miscele gas naturale-idrogeno di composizione variabile. Inoltre, i test hanno evidenziato emissioni di NO_x superiori ai limiti permessi. Relativamente ai motori a combustione, le precedenti attività erano finalizzate alle analisi

delle criticità legate all'impiego di miscele di gas naturale e idrogeno, con riferimento a malfunzionamenti dovuti a regolazione impropria per diversi tenori di idrogeno in miscela o sensibili variazioni di concentrazione nell'arco della giornata.

Infine, relativamente alle attività connesse alla produzione di idrogeno, solo il tema della scissione fotocatalitica dell'acqua è stato oggetto di studio nel precedente triennio della RdS, nell'ambito del tema di ricerca 1.6. Le altre tecnologie di produzione considerate nel presente progetto sono di nuova introduzione. Tuttavia, il tema dei processi di produzione di idrogeno verde alternativi all'elettrolisi alcalina e PEM è stato sviluppato anche nel precedente triennio (Tema di ricerca 1.2 - work package 3) attraverso lo studio su scala di laboratorio di 4 processi innovativi: elettrolisi a membrana a scambio anionico, elettrolisi del vapore in carbonati fusi, water splitting termochimico, reforming del biogas a bassa temperatura. Queste tecnologie sono attualmente sviluppate in altre cornici di finanziamento (PNRR, Missione 2, componente 2).

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

Le attività del progetto consentiranno un significativo avanzamento rispetto allo stato dell'arte descritto nelle precedenti sezioni attraverso il perseguimento dei seguenti specifici obiettivi scientifici e tecnologici:

1. PRODUZIONE

- Ottimizzazione del processo di gassificazione di rifiuti agroindustriali per la produzione di gas di sintesi ricco in idrogeno, attraverso la selezione e caratterizzazione dei rifiuti e lo sviluppo di materiali catalitici
- Sviluppo del processo di produzione di idrogeno verde basata sulla deidrogenazione di liquidi organici provenienti da substrati organici di scarto, come gli oli esausti da cucina (anche trasportatori dell'idrogeno), con sviluppo di nuovi materiali catalitici "altamente attivi", in grado di operare efficacemente e selettivamente la de-idrogenazione dei substrati organici (i.e. acidi grassi), in condizioni di processo "economicamente" sostenibili
- Sviluppo ed ottimizzazione di un processo per la gassificazione in letto bollente di rifiuti plastici non riciclabili e da biomasse basato sull'uso di ossigeno e vapore come agente gassificante. Il principale obiettivo atteso è l'aumento dell'efficienza complessiva del processo (oltre l' 80%), mediante la produzione di un syngas con un'elevata concentrazione di idrogeno e bassa concentrazione di tar ottenuto attraverso l'integrazione dell'impianto con un sistema di pulizia a caldo innovativo
- Sviluppo, realizzazione e caratterizzazione di membrane ceramiche per la separazione di H₂ puro ad alta temperatura da prodotti di gassificazione delle biomasse.
- Studio e caratterizzazione su scala di laboratorio del processo di pirolisi di biogas/biometano in bagni fusi a temperature inferiori ai 1000 °C. In particolare, le attività mirano all'identificazione di materiali idonei per il bagno fuso, alla definizione delle condizioni operative più interessanti per l'ottenimento di idrogeno e materiali carboniosi valorizzabili sul mercato e all'acquisizione di dati utili per lo scaleup. È anche prevista un'analisi tecnico-economica preliminare del processo.
- Sviluppo, su scala di laboratorio, di sistemi per la produzione di idrogeno verde attraverso scissione fotocatalitica dell'acqua, che consentano migliori prestazioni in termini di efficienza di conversione, durabilità e affidabilità. Nel dettaglio, le attività saranno indirizzate allo sviluppo di due differenti tipologie di celle: la prima, di tipo fotoelettrocatalitico, non accoppiata con pannelli solari, sfrutterà membrane polimeriche immerse in elettrolita liquido, che fungeranno da separatore per i prodotti di reazione (ossigeno e idrogeno). Nella cella verranno integrati materiali elettrodi innovativi. Parte fondamentale della ricerca, oltre allo studio dei materiali elettrodi, sarà l'identificazione di elettroliti liquidi in grado di migliorare le prestazioni della cella generando il minor numero di interazioni negative con gli elettrodi e la membrana. La prova di funzionamento del prototipo prevederà la realizzazione e caratterizzazione elettrochimica della cella elementare di fotoelettrocatalisi (fotoanodo/elettrolita/fotocatodo) e lo sviluppo di un sistema per l'accoppiamento della cella agli strumenti di analisi diretta o indiretta dell'idrogeno prodotto. La seconda tipologia di cella di fotoelettrolisi, accoppiata con pannelli solari, prevede l'utilizzo di membrane polimeriche che fungano da elettrolita, separando allo stesso tempo i prodotti di reazione (ossigeno e idrogeno) e l'integrazione di materiali elettrodi innovativi (semiconduttori binari del tipo NiFeOx per il fotoanodo e NiCuOx per il fotocatodo ricoperti con strati protettivi per limitare i fenomeni corrosivi). Il target prestazionale atteso di efficienza di conversione da solare a idrogeno, nella cella in scala di laboratorio, sarà almeno del 5 %, incrementando contemporaneamente il tempo di vita ed abbassando il costo dei materiali. La prova di funzionamento del concetto sperimentale proposto sarà fornita con la realizzazione e caratterizzazione elettrochimica di una cella elementare (fotoanodo/elettrolita/fotocatodo) di fotoelettrolisi. Sarà sviluppato ed integrato un sensore di idrogeno finalizzato alla prototipazione di un analizzatore di dimensioni ridotte, composto, oltre che dal sensore (conduttometrico o elettrochimico) di idrogeno, da un sensore di umidità/temperatura, per il monitoraggio della composizione della miscela H₂/H₂O in uscita dall'elettrolizzatore. Per l'analisi della trasferibilità dei risultati ottenuti per l'industria del settore sarà

effettuata un'analisi attraverso l'Environmental LCC (eLCC). Sviluppo di un sistema per la certificazione dell'origine green dell'idrogeno basato sulla distributed ledger technology (DLT) che garantisce la possibilità di fornire tale certificazione con trasparenza e tracciabilità attraverso un sistema distribuito, immutabile e a disposizione di tutti gli utenti.

- Sviluppo di un framework metodologico per la localizzazione ottima di impianti power-to-hydrogen per ridurre le congestioni di rete evitando il curtailment della produzione rinnovabile, in particolare nelle regioni dove la rete elettrica è più debole e meno interconnessa.

2. TRASPORTO E STOCCAGGIO

Il progetto punta nel suo insieme a sviluppare ed analizzare diverse tecnologie da integrare nei diversi contesti applicativi, quali elementi dell'infrastruttura necessari a "disaccoppiare" temporalmente e geograficamente la produzione dell'idrogeno dal suo utilizzo:

- Verrà dato corso in quest'ambito ad attività di analisi, modellazione e test di tecnologie PtG/L presso laboratori e impianti dedicati (Menhir c/o ENEA, Power to Fuel c/o Sotacarbo, rSOFC c/o CNR, PtG elettrochimico c/o RSE).
- Verrà dato corso a studi sul comportamento chimico-fisico dei materiali del sottosuolo a contatto con l'idrogeno puro o in miscela con gas naturale, al fine di analizzare la fattibilità in sicurezza dello stoccaggio geologico dell'idrogeno, mentre l'affinamento delle tecniche di simulazione numeriche permetterà di migliorare la comprensione delle fenomenologie indotte nel sottosuolo dallo storage e dai processi di iniezione ed estrazione del gas. L'attività modellistica legata allo studio di alcuni scenari incidentali, causati dal rilascio dal pozzo e successiva dispersione e combustione di miscele aria-H₂, potrà essere di supporto alle valutazioni sulla sicurezza dei depositi geologici. Verranno condotti analisi, studi e attività sperimentali per la caratterizzazione degli impatti legati all'immissione dell'idrogeno all'interno delle reti gas con test sulla componentistica tipica per l'accumulo in recipienti in pressione, la distribuzione, la regolazione e la misura. In generale gli studi forniranno utili indicazioni sugli obiettivi comuni da raggiungere a livello tecnico/regolatorio, al fine di indirizzare i diversi paesi europei verso l'utilizzo di parametri di qualità del gas realistici e confrontabili, supportando in questo modo l'interoperabilità del sistema e rispettando gli obiettivi energetici nazionali, individuando altresì le metodologie e gli strumenti volti alla valutazione e alla mitigazione del rischio.
- Verrà in quest'ambito effettuata la validazione di un sistema integrato composto da elettrolizzatore da 25 kWe, stoccaggio idrogeno da 6m³, metanazione da 1m³/h e sistema di trattamento del gas al fine di produrre un metano a specifiche di rete. La matrice di sperimentazione definirà le condizioni comuni a tutti i test e gli step in cui saranno suddivise le attività, definirà inoltre l'inventario dei dati che saranno acquisiti/rielaborati/immagazzinati le condizioni operative, il numero di test, l'intervallo di acquisizione e altri parametri di interesse. L'elaborazione a valle consentirà la valutazione delle rese del processo come efficienze e qualità globali del gas prodotto. Rispetto allo stato dell'arte e ai precedenti studi condotti, l'obiettivo riguarda principalmente la caratterizzazione del sistema globale e l'integrazione di componentistica in un'architettura innovativa (con sistemi di accumulo elettrico, sistemi di captazione della CO₂ da gas di suolo e sistemi di polishing del metano prodotto) che mira ad estendere l'operatività e la qualità del gas prodotto in questi sistemi alimentati da FER.
- Verrà dato corso ad una serie di attività incentrate sulla conduzione di campagne sperimentali presso un "Campo Prove Reti Gas", che rappresenta un modello, su scala ridotta, del sistema di trasporto/distribuzione del gas naturale e che verrà utilizzato, con gli opportuni adeguamenti, per caratterizzare e validare il comportamento e le prestazioni di materiali, dispositivi e strumenti, e definire linee guida e procedure operative di gestione e manutenzione in presenza di miscele H₂/GN a percentuali variabili integrando le informazioni e i risultati ottenuti dalle attività che coinvolgono i diversi soggetti cobeneficiari (compatibilità delle utenze per l'uso di diverse miscele di idrogeno-metano, studi di sostenibilità ambientale e socioeconomica rispetto all'uso di miscele H₂/GN, mappatura e censimento delle reti di trasporto e distribuzione del gas e analisi della compatibilità dei materiali, ecc).
- Sviluppo di un sistema di tipo P2G2P innovativo, basato su un dispositivo elettrochimico reversibile ad alta temperatura di tipo SOE/SOFC. Rispetto allo stato dell'arte e ai precedenti studi condotti, l'obiettivo riguarda principalmente l'analisi di una architettura di sistema reversibile, che consentirebbe con un unico dispositivo la fase di accumulo e quella di restituzione. Analisi delle prestazioni energetiche del sistema proposto in condizioni reali/realistiche di esercizio, sviluppando a tale fine un modello di calcolo per la simulazione del funzionamento in off-design, ovvero al variare dell'input elettrico disponibile da fonte rinnovabile non programmabile, ed analizzando i principali aspetti relativi alla dinamica di reversibilità.
- Dimostrare la fattibilità dell'applicazione della tecnologia della elettrometanogenesi a terreni impattati dall'emissione di gas geologici (CO₂), attraverso la realizzazione di un apparato dimostrativo e l'esecuzione di prove in campo.
- Continuare lo sviluppo e la sperimentazione di reattori per la metanazione biologica del tipo a gocciolamento, ancora a basso livello di

sviluppo (TRL<4), ma potenzialmente in grado di migliorare le condizioni di disponibilità dei reagenti ai microrganismi, di minimizzare i consumi energetici, i costi d'investimento e operativi, rispetto ad altre tecnologie.

3. USI FINALI

- Implementazione e verifica, sia in condizioni stazionarie che dinamiche, di tecnologie di combustione che consentano di contenere le emissioni di NOx in microturbine a gas alimentate con miscele gas naturale-idrogeno. In particolare, l'innovazione sarà sia a livello di processo che di componente, e consisterà nello sviluppo di una tecnologia di combustione integrabile con EGR (Exhaust Gas Recirculation) ed implementata in una nuova geometria di combustore, in modo da garantire l'utilizzo di una miscela gas naturale-idrogeno con un contenuto di H₂ del 20% in volume (stato dell'arte per microturbine) e dimostrare il raggiungimento di un trend tecnologico oltre il 50% in volume di H₂, nel rispetto dei limiti delle emissioni. Il raggiungimento degli obiettivi consentirà, da un lato di testare sia una tecnologia di combustione innovativa che una strategia di monitoraggio avanzata, 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 H₂ maggiore dello stato dell'arte.

- Studio approfondito dell'effetto dell'alimentazione di miscele H₂-gas naturale sulle prestazioni energetico/ambientali dei motori a combustione interna cogenerativi a pistoni e sul degrado dei loro componenti nell'arco di tutta la vita utile. L'obiettivo verrà perseguito attraverso l'uso della postazione di prova, realizzata nel precedente triennio della RdS, appositamente concepita per simulare le tipiche condizioni di esercizio caratterizzate da concentrazioni volumetriche d'idrogeno variabili nel tempo, al fine di seguire una curva di produzione di idrogeno, in uno scenario di forte penetrazione delle fonti rinnovabili.

- Sviluppo di processi innovativi per la produzione dei piatti bipolari per stack PEFC basati sull'additive manufacturing secondo criteri di sustainability-by-design.

Nello specifico, l'obiettivo è di ottenere: (i) design di piatti bipolari innovativi, in grado di assicurare un abbattimento dei costi economici e ambientali [10-15%], a parità o oltre le prestazioni rispetto alla letteratura scientifica, la cui produzione sarà possibile esclusivamente per stampa 3D, (ii) implementazione di processi produttivi automatizzati con l'impiego di robot industriali, che garantiscano velocità di produzione esente da difetti di assemblaggio dello stack, consentendo un abbattimento dei costi per unità di prodotto [10-20%]; in vista di un impiego estensivo dell'idrogeno come vettore energetico nel settore trasportistico e stazionario, (iii) miglioramento generale della metodologia di design e produzione in un'ottica di sostenibilità intrinseca.

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", che, nella fattispecie, andrà a realizzare presso il Centro di Ricerche ENEA della Casaccia, alle porte di Roma, una delle prime Hydrogen demo Valley italiane, una piccola cittadella dove verranno costruite un insieme di infrastrutture hi-tech a TRL significativo (con finalità dimostrative e quindi in generale con una maturità più elevata rispetto a quanto trattato in questo progetto) finalizzate alla ricerca, l'innovazione, la sperimentazione e la validazione delle diverse tecnologie di produzione, accumulo, distribuzione e utilizzo dell'idrogeno, puro o in miscela con il gas naturale, per applicazioni nei settori energia, trasporti, industria e residenziale.

Sono inoltre previsti alcuni collegamenti con progetti regionali e con attività svolte in altri progetti del PTR 22-24 della RdS; nello specifico: Progetto integrato 1.2 "Tecnologie di Accumulo Elettrolitico e Termico" e Progetto 1.6 "Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali".

Di seguito un elenco delle tematiche interessate:

- Nuovi materiali per i processi power to fuels: nel progetto 1.3 (LA2.23, LA2.24 e LA2.25) sarà effettuata la sintesi, la caratterizzazione chimico-fisica e lo scale-up di catalizzatori per i processi di sintesi del metano e del metanolo mediante idrogenazione catalitica della CO₂. In altri progetti, finanziati dalla Regione Autonoma della Sardegna, si stanno sviluppando nuovi materiali per la produzione di differenti combustibili rinnovabili (sintetizzati anche a partire da materiali di riciclo) e nuovi materiali per il processo di cattura della CO₂ direttamente dall'aria.

- Processi power to fuels: nel progetto 1.3 (LA 2.23 e 2.24) sarà effettuato lo sviluppo sperimentale dei processi di produzione di combustibili rinnovabili da CO₂ riciclata e idrogeno verde su un impianto da banco Xtl e sull'impianto P2G/L realizzato nel precedente triennio della Ricerca di Sistema. Nell'ambito di un progetto finanziato dall'Agenzia per la Coesione Territoriale, saranno realizzati nuovi laboratori e nuovi impianti che andranno ad implementare l'attuale Centro ricerche Sotacarbo con l'obiettivo di sviluppare, su diversa

scala, le diverse tecnologie e la loro integrazione.

- Sviluppo di stack per celle a combustibile: nell'ambito dell'AdP – PNRR è in programma lo sviluppo di stack con architettura innovativa, denominati "ad alta modularità" in grado di scalare la potenza nominale con valori di incremento piccoli e assicurare così una migliore capacità di integrazione di sistema.
- Microturbine a gas alimentate con miscele H₂-gas naturale: nell'ambito del programma Mission Innovation con il progetto "H₂ demo Valley: infrastrutture polifunzionali per la sperimentazione e dimostrazione delle tecnologie dell'idrogeno", WP4 "Utilizzi idrogeno, miscele e derivati", LA4.6 "Applicazioni per la produzione elettrica con sistemi mTG", sarà realizzato il modulo Exhaust Gas Recirculation dell'impianto AGATUR, il cui sistema di controllo sarà programmato con l'ausilio del database ottenuto in questo piano triennale; compatibilmente con i tempi di realizzazione, il modulo EGR sarà testato ed utilizzato anche nel presente piano triennale. Inoltre, 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 H₂-carrier (NH₃)", compatibilmente con le tempistiche dei progetti, potranno essere utilizzati per la definizione delle nuove configurazioni di bruciatori per microturbina previste in questo piano.
- Sistemi elettrochimici microbici: nel progetto 1.3 il processo di elettrometanogenesi verrà sperimentato in laboratorio e in siti identificati come idonei a tale applicazione (LA 2.4 e LA 2.5); il Progetto PNRR si propone la messa a punto di materiali innovativi degli elettrodi per sistemi elettrochimici microbici da sperimentare in ambito industriale, in condizioni di ipertermofilia e ad alta pressione.
- Rilascio, dispersione e combustione accidentale dell'idrogeno e di miscele idrogeno – metano: nel progetto 1.3 (LA 2.36 e LA 2.37) le attività saranno focalizzate da un lato alla messa a punto di alcuni strumenti di calcolo in dotazione a RSE per le analisi di sicurezza, dall'altro alla valutazione delle conseguenze associate al rilascio accidentale di una miscela di H₂, CH₄ e H₂S da un deposito geologico; tali attività presentano sinergie con quelle proposte all'interno del Progetto PNRR che prevedono di studiare, a partire da codici numerici già in uso e supportate da attività sperimentale, soluzioni di calcolo più efficaci/ottimizzate rispetto a quelle esistenti, per la simulazione del rilascio, dispersione e combustione di miscele di gas dalle reti di trasporto, distribuzione e stoccaggio.
- Tecnologia a membrana per la separazione di gas: gli studi su questa tecnologia, che nel progetto 1.3 si riferiscono alla separazione di H₂ (LA1.17 e LA1.18), vedono diverse analogie in termini di materiali utilizzati, tecniche di manufacturing e caratterizzazione materiali, con quanto sviluppato nel progetto RDS 1.6 ai fini dello sviluppo di membrane ceramiche per la produzione di ossigeno in processi industriali, e nel Progetto PNRR ai fini dello sviluppo di reattori a membrana per la termoscissione dell'acqua. Il tema delle membrane per la separazione di gas è affrontato anche nel Progetto Materiali di Frontiera 1.4 di CNR, che si propone di sviluppare membrane ceramiche a base di composti differenti (cerati-zirconati di bario drogati con ittrio e ceria drogata con gadolinio) da utilizzare in reattori a membrana. In questo caso, le membrane ceramiche verranno realizzate mediante tecniche di additive manufacturing a basso impatto ambientale, per verificare la possibilità di realizzare membrane asimmetriche con microstruttura ottimizzata mediante l'impiego della sola tecnica di microestrusione 3D. In parallelo, verranno studiati processi di impregnazione/deposizione di strati catalitici sulla membrana e metodi di washcoating per la funzionalizzazione della superficie. I risultati derivanti da questa specifica attività potranno dare indicazioni utili per la realizzazione di strati catalitici sulle membrane per separazione oggetto di studio nelle LA1.17 e 1.18.
- Materiali innovativi per anodi e catodi: alcuni materiali, quali ad esempio i MXeni e il TiO₂, sviluppati nei progetti RDS 1.2 e 1.6 saranno testati anche nelle attività del progetto 1.3 inerenti la produzione di idrogeno mediante scissione fotocatalitica dell'acqua (LA1.22 e LA 1.23); in particolare, i primi saranno testati in miscela con il C₃N₄ come materiale catodico, mentre il secondo verrà testato in miscela con BiVO₄, come materiale anodico della cella fotoelettrocatalitica.

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 dei seguenti obiettivi finali del progetto, associati a ciascuna delle tre aree della catena del valore dell'idrogeno coperte:

1. **PRODUZIONE.** Sviluppare processi altamente innovativi, alternativi all'elettrolisi dell'acqua e del vapore (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 di rifiuti non riciclabili o la co-produzione di materiali valorizzabili sul mercato.

2. TRASPORTO E ACCUMULO. Contribuire allo sviluppo e alla diffusione delle tecnologie di accumulo e trasporto dell'idrogeno lungo le tre direttrici principali legate allo stoccaggio, trasporto e tecnologie PtX, che consentono la conversione dell'energia elettrica rinnovabile in combustibili verdi per lo stoccaggio chimico dell'energia e per il supporto al processo di decarbonizzazione di settori "hard-to-abate", quali, in particolare, quello dei trasporti e dell'industria pesante, che difficilmente possono essere decarbonizzati con altre tecnologie più efficienti ed economiche. A livello internazionale, negli ultimi anni sono state avviate importanti iniziative e numerose attività di ricerca ma, a seconda della specifica applicazione, è ancora necessario sviluppare processi, materiali e componenti impiantistici per rendere le tecnologie sostenibili dal punto di vista ambientale, economico e sociale e determinare una più rapida ed efficace penetrazione dell'idrogeno come vettore energetico totalmente rinnovabile. L'attività di ricerca intende contribuire allo sviluppo del processo globale, effettuando studi e sperimentazioni sui processi valutando anche l'integrazione di nuovi componenti e sistemi ausiliari volti ad aumentare le performance dei processi, la sostenibilità ambientale (quali ad esempio la cattura della CO₂ dall'aria), riducendo in prospettiva i costi di investimento e operatività. Nello specifico le attività sono volte a migliorare il livello di readiness dell'attuale infrastruttura gas (trasporto, storage e distribuzione) individuando delle "linee guida" relative alle azioni ed agli interventi che si rendono necessari per rendere l'intero sistema pronto all'utilizzo con idrogeno, in miscela prima fino al 20% e puro almeno sulla rete di trasporto principale in prospettiva futura per tragguardare gli obiettivi di neutralità climatica in programma al 2050. Per quanto riguarda il PtX l'obiettivo è quello di migliorare l'integrazione delle tecnologie, estendere le ore di funzionamento degli impianti alimentati da FER variabili (fino al funzionamento praticamente continuo) grazie all'ibridizzazione di diverse tecnologie di accumulo e in definitiva ridurre i costi di produzione riducendo il gap attuale con gli omologhi combustibili fossili.

3. USI FINALI. Accelerare la penetrazione dell'idrogeno nel sistema energetico, stimolandone la domanda nel breve periodo in applicazioni a supporto della flessibilità (e quindi anche a supporto della penetrazione delle fonti rinnovabili non programmabili). Nello specifico, l'obiettivo viene perseguito attraverso lo sviluppo di soluzioni innovative che permettono di adattare all'alimentazione con miscele di idrogeno e gas naturale tecnologie di (co)generazione di pronta applicazione, valutando, in particolare, l'impatto su prestazioni, emissioni e problematiche di degrado dei componenti. Inoltre, si punta a favorire la capacità produttiva e la diffusione delle unità a celle a combustibile, intervenendo sul design e sul processo di produzione dello stack per abbattere i costi e diminuire l'impatto ambientale dovuto alla loro produzione attraverso l'uso di stampa 3D e l'assemblaggio automatizzato con l'ausilio di robot.

A quelli sopra elencati, si aggiungono i seguenti due obiettivi trasversali, di interesse, rispettivamente, per i settori della ricerca e dell'industria nazionali:

- 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
- Sviluppare tecnologie innovative particolarmente adatte (e quindi facilmente assorbibili dal) al tessuto industriale italiano, facilitando la formazione di una filiera nazionale nel settore delle tecnologie dell'idrogeno. In questa direzione va, ad esempio, la scelta di puntare anche su processi termochimici per la produzione di idrogeno, che sono sicuramente in linea con la lunga e solida esperienza maturata dell'industria chimica e di processo nazionale e non richiedono radicali cambiamenti di paradigma rispetto ai processi attualmente consolidati.

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 117 deliverable, tra cui: 101 rapporti tecnici, 11 impianti/prototipi e 5 software/database.

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

Impianti/prototipi:

- [P1.06-1] Setup per lo studio sperimentale su scala di laboratorio del processo di pirolisi del biogas/biometano in bagni fusi. L'impianto consente di testare diverse condizioni operative e materiali per il bagno fuso (metalli liquidi, sali fusi) ed è equipaggiato con un sistema di

controllo ed acquisizione delle condizioni operative di analisi dei prodotti gassosi.

- [P1.13-1] Sistema di pulizia del syngas prodotto da gassificazione a letto fluido
- [P1.18-1] Campioni di membrane ceramiche per la separazione d'idrogeno
- [P1.18-2] Realizzazione della postazione di prova per l'esecuzione dei test di permeazione.
- [P1.22-1] Primo prototipo di cella fotoelettrocatalitica con finestra di illuminazione a sezione variabile
- [P1.23-1] Secondo prototipo di cella fotoelettrocatalitica
- [P2.05-1] Prototipi di sistemi di elettrometanogenesi con strumenti validati (sensori) per il monitoraggio dei gas e dell'attività microbica nel suolo e sottosuolo
- [P2.09-1] Prototipo di captatore di CO₂ da soil gas
- [P2.26-1] Prototipo di sistema SOFC/SOE reversibile integrato con reattore di metanazione/reforming per la produzione di metano sintetico da fonti rinnovabili (es. upgrading di syngas/biogas).
- [P3.02-1] Prototipo di stack di celle a combustibile innovativo con piatti bipolari e piatti terminali prodotti per stampa 3D e assemblaggio robotizzato.
- [P3.07-1] Prototipo di bruciatore fuel-flexible sviluppato per la microturbina TURBEC T100 in assetto EGR

Software/database:

- [S2.31-1] Software per l'acquisizione delle misure effettuate su campo prove componenti rete gas
- [S2.39-1] Database per studi di carattere geologico-modellistico di utilità per la ricerca applicata al sistema energetico
- [S3.09-1] Software di analisi wavelet e caotica di una serie di campi fluidodinamici istantanei per la caratterizzazione multi-scala del mescolamento in combustori: tale software consentirà di caratterizzare iniettori e bruciatori dal punto di vista del mescolamento, e questa strategia di analisi potrebbe divenire un promettente strumento di progettazione
- [S3.10-1] Software (post-processing) per architettura GPU: si tratta di un software che consente di calcolare nuove grandezze, anche di tipo statistico, a partire da quelle trasportate nelle simulazioni termo-fluidodinamiche; sono attesi tempi di calcolo inferiori rispetto alla versione seriale o parallela di tipo MPI
- [S3.10-2] Software (simulazione) per architetture CPU-MPI/GPU: in particolare, si tratta del codice di simulazione termo-fluidodinamica HearT in cui il modulo di trasferimento radiativo dell'energia è scritto per GPU, mentre la restante parte del codice resta scritta in MPI; sono attesi tempi di calcolo inferiori rispetto alla versione puramente MPI

2.6 Fattibilità tecnico-scientifica

a) Fattibilità tecnico-scientifica

Il programma di ricerca proposto è vasto e ambizioso e tratta, a diversi livelli, molteplici tecnologie che interessano tutta la catena del valore dell'idrogeno. L'azione è articolata in 81 linee di attività (LA) raggruppate in 4 work package (WP): 3 WP tecnici, che si focalizzano rispettivamente sulle tecnologie di produzione (WP1, 25 LA), di trasporto e accumulo (WP2, 39 LA) e degli usi finali (WP3, 12 LA) dell'idrogeno, e 1 WP dedicato alle attività di disseminazione e comunicazione dei risultati (WP4, 5 LA). All'interno dei WP tecnici, le LA sono ulteriormente raggruppate in 8 macro-temi (e temi specifici) che definiscono in modo chiaro le aree di intervento del progetto:

1. PRODUZIONE

1.A. Idrogeno da biomassa e/o rifiuti [CNR, ENEA, RSE]

- Idrogeno da rifiuti agro-industriali e oli vegetali esausti (LA 1.1-1.4)
- Idrogeno da pirolisi del biogas/biometano (LA 1.5-1.10)
- Idrogeno da biomasse e rifiuti plastici (LA 1.11-1.16)
- Membrane per la separazione di idrogeno ad alta temperatura (LA 1.17-1.18)

1.B. Idrogeno da acqua mediante water splitting foto(elettro)chimico [CNR, RSE] (LA 1.19-1.23)

1.C. Sviluppo di metodologie e strumenti per favorire la penetrazione dell'idrogeno verde nel sistema energetico [CNR] (LA 1.24-1.25)

2. TRASPORTO E ACCUMULO

2.A. Power-to-X [CNR, ENEA, RSE]

- Metanazione catalitica e biologica (LA 2.1-2.5)
- Captazione di CO₂ da gas di suolo per applicazioni PtG (LA 2.6-2.9)
- Componenti ausiliari e integrazione di sistemi PtG (LA 2.10-2.14)
- Normativa e sicurezza per sistemi PtG e reti trasporto/distribuzione (LA 2.19-2.20)
- Power-to-liquids (LA 2.21-2.25)
- Power-to-Gas(-to-Power) (LA 2.26-2.28)

2.B. Immissione e trasporto in rete [CNR, ENEA, RSE]

- Analisi di componenti per reti trasporto/distribuzione idrogeno (LA 2.29-2.33)
 - Analisi di scenari e casi di studio (LA 2.34-2.35)
 - Aspetti di sicurezza e normativa per l'immissione in rete (LA 2.36-2.37)
- 2.C. Stoccaggio geologico [RSE] (LA 2.38-2.39)

3. USI FINALI

- 3.A. Manufacturing di celle a combustibile sustainable by design [CNR] (LA 3.1-3.4)
- 3.B. Alimentazione flessibile di motori a combustione interna con miscele gas naturale - idrogeno [ENEA, RSE] (LA 3.5-3.12)

4. DISSEMINAZIONE E COMUNICAZIONE DEI RISULTATI

Le attività previste, caratterizzate da una metodologia fortemente interdisciplinare e da una tipologia molto varia, includono sviluppo e caratterizzazione di materiali, realizzazione e testing di impianti sperimentali su scala di laboratorio, upgrading di infrastrutture e testing su scala prototipale, sviluppo di software e database, sviluppo e validazione di modelli matematici a livello di componenti e di sistemi, analisi di scenari e di casi di studio, analisi di aspetti normativi e di sicurezza, analisi tecnico-economiche.

Nell'insieme il Progetto, a fronte di un investimento totale richiesto di 18,05 M€, consentirà di generare risultati, avanzamenti tecnologici e potenziali ricadute sul sistema energetico nazionale, attraverso:

- la realizzazione di sistemi innovativi per la produzione di idrogeno a supporto della crescente diffusione di fonti rinnovabili non programmabili;
- lo sviluppo di tecnologie di trasporto e accumulo dell'idrogeno in grado di garantire sicurezza, flessibilità e resilienza dell'approvvigionamento energetico;
- la verifica e l'adeguamento di tecnologie esistenti al funzionamento con miscele metano/idrogeno attraverso l'incremento della vita utile, dell'affidabilità e della flessibilità operativa.

In questo quadro altamente articolato, grande importanza è stata data al coordinamento e monitoraggio delle attività durante la fase di implementazione e alla effettiva collaborazione tra i partecipanti. Gli affidatari collaboreranno in modo complementare e sinergico sulla maggior parte dei macro-temi di ricerca (più della metà dei macro-temi definiti vede la partecipazione di almeno 2 affidatari su 3 e 3 macro-temi vedono la partecipazione di tutti gli affidatari). 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. Inoltre, più della metà dei temi di ricerca proposti viene sviluppato in due linee di attività consecutive, rispettivamente collocate nella prima e nella seconda metà del progetto, in modo che il raggiungimento dei risultati e la produzione dei deliverable previsti entro il mese 18 funga da milestone per la verifica dello stato di avanzamento delle attività, lasciando tempo sufficiente per l'implementazione di contromisure nel caso di ritardi o problemi. 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.

Oltre che dalle strategie di gestione del progetto sopra descritte, la robustezza del piano di lavoro e la credibilità dei risultati previsti è supportata dalla comprovata esperienza posseduta dal gruppo dei partecipanti sui temi del progetto: oltre agli affidatari, che rappresentano 3 dei principali punti di riferimento nazionali per la ricerca sulle tecnologie dell'idrogeno, il consorzio include infatti la società Sotacarbo e 17 tra i principali istituti universitari italiani, tutti con un significativo track record dimostrato da pubblicazioni e partecipazione in importanti progetti nazionali ed internazionali.

2.7 Impatto sul sistema energetico e benefici attesi

a) Impatto e benefici sul sistema energetico

Il ruolo chiave dell'idrogeno e delle tecnologie ad esso connesse per la decarbonizzazione dei sistemi energetici è oggi ampiamente riconosciuto da documenti strategici internazionali, europei e nazionali. La strategia europea per l'idrogeno identifica l'idrogeno come un elemento "essenziale per supportare l'impegno dell'Unione a raggiungere la carbon neutrality entro il 2050 e lo sforzo globale per l'implementazione dell'Accordo di Parigi, mentre si lavora all'azzeramento dell'inquinamento". Nelle linee guida preliminari per la strategia italiana idrogeno rilasciate dal MISE nel 2020, "l'idrogeno occupa una posizione unica per contribuire agli obiettivi nazionali ambientali e a

una produzione più sicura e affidabile di energia”.

In questo quadro ed in linea con gli obiettivi del PNIEC (2019), le attività previste e gli obiettivi definiti nel presente progetto porteranno, in prospettiva, un significativo impatto positivo sul sistema energetico relativamente alle dimensioni della decarbonizzazione e della sicurezza energetica, andando ad incidere in diversi settori, quali quello elettrico, del gas, dell'industria e dei trasporti.

Per quanto riguarda il settore elettrico, i risultati del progetto contribuiranno allo sviluppo di tecnologie che potranno supportare la penetrazione delle fonti rinnovabili non programmabili, favorendo da un lato l'uso dell'idrogeno per l'accumulo ad alta capacità e lungo termine dell'energia (power to gas e stoccaggio geologico) e dall'altro la sostenibilità di tecnologie in grado di supportare la flessibilità e la resilienza della rete (turbine e motori ad alimentazione flessibile H₂-metano). Ne derivano chiaramente sia vantaggi ambientali, in termini di decarbonizzazione, che strategici ed economici, in termini di sicurezza energetica, grazie alla riduzione della richiesta di importazione di energia. In modo analogo, e strettamente connesso nell'ottica del sector coupling, i risultati del progetto possono contribuire alla decarbonizzazione e alla sicurezza energetica del settore gas. In questo caso, sono rilevanti gli studi sulla fattibilità tecnica e sugli aspetti di sicurezza connessi al trasporto, nella rete esistente, di miscele idrogeno-metano, sia in vista dell'immissione in rete di idrogeno rinnovabile prodotto, ad esempio, dall'overgeneration delle FER non programmabili, sia nel caso di impiego delle tecnologie PtG per la produzione di metano sintetico da idrogeno rinnovabile e anidride carbonica (catturata da processi industriali o siti naturali). Relativamente alla decarbonizzazione dei trasporti, settore responsabile nel nostro paese della maggiore quota di emissioni di gas serra e per il quale il PNIEC prevede un contributo dell'idrogeno intorno all'1% del target FER al 2030 (14%), i processi di produzione alternativi all'elettrolisi sviluppati nel progetto ampliaranno il portafoglio di tecnologie disponibili per la produzione climaticamente ed economicamente sostenibile di idrogeno, permettendo di meglio adattarsi alle condizioni e al mix energetico localmente disponibili nei siti produttivi. Le tecnologie per la produzione per il metano sintetico e gli e-fuels, oltre a quelle per il trasporto in rete di blend idrogeno-metano, potranno contribuire anche in questo ambito.

Infine, le tecnologie dell'idrogeno, in particolare quelle di produzione da fonte rinnovabile e quelle che consentono di disaccoppiare geograficamente e temporalmente la sua produzione dall'utilizzo (come quelle sviluppate in questo progetto), possono giocare un ruolo chiave nella decarbonizzazione dei settori industriali difficili da elettrificare o che usano idrogeno come feedstock.

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 più immediatamente tangibili 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.

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

Come evidenziato nella sezione 2.3, 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.

I principali benefici per i proponenti, derivanti dall'implementazione di questa azione progettuale, saranno la generazione di rilevante know-how su un'ampia gamma di tecnologie dell'idrogeno ad elevata priorità a livello internazionale e la realizzazione di 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.

In ogni caso, le tecnologie da considerare nel progetto sono state selezionate 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. Come già evidenziato, la scelta di sviluppare anche processi termochimici per la produzione di idrogeno da feedstock carboniosi rinnovabili o di riciclo, tiene conto della presenza, sul territorio nazionale, di società di ingegneria, EPC e industrie oil&gas, chimiche e petrolchimiche (e.g., ENI, Versalis) con una lunga e consolidata esperienza in processi simili per modalità e condizioni operative, che potrebbero facilmente riadattare ed estendere il loro know-how a questi processi innovativi.

Le innovazioni relative alle microturbine alimentate con miscele di gas naturale e idrogeno sono di interesse per l'applicazione della tecnologia EGR (Exhaust Gas Recirculation) e per lo sviluppo di combustori fuel-flexible per le turbine a gas. Questi due temi sono attualmente al centro dell'attenzione nel settore delle turbine a gas e quindi i risultati possono potenzialmente avere ricadute applicative in industrie nazionali (e.g., Baker Hughes e Ansaldo Energia). A parte il generale interesse dei produttori sulla tematica della fuel-flexibility, con attenzione volta anche all'uso di ammoniaca come combustibile (considerata un eccellente vettore di idrogeno), Baker Hughes sta

investendo sull'uso dell'EGR con gas naturale per aumentare la concentrazione di CO₂ nei fumi e ridurre quindi i costi della sua cattura con tecniche CCS. Le esperienze condotte sulla tecnologia EGR possono avere ricadute anche nel settore dello smaltimento dei rifiuti con termovalorizzatori, per l'applicazione di tecniche CCS anche in questo ambito. Ansaldo Energia ha dal suo canto una delle macchine più avanzate (GT-36) in grado di operare con elevate concentrazioni di H₂ in modo flessibile, e sta affrontando il tema della flessibilità di combustibile anche per le microturbine. Il fatto che nell'attuale Piano Triennale si lavori sulla microturbina TURBEC T100, di Ansaldo, aggiunge opportunità di collaborazione ai canali diretti già attivi con il produttore, interessato ai risultati del progetto e ad ulteriori sviluppi. Infine, l'implementazione di sensori ottici per il monitoraggio "real-time" della combustione nella TURBEC T100, potrà avere ricadute anche nel settore della sensoristica applicata alle turbine a gas.

La sperimentazione di motori a combustione interna di tipo cogenerativo, alimentati con miscele gas naturale - idrogeno, per lunghi periodi di funzionamento, unitamente alla collaborazione con ASJA, società fornitrice del motore, consentirà di valutare l'integrazione di queste macchine in sistemi multi-energy calore/gas/elettricità, con ricadute applicative sugli end-user, quali ad esempio il settore commerciale, turistico, residenziale.

Infine, anche il nuovo design e il nuovo processo produttivo sviluppati per lo stack PEFC potrebbe stimolare lo sviluppo di una filiera produttiva italiana per questi componenti.

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.

In totale è prevista la produzione di 117 deliverable nel corso del progetto, così ripartiti:

Al 18° mese del progetto sono previsti 34 deliverable

- 10 per il WP1 (9 rapporti tecnici, 1 impianto/prototipo)
- 19 per il WP2 (rapporti tecnici)
- 4 per il WP3 (rapporti tecnici)
- 1 per il WP4 (rapporto tecnico).

Al 36° mese del progetto sono previsti 82 deliverable

- 21 per il WP1 (16 rapporti tecnici e 5 impianti/prototipi)
- 45 per il WP2 (40 rapporti tecnici, 3 impianti/prototipi, 2 software/database)
- 13 per il WP3 (8 rapporti tecnici, 2 impianti/prototipi, 3 software/database)
- 5 per il WP4 (rapporti tecnici)