

**PIANO TRIENNALE DI REALIZZAZIONE 2025-27 - RICERCA DI SISTEMA
ELETTRICO NAZIONALE**

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

**AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO SVILUPPO
ECONOMICO SOSTENIBILE**

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto 1.3 – Progetto Integrato Tecnologie e Usi Finali dell'Idrogeno

Durata: 36 mesi

Periodo attività: 01/01/2025 - 31/12/2025

ABSTRACT ATTIVITA' ANNUALE:

Il Progetto Integrato Tecnologie e usi finali dell'Idrogeno propone un vasto e articolato programma di ricerca che tratta molteplici tecnologie lungo tutta la catena del valore dell'idrogeno, in piena coerenza con gli obiettivi del PNIEC (dimensioni decarbonizzazione, sicurezza energetica, ricerca e innovazione). Nel corso del primo anno di implementazione, le attività si sono svolte in linea con il cronoprogramma generale del progetto, ponendo solide basi per gli sviluppi tecnologici e le validazioni sperimentali previste per l'intero triennio. Il programma si è focalizzato su tutte le tre aree della catena del valore dell'idrogeno coperte dal progetto: la produzione di idrogeno sostenibile (con attenzione a processi innovativi di water splitting e valorizzazione di feedstock carboniosi), l'accumulo e il trasporto tramite vettori (LOHC, ammoniaca, power-to-gas e power-to-fuel) e gli usi finali per la generazione elettrica e settori hard-to-abate (celle a combustibile, microturbine flessibili, sistemi di combustione MILD).

I risultati preliminari finora conseguiti evidenziano un forte orientamento alla trasferibilità industriale e un chiaro potenziale di contributo al sistema produttivo nazionale. L'ottimizzazione di processi per la valorizzazione energetica di scarti e rifiuti, lo sviluppo di soluzioni avanzate per la flessibilità energetica e la decarbonizzazione delle filiere industriali mirano infatti a favorire la competitività delle aziende italiane, anche promuovendo nuovi modelli di economia circolare.

La seguente tabella illustra sinteticamente, per ogni partner di progetto, i progressi e le attività di ricerca svolte in questa prima fase di implementazione del progetto.

ATTIVITA' SVOLTE

WP1: Produzione

<i>AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO</i>	<i>SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO</i>
SOTACARBO	LA1.15: Produzione di idrogeno da rifiuti plastici non riciclabili mediante gassificazione a letto fluido bollente (fase 1) Sono state svolte le seguenti attività: 1. Ottimizzazione dell'impianto di gassificazione. È stata effettuata un'attività iniziale di messa a punto dell'impianto di gassificazione a

	letto fluido bollente FABER. Successivamente sono stati avviati i primi test sperimentali in arricchimento di ossigeno (70%-80%) variando il rapporto di equivalenza ER e il rapporto vapore/ossigeno. Sulla base dei dati dei primi test sono stati progettati i successivi test sperimentali per arrivare ad utilizzare ossigeno e vapore come unici agenti gassificanti. 2. Ottimizzazione del sistema di pulizia a caldo. Sono state individuate e successivamente avviate le modifiche impiantistiche per l'ottimizzazione del sistema di pulizia a caldo attraverso i reattori di tar cracking che consentiranno di ottenere una corrente gassosa ad elevata concentrazione di idrogeno. 3. Analisi tecnico-economica. È stata avviata l'analisi tecnico-economica del processo di produzione dell'idrogeno da rifiuti plastici non riciclabili utilizzando i dati sperimentali ottenuti nel precedente triennio, al fine di valutare il costo di produzione dell'idrogeno attraverso l'utilizzo di scarti plastici. 4. Sviluppo modello del gassificatore. È stata avviata l'attività di predisposizione di un modello del gassificatore a letto fluido bollente Faber al fine di predire il suo funzionamento principalmente con l'utilizzo di ossigeno e vapore come agenti gassificanti.
ENEA	LA1.18: Idrogeno da pirolisi del biogas/biometano in bagni fusi: ottimizzazione dell'impianto sperimentale e della composizione del bagno Sono state avviate le attività propedeutiche allo sviluppo del processo di pirolisi di biogas/biometano in bagni fusi. In particolare, è stata approfondita l'analisi delle criticità emerse nel precedente triennio, con riferimento alla volatilità delle miscele di cloruri, alla fragilità dei reattori di quarzo, alla corrosività dei bagni fusi e alle difficoltà di recupero dei prodotti carboniosi. Sulla base di tali evidenze sono state selezionate le miscele più significative da investigare e sono state impostate le prove di volatilità, definendo temperature operative, portate di gas inerte e modalità di raccolta dei sali ricondensati a valle del reattore. Parallelamente, sono state avviate le attività di progettazione e acquisto di nuovi reattori, sia in quarzo sia in materiale ceramico, oltre che di reattori in acciaio rivestiti internamente con materiale ceramico. Tali soluzioni sono state valutate in funzione della compatibilità con l'ambiente corrosivo e delle esigenze di contenimento del bagno fuso. Sono inoltre proseguite le interlocuzioni con le unità coinvolte nelle linee collegate, Università Campus Bio Medico di Roma LA 1.20 e Sapienza Università di Roma LA 1.21, in particolare per l'ottimizzazione della geometria dei reattori e del sistema di recupero del carbonio. In parallelo, è stata avviata la progettazione e l'acquisizione dell'upgrade del setup per prove di corrosione ad alta temperatura e di lunga durata, con l'obiettivo di migliorare il contenimento dei sali e consentire lo svolgimento di prove in atmosfera inerte.

Università Campus Bio Medico di Roma Facoltà Dipartimentale di Ingegneria	LA1.20: Idrogeno da pirolisi del biogas/biometano in bagni fusi: analisi morfologiche e spettroscopiche dei prodotti solidi ottenuti nei test sperimentali Sono state avviate le attività preparatorie per la caratterizzazione dei prodotti solidi carboniosi ottenuti dai test di pirolisi di metano e biogas in bagni fusi, previsti nelle linee LA 1.18 e LA 1.19. In particolare, sono state valutate le tecniche di analisi più adatte per studiare la morfologia, la struttura e le principali caratteristiche dei solidi prodotti. Sono state quindi messe a punto le tecniche da utilizzare, tra cui la microscopia elettronica SEM/TEM e la spettroscopia FTIR, finalizzate all'osservazione della superficie dei campioni, dell'eventuale agglomerazione, della porosità e della presenza di seconde fasi. Parallelamente, sono stati avviati i contatti con ENEA per definire le modalità di raccolta, conservazione e trasferimento dei campioni da analizzare, così da collegare correttamente i risultati delle analisi alle condizioni operative dei test di pirolisi. Sono inoltre state impostate le prime procedure di analisi, tenendo conto della necessità di confrontare campioni ottenuti a diverse temperature, con differenti bagni fusi e diverse alimentazioni gassose.
Sapienza Università di Roma Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali Ambiente	LA1.21: Idrogeno da pirolisi del biogas/biometano in bagni fusi: analisi dell'effetto della non uniformità della temperatura sulla performance del reattore a bolle Scopo delle attività relative al primo anno è stato quello di determinare i coefficienti di trasporto di energia nel bagno di reazione, considerando sia il reattore su scala di laboratorio (diametro di 3-6 cm) che la scala pilota (diametro dell'ordine di un metro). I coefficienti di trasporto termico locali sono stati determinati assumendo correlazioni semiempiriche riportate in letteratura (validate sperimentalmente su reattori a bolle), le quali assumono un valore del numero di Schmidt turbolento pari a 0.85. Sulla base di questa assunzione, la conducibilità termica turbolenta locale è stata determinata dal campo di viscosità turbolenta ottenuto con l'approccio bifase "turbulent bubbly flow". Per valutare il massimo gradiente di temperatura nel bagno di reazione si è considerato un reattore del diametro di un metro con una temperatura di parete pari a 1000 K, ed un range di portate dell'alimentazione $Q=100-2000$ Nl/min. La potenza locale richiesta per l'avanzamento della reazione è stata stimata da un modello di microscala sviluppato in precedenza, che fornisce la velocità di conversione della singola bolla in funzione del tempo trascorso nel bagno. La soluzione dell'equazione di trasporto di energia (convezione-diffusione e termine di scomparsa dovuto all'endotermicità della reazione di pirolisi) con metodo agli elementi finiti ha evidenziato che i gradienti di temperatura in fase liquida sono del tutto trascurabili (meno di un grado centigrado), anche in corrispondenza delle portate di alimentazione più basse. Questo risultato rende possibile bypassare completamente il problema di trasporto termico in fase liquida, considerando la temperatura sulla superficie delle bolle uguale alla temperatura di parete del reattore. L'assenza di resistenze significative al trasporto termico in fase liquida è il risultato dell'elevato livello di turbolenza del bagno, dove il numero di Re risulta dell'ordine di 5000 nel reattore su scala di laboratorio e di ordine 50000 nel reattore pilota.

ENEA	LA 1.23: Reforming solare del biogas: Progettazione del sistema sperimentale alimentato dalla Fornace Solare del CR ENEA di Portici Sono state avviate le attività di progettazione di un sistema sperimentale per la produzione di idrogeno da reforming di biogas/biometano, sfruttando calore solare attraverso la fornace solare presente presso il CR ENEA di Portici. In particolare, sono state condotte le seguenti attività: 1. Progettazione degli interventi di adeguamento del sito sperimentale che ospiterà l'impianto di reforming solare. Tale attività ha previsto la definizione dei sottoservizi necessari all'esercizio dell'impianto, ed il dimensionamento degli interventi necessari. L'attività si è conclusa con l'affidamento dei lavori all'operatore economico DAP Costruzioni mediante regolare gara d'appalto. 2. Definizione dello schema di processo. Tale attività ha visto lo studio e lo sviluppo dello schema di massima del processo di reforming accoppiato all'impianto solare, con l'individuazione delle unità operative principali necessarie. In un secondo momento è stato condotto lo studio e la definizione dei PFD di processo, relativi a 4 casi d'uso specifici (alimentazione di bio-metano e biogas, a pressione di 1 o 2 barg). Infine, è stato sviluppato il P&ID dell'impianto, con la definizione delle specifiche dei componenti per il controllo ed il monitoraggio del processo 3. Definizione del layout generale del sistema: Sulla base delle indicazioni ottenute dai punti precedenti, è stata condotta una prima fase di progettazione del layout dell'intero sistema, con la disposizione dei componenti all'interno dell'area preposta. Tale fase definirà alcune condizioni al contorno per le fasi successive di progettazione delle componenti principali. I risultati ottenuti in tale primo anno di attività verranno utilizzati per le successive azioni mirate alla progettazione del reattore catalitico e degli scambiatori ausiliari, nonché al dimensionamento delle tubazioni di interconnessione, previste nel primo semestre del 2026.
Università di Salerno Dipartimento Ingegneria Industriale	LA1.25: Reforming solare del biogas: Progettazione di un Sistema Catalitico ad Elevata Efficienza per la Conversione ad Idrogeno di biometano e biogas L'attività svolta nel primo anno si è focalizzata sullo sviluppo e sull'ottimizzazione di catalizzatori Ni/CeO₂-Al₂O₃ per il tri-reforming del metano. In particolare, lo studio ha riguardato l'effetto del carico di Ni (Ni/CeO₂=0.15, 0.30, 0.45) sulle prestazioni catalitiche, al fine di individuare la formulazione più promettente in termini di attività e resa ad idrogeno anche alle basse temperature. Sulla base dei risultati ottenuti, la formulazione ottimizzata è stata successivamente trasferita su un supporto strutturato costituito da schiume a celle aperte in Oxygen Bonded Silicon Carbide (OBSiC), materiale caratterizzato da elevata conducibilità termica e di potenziale interesse per applicazioni di reforming intensificato. Le attività svolte risultano pienamente coerenti con la pianificazione prevista e non si registrano ritardi rispetto al cronoprogramma. I risultati ottenuti rappresentano una base promettente per lo sviluppo di sistemi di reforming intensificato ed elettrificato ad alta efficienza energetica.

1.27: Reforming Solare del Biogas: Produzione di Catalizzatori Redox per un Approccio Alternativo Basato sul Chemical Looping

Nel corso del periodo di attività sono state avviate le attività sperimentali finalizzate allo sviluppo e alla valutazione di materiali catalitici per processi di chemical looping applicati al reforming del biogas. Le attività si sono concentrate principalmente sulla sintesi di ossidi misti a base di ceria, sulla preparazione di ossidi derivati da layered double hydroxides (LDH) e sulla progettazione e l'esecuzione di test preliminari di chemical loop in condizioni controllate.

Una prima linea di attività ha riguardato la sintesi di ossidi misti a base di Ce-Zr, con particolare attenzione a sistemi caratterizzati da rapporti molari Ce:Zr prossimi a 1:1. L'obiettivo di questa attività è stato lo sviluppo di materiali in grado di combinare elevate proprietà redox, capacità di stoccaggio e rilascio di ossigeno e buona stabilità termica in condizioni cicliche di ossido-riduzione. Le sintesi sono state condotte mediante metodologie in grado di favorire la formazione di soluzioni solide omogenee, promuovendo l'integrazione strutturale dei diversi cationi all'interno della medesima fase cristallina. In particolare, le prime sintesi hanno operato secondo il metodo Pechini, producendo un ossido di Ce:ZrLa dalla composizione 0.48:0.48:0.04. Questo ossido è stato impregnato tramite incipient wetness impregnation con diverse quantità di Ni al fine di studiarne l'effetto sulle performance catalitiche (5, 7.5 e 10% wt/wt). Sono stati inoltre sintetizzati materiali analoghi contenenti ulteriori dopanti, in particolare Pr e Gd, aggiunti nella sintesi dei materiali CeZrLa, al fine di aumentare ulteriormente le capacità di storage e mobilità di ossigeno.

I materiali sintetizzati sono stati sottoposti a una prima fase di caratterizzazione strutturale e morfologica mediante tecniche quali diffrazione a raggi X (XRD), al fine di verificare la formazione delle fasi desiderate (ossido misto) e sono state avviate analisi preliminari delle proprietà redox e della capacità di trasporto dell'ossigeno, aspetti ritenuti fondamentali per l'applicazione dei materiali in processi di chemical looping. In particolare, l'aggiunta di Ni favorisce la riducibilità a bassa temperatura e aumenta la quantità di ossigeno utilizzabile dal catalizzatore. Una seconda linea di attività ha riguardato la sintesi di ossidi derivati da layered double hydroxides (LDH) a base Mg-Al contenenti specie attive di ferro e nichel. I materiali precursori sono stati preparati con l'obiettivo di ottenere sistemi altamente interdispersi, nei quali i cationi metallici risultassero distribuiti omogeneamente all'interno della struttura lamellare. Successivamente, mediante trattamenti termici controllati, i precursori LDH sono stati trasformati in ossidi misti ad elevata area superficiale oppure in sistemi spinello/MgO caratterizzati da maggiore stabilità termica e meccanica. In particolare, sono stati sintetizzati due ossidi misti contenenti Ni:Mg:Al a quantità costante di Ni e diverso rapporto Mg:Al al fine di studiare l'effetto della basicità, fornita dalla presenza di Mg, sull'interazione con l'anidride carbonica e con le performance catalitiche. Anche per questi materiali sono state avviate caratterizzazioni preliminari mediante XRD e riduzione in programmata di temperatura.

Contestualmente alle attività di sintesi e caratterizzazione, sono stati eseguiti i primi test preliminari di chemical looping in microreattore, allo scopo di valutare il comportamento dei materiali in condizioni operative

	rappresentative del reforming ciclico del biogas. Le prove sono state condotte alimentando sequenzialmente correnti riducenti contenenti CH₄ e CO₂ e correnti ossidanti contenenti vapor d'acqua, monitorando l'evoluzione dei prodotti gassosi mediante spettrometria di massa. I test preliminari hanno consentito di ottenere le prime indicazioni sulla capacità dei materiali di sostenere cicli redox ripetuti, sulla reattività nei confronti del metano e sulla stabilità operativa alle temperature investigate. In particolare, è stato testato il catalizzatore a base di Ni5% su ossido di CeZrLa e sono state investigate diverse temperature di riduzione (600 e 700°C, con metano e anidride carbonica) a temperatura di ossidazione costante (600°C, con acqua). Il catalizzatore ha prodotto CO e H₂ nella fase di riduzione con CO₂ e CH₄ e H₂ nella fase di ossidazione con H₂O. Durante la riduzione si creano delle vacanze di ossigeno che vengono sfruttate per ottenere H₂ da H₂O. Lo studio della temperatura di riduzione mostra come aumentare la T riduzione aumenti la formazione di vacanze di ossigeno e quindi l'attività catalitica. Le attività svolte hanno inoltre permesso di definire le condizioni sperimentali più idonee per le successive campagne di screening catalitico e di identificare le formulazioni più promettenti da sottoporre a ulteriori ottimizzazioni. Particolare attenzione è stata rivolta alla valutazione preliminare della resistenza alla deposizione di carbonio e alla stabilità strutturale dei materiali dopo i primi cicli di reazione, aspetti ritenuti centrali per il futuro sviluppo del processo di reforming del biogas mediante approccio chemical looping. Le attività svolte hanno consentito di avviare lo sviluppo di materiali innovativi per processi di reforming del biogas mediante approccio chemical looping, evidenziando il potenziale di tali sistemi per applicazioni nel settore energetico sostenibile. Dal punto di vista delle ricadute sul sistema produttivo, lo sviluppo di catalizzatori più stabili, efficienti e resistenti alla formazione di carbone può favorire la realizzazione di reattori più compatti, durevoli e facilmente integrabili in impianti di produzione energetica distribuita. L'implementazione futura di queste tecnologie potrebbe quindi contribuire allo sviluppo di filiere industriali legate alla valorizzazione energetica del biogas e delle biomasse residuali, promuovendo modelli di economia circolare e riducendo la dipendenza da combustibili fossili e importazioni energetiche. Inoltre, la possibilità di produrre idrogeno e syngas da fonti rinnovabili mediante sistemi più efficienti e flessibili rappresenta un potenziale vantaggio competitivo per il comparto industriale nazionale, con ricadute positive sia in termini ambientali sia in termini di resilienza e sostenibilità del sistema energetico.
ENEA	LA1.29: Accoppiamento di processi termo(elettrochimici) per la produzione o conversione dell'idrogeno con impianti CST: screening preliminare dei processi studiati nel progetto È stata condotta un'ampia analisi delle tecnologie di produzione dell'idrogeno considerate nel progetto, che ha permesso di selezionare specifici processi endotermici integrabili con impianti solari a concentrazione. L'identificazione delle combinazioni ottimali ha tenuto conto dei livelli termici operativi, delle apparecchiature di interfaccia già esistenti e dei principali sottosistemi degli impianti CST, quali il collettore

	solare, il fluido termovettore e l'unità di accumulo dell'energia termica (TES). Nello specifico, lo studio ha evidenziato come soluzioni potenzialmente idonee all'accoppiamento con i sistemi CST i seguenti processi: l'elettrolisi del vapore, la gassificazione in acqua supercritica di rifiuti agroindustriali, la carbonizzazione idrotermica abbinato con il reforming in fase acquosa di scarti agroalimentari, la gassificazione di rifiuti plastici non riciclabili, il reforming solare del biogas/biometano, la deidrogenazione di bio-derivati rinnovabili e, infine, la sintesi e decomposizione dell'ammoniaca. Per ciascuna di queste tecnologie verranno valutati nel dettaglio i fabbisogni energetici e i potenziali punti di integrazione con gli impianti CST, ponendo così le basi per lo sviluppo e l'elaborazione dei relativi schemi preliminari di processo.
Università Campus Bio Medico di Roma Facoltà Dipartimentale di Ingegneria	LA1.32: Analisi di sostenibilità: screening di processi di produzione di idrogeno da feedstock carboniosi rinnovabili o di recupero È stata svolta un'attività di screening dei processi di produzione di idrogeno a partire da feedstock carboniosi rinnovabili o di recupero, identificati all'interno del WP1, con l'obiettivo di selezionare almeno due processi da sottoporre ad analisi LCA nell'ambito della successiva LA 1.33. A tal fine, è stata predisposta e inviata una scheda per la raccolta dei dati di inventario ai referenti tecnico-scientifici delle diverse attività considerate nel WP1. Le tecnologie oggetto di indagine includono: reforming solare del biogas, pirolisi del biogas e del biometano in bagni fusi, gassificazione a letto fluido bollente di rifiuti plastici non riciclabili, deidrogenazione catalitica di bioderivati rinnovabili, processo ciclico a bassa temperatura per la valorizzazione di sottoprodotti dell'industria chimica e gassificazione in acqua supercritica di sottoprodotti agroindustriali. I dati raccolti sono stati successivamente integrati mediante un'analisi bibliografica e utilizzati per attribuire a ciascuna tecnologia un punteggio comparativo. La valutazione è stata condotta considerando quattro criteri, con pesi differenti, definiti congiuntamente dai partner coinvolti nelle attività di sostenibilità del WP1 e WP2: Technology Readiness Level (TRL), scalabilità del processo, reperibilità dei dati e presenza di studi LCA pregressi.

WP2: Trasporto e Accumulo

<i>AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO</i>	<i>SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO</i>
SOTACARBO	LA2.5: Sintesi ecosostenibili di nuovi materiali e sviluppo di processi di idrogenazione catalitica della CO₂ per la produzione di combustibili (fase 1) Sono state svolte le seguenti attività: 1. Sintesi e Caratterizzazione Catalizzatori Innovativi. L'attività del 2025 è partita da uno studio bibliografico sulle tecniche a microonde e meccanochimiche, finalizzato a riprodurre con metodi ecosostenibili i catalizzatori più promettenti del precedente triennio: • Metanolo/DME (CuO/ZnO/Al₂O₃/ZrO₂ - CZAZ): scelto il sistema CZAZ, da preparare adattando la coprecipitazione in forma di idrossido a doppio strato (LDH) assistita da microonde e per via meccanochimica. • Metano (NiO/CeO₂, Ni/Ce = 3.0): selezionato il catalizzatore convenzionale soft-template (NiCe_3.0_ST) per essere riadattato ai metodi con microonde e alla meccanochimica. • Sviluppo sperimentale nel corso dell'anno: • Studio preliminare metodi meccanochimici (Vibromulino a sfere): studio dell'effetto di frequenza e tempo di macinazione su un sistema modello CuO/ZnO/Al₂O₃ (CZA) con caratterizzazione tramite XRD (struttura), fisisorbimento di N₂ (tessitura), SEM-EDX (morfologia) e ICP-MS (composizione chimica). • Sviluppo materiali CZA: sviluppate le sintesi meccanochimiche non idrolitiche degli ossidi misti da idrossidi (con NaOH) e da LDH (con NaOH e Na₂CO₃), con test catalitici dei materiali più interessanti nell'impianto da banco XtL (X-to-Liquids). • Sviluppo materiali NiCe_3.0: avviato l'adattamento del metodo soft-template (ST). Per la via meccanochimica sono stati testati diversi templanti oltre al CTAB, ovvero PEG e P-123 (materiali in caratterizzazione). Per la via assistita da microonde, è iniziato lo studio sull'effetto di potenza e tempi di reazione e maturazione. 2. Campagne Sperimentali e Test Catalitici (Unità XtL) • Ottimizzazione Impianto: È stata eseguita un'ottimizzazione della valvola micrometrica servocontrollata dell'impianto XtL per la gestione della pressione. Questo intervento ha permesso di operare in sicurezza a una pressione intermedia tra la minima e la massima ottimale utilizzata nella precedente campagna sperimentale di metanazione. • Test Idrogenazione CO₂ a Metanolo: Sono stati testati i primi catalizzatori CZA da sintesi meccanochimica per valutarne attività e selettività, confrontandoli con un catalizzatore commerciale e quello ottenuto per via convenzionale. • Test di Metanazione: Proseguita la campagna con i catalizzatori nichel-cerio dell'Università di Cagliari per ottimizzare le

	performance a condizioni blande ($T < 300\text{ }^{\circ}\text{C}$) o velocità spaziali sfavorevoli. L'attività è proseguita con lo studio dell'influenza della pressione intermedia a velocità spaziali sfavorevoli e in un ampio range di temperatura ($250\text{-}350\text{ }^{\circ}\text{C}$), confrontando i dati con il catalizzatore commerciale al nichel. 3. Ottimizzazione Prototipo Power to Fuels (P2G/L). L'ottimizzazione del prototipo esistente si è sviluppata in due fasi: • Ingegnerizzazione (Semestre I): analisi progettuale volta a ridurre le perdite termiche e migliorare l'efficienza dell'impianto. È stato svolto un computo delle potenze e dei preventivi per sostituire i vecchi cavi scaldanti in fibra di vetro (idonei esclusivamente per uso interno) con cavi corazzati a rivestimento minerale (idonei all'impiego in ambiente esterno). Le sezioni coinvolte sono state: alimentazione gas reagenti, gas prodotti e olio diatermico (con incremento della potenza elettrica tramite nuovo quadro di controllo). È stata inoltre avviata la ricerca bibliografica per le condizioni dei futuri test. • Esecuzione (Semestre II): a settembre 2025 è terminato l'approvvigionamento dei materiali ed è iniziata l'installazione dei cavi sulle linee gas e sui vessel dell'olio diatermico, insieme al montaggio del nuovo quadro elettrico. L'attività di installazione è stata successivamente validata da prove funzionali complessive dell'intero sistema di riscaldamento sia lato gas che lato olio. • Attività di supporto: è stata avviata la ricerca di un fornitore capace di fornire il materiale interne (allumina tabulare in sfere) necessario per la realizzazione del letto catalitico dei reattori ed è proseguito lo studio bibliografico per la futura campagna sperimentale sul P2G/L. 4. Attività su Unità Power-to-Hydrogen (PtH) ed Integrazione • Compressione Termochimica a idruri metallici: è stato avviato uno studio sistematico per progettare un sistema di compressione guidato da apporto termico (senza parti meccaniche in movimento) in grado di superare l'attuale limite di 50 barg dell'impianto PtH. Sono state analizzate tre classi: idruri elementari (MgH_2, AlH_3), interstiziali (TiMn_2, LaNi_5, ideali per calore di scarto a bassa temperatura) e complessi (NaAlH_4, LiBH_4, richiedenti matrici RHC). Il sistema finale alimenterà ad alta pressione l'unità XtL per la sintesi del metanolo. • Messa a punto e Qualificazione Pre-operativa: nel secondo semestre, sul sistema PtH (composto da due elettrolizzatori in parallelo, PEM e AEM, connessi a un unico BoP) sono state avviate le attività pre-operative. L'idrogeno prodotto viene stoccato in bombole (pressione max 200 barg, operativa 35-50 barg). • Interventi Strutturali e Sicurezza: installati i box esterni ventilati per le bombole ed è stato realizzato il collegamento fisico/impiantistico diretto PtH-XtL per far operare i due sistemi in modo integrato. Eseguite prove di tenuta sulle linee idrogeno, verifiche elettromeccaniche e test sui sistemi di sicurezza (rilevatori H_2 e logiche di blocco automatico). L'impianto è ora
--	--

	qualificato in configurazione pre-operativa per le future campagne combinate.
--	---

WP3: Usi Finali

<i>AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO</i>	<i>SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO</i>
ENEA	LA3.5: Studi per lo sviluppo di un bruciatore fuel-flexible e low-NOx per turbine a gas Sulla base dei risultati ottenuti nel precedente PTR 22-24, si è ritenuto di dover semplificare il controllo del bruciatore completo prototipo “P3.7 H2-Flex” del PTR22-24, costituito da due bruciatori, uno centrale per bassi contenuti di H₂ e l’altro fatto da un sistema di dieci bruciatori a corona per maggiori concentrazioni. Questo ha portato ad una semplificazione del bruciatore stesso, che di fatto è evoluto verso una configurazione che prevede un singolo bruciatore o un insieme di bruciatori identici. Con tale obiettivo, sono state inizialmente apportate semplici modifiche ad uno dei bruciatori del sistema a corona, ed in particolare sul prototipo “P3.7 H2-High” del PTR22-24: è stato modificato il corpo centrale del bruciatore per valutare sperimentalmente gli effetti della sua altezza e del suo materiale sul flashback della fiamma. Sono anche stati eseguiti degli ulteriori test sperimentali dello stesso bruciatore in assetto micro-miscelamento diffusivo, ed eseguite delle simulazioni. Dalle analisi dei risultati vecchi e nuovi, sono state identificate delle modifiche del vecchio bruciatore: il corpo centrale ha cambiato forma geometrica ed è stato introdotto un sistema di raffreddamento (film-cooling) sia del corpo centrale che della superficie interna del miscelatore. Questa nuova geometria è stata simulata numericamente per caratterizzarne la fluidodinamica ed ottimizzarla.
	LA3.8: Verifica delle prestazioni di un sistema di supervisione avanzata per l’impianto AGATUR dell'ENEA Sono state svolte riunioni tecniche con il cobeneficiario Università degli Studi Roma Tre - Dipartimento di Ingegneria Industriale, Elettronica e Meccanica che si occupa della LA3.12, in modo da definire (1) la strategia di IA e machine learning da adottare per il sistema di supervisione e controllo dell’impianto AGATUR, (2) l’organizzazione e i formati dei dati storici dell’impianto per la fase di apprendimento, (3) la parte hardware necessaria per configurare la piattaforma di test del sistema da sviluppare. A valle di tale definizione, sono state avviate le relative attività. Parallelamente, sono stati eseguiti nuovi test con miscele di gas naturale e idrogeno sull’impianto AGATUR, sia a composizione del combustibile costante e potenza variabile, che a potenza costante e composizione variabile nel tempo: questi dati arricchiranno la fase di machine learning del sistema di supervisione e controllo dell’impianto AGATUR.

Università degli Studi Roma Tre Dipartimento di Ingegneria Industriale, Elettronica e Meccanica	LA3.12: Sviluppo di un sistema di supervisione avanzata per l'impianto AGATUR dell'ENEA utilizzando algoritmi di machine learning integrati con LabVIEW L'obiettivo complessivo della ricerca è la messa a punto di un sistema di supervisione per l'impianto AGATUR, basato sull'integrazione di metodi di Machine Learning con il sistema LabVIEW. Sono state effettuate due riunioni tecniche di coordinamento delle attività (16/02/2026 e 24/04/2026) presso ENEA -Casaccia durante le quali sono state stabilite in modo condiviso le specifiche di sistema (requisiti tecnici, interfacce, metriche e protocolli di test) che costituiscono la base delle attività di ricerca e la project charter preliminare per l'allineamento delle attività tra LA3.8 ed LA3.12. Durante questo primo periodo si è lavorato alla definizione della base dati di riferimento. In particolare, sono stati selezionati i dati sperimentali relativi alla turbina a gas e all'intero impianto AGATUR utili allo sviluppo del sensore virtuale basato su Intelligenza Artificiale/Machine Learning (AI/ML). Tale supervisore dovrà fornire il valore operativo della portata di gas naturale da impiegare nel funzionamento della macchina in fuel blending (GN/H₂) in condizioni di funzionamento in fuel flexibility. Al momento sono in fase di valutazione diverse architetture per il supervisore AI/ML e si ritiene che entro i prossimi tre mesi sarà completata la fase di messa a punto del modello AI previsionale per la portata di gas naturale da utilizzare su base temporale 0,5-1 s.
---	--

WP4: Disseminazione e comunicazione dei risultati

<i>AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO</i>	<i>SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO</i>
ENEA	LA4.2: Disseminazione e comunicazione dei risultati (ENEA) Relativamente alla comunicazione e disseminazione dei risultati, il primo anno è stato focalizzato sulle attività interne al gruppo di partecipanti del progetto, con particolare riferimento alla progettazione e pianificazione di una serie di workshop su 4 temi trasversali: • studio dell'accoppiamento di processi di produzione e conversione dell'idrogeno con fonti energetiche rinnovabili termiche e/o elettriche • Analisi di sostenibilità con approccio a ciclo di vita • Sviluppo caratterizzazione e testing di catalizzatori per processi chimici legati alle tecnologie dell'idrogeno • Ammoniaca come vettore e combustibile derivato dall'idrogeno.