

la validazione di nuove architetture di sistemi energetici, promuovendo al contempo il dialogo tra ricerca, industria e policy makers.

## **II<sup>a</sup> PARTE: ELEMENTI DESCRITTIVI DEL PROGETTO**

### **1. TITOLO E DURATA DEL PROGETTO**

*Titolo del progetto:* Biogas Electrically-Managed Membrane Assisted Reforming System for clean hydrogen production.

*Acronimo:* BEMARS

*Titolo in Italiano:* Sistema di Reforming Assistito a Membrane e gestito Elettricamente per la produzione di idrogeno verde e pulito da Biogas/biosyngas/biometano.

*Durata del progetto:* 12 mesi

### **2. AMBITO TECNOLOGICO**

La tematica al cui sviluppo è finalizzato il progetto tra quelle indicate nell'Articolo 5, comma 1, dell'Avviso è:

- a) Produzione di idrogeno verde e pulito

Il progetto **BEMARS** si colloca nell'ambito della **produzione di idrogeno verde** mediante l'innovativo processo di **reforming assistito da membrane** applicato a feedstock rinnovabili quali **biogas, bio-metano e bio-syngas**.

L'obiettivo generale è **realizzare un notevole miglioramento di processo**, attraverso l'ottimizzazione di tecnologie già note (steam reforming e separazione idrogeno), ma applicate in modo nuovo e sinergico, integrando:

- **Reattori a letto fluidizzato** ottimizzati per conversione e separazione simultanea dell'idrogeno,
- **Sistemi di membrane per la separazione selettiva dell'idrogeno** ad alta temperatura,
- **Sistemi di riscaldamento innovativi** basati su **resistenze elettriche ad alta efficienza**, alimentabili da fonti rinnovabili, in sostituzione dei tradizionali bruciatori.

Il progetto si propone pertanto di:

- **Aumentare l'efficienza** del processo di produzione di idrogeno,
- **Ridurre il costo** dell'idrogeno prodotto rispetto allo stato dell'arte attuale,
- **Aumentare la modularità e l'affidabilità** degli impianti su scala industriale compatta (containerizzabili).

Le tecnologie applicate nel progetto sono finalizzate:

- alla **produzione di idrogeno rinnovabile** ad alta purezza (>99,9%),
- con un **miglioramento radicale** dell'efficienza energetica e una riduzione dei costi rispetto ai sistemi tradizionali di reforming.

La tecnologia è caratterizzata da **elementi fortemente innovativi**, che derivano sia dalla **integrazione di sistemi avanzati** (reforming + membrane + riscaldamento elettrico), sia dalla **ottimizzazione ingegneristica** su scala industriale modulare.

### **3. SINTESI**

Il progetto BEMARS mira allo sviluppo di un innovativo processo per la produzione di idrogeno verde con costi <3 €/kg, emissioni < 5 kg CO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub> ed efficienze prossime al 60% a taglie di 0,2-5 MW (contro gli attuali costi di 5-10 €/kg ed efficienze del 40% ma con taglie da 10-100 MW per cui non compatibili con la maggior parte degli attuali impianti a biomasse). Tale diminuzione di costi e aumento dell'efficienza è ottenuta principalmente tramite l'accoppiamento di membrane per la separazione di idrogeno in un processo di reforming a letto fluido (il letto fluido migliora la conduzione della reazione mentre le membrane promuovono la reazione oltre l'equilibrio termodinamico, sottraendo un prodotto, e eliminano la necessità di sistemi di separazione dell'idrogeno, e.g. PSA, che hanno alti capex e opex) e la fornitura del calore di processo da resistenze elettriche con elettricità prodotta da fonti rinnovabili invece di bruciatore e scambiatore di calore (per cui anche qui eliminando componenti e aumentando efficienze). Il progetto prevede nell'OR1 un'analisi della filiera che comprende sia i sistemi a monte (per calcolare i parametri

globali della produzione di idrogeno comprendendo gli impianti a monte di biogas e syngas e per ricavare i dati su cui applicare il sistema come composizioni e costi dei gas di partenza) e un'analisi di sistema in cui il modello di BEMARS viene sviluppato in ASPEN partendo dalle sue componenti e integrato con gli impianti a monte. Nell'OR2 è previsto lo studio di catalizzatori per lo steam reforming del biogas/biometano/biosyngas e di membrane per la separazione dell'idrogeno in microreattori da laboratorio con il fine di determinare le cinetiche delle reazioni e di permeazione dell'idrogeno, da fornire per le attività in OR1 e OR3. Nell'OR3 verranno sviluppate simulazioni CFD 3D del reattore a letto fluido con integrazione della cinetica chimica relativa alle reazioni di steam reforming di biogas/biometano/biosyngas con separazione in situ dell'idrogeno prodotto mediante membrane. Le cinetiche di reazione implementate saranno quelle ricavate su scala di laboratorio nell'ambito dell'OR2. Nell'OR4 verranno analizzati la modularità e lo scale up di BEMARS, individuando fornitori per i componenti chiave ed analizzando ed ottimizzando l'impianto a differenti taglie sulla base delle esigenze degli utenti e tenendo conto delle specifiche dei componenti chiave. L'OR5 raccoglie i dati sperimentali di un prototipo base realizzato nel progetto Europeo MACBETH. L'OR6 valida con i dati dell'OR5 le modellazioni CFD (OR3) e di sistema (OR1) ed identifica le criticità impiantistiche e i miglioramenti. L'OR7 definisce le specifiche di scaling up e elabora il pre-desing degli impianti industriali. Nell'OR8 viene effettuata la realizzazione degli interventi di modifica e ottimizzazione dell'impianto pilota, emersi nell'OR6 e OR7 sotto un profilo ingegneristico e nell'OR4 sotto un profilo modellistico e di specifiche dei fornitori e degli utenti. L'OR9 effettua l'analisi economica e ambientale attraverso LCC e LCA e monitora i KPI del processo. Infine l'OR10 effettua la gestione del progetto e la disseminazione e valorizzazione dei risultati.

#### 4. FINALITA'

Il progetto si inserisce nel settore della produzione di idrogeno le cui direttive e scenari sono indicate dall'IEA (e.g. World Energy Outlook 2024), dall'UE (EU Hydrogen strategy (COM/2020/301), REPowerEU (SWD/2022/230) EU Hydrogen Bank (COM/2023/156) EU Hydrogen initiatives Clean Hydrogen Partnership, European Clean Hydrogen Alliance, Hydrogen Public Funding Compass) e dall'Italia (PNRR M2C2), in particolare la tabella seguente (IEA) riporta i dati di produzione mondiale di idrogeno, emissioni medie di CO<sub>2</sub> al kg di idrogeno prodotto e quindi emissioni totali, prezzo medio dell'idrogeno e quindi mercato dell'idrogeno al 2023, 2030 e 2050.

World	2023	2030	2050
hydrogen production Mt	~100 (63% with natural gas, 20% coal, 7% electricity from grid)	200 (70% is produced using low-carbon technologies).	500 (all based on low carbon technologies)
kgCO <sub>2</sub> /kgH <sub>2</sub>	11-13	4-5	1
CO <sub>2</sub> emission Mt/year	1100-1300	800-1000	500
H <sub>2</sub> selling price €/kg	~3 (SMR)	~4 (Green hydrogen)	~3
H <sub>2</sub> market B€	~300	~800	1500

Rispetto a tali dati, BEMARS, arriva a produrre idrogeno, come detto, a 2-3 €/kg dipendendo dal costo del biogas/biosyngas/biometano, le emissioni di CO<sub>2</sub> sono da 1 a 5 kg CO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub> dipendendo dalle emissioni nella produzione del biogas/biosyngas/biometano (Clean hydrogen production pathways report 2024, SRIA 2024-2027, Clean Hydrogen Partnership) per cui tale tecnologia permette di superare i target di costo e di emissioni del 2030 nel 2026 e di avvicinarsi molto a quelli del 2050, ponendosi come leader internazionale nel settore.

Il progetto mira a “migliorare la conoscenza delle tecnologie legate alla produzione di idrogeno verde” attraverso la sperimentazione e la realizzazione di prototipi per la fase di industrializzazione” per “aumentare la competitività del settore tramite progressiva riduzione dei costi” (PNRR M2C2I3.5) ed è collegato con l’obiettivo di innalzare il potenziale di crescita del sistema economico, favorendo la transizione verso un modello di sviluppo fondato sulla conoscenza con un significativo aumento del volume della spesa in R&S e in un più efficace livello di collaborazione tra la ricerca pubblica e il mondo imprenditoriale” (PNRR M4C2).

Quindi le finalità del progetto sono lo sviluppo di un nuovo processo di produzione di idrogeno verde e pulito con costi di 2-3 €/kg, emissioni di 1-5 kg CO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub>, efficienze prossime al 60% in taglie di 0,2-5 MW (contro le attuali del massimo del 40% e su impianti da 10-100 MW per la produzione di idrogeno da biomasse, in particolare tramite gassificazione, condizionamento, reforming e separazione). Con i progetti europei UNIFHY (USGM), BIONICO e MACBETH (ICI) ci si è avvicinati a tali target realizzando piloti e dimostrando il raggiungimento di efficienze fino al 50%, le migliori di processo e di sistema in questo progetto, consentiranno di raggiungere efficienze prossime al 60% dimostrando il raggiungimento di una “leadership internazionale industriale e di ricerca e sviluppo nella principale filiera della transizione” costituita dalla produzione di idrogeno verde (PNRR M2C2).

Nel dettaglio le finalità sono:

- 1) Sviluppare un processo di produzione di idrogeno da biomasse di scarto (biogenic waste, RED III) con costi di 3 €/kg, emissioni di 1-5 kg CO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub>, efficienze prossime al 60%
- 2) Testare il prototipo sviluppato in MACBETH per validare le simulazioni delle cinetiche, CFD e di sistema
- 3) Analizzare, applicare e validare miglioramenti nella gestione del reattore e delle membrane e l'inserimento del riscaldamento elettrico invece dell'inefficiente burner e scambiatore
- 4) Aumentare la modularità e l'affidabilità dell'impianto su scala industriale compatta (containerizzabile) individuando mercati e business plan (e.g. accordo tra ICI e SNAM per l'applicazione del sistema agli impianti a biogas di SNAM)

## 5. OBIETTIVO FINALE DEL PROGETTO

Come detto nel punto precedente, l'obiettivo finale del progetto è lo sviluppo di un processo di produzione di idrogeno da biomasse di scarto (biogenic waste, EU RED III) con costi di 3 €/kg, emissioni di 1-5 kg CO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub>, efficienze prossime al 60% (di sistema considerando efficienze di syngas dell'80% e del sistema di reforming del 70%). Tale processo costituirà un prodotto di ICI consentendole di essere l'azienda leader non solo nel settore della generazione di sistemi per la produzione di vapore di processo ma anche nel settore dei sistemi di reforming per la produzione di idrogeno. Il pilota realizzato in MACBETH e qui migliorato è di taglia di 100 kg/giorno di idrogeno (200 kW di input energetico) e le attività qui previste consentiranno a ICI di avere tale prodotto testato a scala pilota, migliorato in efficienze, ridotto in costi di produzione e di gestione, modulato in taglie (da 100 a 2500 kg/giorno di idrogeno, quindi 0,2-5 MW di input, per cui completamente compatibile con le taglie degli impianti a biogas e syngas esistenti in Italia e in linea con le taglie dei sistemi di produzione di idrogeno del PNRR M2C2I3.1) per poterlo affiancare alla gamma dei prodotti dell'azienda.

Le principali problematiche per conseguire l'obiettivo finale (impianto di produzione di idrogeno verde con costi ed emissioni ridotte a taglie di 0,2-5 MW) riguardano l'aumento dell'efficienza (ottenuto tramite l'integrazione di reforming e membrane e il riscaldamento elettrico), che permette di ridurre i costi e le emissioni (in quanto riduce i componenti e i consumi) e la modularità, che permette di ridurre i costi. Tale sistema di reforming è un cambiamento radicale nella tecnologia non solo per le efficienze ottenibili (in quanto, sottraendo un prodotto, l'idrogeno sposta le reazioni oltre l'equilibrio termodinamico) ma anche in quanto consente (essendo le membrane selettive solo all'idrogeno) di produrre direttamente (senza l'uso di successivi sistemi di purificazione come le PSA) idrogeno puro all'uscita delle membrane e CO<sub>2</sub> in pressione all'uscita del reattore. L'impatto economico finanziario del progetto è assolutamente sostenibile rispetto alla situazione aziendale che ha già affrontato lo sviluppo di un tale sistema in progetti più ampi (MACBETH ha avuto un costo di 20 M€) così come la creazione di una nuova linea di prodotti a idrogeno (ICI ha già sviluppato la linea di generatori di vapore a idrogeno in range di 200-5000 kW di input termico).

## 6. RESPONSABILE DEL PROGETTO

Carlo Tregambe (responsabile R&D di ICI) il cui CV è allegato.

## 7. OBIETTIVI REALIZZATIVI DEL PROGETTO

OR	Soggetto proponente	Tipologia OR (SS/RI)	Titolo OR
OR1	USGM	RI	Analisi di filiera e di sistema
OR2	USGM	RI	Studio cinetiche (Test rig)
OR3	USGM	RI	Simulazioni CFD avanzate
OR4	USGM	RI	Modularità e Scale up (fornitori e end users)
OR5	ICI	SS	Funzionamento impianto pilota (industrializzazione)
OR6	ICI	SS	Validazione + adattamento design impianto
OR7	ICI	RI	Supporto ingegneristico e scaling impiantistico
OR8	ICI	SS	Adattamento dell'impianto per industrializzazione
OR9	USGM	RI	KPI e Analisi economica e ambientale
OR10	ICI	RI	Management Disseminazione e Valorizzazione dei risultati

Per ogni Obiettivo Realizzativo indicato nella tabella compilare sinteticamente i 3 moduli seguenti:

## 8. DESCRIZIONE DELL'OBIEKTIVO REALIZZATIVO 1

## OR1: Analisi di filiera e di sistema – USGM – RI

L'OR1 è dedicato allo studio della filiera e del sistema: attraverso la determinazione dei flussi, composizioni, temperature, pressioni in ogni punto di impianto si determineranno i bilanci energetici e di massa per ogni processo e di sistema integrando le rese individuate nelle OR2 e OR3 e dando i risultati per le OR4 e OR6-9. La definizione delle configurazioni (e.g. scambiatori di calore) e dei parametri operativi ottimali per minimizzare i costi e massimizzare l'efficienza rientrano in tale attività.

### 8.1. ELENCO DELLE ATTIVITÀ DELL'OBIETTIVO REALIZZATIVO 1 E RELATIVA DESCRIZIONE

#### LA1.1 Analisi di filiera M1-M5

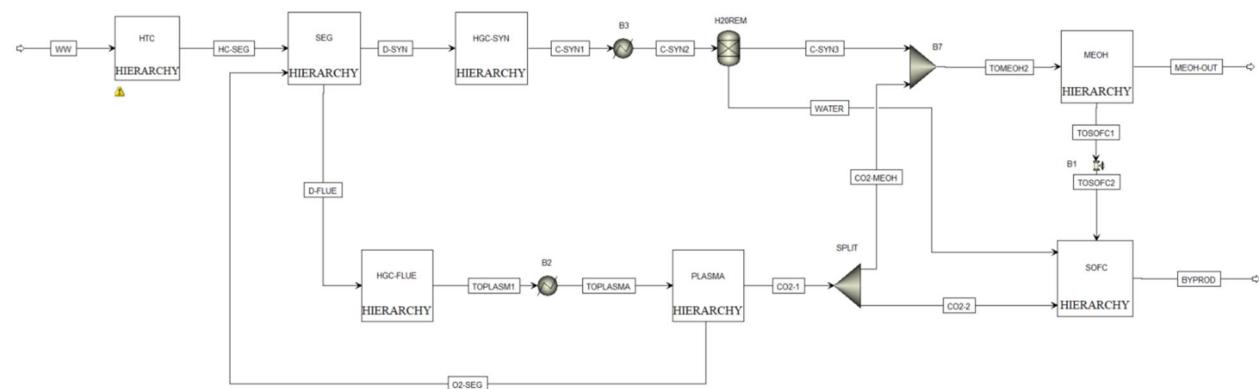
Per poter effettuare le simulazioni del sistema BEMARS e per poter valutare le prestazioni di filiera (e.g. costi, consumi ed efficienze della produzione di idrogeno partendo da biomasse di scarto) bisogna valutare le possibili composizioni di partenza del gas entrante al sistema e i costi, consumi ed efficienze dei processi di produzione del biogas, biosyngas e biometano. USGM, ed in particolare il prof. Bocci (autore del libro “Sistemi a biomasse” e di molte pubblicazioni e membro dell'ETIP bioenergy) ha una esperienza di più di 20 anni in tali analisi. Prima di tutto, aggiornando e dettagliando per l'Italia quanto fatto negli ultimi progetti Horizon di cui Bocci è stato il responsabile scientifico, BLAZE e GICO, si classificheranno le biomasse di scarto per quantità e costi in Italia e in Europa (e.g. database europeo BioSym sviluppato a livello nazionale e regionale). Successivamente si analizzeranno le caratteristiche di tali biomasse (e.g. analisi preliminare e definitiva dal database europeo Phyllis) e si sceglieranno le biomasse maggiormente rappresentative (per quantità, costo di reperimento, caratteristiche di usabilità in digestione e gassificazione) delle 4 principali categorie (i.e. biomasse di scarto del settore agricolo/allevamento, forestale, industriale, urbano) per i 2 differenti processi (i.e. digestione anaerobica e gassificazione in quanto il biometano è tenuto a rispettare una composizione standard e viene comunque prodotto da purificazione e separazione del metano del biogas o da purificazione e metanazione del biosyngas, in questo caso chiamato anche bioSNG). In contemporanea si analizzeranno le tipologie di impianti a digestione anaerobica e gassificazione e quindi le composizioni di gas prodotto (e.g. il biogas contiene tipicamente il 40-70% di metano, il 15-45% di biossido di carbonio, il 2-8% di vapore d'acqua e tracce di O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, ha un PCI di 16-23 MJ/Nm<sup>3</sup> pari a circa 5.5 kWh/Nm<sup>3</sup> dipendente dal suo contenuto di metano; il syngas è principalmente costituito da H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> con vapore (e azoto in caso di gassificazione con aria) e tar e polveri e tracce di H<sub>2</sub>S, HCl, etc., ha un PCI di 5-15 MJ/NM<sup>3</sup> principalmente dipendente dall'agente ossidante, il biometano ha un contenuto minimo di CH<sub>4</sub> dal 75-96% e resto di CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub> e un PCI di 30-45 MJ/Nm<sup>3</sup> dipendendo dalle varie normative a livello nazionale) prendendo come verifica dati di impianti reali (e.g. gli impianti a biogas di SNAM e gli impianti di gassificazione a Walter Tosto e in ENEA con cui i partecipanti al progetto hanno accordi). Dall'analisi delle tipologie di biomasse di scarto e impiantistiche (e.g. biogas da discarica, da acque reflue, da fanghi di depurazione, da scarti agricoli/animali/industriali; syngas da gassificazione a letto fisso/fluido a aria/vapore) si deriveranno 2 tipiche configurazioni di impianto con relative biomasse (1 rappresentativo delle biomasse e delle configurazioni impiantistiche più usate in Italia/Europa e 1 delle biomasse di scarto più disponibili a più basso costo e più performanti in digestione e in gassificazione e delle relative configurazioni impiantistiche più efficienti) rappresentative per i 2 differenti processi che saranno simulate (in ASPEN, usando modelli già sviluppati da USGM e UNIVAQ e di letteratura) in modo da avere i dati di bilanci di massa e energia per le analisi tecniche (successive in questa OR1), economiche e ambientali (OR9) sia sugli attuali impianti e biomasse sia su impianti più performanti applicati a biomasse comunque con grande disponibilità, basso costo e usabilità nei processi di digestione e gassificazione.

Composizione biometano	Media valori paesi europei	EU UNI EN 16723-2	Deviation (%)
<b>Wobbe index inf (MJ/m<sup>3</sup>)</b>	47	46.65	1
<b>Wobbe index sup (MJ/m<sup>3</sup>)</b>	56	50.37	11
<b>High heating value inf (MJ/m<sup>3</sup>)</b>	34	30	13
<b>High heating value sup (MJ/m<sup>3</sup>)</b>	45	47	4
<b>CH<sub>4</sub> content (%)</b>	95	96*	1
<b>CO<sub>2</sub> maximum (%)</b>	2.5		
<b>H<sub>2</sub> maximum (%)</b>	0.1-0.5-5	12	>60
<b>H<sub>2</sub>S+COS maximum (mg m<sup>-3</sup>)</b>	5	6	17
<b>Total sulfur maximum (mg m<sup>-3</sup>)</b>	30	120	75
<b>CO maximum (%)</b>	1-2	1	0
<b>O<sub>2</sub> in dry gas grids maximum (%)</b>	0.5	4	88
<b>NH<sub>3</sub> maximum (mg m<sup>-3</sup>)</b>	3	3	0
<b>Mercaptans maximum (mg m<sup>-3</sup>)</b>	6	5	17

*Esempio di analisi della composizione del biometano (sviluppato da USGM nel progetto europeo SO-FREE a cui partecipano ICI e USGM).*

## LA1.2 Analisi di sistema M1-M6

Dato che gli impianti di biogas e biosyngas sono quasi sempre (nelle realizzazioni attuali) accoppiati con MCI (motori a combustione interna) e considerando che le membrane (al palladio) hanno limiti di contaminanti minori dei MCI (e.g. H<sub>2</sub>S minori di 30 invece di 90 ppm), sarà definito un sistema di condizionamento aggiuntivo per le 2 configurazioni impiantistiche dei 2 processi (i.e. biogas e biosyngas). Queste 4 configurazioni impiantistiche saranno collegate al sistema BEMARS in modo tale da poter valutare dal punto di vista tecnico (BoP, efficienze, etc., in OR1) e dal punto di vista economico-ambientale (in OR9) l'intera filiera di produzione di idrogeno. Il modello di BEMARS sarà sviluppato partendo dalle sue componenti (reattore di reforming a membrana, generatore di vapore, burner, scambiatori, compressori, pompe, valvole collettori, etc.) attraverso modellazione ove possibile termodinamica (in modo da essere generale, cioè non dipendente dal particolare componente usato e poter variare il più possibile le condizioni operative come flussi, temperature e pressioni) e dove il processo non raggiunge l'equilibrio termodinamico con combinazione di modelli termodinamici, sperimentali e cinetici. I modelli dei componenti e del sistema BEMARS vengono qui validati con i dati sperimentali provenienti dalle OR6, in modo tale da avere BoP (Balance of Plant, i.e. bilancio di materia e energia) e i corrispondenti flussi, composizioni, temperature e pressioni in ogni parte dell'impianto validati. Tale modello, insieme con i modelli già validati, delle 2 configurazione impiantistiche di biogas e syngas permette di ottenere un modello di sistema che sarà usato nella OR4 per la ottimizzazione e, ottimizzato, nella OR9 per le analisi economiche e ambientali finali. Qui sotto si riporta un flowsheet di ASPEN realizzato per un analogo sistema.



*Flowsheet di ASPEN sviluppato da USGM e UNIVAQ durante il progetto GICO (più complesso del modello da sviluppare qui in quanto comprende non solo ingresso della biomassa, pretrattamento, conversione primaria della biomassa, condizionamento, come in questo progetto ma anche 3 reattori a membrana invece di 1)*

### Risorse tecniche umane impiegate

Per tali attività si prevede l'impiego di tre Professori Associati per circa 750 ore l'uno e 1 Professore Associato per circa 203 ore (totale 2452 ore).

### Risultati attesi

- Report R1.1 su Analisi di biomasse, biogas, syngas, biometano e tecnologie correlate M5
- Report R1.2 su Modellazione del sistema integrato M6

## 8.2. TEMPI DI REALIZZAZIONE OR1

Le attività dell'OR1 si svolgeranno dal M1 al M6, in quanto 5 mesi sono necessari per l'analisi di filiera e 6 mesi per l'analisi di sistema. Tali attività possono essere condotte parallelamente in quanto l'analisi di sistema sviluppa all'inizio il modello del sistema BEMARS per cui è indipendente dall'analisi di filiera che sviluppa l'analisi delle biomasse e i 4 modelli delle 4 configurazione impiantistiche degli impianti di biogas e syngas. Verso la fine delle LA1.1, i modelli della LA1.1 saranno integrati nella LA1.2.

## 9. DESCRIZIONE DELL'OBIETTIVO REALIZZATIVO 2

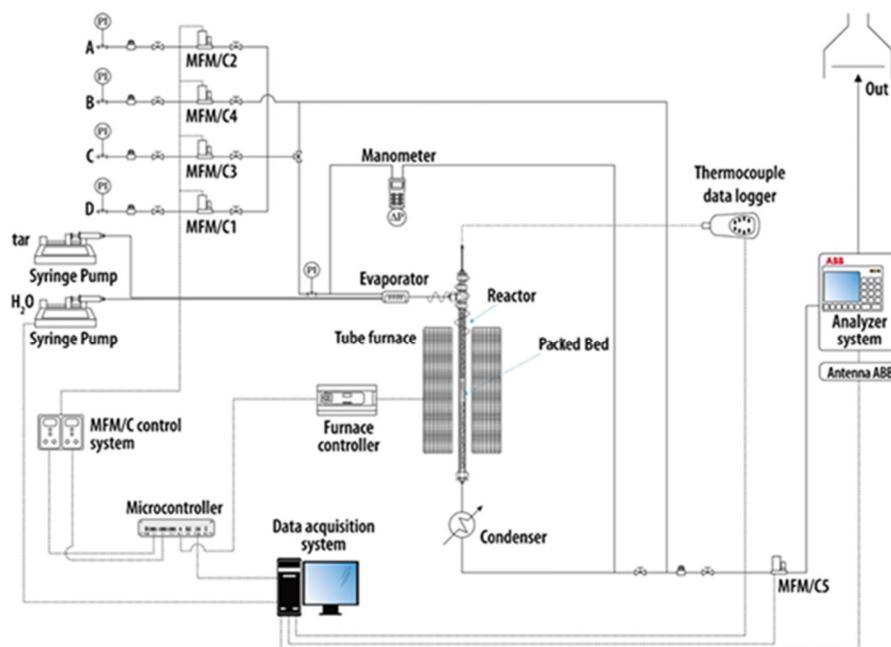
## OR2: Studio cinetiche (RI), USGM (con la consulenza di UNIVAQ)

Nell'OR2 è previsto lo studio di catalizzatori commerciali per lo steam reforming del biogas/biometano/biosyngas e di membrane per la separazione dell'idrogeno in microreattori da laboratorio con il fine di determinare le cinetiche delle reazioni e di permeazione dell'idrogeno, da fornire per le attività in OR1 e OR3.

### 9.1. ELENCO DELLE ATTIVITÀ DELL'OBIETTIVO REALIZZATIVO 2 E RELATIVA DESCRIZIONE

#### LA2.1 Test di reattività in micro-reattore M1-M6

I catalizzatori già utilizzati nel reattore a letto fluidizzato di MACBETH per lo steam reforming di metano saranno testati in condizioni di processo compatibili con quelle esperibili nel reattore di BEMARS. I risultati dei test in micro-reattore permetteranno la deduzione di cinetiche di catalisi eterogenea, utili in fase di modellazione matematica degli step di processo. Si partirà da cinetiche consolidate di letteratura (come quelle di Xu-Froment o Numaguchi-Kikuchi), e si determineranno gli Arrhenius di reazione e le relazioni matematiche che legano la velocità di reazione alle pressioni parziali dei reagenti/prodotti, al fine di selezionare il modello matematico più idoneo per le simulazioni degli OR1 e OR3. Uno schema rappresentativo del test rig delle prove di attività dei catalizzatori è mostrato nella figura sottostante.



*Test rig per le prove di attività sui catalizzatori*

#### LA2.2 Test di membrane per la separazione di idrogeno M1-M6

Utilizzando lo stesso apparato di laboratorio illustrato nella figura sopra, saranno testate membrane al Pd-Pd/Ag (cylindriche e/o piane) per la separazione dell'idrogeno ad alta Temperatura (fino a 600 °C) e Pressione (fino a 10 bar), usando miscele di gas ottenibili dal processo di steam reforming del metano (si veda LA 2.1, OR1, OR3). Partendo anche in questo caso da relazioni di letteratura (es. legge di Sieverts) e grazie ai risultati sperimentali, sarà possibile determinare la dipendenza della velocità di permeazione dell'idrogeno dalla temperatura e identificare la relazione più idonea con la pressione parziale dell'idrogeno stesso. Tali risultati consentiranno di sviluppare un modello matematico da implementare nelle simulazioni previste in OR1 e OR3. Per tali attività si prevede l'impiego di un Ricercatore a Tempo Determinato con la supervisione di un Professore Associato.

#### LA2.3 Caratterizzazione dei materiali solidi M1-M6

I catalizzatori e le membrane testate in OR2.1 e OR2.2 saranno sottoposti a caratterizzazione pre e post-test mediante tecniche analitiche quali: ICP-MS, porosimetria con BET-BJH, misura della distribuzione granulometrica particolare, TPR/TPD/TPO, XRD, FT-IR e analisi SEM-EDS. L'obiettivo è valutare eventuali effetti di degradazione/disattivazione indotti dal processo (e.g. deposito di Carbonio, sinterizzazione).

### Risorse tecniche umane impiegate

Per lo svolgimento di tali attività si prevede l’impiego di due Professori Associati (e un Ricercatore a Tempo Determinato con la supervisione di un Professore Associato da parte di UNIVAQ).

### Risultati attesi

- Report R2.1 su analisi cinetiche per i catalizzatori e le membrane M6

## 9.2. TEMPI DI REALIZZAZIONE

Le attività dell’OR2 si svolgeranno dal M1 al M6, in cui i primi 3 mesi saranno necessari per la messa a punto degli apparati sperimentali e le caratterizzazioni dei materiali ex-ante e gli ultimi 3 mesi saranno impiegati per la fase di test, raccolta e analisi dati e caratterizzazione ex-post.

## 10. DESCRIZIONE DELL’OBIETTIVO REALIZZATIVO 3

### OR3: Simulazioni CFD avanzate (RI), USGM con la consulenza di UNIVAQ.

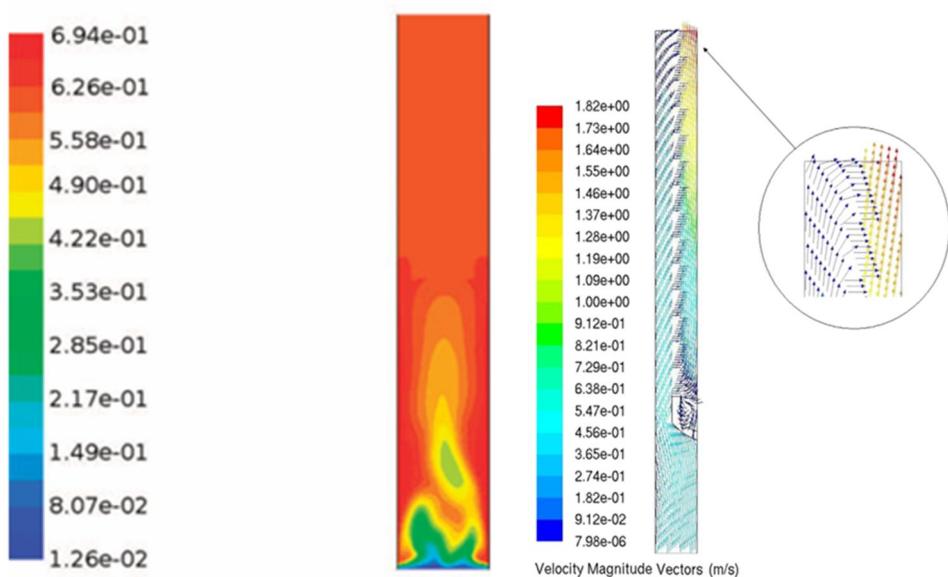
In questo OR saranno sviluppate Simulazioni CFD 3D del reattore a letto fluidizzato sviluppato in BEMARS, con integrazione della cinetica chimica relativa alle reazioni di steam reforming di Biogas/Biometano/Biosyngas con separazione in situ dell’idrogeno prodotto mediante membrane. Le cinetiche di reazione implementate saranno quelle ricavate su scala di laboratorio nell’ambito dell’OR2.

### 10.1. ELENCO DELLE ATTIVITÀ DELL’OBIETTIVO REALIZZATIVO 3 E RELATIVA DESCRIZIONE

#### LA3.1 Sviluppo del modello CFD 3D del sistema non ottimizzato già presente M1-M4

In questa prima fase sarà implementato un modello MP-PIC del reattore a letto fluidizzato già presente presso ICI Caldaie, con integrate le membrane (cilindriche) per la permeazione dell’idrogeno (impianto pilota MACBETH). A tal proposito, le cinetiche delle reazioni di steam reforming, dedotte nell’OR2, e quelle di combustione, ricavate da letteratura, saranno incorporate nel modello puramente fluidodinamico per la simulazione del letto fluidizzato. Parallelamente, saranno modellizzate le membrane permeanti tramite opportuni mezzi porosi, includendo le cinetiche di permeazione dell’idrogeno, anch’esse derivate dai risultati ottenuti nell’OR3. Saranno quindi condotte simulazioni dell’intero sistema, con il fine di validare il modello numerico (si veda OR6) su una scala rilevante (impianto pilota) e dare indicazioni sulle performance dei processi separati (reforming in letto fluido e separazione idrogeno) a supporto delle attività previste nell’OR1 e OR4 per l’analisi della modularità del sistema.

L’università dell’Aquila ha già sviluppato modelli CFD di reattori con membrane, come mostra la figura seguente.



*Contenuto di idrogeno e velocità lungo una membrana di 2 letti fluidi (Development of a CFD model for the simulation of tar and methane steam reforming through a ceramic catalytic filter and Three-dimensional computational fluid-dynamic simulation of polypropylene steam gasification, IJHE, 2015 and 2024).*

### **LA3.2 Simulazioni CFD 3D del nuovo sistema BEMARS M5-M9.**

Il modello sviluppato nella LA3.1 verrà validato, in OR6 LA 6.1, su scala pilota. Una volta validato si procederà a effettuare simulazioni CFD 3D per l'analisi di differenti configurazioni reattoristiche. In particolare, si valuterà la possibilità di usare membrane di geometria alternativa (piane invece che cilindriche) e si analizzerà la possibilità di usare tali membrane, anziché direttamente nel letto fluidizzato, nel freeboard del reattore, al fine di semplificare la gestione operativa. Le performance delle diverse configurazioni saranno analizzate in funzione delle condizioni operative (temperatura, pressione, S/C...), con il fine di massimizzare:

- i) l'avanzamento delle reazioni di steam reforming (conversione di CH<sub>4</sub> e CO)
- ii) la permeazione di idrogeno.

Le informazioni raccolte in questa LA saranno usate nell'OR4 per le simulazioni di sistema e nell'OR6 per la validazione e il miglioramento dell'impianto.

#### **Risorse tecniche umane impiegate**

Per lo svolgimento di tali attività si prevede l'impiego di due Professori Associati (e un Ricercatore a Tempo Determinato con la supervisione di un Professore Associato da parte di UNIVAQ).

#### **Risultati attesi**

- Report R3.1 su Sviluppo del modello CFD 3D del sistema non ottimizzato M4
- Report R3.2 su Simulazioni CFD 3D del sistema ottimizzato M9

## **10.2. TEMPI DI REALIZZAZIONE OR3**

Le attività dell'OR3 si svolgeranno dal M1 al M9. I primi 4 mesi serviranno per la realizzazione del modello CFD 3D del sistema attuale non ottimizzato mentre i secondi 4 mesi verranno dedicati alla realizzazione di CFD del sistema ottimizzato.

## **11. DESCRIZIONE DELL'OBIETTIVO REALIZZATIVO 4**

### **OR4: Modularità, scale up, fornitori e end-users – USGM – SS**

L'obiettivo di tale attività è di analizzare la modularità e lo scale up di BEMARS individuando fornitori e end users. Per ottenere le efficienze e i costi indicati come obiettivo finale del progetto è necessario non solo che siano individuati fornitori per i componenti chiave (e.g. membrane, resistenze elettriche) con prestazioni e costi in linea con gli obiettivi ma anche che tali componenti siano integrati nel sistema nel miglior modo possibile (e.g. nel letto, nel freeboard, in reattori separati). Inoltre, BEMARS deve essere progettato in funzione delle taglie e delle esigenze degli utenti. Per questo dopo aver sviluppato cinematiche (OR2), CFD (OR3) e simulazione di sistema (OR1), è necessario svolgere un'attività di valutazione di differenti soluzioni modulari interne ed esterne in contemporanea con le attività degli OR6-9 dedicate alla relativa progettazione, ingegnerizzazione, realizzazione e test di tali soluzioni. Data la caratterizzazione di tale attività di analisi di fornitori e di utenze per lo sviluppo del prodotto, l'OR4 si configura come sviluppo sperimentale. Tali attività sono svolte nel LTS di USGM.

### **11.1. ELENCO DELLE ATTIVITÀ DELL'OBIETTIVO REALIZZATIVO 4 E RELATIVA DESCRIZIONE**

#### **LA 4.1 Valutazione della modularità interna e dei fornitori dei componenti chiave M6-M8**

Le differenti configurazioni di sistema individuate nella OR1 (e quindi differenti condizioni operative dei componenti come flussi, composizioni, temperatura e pressione e differenti efficienze chimiche ed energetiche) saranno valutate per quanto concerne i fornitori dei componenti chiave (e.g. Tecnalia e Memtec per le membrane, Thermowatt e FTG per le resistenze elettriche) e per quanto concerne le relative integrazioni di tali componenti e la realizzazione del sistema in modo da dare un input adeguato alla LA6.3 (Identificazione delle criticità impiantistiche e proposte di miglioramento)

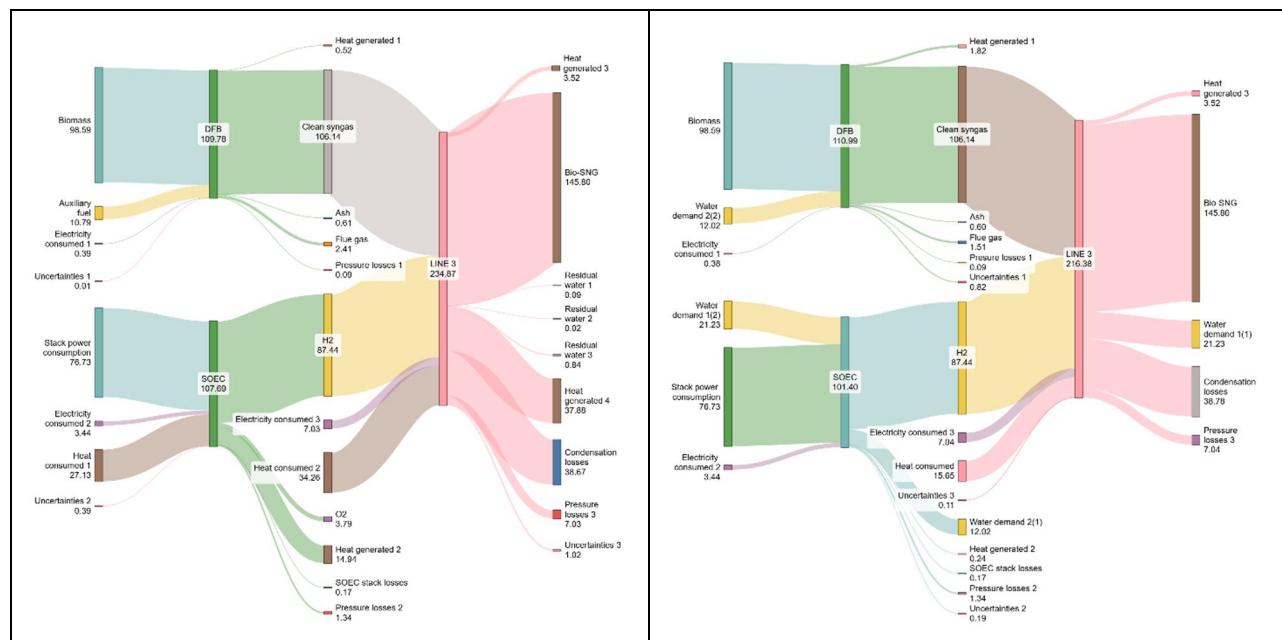
dell'OR6. La valutazione terrà conto sia di parametri tecnici (e.g. rese, decadimenti) sia economici (e.g. costo di acquisto, di implementazione).

## LA4.2 Valutazione dello scale-up (modularità esterna) e degli end users M8-M11

Tale attività analizza i possibili end user analizzando le relative taglie di impianti a biogas, a bio syngas e forniture di biometano e la relativa produzione di idrogeno per specifici usi (e.g. fornitura di idrogeno a una HRS, utilizzo in settori hard to abate e immissione in rete del gas naturale). La configurazione di sistema (con i relativi fornitori dei componenti chiave ottimali con una miglior valutazione nella LA4.1), sarà oggetto di analisi di valutazione di scale up sia tramite aumento di taglia dell'impianto (e quindi di ogni suo componente) sia tramite la definizione di una taglia standard minima e quindi il soddisfacimento di utenze più grandi tramite più unita standard. Tale attività è congiunta alla LA7.2 (Definizione delle specifiche di scaling up) e alla LA7.3 (Elaborazione del pre-desing di impianto industriale) in quanto fornisce tale analisi di scaling up dal lato delle utenze mentre le attività dell'OR7 lo fanno dal punto di vista dell'ingegneria dell'impianto.

## LA4.3 Ottimizzazione di BEMARS M6-M11

Il modello validato di BEMARS dell'OR1 verrà ottimizzato (tramite analisi di bilanci di materia ed energia tenendo in conto delle migliori performance in termini di efficienza di produzione e resa di idrogeno, superficie degli scambiatori di calore e recuperi termici, migliori fornitori dei componenti chiave e possibili end-user e taglie). Lo scopo dell'ottimizzazione è identificare lo schema di impianto che massimizza le performance. L'analisi delle prestazioni sia dei sottosistemi presenti che del processo nel suo complesso sarà effettuata attraverso il calcolo di diversi parametri. L'identificazione del BoP complessivo dell'impianto in regime stazionario ottimizzato considera i componenti e i sistemi ausiliari necessari per garantire un funzionamento stabile e la rete di scambiatori di calore (HEN) ottimale per minimizzare i costi operativi e massimizzare l'efficienza. Inoltre, considerando (i) la disponibilità e la variazione della materia prima e le potenzialità locali di utilizzo del prodotto H<sub>2</sub> verde pulito, insieme a (ii) le finestre operative (caratteristiche fuori progetto e vincoli pratici chiave) dei componenti e dei sottosistemi presenti, saranno proposti sia carichi di lavoro tipici che schemi operativi di processo. In questo modo, si definiranno gli scenari operativi dell'intero sistema. Tale attività è necessariamente parallela alle LA4.1 e LA4.2 inoltre è congiunta alle LA6.3, LA7.2 e LA7.3. Qui sotto si riportano i risultati di una ottimizzazione fatta su un simile impianto.



Diagrammi di Sankey sviluppati dall'USGM durante il progetto nazionale AIRE (coordinato da UNIVAQ) che mostrano il bilancio energetico dell'impianto prima e dopo l'ottimizzazione.

### Risorse tecniche umane impiegate

Per tali attività si prevede l’impiego di due Professori Associati per 625 ore l’uno e di circa 260 ore di un terzo Professore Associato (totale 1510 ore).

## Risultati attesi

- Report R4.1 su Analisi della modularità interna e esterna, dei fornitori e degli end user con valutazione di scale-up e ottimizzazione M11

## 11.2. TEMPI DI REALIZZAZIONE OR4

Le attività dell'OR4 si svolgeranno dal M6 al M11.

## 12. DESCRIZIONE DELL'OBIETTIVO REALIZZATIVO 5

### OR5: Funzionamento impianto Pilota (industrializzazione) – ICI - SS

L'obiettivo dell'OR5 è la validazione preliminare e la messa a punto dell'impianto pilota MACBETH attraverso test di verifica (tenuta, funzionamento sottosistemi) e Site Acceptance Test (SAT). A seguito di queste attività, sarà avviato il funzionamento regolare per la raccolta di dati sperimentali sui processi di reforming e separazione dell'idrogeno. I dati acquisiti saranno utilizzati per il tuning operativo dell'impianto e come base per la validazione CFD (OR6) e per le analisi di scaling industriale (OR7).

L'OR5 è classificato come **Sviluppo Sperimentale**, in quanto consiste nell'utilizzo pratico di un sistema pilota esistente per acquisire evidenze tecniche, ottimizzare il funzionamento e produrre risultati sperimentali a supporto delle successive attività di progettazione e scaling.

## 12.1. ELENCO DELLE ATTIVITÀ DELL'OBIETTIVO REALIZZATIVO 5 E RELATIVA DESCRIZIONE

### LA5.1 Verifica preliminare e test di tenuta del sistema M1–M2

In questa fase sarà verificato lo stato generale dell'impianto pilota MACBETH attraverso prove di tenuta sui circuiti principali (gas e liquidi), test di funzionamento degli ausiliari e dei sottosistemi (alimentazione gas, gestione fluidi, sistemi di controllo). L'obiettivo è individuare e correggere eventuali anomalie derivanti dal limitato utilizzo pregresso dell'impianto. Le attività saranno svolte da personale tecnico specializzato e documentate mediante check-list di verifica.

### LA5.2 Site Acceptance Test (SAT) M2–M3

Dopo il completamento dei test preliminari, verranno eseguiti i Site Acceptance Test (SAT) ufficiali, con verifica completa della funzionalità degli impianti di reforming, separazione idrogeno e sistemi ausiliari. Saranno raccolti dati iniziali di funzionamento a carico controllato, per garantire la conformità dell'impianto alle specifiche di progetto e autorizzare l'avvio della fase di test operativi.

### LA5.3 Funzionamento operativo e raccolta dati sperimentali M4–M6

A seguito dell'esito positivo dei SAT, inizierà il funzionamento regolare dell'impianto pilota. Verranno condotte campagne di prova variando le condizioni operative principali (temperatura, pressione, rapporto S/C) e saranno raccolti dati sui parametri di processo, sulle prestazioni di conversione dei gas e sulla permeazione dell'idrogeno attraverso le membrane. I dati raccolti saranno successivamente utilizzati per la validazione CFD (OR6) e per le attività di scaling impiantistico (OR7).

### LA5.4 Valutazione preliminare dell'efficienza del sistema di riscaldamento M2–M4

Durante le prove operative iniziali, saranno eseguite misure specifiche sull'efficienza energetica del sistema di riscaldamento attuale a vena d'aria. In caso di conferma di inefficienze significative, sarà predisposta una proposta tecnica preliminare per la sostituzione del sistema con riscaldatori elettrici ad alta efficienza, alimentabili da fonti rinnovabili. La decisione finale sarà formalizzata entro il mese 4 del progetto.

### Problemi progettuali da affrontare e soluzioni tecnologiche proposte

- Riconoscere eventuali problemi derivanti da inattività parziale dell'impianto (perdite, degrado componenti)  
→ Soluzione: test di tenuta e ripristino preventivo dei sottosistemi.

- Assicurare che le condizioni operative reali siano compatibili con quelle previste nelle simulazioni → Soluzione: tuning operativo basato su dati sperimentali.

#### Risorse tecniche umane impiegate

- Tecnici di impianto per verifica e ripristino,
- Ingegneri di processo per esecuzione SAT e analisi dati,
- Responsabili R&D per gestione dei test e supporto tecnico-scientifico.

#### Risultati attesi

- Verifica completa della funzionalità dell'impianto,
- Dati sperimentali affidabili per ottimizzazione processo,
- Validazione delle condizioni operative preliminari in vista delle fasi successive di progetto.
- Report R5.1 su funzionamento dell'impianto pilota M6

### 12.2. TEMPI DI REALIZZAZIONE OR5

Le attività dell'OR5 si svolgeranno dal M1 al M6

### 13. DESCRIZIONE DELL'OBIETTIVO REALIZZATIVO 6

#### OR6: Validazione + adattamento design impianto – ICI - SS

Il presente Obiettivo Realizzativo prevede l'analisi e il confronto tra i dati sperimentali raccolti sull'impianto pilota e i risultati delle simulazioni CFD sviluppate da USGM, al fine di validare il modello numerico a supporto del processo di reforming con separazione di idrogeno. Inoltre, l'attività includerà l'identificazione di eventuali inefficienze impiantistiche, tra cui il sistema di riscaldamento dei flussi gas e vapore, con proposta di soluzioni migliorative in ottica di efficienza energetica e integrazione di fonti rinnovabili. Le attività si svolgeranno presso ICI Powering Evolution S.p.A., utilizzando dati reali di esercizio e strumenti avanzati di analisi. L'OR6 è classificato come **Sviluppo Sperimentale**, in quanto si basa sull'elaborazione di dati ottenuti da impianto fisico e sulla loro applicazione per adattamenti progettuali e funzionali su prototipo operante.

### 13.1. ELENCO DELLE ATTIVITÀ DELL'OBIETTIVO REALIZZATIVO 6 E RELATIVA DESCRIZIONE

#### LA6.1 Elaborazione e analisi dati sperimentali per la valutazione dei modelli di sistema e CFD M4–M7

Elaborazione e normalizzazione dei dati sperimentali raccolti dall'impianto pilota, con particolare attenzione ai parametri di funzionamento dei reattori, delle membrane e dei sistemi ausiliari. I dati serviranno come base per la validazione numerica e per individuare eventuali criticità operative, ad esempio sarà svolto un confronto quantitativo tra dati sperimentali e simulazioni CFD 3D, saranno analizzate delle eventuali discrepanze riscontrate nei principali parametri fluidodinamici e chimici del sistema e sarà valutata l'accuratezza dei modelli cinetici e delle ipotesi di simulazione adottate.

#### LA6.2 Identificazione delle criticità impiantistiche e proposte di miglioramento M8–M11

Sulla base delle analisi CFD e di sistema validate, saranno identificate inefficienze impiantistiche, tra cui:

- problemi di fluidodinamica,
- inefficienze di separazione idrogeno,
- prestazioni non ottimali dei sottosistemi ausiliari.

In particolare, verrà consolidata la necessità di sostituire il sistema di riscaldamento dei flussi gas/vapore attualmente basato su un surriscaldatore alimentato da bruciatore a vena d'aria. Sarà definita la proposta tecnica per l'installazione di un nuovo sistema di riscaldamento basato su resistenze elettriche ad alta efficienza, compatibili con alimentazione da fonti rinnovabili. Saranno inoltre elaborate proposte di miglioramento del design del reattore, delle membrane e del bilanciamento termico/energetico dell'intero sistema.

### Problemi progettuali da affrontare e soluzioni tecnologiche proposte

- Discrepanze tra comportamento simulato e comportamento reale → affinamento modelli CFD.
- Inefficienza energetica del sistema di riscaldamento attuale → proposta di sostituzione con resistenze elettriche ad alta efficienza.
- Possibili ottimizzazioni di geometria reattore e integrazione membrane → proposte di redesign mirato.

### Risorse tecniche umane impiegate

- Ingegneri di processo,
- Esperti di simulazioni CFD,
- Tecnici specializzati nella diagnostica impianti.

### Risultati attesi

- Validazione sperimentale dei modelli numerici CFD,
- Individuazione delle principali criticità impiantistiche,
- Definizione di un set di interventi migliorativi, incluso l'upgrade del sistema di riscaldamento per aumentare l'efficienza globale del processo.
- Report R6.1 sulla validazione CFD e adattamento progettuale del sistema M11

## 13.2. TEMPI DI REALIZZAZIONE OR6

Le attività dell'OR6 si svolgeranno dal M4 al M11

## 14. DESCRIZIONE DELL'OBIETTIVO REALIZZATIVO 7

### OR7: Supporto ingegneristico e scaling impiantistico – ICI - RI

Questo Obiettivo Realizzativo ha come scopo la traduzione dei risultati sperimentali e delle analisi CFD validate in specifiche tecniche per il dimensionamento su scala industriale del sistema. Saranno sviluppate attività di scaling-up ingegneristico per preparare il pre-design di un impianto industriale compatto e containerizzabile. Verranno inoltre elaborate linee guida operative e tecniche a supporto della futura realizzazione commerciale. Le attività si svolgeranno presso la sede di ICI Powering Evolution S.p.A. L'OR7 è classificato come **Ricerca Industriale**, in quanto riguarda lo sviluppo di conoscenze applicate e la progettazione concettuale di sistemi industriali futuri, senza interventi su impianti fisici o dimostratori reali.

## 14.1. ELENCO DELLE ATTIVITÀ DELL'OBIETTIVO REALIZZATIVO 7 E RELATIVA DESCRIZIONE

### LA7.1 Analisi dei dati sperimentali e risultati CFD M5–M6

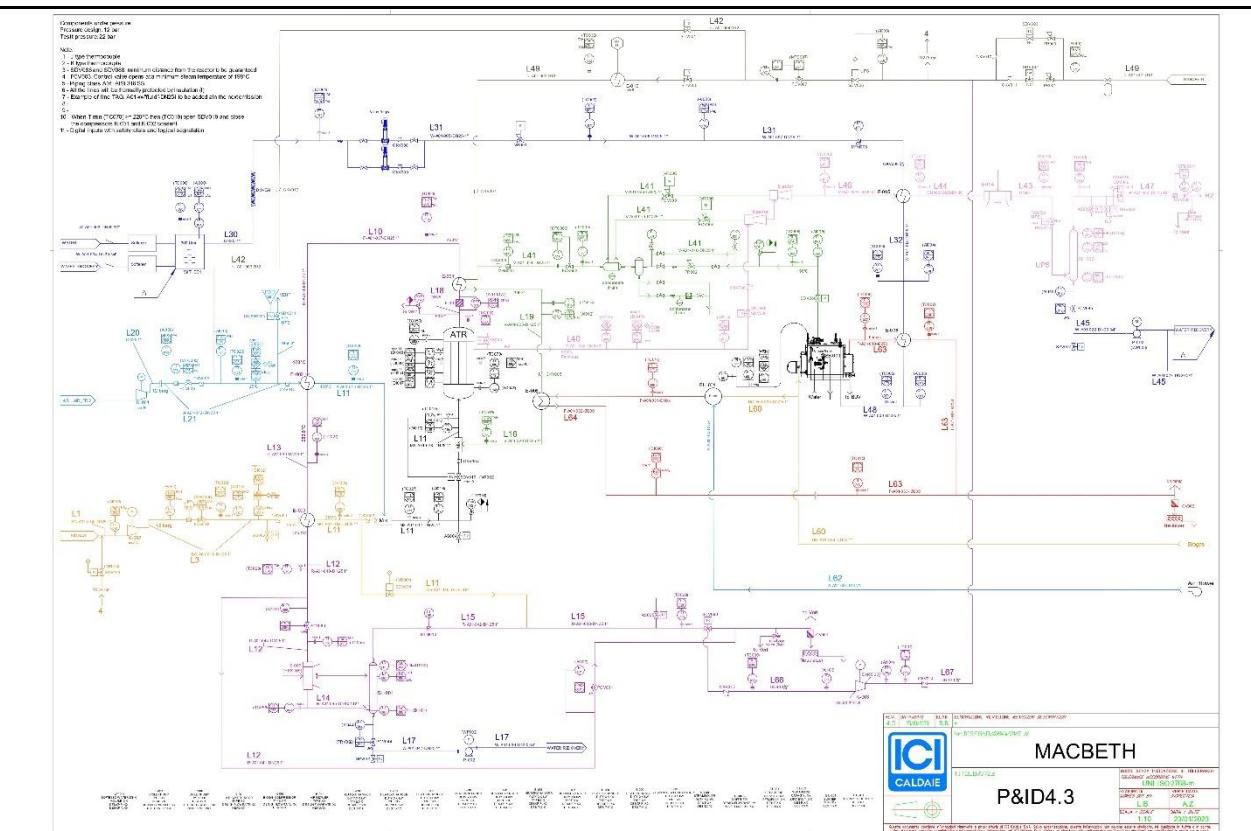
Sarà effettuata una revisione approfondita dei dati sperimentali acquisiti durante il funzionamento dell'impianto pilota e dei risultati delle simulazioni CFD validate. Questa analisi permetterà di definire i parametri chiave da mantenere o migliorare nel passaggio a scala industriale.

### LA7.2 Definizione delle specifiche di scaling-up M6–M9

Sulla base delle analisi, verranno elaborati i criteri di scaling-up del sistema: parametri di processo, dimensionamento dei reattori, configurazioni di layout, requisiti termici e fluidodinamici. Saranno prese in considerazione anche le modifiche proposte in OR6, in particolare quelle relative al miglioramento del sistema di riscaldamento.

### LA7.3 Elaborazione del pre-design di impianto industriale M9–M12

Verrà sviluppato un pre-design completo di un impianto industriale compatto, containerizzabile e basato su energia rinnovabile per il riscaldamento dei flussi. Saranno definiti gli schemi di processo principali (PFD), schemi di base piping (P&ID semplificato), e specifiche funzionali preliminari.



*P&ID of the catalytic membrane reactor (CMR) technology developed in the European MACBETH project for the pure H<sub>2</sub> production from natural gas and biogas che sarà in questo progetto migliorato.*

## Problemi progettuali da affrontare e soluzioni tecnologiche proposte

- Tradurre dati pilota in scala industriale mantenendo efficienza e performance → applicazione criteri di similitudine fisico-chimica.
- Integrare modifiche tecnologiche (es. nuovo sistema di riscaldamento) → adattamento layout e bilanci energetici.

### Risorse tecniche umane impiegate

- Ingegneri di processo,
- Ingegneri meccanici e piping,
- Esperti di scaling-up industriale.

## Risultati attesi

- Definizione di parametri tecnici chiave per scaling up
- Pre-design di impianto industriale modulare
- Linee guida per futura realizzazione su scala commerciale
- Report R7.1 al M12 Supporto ingegneristico e studio di scalabilità del sistema

## 14.2. TEMPI DI REALIZZAZIONE

Le attività dell'OR7 si svolgeranno dal M5 al M12

## 15. DESCRIZIONE DELL'OBIETTIVO REALIZZATIVO 8

OR8: Adattamento dell'impianto per industrializzazione – ICI - SS

L'obiettivo dell'OR8 prevede la realizzazione concreta degli interventi di modifica e ottimizzazione dell'impianto pilota, emersi dalle analisi di validazione e scaling-up. In particolare, sarà implementato il nuovo sistema di riscaldamento dei flussi gas e vapore tramite resistenze elettriche ad alta efficienza, in sostituzione del surriscaldatore a vena d'aria, per incrementare l'efficienza energetica e consentire l'alimentazione da fonti rinnovabili. Saranno inoltre

apportate tutte le modifiche necessarie per rendere l'impianto dimostrativo industrializzabile, modulare e compatibile con future installazioni su scala reale. Per garantire la corretta realizzazione delle modifiche all'impianto nei tempi previsti dal progetto, sono già stati contattati i principali fornitori coinvolti nelle forniture critiche. In particolare:

Thermowatt Professional – Fornitura del surriscaldatore elettrico  
Davcoil – Scambiatori di calore  
Klevers – Materiali per l'isolamento  
Endress+Hauser – Misuratori di portata  
Telmotor – Regolatori di potenza elettrica

Le attività saranno svolte presso ICI Powering Evolution S.p.A.

L'OR è classificato come **Sviluppo Sperimentale**, in quanto consiste nell'intervento diretto su un impianto pilota reale per modificarne il layout e la funzionalità in vista di un'evoluzione industriale.

## 15.1. ELENCO DELLE ATTIVITÀ DELL'OBIETTIVO REALIZZATIVO 8 E RELATIVA DESCRIZIONE

### LA8.1 Ingegnerizzazione delle modifiche impiantistiche M7–M8

Sulla base dei risultati di OR6 e OR7, verranno sviluppati i dettagli tecnici delle modifiche da implementare: scelta delle resistenze elettriche, adattamento piping, revisione del sistema di controllo termico, modifiche meccaniche al layout dell'impianto.

### LA8.2 Sostituzione del sistema di riscaldamento M8–M10

In base alla proposta tecnica consolidata in OR6, sarà realizzata la sostituzione del surriscaldatore alimentato da bruciatore a vena d'aria con un nuovo sistema di riscaldamento basato su resistenze elettriche modulari ad alta efficienza.

L'intervento prevede:

- progettazione e installazione di resistenze elettriche dimensionate per il fabbisogno termico dell'impianto,
- adattamento del piping di alimentazione gas e vapore,
- integrazione del nuovo sistema nel circuito di controllo termico esistente,
- predisposizione di connessioni elettriche compatibili con fonti rinnovabili (energia da fotovoltaico o rete verde).

Le modifiche saranno eseguite minimizzando l'impatto sul layout generale dell'impianto e garantendo il rispetto dei requisiti operativi definiti durante le attività di scaling-up (OR7). Al termine della sostituzione sarà verificata l'efficienza del nuovo sistema attraverso misure dirette di prestazione e test funzionali specifici.

### LA8.3 Adattamento e ottimizzazione del sistema pilota M8–M11

Saranno effettuati tutti gli altri interventi di adattamento individuati: ottimizzazione circuiti gas/vapore, miglioramento integrazione membrane, aggiornamento sottosistemi ausiliari. Si procederà anche alla revisione dei sistemi di misura e controllo per garantire il corretto funzionamento post-modifica.

### LA8.4 Test funzionali di validazione delle modifiche M11–M12

Al termine delle modifiche, sarà eseguita una campagna di test funzionali per validare le nuove configurazioni operative. Saranno verificate le prestazioni del nuovo sistema di riscaldamento, la stabilità operativa dell'impianto e la conformità ai parametri di design definiti in OR7.

### Problemi progettuali da affrontare e soluzioni tecnologiche proposte

- Sostituzione efficiente del sistema di riscaldamento senza alterare il bilanciamento termico globale → adozione di resistenze modulari e controlli dinamici.
- Ottimizzazione circuiti e componenti ausiliari per supportare il nuovo layout impiantistico → interventi mirati e modulari.

### Risorse tecniche umane impiegate

- Ingegneri di impianto,

- Tecnici installatori specializzati,
- Ingegneri di automazione e controllo.

#### Risultati attesi

- Implementazione del nuovo sistema di riscaldamento ad alta efficienza
- Adattamento dell'impianto pilota per renderlo industrializzabile
- Validazione funzionale delle nuove configurazioni operative
- Report R8.1 a M12 Adattamento impiantistico e attività di integrazione tecnologica

### 15.2. TEMPI DI REALIZZAZIONE

Le attività dell'OR8 si svolgeranno dal M7 al M12

### 16. DESCRIZIONE DELL'OBIETTIVO REALIZZATIVO 9

#### OR9: KPI e Analisi economica e ambientale – USGM – RI

L'OR9 è dedicato all'analisi dei KPI e all'analisi tecnica, economica e ambientale del sistema attraverso l'uso di software (e.g. SIMAPRO) che, prendendo dati dai flussi di materia ed energia della simulazione di sistema (OR1 e OR4 in ASPEN) elaborino le analisi di Life Cycle Cost e Life Cycle Assessment (in SIMAPRO). Tali analisi saranno sviluppate nel LTS di Marconi che dispone di server con SIMAPRO e ASPEN.

#### 16.1. ELENCO DELLE ATTIVITÀ DELL'OBIETTIVO REALIZZATIVO 9 E RELATIVA DESCRIZIONE

##### LA 9.1 Key Performance Indicator Analysis M4-M12

I Key Performance Indicator del progetto indicati nell'obiettivo finale:

- Efficienze: prossime al 60% (di sistema per impianti da 0,2-5 MWthermal input rispetto ad efficienze attuali del 40% per impianti da 10-100 MWthermal input)
- Costi: 3 €/kg (rispetto agli attuali 3 €/kg da SMR e maggiori di 5 €/kg del green hydrogen).
- Emissioni: 1-5 kg CO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub> (rispetto agli attuali 10 kg CO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub> per la produzione di idrogeno da SMR)

saranno costantemente monitorati attraverso il loro calcolo in tutte le fasi del progetto. Ad esempio si valuteranno al mese 6 per il sistema non ottimizzato, si valuteranno durante le ottimizzazioni analizzate e validate sul prototipo e si valuteranno alla fine del progetto per il prodotto su scala industriale progettato. Tale valutazione è svolta in OR1 e OR4 per quanto riguarda l'efficienza e nelle LA9.2 e LA9.3 per quanto riguarda i costi e le emissioni.

##### LA9.2 Analisi Ambientale M4-M12

L'impatto ambientale della tecnologia sviluppata in BEMARS sarà analizzato mediante un'analisi del ciclo di vita (in inglese Life Cycle Assessment - LCA). Il LCA sarà conforme alla metodologia delle norme ISO 14040 e 14044. Sarà effettuata un'identificazione e quantificazione degli input e output del processo per la costruzione dell'inventario del ciclo di vita (in inglese Life Cycle Inventory - LCI). I dati primari necessari per la definizione del LCI saranno raccolti negli OR1 e OR5 per il sistema base e OR4 e OR6-OR8 per il sistema ottimizzato. Le categorie d'impatto incluse nello studio saranno selezionate con attenzione, al fine di evitare che impatti ambientali rilevanti (ad esempio, cambiamenti climatici, tossicità per l'uomo, ecc.) vengano esclusi dall'ambito dell'analisi. L'impatto ambientale sarà calcolato utilizzando modelli di caratterizzazione ampiamente riconosciuti, come quelli raccomandati dal Joint Research Centre nel documento "International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context", e in linea con le raccomandazioni del metodo Product Environmental Footprint (PEF).

##### LA9.3 Analisi economica M4-M12

La valutazione delle implicazioni economiche sarà basata su un'analisi completa dei costi lungo il ciclo di vita (Life Cycle Costing – LCC) e verrà costruita a partire dalla definizione dell'obiettivo e campo di applicazione (*Goal and Scope*) e dall'inventario del ciclo di vita (LCI) sviluppati nell'ambito della LA 9.2 per la valutazione ambientale (LCA). Questa valutazione prenderà in considerazione tutti i costi fissi e variabili sostenuti durante l'intero ciclo di vita della tecnologia. I costi fissi riguarderanno principalmente le infrastrutture necessarie, mentre i costi variabili saranno legati principalmente ai prodotti e varieranno in funzione della produzione complessiva, come nel caso delle materie prime.

I costi verranno ulteriormente classificati in: costi di ingegneria e sviluppo, costi di produzione e implementazione, costi di utilizzo e operativi, e costi di fine vita (inclusi smantellamento e smaltimento).

#### **Risorse tecniche umane impiegate**

Per tali attività si prevede l’impiego di due Professori Associati full time per 625 ore l’uno e di circa 259 ore di un terzo Professore Associato (totale 1509 ore).

#### **Risultati attesi**

- Report R9.1 sul LCA, LCC, KPI del sistema non ottimizzato M6
- Report R9.2 sul LCA, LCC, KPI del sistema ottimizzato M12

### **16.2. TEMPI DI REALIZZAZIONE OR9**

Le attività dell’OR9 si svolgeranno dal M4 al M12

### **17. DESCRIZIONE DELL’OBIETTIVO REALIZZATIVO 10**

#### **OR 10 MANAGEMENT DISSEMINAZIONE E VALORIZZAZIONE DEI RISULTATI - ICI – RI**

L’obiettivo generale dell’OR10 è garantire un’implementazione efficace e coordinata del progetto, assicurando la massima diffusione e valorizzazione dei risultati prodotti. L’OR10 integra attività di gestione tecnico-amministrativa (LA10.1), disseminazione (LA10.2) e valorizzazione dei risultati (LA10.3). ICI e USGM, grazie all’esperienza maturata in numerosi progetti nazionali ed europei, vantano competenze consolidate anche in quest’ambito; in particolare, USGM ha già coordinato con successo attività analoghe nei progetti GICO e BLAZE

#### **17.1. ELENCO DELLE ATTIVITÀ DELL’OBIETTIVO REALIZZATIVO 10 E RELATIVA DESCRIZIONE**

##### **LA10.1 Management M1-M12**

La LA10.1 garantirà una corretta attuazione del progetto attraverso un efficace coordinamento e monitoraggio delle attività e delle risorse. In particolare, le attività previste per la LA10.1 sono:

- Garantire una struttura organizzativa adeguata e meccanismi decisionali efficaci.
- Assicurare un’efficiente rete di comunicazione e collaborazione tra i partner.
- Gestire in modo appropriato tutti gli aspetti legali, amministrativi e finanziari del progetto.
- Gestire il trasferimento dei risultati sviluppati.
- Garantire una gestione dei dati rintracciabile, accessibile, interoperabile e riutilizzabile conforme ai principi FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable).
- Affrontare in modo efficace i rischi interni ed esterni del progetto.

##### **LA10.2 Disseminazione M1-M12**

Le attività di disseminazione saranno svolte durante l’intera durata del progetto. L’obiettivo della strategia di disseminazione è identificare e strutturare le azioni necessarie per massimizzare la visibilità del progetto e promuovere la valorizzazione dei risultati ottenuti. La strategia e le attività di disseminazione seguiranno un approccio multicanale (e.g. pubblicazioni open access, presentazione dei risultati a conferenze di settore, comunicazione sui social media), al fine di massimizzare la diffusione dei risultati e adattando con attenzione contenuti e strumenti in base alle caratteristiche, agli interessi e al potenziale di coinvolgimento dei diversi pubblici di riferimento.

##### **LA10.3 Valorizzazione dei risultati M1-M12**

La strategia di valorizzazione dei risultati sarà definita sulla base di un’analisi delle tendenze di mercato, dei potenziali utilizzatori e della sostenibilità economico-finanziaria. Le attività specifiche includono:

- Svolgere un'analisi per raccogliere dati sui bisogni del mercato, identificare i segmenti di potenziali clienti ed evidenziare opportunità e minacce nel processo di commercializzazione.
- Sviluppare e adattare modelli di business.
- Definire un piano finale di valorizzazione dei risultati per ciascun risultato valorizzabile.

#### **Risorse tecniche umane impiegate**

- Tecnici per la gestione del progetto,
- Personale amministrativo

#### **Risultati attesi**

- Report 10.1 sulla strategia di management, disseminazione e valorizzazione del progetto M1
- Report 10.2 sulle attività di management, disseminazione e valorizzazione del progetto M12

### **17.2. TEMPI DI REALIZZAZIONE OR10**

Le attività dell'OR10 si svolgeranno durante tutta la durata del progetto, dal M1 al M12.

### **18. RISULTATO INTERMEDIo ATTESO DEL PROGETTO**

Qui di seguito si riportano i risultati attesi di ogni OR che saranno raggiunti (consegnando i relativi – deliverable – qui chiamati report: R) nei primi 6 mesi di Progetto. Il risultato intermedio è quindi individuato a metà del periodo di realizzazione previsto ed è verificabile dalla consegna dei report in tale periodo. In generale i primi sei mesi vedranno la simulazione delle cinetiche, CFD, di sistema e la loro validazione sperimentale tramite i test del sistema non ottimizzato (per cui efficienze prossime al 50% e non al 60% per la produzione di idrogeno da biomasse di scarto, costi da 5-10 €/kg e emissioni da 1 a 5 kg CO2/kg/H2).

#### **R1.1 Analisi di biomasse, biogas, syngas, biometano e tecnologie correlate – Report [M5]**

Il report conterrà l'analisi tecnica e quantitativa, effettuata utilizzando banche dati nazionali ed europee, delle principali biomasse di scarto disponibili in Italia ed Europa. Il risultato di tale analisi sarà l'identificazione delle tipologie di feedstock più idonee, per quantità, costo di reperimento, caratteristiche di usabilità in digestione e gassificazione, alla produzione di biogas e syngas. Verranno inoltre analizzate le tipologie di impianti attualmente in uso per la produzione di biogas, syngas e biometano, con il supporto di dati da casi studio reali. Il documento costituirà la base tecnica per lo sviluppo dei modelli di simulazione e per le successive analisi economiche e ambientali previste dal progetto.

#### **R1.2 Modellazione del sistema integrato – Report [M6]**

Il documento riporterà lo sviluppo del modello in ASPEN del sistema BEMARS integrato con diverse configurazioni di impianti di produzione di biogas e syngas. Nel lavoro verrà riportato prima lo sviluppo dei singoli componenti del sistema (reattore, scambiatori, compressori, valvole, ecc.) e poi l'integrazione dei componenti per la modellazione del sistema complessivo. Successivamente verrà riportata la validazione del modello integrato ottenuto, effettuata utilizzando i dati sperimentali provenienti dall'OR6. Infine dai risultati dei bilanci di massa ed energia (BoP) ottenuti dal modello integrato e validato, verranno riportate indicazioni utili per le attività di ottimizzazione (OR4) e per le analisi economico-ambientali finali (OR9).

#### **R2.1 Report sulle analisi cinetiche per i catalizzatori e le membrane – Report [M6]**

Sarà selezionato un modello cinetico idoneo per il sistema BEMARS. Saranno anche determinati i parametri cinetici (Arrhenius) per il catalizzatore utilizzato nel reattore di steam reforming per temperature fino a 600 °C e pressioni fino a 10 bar. Per quanto riguarda le membrane sarà determinata la dipendenza della velocità di permeazione dell'idrogeno dalla temperatura e sarà identificata la relazione più idonea con la pressione parziale dell'idrogeno stesso. Tali cinetiche saranno necessarie per lo sviluppo degli altri OR di simulazione.

#### **R3.1 Report su Sviluppo del modello CFD 3D del sistema già presente – Report [M4]**

In questo report saranno riportati i risultati delle simulazioni del sistema di steam reforming con integrate membrane di separazione di idrogeno già presente ad ICI (sistema MACBETH). Il sistema simulato sarà quindi una copia virtuale del sistema reale, tramite tale copia virtuale si potrà continuare lo sviluppo del rettore BEMARS ed effettuare analisi di scale-up. Sarà infine simulato il comportamento del reattore già presente con diverse alimentazioni: Bio-gas, biometano, Biosyngas. Tramite tali simulazioni sarà possibile determinare le condizioni operative più idonee per le differenti alimentazioni (temperatura, pressione, Equivalence ratio, steam to carbon ratio, portate).

#### **R5.1 Report tecnico sul funzionamento dell'impianto pilota – Report [M6]**

In questo report saranno riportati tutti i parametri operativi, le condizioni di test e i risultati sperimentali ottenuti durante la fase di funzionamento dell'impianto pilota MACBETH, condotta da ICI nel periodo compreso tra il mese 1 e il mese 6 del progetto. Il documento costituirà l'output finale dell'Obiettivo Realizzativo OR5 e avrà lo scopo di fornire una visione dettagliata delle attività sperimentali effettuate, con particolare riferimento alla messa in servizio, alla raccolta dati e alle prime valutazioni prestazionali del sistema. Nel report saranno descritte le attività di verifica e messa a punto iniziale dell'impianto, tra cui i test di tenuta, i controlli funzionali e i collaudi preliminari (SAT), necessari a garantire il corretto avvio delle prove. Seguiranno le descrizioni delle campagne di test condotte, con indicazione delle condizioni operative adottate (temperature, pressioni, rapporti di miscelazione tra vapore, biogas e aria), dei set di dati raccolti e delle misurazioni effettuate in continuo. Saranno inoltre presentati i risultati ottenuti in termini di conversione, selettività, portate trattate e produzione di idrogeno, nonché una prima analisi dei bilanci di massa ed energia. Tali informazioni costituiranno la base per le successive attività previste negli OR collegati. Infine, saranno evidenziate eventuali criticità tecniche riscontrate durante le prove e le relative azioni correttive intraprese, oltre a indicazioni utili per le modifiche impiantistiche da attuare nelle fasi successive del progetto.

#### **R9.1 Analisi LCA, LCC e KPI del sistema non ottimizzato – Report [M6]**

Il report conterrà i risultati preliminari dell'analisi ambientale (LCA), economica (LCC) e dei Key Performance Indicator (KPI) relativi al sistema BEMARS nella sua configurazione iniziale. Utilizzando i dati sperimentali e di simulazione disponibili fino al mese 6, saranno elaborati i primi bilanci di massa ed energia, con l'obiettivo di valutare l'efficienza del sistema, il costo di produzione dell'idrogeno e le relative emissioni di CO<sub>2</sub>. Questi risultati costituiranno il punto di riferimento per le attività di ottimizzazione e validazione previste nelle fasi successive del progetto.

#### **R10.1 Report sulla strategia di management, disseminazione e valorizzazione del progetto [M1]**

Il presente deliverable definisce la struttura organizzativa e le procedure operative per l'attuazione coordinata del progetto BEMARS. Il documento include le modalità di comunicazione tra i partner, i meccanismi decisionali, le linee guida per la gestione tecnico-amministrativa e la rendicontazione finanziaria, nonché le procedure per la gestione dei dati. Sono inoltre stabilite le modalità per la tutela della proprietà intellettuale, la gestione dei rischi e la documentazione delle attività progettuali. Il report comprende anche la strategia iniziale di disseminazione e valorizzazione dei risultati: vengono definiti obiettivi, pubblico target, canali, strumenti e responsabilità, con l'obiettivo di massimizzare l'impatto delle attività di comunicazione e promuovere l'adozione dei risultati da parte di stakeholder scientifici, industriali e istituzionali.

### **19. RISULTATO FINALE ATTESO DEL PROGETTO**

Qui di seguito si riportano i risultati attesi di ogni OR che saranno raggiunti (consegnando i relativi – deliverable – qui chiamati report: R) nei restanti 6 mesi di Progetto. Il risultato finale è quindi individuato a fine del periodo di realizzazione previsto ed è verificabile dalla consegna dei report in tale periodo. In generale i restanti sei mesi vedranno la finalizzazione delle simulazioni di sistema e delle ingegnerie per la validazione sperimentale tr del sistema ottimizzato (per cui efficienze prossime al 60% per la produzione di idrogeno da biomasse di scarto, costi di 3 €/kg e emissioni intorno a 1 kg CO<sub>2</sub>/kg/H<sub>2</sub>). Sarà altresì modificato il prototipo, realizzando il prototipo ottimizzato e sarà anche sviluppato il prodotto industriale per specifici casi applicativi (e.g. differenti taglie).

#### **R4.1 Analisi della modularità interna e esterna, dei fornitori e degli end user con valutazione di scale-up e ottimizzazione – Report [M11]**

Il report raccoglie i risultati dell'analisi condotta sull'ottimizzazione, la modularità e lo scale-up del sistema BEMARS. In particolare, verranno riportate nel documento: le valutazioni sui componenti chiave e i fornitori più idonei, le configurazioni impiantistiche ottimali e le possibili taglie industriali, anche in relazione allo studio delle esigenze dei potenziali end-users. Il documento fornirà gli input utili alla definizione delle specifiche di pre-design e industrializzazione del sistema.

### **R3.2 Simulazioni CFD 3D del nuovo sistema BEMARS Report [M9]**

Il report presenterà le simulazioni CFD 3D del nuovo reattore BEMARS, con l'obiettivo di selezionare la configurazione geometrica più adatta e definire le condizioni operative ottimali per diverse alimentazioni (biogas, biometano, biosyngas) al fine di valutare le prestazioni termo-fluidodinamiche del sistema e supportare la progettazione, realizzazione e test dell'OR6-8.

### **R6.1 – Report finale sulla validazione CFD e adattamento progettuale del sistema [M11]**

In questo report saranno riportati i risultati delle attività svolte nell'ambito dell'OR6, con particolare riferimento alla validazione dei modelli CFD mediante confronto con i dati sperimentali ottenuti nel corso delle prove condotte sull'impianto pilota (OR5), e alla successiva definizione degli adattamenti progettuali volti a migliorare il comportamento del sistema. La deliverable includerà un'analisi dettagliata della coerenza tra le simulazioni fluidodinamiche sviluppate nei mesi precedenti (in particolare in OR2, a cura di USGM) e i dati reali raccolti durante le prove sperimentali, evidenziando eventuali scostamenti e proponendo opportune calibrazioni o aggiornamenti del modello numerico. Verranno inoltre valutate le soluzioni tecnologiche alternative emerse dall'analisi dei risultati, con un focus particolare sul miglioramento dell'efficienza termica del sistema e sull'ottimizzazione dell'integrazione delle nuove configurazioni, come l'adozione di riscaldatori elettrici ad alta efficienza in sostituzione del sistema a combustione. Saranno documentate nel report tutte le attività tecniche svolte per analizzare, progettare e valutare le modifiche impiantistiche, incluse le simulazioni aggiuntive, le scelte progettuali preliminari e le implicazioni tecniche ed economiche delle modifiche proposte. Il documento costituirà dunque una base tecnica solida per l'adattamento dell'impianto pilota previsto nel successivo OR8 e per la definizione delle linee guida di scale-up affrontate nell'OR7.

### **R7.1 – Supporto ingegneristico e studio di scalabilità del sistema [M12]**

Il presente report documenterà in modo completo le attività svolte nell'ambito dell'OR7, con particolare riferimento al supporto ingegneristico fornito alla definizione delle modifiche impiantistiche e allo studio di scalabilità del sistema verso soluzioni industriali. Nel documento saranno descritti i contributi tecnici forniti da ICI nella traduzione dei risultati sperimentali e modellistici ottenuti nei precedenti OR (OR5, OR6) in specifiche tecniche e requisiti ingegneristici per l'adattamento e l'evoluzione dell'impianto. Saranno quindi presentati i criteri guida per il pre-design di un impianto in scala industriale, coerente con la produzione di idrogeno da biogas e basato su tecnologia a membrane. Particolare attenzione sarà data alla valutazione della modularità del sistema, all'analisi degli ingombri, all'integrazione con l'infrastruttura impiantistica esistente e all'individuazione delle componenti critiche in ottica di replicabilità e produzione industriale. Il report comprenderà anche un dimensionamento preliminare di un impianto su scala maggiore (fino a 1 MW), considerando scenari realistici di utilizzo nei settori agroindustriale e del waste-to-hydrogen. Verranno infine esposti gli impatti attesi in termini di CAPEX, OPEX, efficienza e sostenibilità ambientale derivanti dalle configurazioni studiate, a supporto delle analisi tecno-economiche e di business model previste in OR9.

### **R8.1 – Adattamento impiantistico e attività di integrazione tecnologica [M12]**

In questo report saranno raccolte e descritte tutte le attività svolte nell'ambito dell'OR8, dedicate all'adattamento dell'impianto pilota sulla base delle evidenze sperimentali e modellistiche raccolte nel corso del progetto, con particolare riferimento alle modifiche hardware effettuate e alla validazione operativa del sistema aggiornato. La deliverable documenterà in dettaglio le azioni di implementazione fisica derivanti dal redesign proposto in OR6 e supportato dal lavoro ingegneristico di OR7. Tra queste rientrano in particolare: la sostituzione del sistema di riscaldamento a combustione con resistenze elettriche ad alta efficienza, la modifica delle linee di alimentazione gas e vapore, l'installazione di componenti ausiliari (scambiatori di calore, materiali isolanti, valvole, raccordi) e le attività di coibentazione e connessione impiantistica. Verranno inoltre presentati i risultati delle prove funzionali post-intervento, effettuate per verificare l'affidabilità e l'efficacia del sistema modificato, nonché l'analisi dei parametri operativi e dei primi indicatori di miglioramento in termini di efficienza energetica e prestazioni di produzione di idrogeno. Il documento rappresenterà quindi la conclusione operativa del processo di ottimizzazione impiantistica del sistema pilota, costituendo un passaggio chiave verso la sua validazione finale e l'impostazione del successivo scale-up industriale.

## R9.2 Analisi LCA, LCC e KPI del sistema ottimizzato – Report [M12]

Il report riporterà i risultati finali dell'analisi ambientale (LCA), economica (LCC) e dei Key Performance Indicator (KPI) per il sistema BEMARS in configurazione ottimizzata. A partire dai dati sperimentali raccolti e dalle simulazioni validate, saranno calcolati i valori di efficienza, costo dell'idrogeno ed emissioni di CO<sub>2</sub>. Il documento includerà anche un confronto con la configurazione iniziale e un'analisi di sostenibilità su scala industriale, fornendo un quadro completo delle prestazioni del sistema per la futura valorizzazione commerciale

## R10.2 Attività di management, disseminazione e valorizzazione – Report [M12]

Questo deliverable riassume le attività di gestione svolte durante l'intero progetto BEMARS, documentando l'efficacia delle procedure di coordinamento, comunicazione e controllo, la conformità agli aspetti legali e finanziari e l'attuazione delle strategie di monitoraggio dei rischi e gestione dell'IPR. Inoltre, il report presenta le attività effettivamente realizzate in ambito di disseminazione e valorizzazione, con dettaglio su pubblicazioni, conferenze, eventi, strumenti di comunicazione utilizzati e feedback raccolti. Infine, viene incluso un piano di sfruttamento dei risultati tecnologici ottenuti, tenendo conto delle valutazioni tecniche, economiche e ambientali emerse durante il progetto e proponendo scenari di utilizzo post-progetto, sia industriali che di ricerca.

## 20. ULTERIORI INFORMAZIONI SULLE VOCI DI SPESA PREVISTE NEL PROGETTO

*Fornire le informazioni utili per la valutazione delle voci di costo “Attrezzature e strumentazioni”, “Consulenze e prestazioni”, “Materiali”. Nel caso di progetti congiunti fornire le suddette informazioni per singolo proponente.*

Il partner ICI si occuperà dello sviluppo delle attività relative agli OR 5,6,7,8,10.

Le spese previste per materiali e attrezzature ammontano complessivamente a 170.000 €, e sono strettamente collegate alle attività sperimentali previste negli OR5, OR6 e OR8. Ogni voce è stata valutata in funzione della sua pertinenza tecnica e della necessità operativa per il corretto svolgimento delle attività progettuali.

Gas tecnici (biogas, N<sub>2</sub>, aria, ecc.) – OR5: 6.000 €. Necessari per l'esecuzione delle prove sperimentali dell'impianto pilota nelle condizioni attuali.

Materiali impiantistici (tubi, raccordi, valvole) – OR6: 24.000 €. Necessari per la modifica del sistema esistente, in particolare per l'integrazione dei nuovi riscaldatori e per l'adattamento del layout impiantistico.

Resistenze elettriche e componenti di potenza – OR8: 69.000 €. Componente chiave per l'elettrificazione del sistema: si tratta di riscaldatori elettrici ad alta efficienza da installare in sostituzione del sistema a bruciatore, con controllo elettronico della potenza.

Coibentazioni e supporti meccanici – OR8: 40.000 €. Materiali tecnici per l'isolamento termico delle nuove linee e componenti riscaldati, al fine di garantire efficienza energetica e sicurezza operativa.

Strumentazione di supporto (sensori, cavi, ecc.) – OR8: 25.000 €. Utilizzata per completare l'integrazione impiantistica e garantire il corretto monitoraggio delle variabili di processo (portate, temperature, pressioni).

Gas tecnici per test post-modifica – OR8: 6.000 €. Servono per eseguire test funzionali sul sistema modificato, validando le prestazioni raggiunte con la nuova configurazione.

Tutte le voci sono motivate da esigenze operative concrete e sono basate su offerte già raccolte da fornitori qualificati. I costi risultano in linea con i valori di mercato e pienamente coerenti con le finalità sperimentali del progetto. Nessuna spesa superflua o non giustificata è stata inserita.

Il partner USGM si occuperà dello sviluppo delle attività relative ai seguenti OR: OR1 (RI), OR2 (RI), OR3 (RI), OR4 (SS), OR9 (RI).

Nell'ambito degli OR 2 e 3 sarà necessario il ricorso a consulenze. In particolare, saranno affidate consulenze alla Università dell'Aquila. Come detto, USGM e UNIVAQ hanno un accordo di collaborazione e in questi ultimi 20 anni hanno sviluppato molti progetti insieme (UNIFHY, BLAZE, GICO, AIRE, ecc.). In particolare, UNIVAQ ha sviluppato la teoria dei letti fluidi (dal 1970 con il libro “Fluidization Dynamics” e gli articoli di Gabilaro e Foscolo in collaborazione con il MIT di Boston, internazionalmente riconosciuto come modello di riferimento per i letti fluidi “the Gabilaro-Foscolo model of the behavior of fluidised bed”) e, recentemente (dal 2015), ha sviluppato anche test rigs per il test di catalizzatori e membrane. Per cui tale consulenza è necessaria per poter svolgere al meglio le attività di analisi delle cinematiche e di simulazione fluidodinamiche (CFD) in modo da usare i modelli e

test rig dell'Aquila (inoltre dal 2005 tali attività sono congiunte tra il prof. Andrea di Carlo dell'Aquila e il prof. Enrico Bocci di USGM, si vedano le relative pubblicazione congiunte qui riportate). .

Nell'ambito degli OR 4 e 9 sarà necessario il ricorso a consulenze. In particolare, saranno affidate consulenze alla società Idea-Re srl. La società Idea-Re si è costituita nel 2016 nella forma di start up innovativa, con l'intento di fornire servizi integrati alle Imprese nell'ambito della Ricerca e Sviluppo e in senso più ampio nella consulenza strategica legata all'innovazione. Idea-Re è una società ricca di esperienza: i soci provengono tutti dal mondo accademico e vantano competenze specifiche nell'ambito della ricerca applicata e della formazione. Obiettivo di Idea-Re è far emergere il bisogno latente di innovazione con il supporto degli strumenti finanziari disponibili e elaborando strategie innovative per l'impiego sul mercato delle innovazioni. Il team Idea-Re, con le sue competenze specialistiche, si inserisce trasversalmente a tutte le funzioni aziendali, sia come coordinatore dello sviluppo dell'innovazione e delle strategie, sia come propositore di iniziative. Idea-Re ha inoltre stabilito accordi di collaborazione con partners che completano la gamma di competenze interne alla società. L'attività di consulenza erogata da Idea-Re al mondo delle imprese e della Pubblica Amministrazione si declina nelle seguenti linee di business:

- Project Funding: Misure agevolative, strumenti e piattaforme finanziarie innovative, consulenza strategica per la creazione e per lo sviluppo competitivo delle imprese.
- Industria 4.0: Idea-Re ha ottenuto la certificazione di Centro di Trasferimento Tecnologico in data 25/01/2021 per gli ambiti D - Simulazione di prodotto e/o di sistemi produttivi e/o logistici; E - Integrazione verticale e orizzontale; F - Industrial Internet, Internet of Things e/o Internet of Machines; G - Cloud; H - Cybersicurezza e business continuity; I - Big Data e Analytics e per le attività connesse: 2.5 - Progettazione e pianificazione interventi di implementazione di tecnologie Industria 4.0; 2.6 - Ricerca industriale e sviluppo sperimentale inclusa prototipazione anche virtuale; 2.7 - Innovazione organizzativa e di processo nei servizi; 2.9 - Servizi di analisi, monitoraggio e brokeraggio tecnologico; 2.10 - Sviluppo software applicativo e personalizzazione package e piattaforme di mercato; relativi a tecnologie 4.0; 2.13 - Protezione proprietà intellettuale, privacy, cybersecurity; 2.15 - Produzione di materiale tecnico o documentale sulle tecnologie 4.0. I servizi di consulenza erogati e i progetti sviluppati in questo ambito sono coerenti con le competenze certificate.
- R&D e Innovazione. Studi di fattibilità, ricerca di base, ricerca industriale e sviluppo sperimentale per le imprese che intendono competere attraverso l'innovazione nei seguenti ambiti: misure e metrologia; data analytics; AI e machine learning; agricoltura di precisione; manifattura additiva; DSS; Industria 4.0; IoT; quantum computing; fintech.
- Formazione. Idea-Re è un organismo di formazione accreditato dalla Regione Umbria con D.D. N. 5314 del 30/05/2019. I servizi di formazione si concretizzano in interventi di disseminazione e trasferimento tecnologico di conoscenza, con metodi e tecniche innovative, su tematiche quali: data science; Artificial Intelligence; smart city; smart agriculture; quantum computing; project management; IT.

Le competenze eterogenee del team Idea-Re consentono una visione olistica dei sistemi complessi e dei progetti R&D applicati a scala industriale. Per tali caratteristiche si intende fare ricorso a Idea-Re sia per attività di scouting industriale relativo a sistemi di Biogas e Syngas, sia per le competenze in ambito strategico per l'analisi tecnico economica del progetto. In particolare, le attività di Idea-Re sono le seguenti:

#### OR4 - Modularità, Scale up, stakeholders e tecnologie:

L'obiettivo realizzativo 4 (OR4) del progetto BEMARS si concentra sull'analisi della modularità e dello scale-up del sistema innovativo di produzione di idrogeno verde tramite reforming assistito da membrane, utilizzando feedstock rinnovabili come biogas, bio-metano e bio-syngas. L'OR4 si configura come sviluppo sperimentale, con l'obiettivo di individuare stakeholder, tecnologie e fornitori per raggiungere efficienze di sistema prossime al 60%, costi di 2-3 €/kg di idrogeno e emissioni di 1-5 kg CO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub>, superando i target del 2030 già nel 2026. Per conseguire tali risultati, è essenziale identificare fornitori di componenti chiave, come membrane per la separazione selettiva dell'idrogeno ad alta temperatura (e con purezza > 99,9%) e resistenze elettriche ad alta efficienza alimentabili da fonti rinnovabili, che sostituiscono i tradizionali bruciatori. Questi componenti devono soddisfare requisiti di prestazioni e costi, e la loro integrazione nel sistema deve essere ottimizzata, ad esempio nel letto fluidizzato, o nel freeboard. L'OR4 valuta soluzioni modulari interne, come reattori con membrane integrate o configurazioni in serie, e soluzioni esterne, come la progettazione di impianti di diverse taglie (da 100 a 2500

kg/giorno di idrogeno, equivalenti a 0,2-5 MW di input energetico) o la combinazione di unità standard. Queste taglie sono compatibili con gli impianti a biogas esistenti in Italia, come quelli di SNAM, e con gli obiettivi del PNRR (M2C2I3.1), favorendo la containerizzazione per una maggiore modularità e affidabilità su scala industriale compatta. Idea-Re si occuperà dello scouting industriale per la selezione di fornitori per componenti critici. Le membrane devono garantire un'elevata selettività per l'idrogeno, mentre le resistenze elettriche devono offrire alta efficienza e compatibilità con fonti rinnovabili, contribuendo a ridurre i consumi energetici e i costi rispetto ai sistemi tradizionali. La scelta dei fornitori sarà guidata dalla necessità di allineare prestazioni e costi agli obiettivi del progetto, migliorando la competitività del sistema rispetto allo stato dell'arte. In tale ambito si prevede il coinvolgimento dei ricercatori di Idea-Re per un totale di circa 40 giornate, pari a un controvalore di 25.000€.

OR9 - Analisi tecno-economica e ambientale: in tale OR Idea-Re si occuperà della realizzazione di una market analysis relativa alle applicazioni industriali dei sistemi sviluppati e dello sviluppo di un del business model legato all'innovazione. Obiettivo dell'attività è sviluppare modelli di business basati sull'analisi strategica del mercato e dei competitor e delle tecnologie in via di sviluppo. Tali consulenze hanno il fine di individuare competitor e prospettive di mercato, ed elaborare un modello di business basato sull'innovazione, delineando una mappatura dei principali competitor a livello nazionale e internazionale ed elaborando una Analisi strategica della capacità di assorbimento delle tecnologie sviluppate da parte del mercato. Saranno definite le priorità di investimento e lo sviluppo della business innovation in relazione alle nuove soluzioni ideate. Sarà valutato l'impatto dei progetti di innovazione a livello di modello di business attraverso una analisi di diversi scenari possibili. In tale ambito si prevede il coinvolgimento dei ricercatori di Idea-Re per un totale di circa 40 giornate, pari a un controvalore di 25.000€.

### **III<sup>a</sup> PARTE: ELEMENTI VALUTATIVI**

#### **1. FATTIBILITÀ TECNICO-ORGANIZZATIVA**

##### **1.1. CAPACITÀ E COMPETENZE**

###### **1.1.1. ICI**

ICI Powering Evolution (già ICI Caldaie S.p.A.) è un'azienda italiana con oltre 60 anni di esperienza nella progettazione e produzione di generatori di calore, ed è oggi riconosciuta come uno dei principali attori a livello europeo nel settore dei generatori di vapore industriali e delle soluzioni per la transizione energetica.

Grazie alla sua natura industriale e alla profonda integrazione tra **ricerca, sviluppo e produzione**, ICI è in grado di progettare, realizzare, testare e industrializzare nuove tecnologie energetiche avanzate in modo completo e autonomo. L'azienda combina capacità ingegneristiche, infrastrutture produttive evolute e un laboratorio R&D interno ad alta specializzazione.

##### **Personale e competenze interne**

Il team tecnico di ICI è costituito da ingegneri, dotti di ricerca e tecnici specializzati. La Direzione Ricerca e Sviluppo è responsabile della gestione dei progetti di innovazione, ed è coinvolta attivamente nella definizione tecnica e nella realizzazione pratica dei sistemi, in sinergia con i reparti di produzione e collaudo.

Grazie a questa organizzazione integrata, ICI è in grado di **progettare e costruire impianti pilota, sviluppare prototipi su scala industriale**, effettuare modifiche impiantistiche complesse e testare le soluzioni in condizioni operative reali.

##### **Struttura produttiva e laboratorio**

La sede di Zevio (VR) ospita l'intera filiera produttiva, dai **componenti meccanici e strutturali ai sistemi complessi chiavi in mano**. Lo stabilimento include: