



**Sperimentare ed industrializzare
una nuova tecnologia per lo stoccaggio
ed il trasporto dell'idrogeno.**



Progetto cofinanziato A VALERE SULL'AVVISO PUBBLICO EX ARTICOLO 1, COMMA 5, LETTERA A), DEL DECRETO MINISTERIALE 23 DICEMBRE 2021
PROGETTI DI RICERCA PER L'IDROGENO NELL'AMBITO DEL PNRR - M2C2 LINEA DI INVESTIMENTO 3.5



I partner di HEHS



aizoOn è una società italiana di tecnologia e consulenza tecnologica di innovazione, indipendente, che opera a livello globale. È presente in Europa, Nord America, Australia. Sostiene il futuro di organizzazioni pubbliche e private nell'era digitale apportando competenze di tecnologia e di innovazione, con quattro livelli di intervento: Ecosystem Programs, Solutions, Platforms & Products, Consultancy services & Turn Key Project. Applica un approccio scientifico e quantitativo e si impegna per una società più responsabile e sostenibile.



Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento e l'Ambiente "M. Felli" - è stato istituito nel 1997 tra l'Università degli Studi di Perugia e l'Università di Roma Tre; hanno in seguito aderito le Università di Firenze, Pisa, L'Aquila, di Pavia, di Cassino, del Salento e il Politecnico di Bari. Sorto con una forte specializzazione in materia di inquinamento da agenti fisici, il Centro ha nel tempo esteso i settori di interesse fino ad includere il risparmio energetico e le fonti rinnovabili, la mobilità alternativa e sostenibile, i monitoraggi e le valutazioni di impatto ambientale, la pianificazione energetica ed ambientale. Il CIRIAF ha costituito nel 2002, presso il Polo Scientifico Didattico di Terni, una sezione al fine di svolgere attività di ricerca nell'ambito delle tematiche proprie dell'efficientamento energetico e dello stoccaggio dell'energia, con focus specifico sull'idrogeno e le celle a combustibile.



Nippon Gases è un'azienda storica, tra le prime in Italia a operare nel settore dei gas industriali. Oggi parte di Nippon Gases Europe, società che fa capo a Nippon Sanso Holdings Corporation (NSHD), una grande realtà internazionale con più di 100 anni di esperienza nell'industria del gas. Il Gruppo fornisce un supporto essenziale a diversi settori industriali tra cui il metallurgico, il chimico, l'elettronico, l'automotive, l'edile, il navale e l'alimentare, con una presenza importante in Giappone, Sud-est asiatico, Canada, Stati Uniti, Australia ed Europa.

Il contesto di riferimento

La **Strategia Europea sull'Idrogeno** è parte integrante del **Green Deal europeo**, che mira ad aumentare l'attuale produzione di **idrogeno verde, prodotto tramite l'elettrolisi dell'acqua, facendo ricorso unicamente all'energia elettrica generata da fonti rinnovabili (RES)**. La Strategia Europea si propone di raggiungere l'obiettivo di produzione di un milione di tonnellate/anno di idrogeno verde entro il 2024 e dieci milioni di tonnellate/anno entro il 2030. Questo risultato contribuirebbe significativamente a ridurre la produzione e il rilascio in atmosfera di gas serra (GHG) e aumenterebbe la fattibilità dell'obiettivo principale del Green Deal, che consiste nel raggiungimento della **carbon neutrality entro il 2050**.

La produzione su larga scala di idrogeno consente di risolvere uno dei problemi più gravi legati alle fonti di energia rinnovabile, ovvero la loro **non programmabilità**. L'energia in eccesso può essere utilizzata per produrre idrogeno verde: si potrebbe in tal modo realizzare un accumulo di energia, consentendo successivi utilizzi programmabili. Pertanto, **la filiera produttiva dell'idrogeno richiede una fase di stoccaggio adeguata e ben dimensionata**. Tuttavia, l'intera catena dovrebbe essere ambientalmente sostenibile, totalmente sicura per l'uomo ed economicamente vantaggiosa; occorre quindi **progettare tecnologie di stoccaggio innovative e ad alta efficienza, per superare le ben note problematiche legate alle metodologie attualmente adottate**.

La **Strategia Nazionale Italiana sull'Idrogeno** fa esplicito riferimento alla necessità di **ottimizzare e migliorare la catena di stoccaggio dell'idrogeno, insieme alla sua produzione ed utilizzo**. Particolare attenzione è riservata alle "Hydrogen Valley": l'insieme di produzione, stoccaggio e consumo dell'idrogeno secondo logiche «di prossimità» ridurrebbe la dipendenza energetica, attraverso la compensazione tra la domanda e la produzione in situ di energia. Inoltre, l'accumulo di energia è un fattore chiave per garantire la flessibilità dell'intero sistema. **Il Piano nazionale per la ripresa e la resilienza (PNRR) sostiene gli investimenti nella produzione, stoccaggio e utilizzo dell'idrogeno. In particolare, la misura M2C2.3 si focalizza sulla necessità di sviluppare nuove tecnologie originali e innovative per lo sviluppo della filiera dell'idrogeno.**

Le finalità del progetto

HEHS, High Efficiency Hydrogen Storage, intende sviluppare e sperimentare tecnologie innovative per **lo stoccaggio dell'idrogeno** ed identificare specifiche soluzioni tecnologiche per il trasporto e la distribuzione, con particolare riguardo **alla sicurezza del processo e alla sostenibilità ambientale ed economica dello stesso**.

HEHS prevede altresì lo studio e la validazione di **“sistemi intelligenti”** di gestione integrata del nuovo processo di stoccaggio dell'idrogeno oggetto del progetto.

In particolare HEHS si propone di realizzare un sistema di accumulo in scala industriale basato **sulla tecnologia dei gas idrati**, per il quale è richiesta una fase di sperimentazione in laboratorio ed in ambiente rilevante ed una successiva verifica sperimentale in casi applicativi rivolti ad:

- **Aziende energivore**
- **Aziende produttrici di mezzi di movimentazione industriale**



Gli elementi fondamentali della filiera dell'H₂ sono rappresentati dalla creazione di un sistema efficiente di trasporto su grandi distanze, l'assicurazione dello stoccaggio per tempi medio-brevi ovvero su base stagionale, e lo sviluppo di una rete di distribuzione di idrogeno adatta alle varie tipologie di applicazione.

E' un sistema complesso e interdipendente che deve avvalersi di un insieme coordinato di metodologie.

Gli idrati di idrogeno, ottenuti con l'eventuale impiego sinergico di molecole promotrici, possono costituire in prospettiva un'interessante tecnologia per il trasporto dell'idrogeno su lunghe distanze, **con elevato standard di sicurezza e moderati costi di "storage"**.

I clatrati idrati, già sperimentati con successo per lo stoccaggio ed il trasporto del metano, consentono teoricamente di coniugare alle ottime densità di stoccaggio (30-40 g/l a pressione atmosferica) un'elevata sicurezza in fase di trasporto (rischio di infiammabilità ed esplosione molto basso) e basse energie di accumulo.

La **metodologia proposta** sfrutta il processo di formazione dei clatrati idrati che, in condizioni adeguate di pressione e temperatura, possono ospitare molecole di idrogeno.

Il processo è favorito dal contemporaneo impiego di gas complementari che, insieme all'idrogeno, ne facilitano la diffusione e la stabilità nell'idrato e riducono l'energia necessaria per il suo stoccaggio e successivo rilascio.

I gas complementari sono costituiti principalmente da anidride carbonica, per favorirne il riutilizzo prima dello smaltimento finale, e da idrocarburi a catena corta, come etano, propano e butano.

Di seguito sono riportati **i dati attesi** di stoccaggio dell'idrogeno:

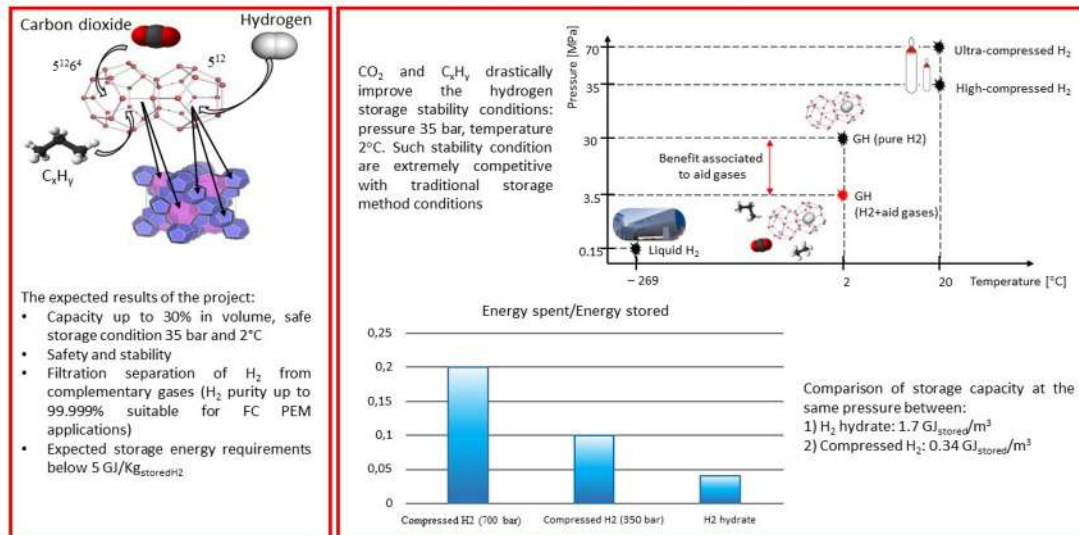
- **capacità fino al 30% in volume**
- **energia necessaria per lo stoccaggio inferiore a 5MJ/Kg a 35bar e 2°C.**

Attraverso l'applicazione di metodi ed algoritmi di Intelligenza Artificiale si intende modellizzare il processo stocastico di produzione dei clatrati idrati di H₂ attraverso l'osservazione del processo in opportuni storage reaction (SR-H₂) refrigerati e sensorizzati per lo stoccaggio, analizzando le temperature, il leakage di H₂, l'energia assorbita ed altre variabili che possano influire nella caratterizzazione dei fenomeni sottostanti. L'obiettivo è la definizione di un modello "data driven" utile alla descrizione del processo ed al suo controllo.

Particolare risalto verrà dato anche al monitoraggio dell'apparato nel suo ciclo di vita focalizzato alle variabili più rilevanti ed a specifici parametri di performance restituiti nelle modalità più opportune ed utili ai casi d'uso identificati.

Il progetto dovrà inoltre validare, attraverso opportuni modelli di analisi di scenario o "what if", la carbon footprint del processo di produzione e di distribuzione e consentirà la validazione di differenti business model sulla base delle diverse tipologie di end user target.

3-H High-efficiency Hydrogen storage by clathrate Hydrates



Fase 1

Sperimentazione Gas di supporto per lo stoccaggio e definizione sistemi di filtraggio

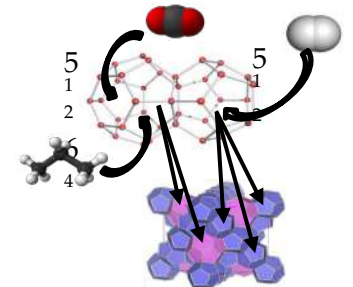
Presso il **laboratorio gas Idrati del CIRIAF**, dove sono presenti quattro reattori con diverse caratteristiche, **verranno sperimentate diverse strategie per l'assorbimento dell'idrogeno all'interno degli idrati**. Le miscele ternarie conterranno idrogeno, anidride carbonica e diversi idrocarburi, tra i quali etano, propano e butano.

La sperimentazione è finalizzata all'individuazione **dell'idrocarburo più affine al processo ed a stabilire le concentrazioni ottimali** delle tre specie gassose in miscela.

Un eccesso di gas di supporto consentirebbe di formare idrati a condizioni estremamente favorevoli, ma la concentrazione di idrogeno all'interno del reticolo cristallino non sarebbe apprezzabile. Di contro, percentuale eccessivamente ridotta di questi gas, porterebbe ad un idrato contenente quasi esclusivamente idrogeno, ma si renderebbero necessarie pressioni estremamente distanti dai valori dichiarati e proposti nell'ambito di questo progetto.

In questa fase del progetto verranno analizzate e verificate sperimentalmente le tecnologie ritenute, sulla base di quanto presente in letterature e dell'esperienza acquisita, più adatte alla separazione dell'idrogeno dai gas di supporto. L'obiettivo consiste nel raggiungimento di un grado di purezza dell'idrogeno pari o superiore al 99.9999%.

L'impiego di membrane presenta il vantaggio di dipendere principalmente dalla differente dimensione delle molecole presenti in miscela e non dalla loro rispettiva concentrazione (anche questo parametro influisce, ma in misura nettamente inferiore al precedente). La molecola di idrogeno ha una dimensione di oltre un ordine di grandezza inferiore rispetto a quella tipica di molecole quali etano propano, butano e la stessa anidride carbonica. Per questo motivo, si ritiene che la **separazione tramite membrane** possa risultare la situazione più appropriata per la separazione dell'idrogeno a valle del processo di stoccaggio all'interno dei clatrati idrati.



Fase 2

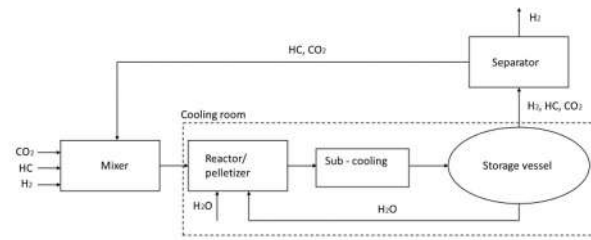
Prototipazione sistema di accumulo scale up

Nel suo complesso, il nuovo reattore dovrà possedere le seguenti caratteristiche:

- una camera di reazione in grado di operare, se richiesto, ad elevate pressioni;
- un sistema di controllo puntuale della temperatura interna;
- dispositivi per il monitoraggio della pressione e delle sue variazioni in fase di formazione degli idrati;
- possibilità di osservazione diretta dello sviluppo del processo al suo interno.

La forma ed il rapporto superficie/volume del reattore verranno progettati per favorire un accurato controllo della temperatura interna e per ridurre, per quanto possibile, la formazione di gradienti.

Il reattore sarà inoltre dotato di due serbatoi supplementari, pensati per ospitare idrogeno puro e i gas complementari, qualora vi sia richiesta di idrogeno e si proceda quindi alla separazione di questo dalla miscela stoccata.



A valle della progettazione del reattore da impiegare su scala industriale (facilmente scalabile per impieghi con volumetrie di stoccaggio superiori), con adeguato sistema di controllo di portate e pressioni dell'idrogeno e dei gas complementari, oltre ai necessari sistemi di controllo della temperatura interna e variazione di pressione, il modulo base da 1000 Litri, verrà realizzato, predisposto su sistema di movimentazione mobile, così da permetterne una maggiore facilità di utilizzo nei successivi test presso gli utilizzatori (end user). Sulla base delle miscele di gas complementari identificate come miscele che facilitano la diffusione e la stabilità dell'idrogeno nell'idrato ed a minore energia di stoccaggio e successivo rilascio, la realizzazione del modulo base prevede l'alimentazione di idrogeno e di gas complementari puri che verranno miscelati direttamente in situ.

Fase 3

Modellazione del processo di formazione dei clatrati idrati mediante Intelligenza Artificiale

Parte costitutiva e fondamentale del progetto HEHS è l'identificazione, lo sviluppo e la validazione di un modello del processo di formazione dei clatrati idrati mediante metodi ed algoritmi di Intelligenza Artificiale (IA). L'obiettivo è sviluppare una soluzione software "data driven" utile alla descrizione del processo ed al suo controllo, in risposta pertanto a finalità scientifiche ed ingegneristiche

Il contesto di riferimento è quello della data driven science and engineering: la modellazione basata sui dati è un acceleratore a supporto della descrizione dei fenomeni della scienza e dell'ingegneria caratterizzati da una difficoltà intrinseca nell'ottenere leggi ed equazioni in forma analitico / teorica. Nel caso in oggetto (multi-variato e stocastico) non esiste una descrizione "in forma chiusa" ma vi è la contestuale opportunità di strumentare il fenomeno / processo sia a livello di laboratorio sia a livello di prototipo industriale.

Le fasi distintive sono riconducibili a **Data Engineering** e **Data Science**.

Le attività includono le fasi di test, validazione e correzione iterativa delle componenti modellistiche ed il rilascio di un dimostratore software che assicuri da un lato la persistenza della catena modellistica - per ulteriori raffinamenti ed applicazioni- e dall'altro risponda ai requisiti operativi ed, in prospettiva, ad una successiva industrializzazione della soluzione.

Fase 3 / Data Engineering

Progettazione, sviluppo e gestione del sistema di acquisizione, salvataggio, preparazione e fruizione dei dati sperimentali necessari per la modellazione AI. La creazione di un repository digitale dei dati descrittivi del fenomeno ha di per sé una forte valenza scientifica poiché apre ad ulteriori possibilità di indagine e ricerca. La progettazione delle sperimentazioni è di particolare rilevanza, dovendo assicurare la completa esplorazione del dominio di variabilità e la significatività statistica delle misure. Verrà affrontata in stretta sinergia tra domain expert e data expert , ricorrendo anche a tecniche per massimizzare il contenuto informativo dei test (ad es. Design of Experiment).

Sui dati progressivamente acquisiti verranno applicate le necessarie trasformazioni di Data Fusion (integrazione e pre-elaborazione dei dati grezzi), Data Quality (normalizzazione, ricampionamento, ecc.) per creare repository finalizzati alla fase di Data Insight. In essa si definiscono le metriche e si quantificano le proprietà utili a valutare il valore informativo dei dati (caratteristiche distributive, correlazioni, componenti principali, ecc.). In base alle evidenze ottenute ed alle necessità algoritmiche si indirizzano anche le dovute azioni di Data Enrichment (replica misure, nuovi sensori, ecc..) .

Fase 3 / Data Science

Sviluppo degli algoritmi di IA utili a rappresentare gli specifici sotto-processi: la formazione del clatrato idrato, la filtrazione e la separazione dell'idrogeno dal clatrato idrato prima dell'utilizzo finale.

Verranno affrontati modelli di tipo causale (supervisionati) utili a ricostruire le variabili di output, descrittive del target di interesse (ad es. moli di H₂) sulla base delle n istanze delle variabili di input e di contesto, ovvero di tutte le grandezze potenzialmente significative e misurabili (ad es. temperatura, pressione, reagenti, ecc.).

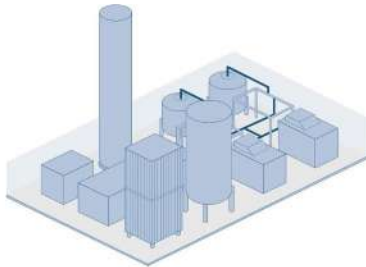
Verranno considerati anche modelli non supervisionati, per identificare cluster caratteristici e descrittivi del fenomeno, così come approcci specifici per gestire la possibile carenza di dati sperimentali (metodi Physics-Informed, Reinforcement Learning, ecc.).



Fase 4

Sperimentazione del Sistema di accumulo in ambiente rilevante e simulazione in casi d'uso specifici

La validazione della scalabilità del reattore e del modello matematico sviluppato comporterà anche dei test in campo per la verifica della continuità di erogazione dell'idrogeno dallo stoccaggio, oltre alla sua purezza. Verranno predisposti dei test rappresentativi dei possibili impieghi industriali tra cui: stoccaggio per mobilità (consumo batch) e quale combustibile alternativo (consumo continuativo nei processi fusori industriali).



Lo stoccaggio di idrogeno tramite formazione di Clatrati idrati rappresenta una soluzione innovativa a basso impatto energetico, una soluzione sicura a bassa pressione e con ridotto impatto ambientale, che può trovare spazi in molteplici applicazioni, dalla mobilità alla produzione industriale, con particolare attenzione ai settori hard-to-abate, che hanno individuato l'idrogeno quale possibile combustibile alternativo, in blending o in sostituzione totale del metano così da ridurre le emissioni di CO₂ in atmosfera e la loro dipendenza dal metano stesso.

La produzione di idrogeno «clean», alimentato da fonti rinnovabili vede attualmente nello stoccaggio un fattore limitante, soprattutto nella assicurazione di continuità di fornitura agli impianti produttivi. Pertanto, a valle della realizzazione dell'impianto dimostrativo lo stesso verrà validato in campo, svolgendo opportune simulazioni atte a riprodurre effettivi casi reali:

- Verifica continuità ed affidabilità erogazione idrogeno nel caso di impiego come combustibile alternativo in processi fusori
- Verifica disponibilità istantanea necessaria al caricamento di mezzi di trasporto ad idrogeno (muletti ed automezzi)

Le ricadute attese

I risultati attesi del progetto HEHS, rappresentando un notevole progresso rispetto allo stato dell'arte nei processi di stoccaggio dell'idrogeno contribuiranno alla diffusione dell'utilizzo di questo vettore energetico grazie alla riduzione della carbon footprint ed ad una maggiore sostenibilità economica.

La valenza e le potenzialità degli effetti di ricaduta devono essere considerate nell'ambito del più ampio quadro di investimenti previsti dalla strategia europea e nazionale sull'idrogeno.

Nell'ambito delle Hydrogen Valley, a valle della sperimentazione, della modellazione e dell'analisi economica, si potrà identificare l'area di maggiore vantaggio nell'impiego della tecnologia, tra cui: produzione in situ di idrogeno rinnovabile con stoccaggi di dimensioni contenute, a basso impatto di energia di stoccaggio e rilascio continuativo con relativa implementazione di soluzioni di impiego dell'idrogeno (ad esempio bruciatori H₂/O₂ nel settore del vetro) e sviluppo di nuovi sistemi di trasporto (in alternativa a carri bombolai) o più in generale nella movimentazione mezzi e mobilità.

Un esempio concreto per la regione Umbria riguarderà la collaborazione con i comuni di Panicale e Piegara, in qualità di rappresentanti delegati dell'associazione nata dalla sottoscrizione del Protocollo d'Intesa da parte di 32 comuni, che ha già manifestato l'interesse a favorire lo sfruttamento dei risultati della ricerca al fine di creare una filiera dell'idrogeno verde in Umbria. L'utilizzo dei risultati del presente progetto consentirebbe di stoccare l'idrogeno prodotto a costi molto contenuti e di creare un hub, nell'area di Pietrafitta quale sito del progetto "WOOD 4 GREEN UMBRIA", per la distribuzione di questo vettore energetico anche in aree interne del territorio nazionale. Inoltre si auspica la realizzazione di start-up innovative da far insediare nell'area per produrre su scala industriale i reattori attrezzati sviluppati nel progetto. Il modello di sviluppo risultante da questa sinergia ambisce a diventare una best practice, un modello di sviluppo economico da replicare in altre aree nazionali ed internazionali.

I vantaggi ambientali

La produzione su larga scala di idrogeno permette di risolvere uno dei problemi più gravi legati alle fonti di energia rinnovabile, ovvero la loro non programmabilità. L'energia FER in eccesso può essere utilizzata per produrre idrogeno verde: si potrebbe ottenere un accumulo di energia, con possibilità di successivi utilizzi programmabili. Pertanto, la filiera produttiva dell'idrogeno richiede una fase di stoccaggio adeguata e ben dimensionata.

Tuttavia, l'intera catena dovrebbe essere ambientalmente sostenibile, totalmente sicura per l'uomo ed economicamente vantaggiosa; occorre quindi progettare tecnologie di stoccaggio innovative e ad alta efficienza, per superare le ben note problematiche legate alle metodologie attualmente adottate.

Lo stoccaggio dell'idrogeno tramite idrati di clatrato sarà in grado di raggiungere le massime prestazioni in termini di rapporto energia immagazzinata/energia spesa.

Questo obiettivo è dovuto principalmente all'utilizzo dell'acqua come materiale di stoccaggio e alle condizioni termodinamiche relativamente miti richieste per il processo. **In termini di energia immagazzinata per unità di volume e per unità di massa, i risultati attesi sono nettamente inferiori a quelli ottenuti con le tecniche di stoccaggio ad alta pressione e di idrogeno liquido.**

Tuttavia, a pressioni simili, il che significa approssimativamente l'utilizzo di una quantità simile di energia per eseguire il processo, i risultati ottenuti con la tecnica proposta sono visibilmente superiori, per entrambi gli indicatori (per unità di volume e per unità di massa).



I referenti di HEHS



Laura Bizzarri
Market Director | Energy
laura.bizzarri@aizoongroup.com
aizoOn Technology Consulting



Luca Bolognini
Digital Engineering and Innovation Director
luca.bolognini@aizoongroup.com
aizoOn Technology Consulting



Francesca Cipollini
Senior Data Scientist
francesca.cipollini@aizoongroup.com
aizoOn Technology Consulting



Franco Cotana
Professore Ordinario
franco.cotana@unipg.it
Università di Perugia - CIRIAF



Federico Rossi
Professore Ordinario
federico.rossi@unipg.it
Università di Perugia - CIRIAF



Andrea Nicolini
Professore Associato
andrea.nicolini@unipg.it
Università di Perugia - CIRIAF



Beatrice Castellani
Ricercatrice
beatrice.castellani@unipg.it
Università di Perugia - CIRIAF



Alberto Maria Gambelli
Ricercatore
albertomaria.gambelli@unipg.it
Università di Perugia - CIRIAF



Paola Amore
Carbon Neutrality Manager
paola.amore@nippongases.com
Nippon Gases



Fabiano Ferrari
Industrial Engineering
& Regulatory Manager
fabiano.ferrari@nippongases.com
Nippon Gases



Stefano Boggio
Chivasso Speciality Gases
Production Manager
stefano.boggio@nippongases.com
Nippon Gases





HEHS

HIGH EFFICIENCY
HYDROGEN STORAGE

hydrogen-hehs.com

hehs@aizoOngroup.com

aizoOn Technology Consulting

aizoon@aizoongroup.com

011 234 4611

06 9760 5931

aizoongroup.com

CIRIAF

centro.ciriaf@unipg.it

075 585 3717

ciriaf.it

Nippon Gases

info.italy@nippongases.com

011 220 8911

nippongases.it