

Ricerca di Sistema elettrico



Progettazione e sviluppo di energy storage per favorire
l'integrazione tra rete elettrica e rete gas (LA 2.14)

E. Jannelli, G. Di Ilio, A. Altomonte, E.Simeoni



PROGETTAZIONE E SVILUPPO DI ENERGY STORAGE PER FAVORIRE L'INTEGRAZIONE TRA RETE ELETTRICA E RETE GAS

LA2.14 Progettazione e sviluppo di energy storage per favorire l'integrazione tra rete elettrica e rete gas

E. Jannelli, G. Di Ilio, A. Altomonte, E. Simeoni

Dipartimento di Ingegneria - Università degli Studi di Napoli Parthenope

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica -ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: 1.3 - Progetto Integrato Tecnologie dell'Idrogeno

Linea di attività: 2.14

Responsabile del Progetto: Luca TURCHETTI, ENEA

Responsabile del Work Package: Luca TURCHETTI, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Elio, JANNELLI, UNIVERSITA' DI NAPOLI PARTHENOPE

Mese inizio previsto: 1/01/2022

Mese inizio effettivo: 1/01/2022

Mese fine previsto: 31/12/2024

Mese fine effettivo: 31/12/2024

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: *Progettazione e sviluppo di energy storage per favorire l'integrazione tra rete elettrica e rete gas*

Responsabile scientifico ENEA: Viviana CIGOLOTTI

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Elio JANNELLI

Si ringrazia la Prof.ssa Minutillo per il contributo nella redazione dei documenti presentati.

INDICE

1	Risultati attesi	4
1.1	Caratterizzazione ed analisi delle prestazioni di tecnologie avanzate per la produzione di H2 con elettrolizzatori.....	4
1.2	Caratterizzazione ed analisi delle prestazioni di tecnologie avanzate per lo stoccaggio di H2 a bassa pressione con idruri metallici.....	4
1.3	Sviluppo di modelli numerici per la valutazione delle condizioni operative dei singoli componenti e del sistema di energy storage in cui essi vengono integrati, secondo approcci energetici e funzionali	5
1.4	Sviluppo e realizzazione di un sistema di energy storage in configurazione "power-to-fuel-to power" secondo l'approccio CO2 free	6
2	Risultati ottenuti.....	7
2.1	Caratterizzazione delle tecnologie di elettrolisi	7
2.2	Caratterizzazione prestazioni di sistemi di accumulo H2 in idruri metallici	9
2.3	Sviluppo e validazione di modelli numerici avanzati	11
2.4	Progettazione e realizzazione di un prototipo in scala di laboratorio	12
2.5	Risultati aggiuntivi rispetto al capitolato	13
2.6	Benefici per il sistema elettrico nazionale e per i suoi utenti.....	13
3	Prodotti attesi	15
4	Prodotti sviluppati	16
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	18
6	Sintesi delle attività svolte	20
7	Dettaglio delle attività svolte.....	21
7.1	Selezione componenti e definizione dell'architettura ottimale	21
	In una prima fase dell'attività, l'attenzione si è concentrata sulla valutazione delle tecnologie da integrarsi per la realizzazione del sistema di energy storage.	21
7.2	Modellazione componenti e sistemi	23
7.2.1	Modello PEMFC	23
7.2.2	Modello PEMEL.....	23
7.2.3	Modelli serbatoio a idruri	24
7.3	Sviluppo e realizzazione del sistema di energy storage	26
7.3.1	Progettazione del prototipo	26
7.3.2	Sviluppo e sperimentazione del prototipo di Energy Storage	26
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	28
9	Pubblicazioni scientifiche.....	29
10	Eventi di disseminazione	30

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 – Confronto delle capacità di accumulo e densità energetiche dei sistemi di accumulo H ₂	9
Figura 2 – Classificazione di idruri metallici	10
Figura 3 – Valori dell'entalpia di formazione del composto binario E-H	10
Figura 4 – Configurazione del sistema di Energy storage.....	12
Figura 5 – Tecniche di accumulo H ₂	21
Figura 6 – Polvere di Idruro metallico Hydralloy C5	22
Figura 7 – Flowsheet del modello della cella a combustibile.....	23
Figura 8 – Flowsheet del modello dell'elettrolizzatore	24
Figura 9 – Modello 3D di serbatoio a idruri metallici (sinistra) e relativi parametri caratteristici (destra).	25
Figura 10 – Componenti presso i laboratori del centro di ricerca di ATENA.	27
Figura 11 – Interfaccia grafica del sistema per la gestione del prototipo con i relativi scambi di energia.	27

1 Risultati attesi

In linea con quanto definito nel capitolato tecnico, l'attività di ricerca prevede di raggiungere seguenti risultati

- Caratterizzazione ed analisi delle prestazioni di tecnologie avanzate per la produzione di H₂ con elettrolizzatori.
- Caratterizzazione ed analisi delle prestazioni di tecnologie avanzate per lo stoccaggio di H₂ a bassa pressione con idruri metallici.
- Sviluppo di modelli numerici per la valutazione delle condizioni operative dei singoli componenti e del sistema di energy storage in cui essi vengono integrati, secondo approcci energetici e funzionali.
- Sviluppo e realizzazione di un sistema di energy storage in configurazione "power-to-fuel-to power" secondo l'approccio CO₂ free

1.1 Caratterizzazione ed analisi delle prestazioni di tecnologie avanzate per la produzione di H₂ con elettrolizzatori

Il capitolato tecnico prevedeva, tra gli obiettivi principali del progetto, la caratterizzazione delle principali tecnologie di elettrolisi disponibili sul mercato, con l'intento di individuare le soluzioni più adatte all'integrazione in sistemi modulari di energy storage basati sull'H₂. L'attività avrebbe dovuto concentrarsi, in particolare, sulle tecnologie a elettrolizzatore di tipo PEM (Proton Exchange Membrane), AEM (Anion Exchange Membrane) e alcalino, analizzate in relazione a una serie di parametri tecnico-prestazionali ritenuti essenziali per la selezione della soluzione più efficiente e affidabile.

Il confronto tra le tecnologie doveva considerare l'efficienza di conversione elettrica, intesa come rapporto tra la potenza assorbita e la quantità di H₂ effettivamente prodotta, così come la purezza dell'H₂ generato, tenendo conto dei requisiti necessari per l'alimentazione diretta di celle a combustibile. Altri aspetti da approfondire riguardavano le condizioni operative ottimali, con riferimento alla pressione e alla temperatura di esercizio, ai tempi di avviamento e arresto e alla dinamica di risposta del sistema in funzione delle variazioni di carico.

Tra i risultati attesi figurava anche la valutazione della stabilità e dell'affidabilità delle prestazioni nel lungo termine, soprattutto in presenza di carichi energetici variabili, e la verifica della compatibilità delle diverse soluzioni con fonti rinnovabili non programmabili, come il fotovoltaico e l'eolico, per consentirne l'integrazione efficace in architetture energetiche flessibili e decarbonizzate.

1.2 Caratterizzazione ed analisi delle prestazioni di tecnologie avanzate per lo stoccaggio di H₂ a bassa pressione con idruri metallici

Il capitolato tecnico prevedeva che l'attività di ricerca includesse un'analisi approfondita delle tecnologie di accumulo dell'H₂ basate su idruri metallici, considerate particolarmente adatte per applicazioni stazionarie in configurazioni power-to-power. Tali tecnologie si caratterizzano per la capacità di operare in condizioni di sicurezza, a pressioni contenute e temperature moderate, rendendole idonee a scenari applicativi decentralizzati e modulari.

L'attività prevista avrebbe dovuto concentrarsi innanzitutto sulla caratterizzazione dei materiali, attraverso lo studio delle principali famiglie di idruri utilizzabili in ambito energetico.

I parametri oggetto di valutazione includevano la capacità gravimetrica e volumetrica di stoccaggio, la velocità di reazione, la stabilità ciclica e la ripetibilità delle prestazioni nei cicli di carica e scarica. Un'attenzione particolare doveva essere riservata alla definizione delle condizioni operative ottimali per ciascun materiale, con riferimento sia alla resa complessiva che alla gestione termica durante le fasi di assorbimento e rilascio dell'H₂.

Tra i risultati attesi rientrava anche l'analisi delle strategie di controllo termico necessarie al corretto funzionamento del sistema di accumulo. Il capitolato prevedeva che fossero considerate soluzioni di riscaldamento e raffreddamento attivo, preferibilmente basate sul recupero del calore generato da altri sottosistemi, come ad esempio le celle a combustibile. In questo ambito, era richiesta anche la realizzazione di modelli numerici in grado di simulare le dinamiche termiche e fluidodinamiche all'interno dei serbatoi contenenti idruri, al fine di prevederne con precisione il comportamento in condizioni operative reali.

L'obiettivo complessivo dell'attività, così come delineato nel capitolato, consisteva nell'identificazione dei materiali a idruri metallici più promettenti per applicazioni a bassa pressione, nella valutazione tecnica e funzionale delle loro prestazioni e nella definizione delle migliori soluzioni per la loro integrazione in un sistema di energy storage a H₂ modulare e scalabile.

1.3 Sviluppo di modelli numerici per la valutazione delle condizioni operative dei singoli componenti e del sistema di energy storage in cui essi vengono integrati, secondo approcci energetici e funzionali

Il capitolato tecnico prevedeva che il progetto includesse lo sviluppo di modelli numerici dedicati alla simulazione e all'analisi delle condizioni operative dei principali componenti del sistema di energy storage a H₂. L'obiettivo indicato era quello di ottimizzare il funzionamento del sistema e garantirne un'integrazione coerente in architetture modulari, attraverso strumenti di modellazione in grado di rappresentare fedelmente le dinamiche termo-fluidodinamiche e funzionali del sistema.

I modelli avrebbero dovuto essere sviluppati per ciascun componente chiave: l'elettrolizzatore, il sistema di accumulo a idruri metallici, la cella a combustibile PEM. L'attività doveva essere condotta utilizzando ambienti di simulazione avanzata di tipo termo-elettrochimico e CFD con l'obiettivo di valutare il comportamento di ciascun sottosistema in scenari di carico variabili.

Oltre alla caratterizzazione dei singoli componenti, l'attività prevista comprendeva la costruzione di un modello complessivo del sistema integrato. Questo modello avrebbe dovuto supportare l'analisi dei bilanci energetici e funzionali dell'intero sistema, la definizione di logiche di controllo avanzate per la gestione ottimizzata del ciclo power-to-fuel-to-power e la simulazione di scenari applicativi sia in configurazione connessa alla rete (grid-connected) che in modalità autonoma (stand-alone).

I risultati attesi, come indicato nel capitolato, comprendevano la disponibilità di un set di strumenti numerici affidabili e versatili, utili per supportare la progettazione, la previsione delle prestazioni, la regolazione dei parametri operativi e, più in generale, la scalabilità e il trasferimento industriale della soluzione sviluppata.

1.4 Sviluppo e realizzazione di un sistema di energy storage in configurazione “power-to-fuel-to power” secondo l’approccio CO₂ free

Il capitolato tecnico prevedeva, tra i risultati attesi, la progettazione e la realizzazione di un sistema innovativo di accumulo energetico su scala di laboratorio, fondato sull’integrazione completa della catena di conversione elettricità-H₂-elettricità, secondo la logica power-to-fuel-to-power. Il sistema doveva essere costituito da un elettrolizzatore per la produzione di H₂ a partire da energia elettrica generata da fonti rinnovabili, da un modulo di accumulo basato su idruri metallici per lo stoccaggio sicuro e reversibile dell’H₂, e da una cella a combustibile PEM per la riconversione dell’H₂ in energia elettrica, da impiegare in funzione della domanda.

In linea con quanto definito nel capitolato, il progetto avrebbe dovuto includere tutti i sottosistemi ausiliari necessari al corretto funzionamento dell’impianto: convertitori di potenza per l’interfacciamento alla rete elettrica o a carichi isolati, sistemi di controllo e supervisione per la gestione integrata dei flussi energetici e termici, e dispositivi di bilanciamento per garantire la sicurezza operativa. Particolare enfasi era posta sull’aspetto della modularità, considerata fondamentale per garantire la scalabilità del sistema e la sua adattabilità a contesti applicativi eterogenei.

Il sistema doveva essere sviluppato per operare sia in modalità grid-connected, con possibilità di contribuire alla stabilizzazione della rete elettrica, sia in modalità stand-alone, dimostrando la capacità di alimentare carichi isolati anche in assenza di collegamento alla rete. La sperimentazione era prevista in condizioni operative reali, da svolgersi presso il centro di ricerca ATENA, con l’obiettivo di valutare il comportamento del sistema in scenari dinamici e di lungo periodo.

I risultati attesi, così come definiti nel capitolato, includevano la validazione tecnica e funzionale dell’intero ciclo di accumulo e rilascio dell’energia, la dimostrazione dell’efficacia della configurazione power-to-fuel-to-power in ottica CO₂-free, e la raccolta di dati sperimentali utili alla definizione di parametri prestazionali, di affidabilità e di scalabilità. L’obiettivo finale dell’attività era la produzione di linee guida operative e tecniche in grado di supportare un futuro trasferimento industriale della tecnologia, in particolare in applicazioni distribuite ad alta penetrazione di rinnovabili.

2 Risultati ottenuti

Lista dei risultati ottenuti (*Evidenziare in che misura il risultato è stato ottenuto ed il beneficio per il sistema elettrico nazionale e i suoi utenti. Aggiungere eventuali risultati ottenuti non previsti nel capitolato*).

L'attività di ricerca ha portato al raggiungimento di tutti gli obiettivi previsti nel capitolato tecnico, con risultati pienamente coerenti con le finalità strategiche del progetto e con un impatto potenziale significativo sul sistema elettrico nazionale, in particolare per quanto riguarda l'integrazione delle fonti rinnovabili e il miglioramento dell'affidabilità e della resilienza energetica.

2.1 Caratterizzazione delle tecnologie di elettrolisi

È stata completata l'analisi delle principali tecnologie di elettrolizzatori valutandone prestazioni, efficienza e idoneità all'integrazione in sistemi modulari. I risultati hanno consentito di individuare le configurazioni più efficaci per scenari di utilizzo distribuito e per sistemi off-grid. Nello specifico sono stati analizzati i sistemi di produzione dell'H₂ mediante elettrolisi dell'acqua con tecnologia PEM, AEM e AEL secondo quanto illustrato nel lavoro di Zhao et al. [Zhao H, Wu Q, Hu S, Xu H, Rasmussen CN. Review of energy storage system for wind power integration support. Appl Energy 2015;137:545–53].

- **Elettrolisi polimerica** (elettrolizzatori PEM): è classificata come elettrolisi a bassa temperatura e utilizza una membrana polimerica a scambio protonico come elettrolita solido. I catalizzatori utilizzati come elettrodi in queste celle sono a base di platino, iridio, rutenio e rodio, mentre la membrana polimerica, che funge da separatore tra gli elettrodi e i gas, è costituita da Nafion variamente drogato. Gli elettrolizzatori a membrana polimerica operano all'interno di una finestra di temperatura attentamente calibrata, che in genere va da 50°C a 80°C. Questa scelta progettuale garantisce che il processo avvenga entro limiti termici sicuri, cercando al contempo di ottenere la massima efficienza energetica possibile, riducendo al minimo la necessità di un eccessivo apporto termico. Inoltre, gli elettrolizzatori PEM sono progettati meticolosamente per funzionare a pressioni moderate, spesso comprese tra 1 e 30 bar. Questo equilibrio tra un'efficace generazione di H₂ e requisiti ingegneristici pratici contribuisce in modo significativo alla fattibilità complessiva di questa tecnologia. Inoltre, gli elettrolizzatori PEM sono apprezzati per la loro notevole efficienza, che spesso raggiunge tassi compresi tra il 60% e l'80%. La durabilità degli elettrolizzatori PEM si basa su una meticolosa selezione dei materiali, su solide considerazioni di progettazione e su strategie per ridurre la degradazione della membrana o l'erosione dell'elettrodo. La scalabilità e la versatilità degli elettrolizzatori PEM è un importante punto di forza di questa tecnologia. Questi elettrolizzatori possono essere adattati a uno spettro di dimensioni e capacità, offrendo una soluzione pragmatica che può essere applicata in un'ampia gamma di contesti, che vanno dalle applicazioni su piccola scala agli impieghi industriali. In sintesi, gli elettrolizzatori PEM emergono come una soluzione all'avanguardia per un impiego efficiente dell'H₂. Le loro prestazioni comprendono una finestra di temperatura operativa esattamente bilanciata, pressioni moderate che raggiungono un equilibrio tra praticità ed efficacia, tassi di efficienza lodevoli e la capacità di adattarsi in modo flessibile a diverse scale. Nel complesso, queste caratteristiche fanno degli elettrolizzatori PEM un attore fondamentale nella transizione verso un'economia dell'H₂ caratterizzata da emissioni minime. Rispetto alle celle alcaline, le celle

polimeriche mostrano una maggiore efficienza e affidabilità. L'uso di un elettrolita solido al posto di una soluzione caustica ne aumenta inoltre la sicurezza.

Tra i principali costruttori di elettrolizzatori PEM troviamo ad esempio ITM Power (UK), NEL Hydrogen (USA-Norvegia), Siemens (Germania), AREVA H2 Gen (Francia), Giner (USA), Cummins-Hydrogenics (USA/Canada), ErreDue (Italia), H-TEC (Germania).

- **Elettrolisi con membrane a scambio anionico** (elettrolizzatori AEM): è una nuova ed emergente tecnologia che funziona in maniera simile a quella con membrane a scambio protonico (PEM), ma senza materiali preziosi. Gli elettrolizzatori a membrana a scambio anionico sono progettati per funzionare in un intervallo di temperatura moderato, tipicamente compreso tra 50°C e 60°C. Questa scelta progettuale non solo garantisce la sicurezza del processo, ma ne ottimizza anche l'efficienza, riducendo al minimo la richiesta di un input termico eccessivo. Questi elettrolizzatori sono noti per lavorare a pressioni comprese tra 10 e 30 bar. Questo equilibrio tra un'inefficiente generazione di H₂ e requisiti ingegneristici gestibili contribuisce alla praticità complessiva della tecnologia. Sono riconosciuti per i loro lodevoli livelli di efficienza, spesso compresi tra il 60% e il 70%. È importante sottolineare che l'efficienza si manifesta in modo variabile, a seconda delle variabili operative e della complessità della progettazione del sistema. In termini di durata, la longevità degli elettrolizzatori a membrana a scambio anionico è un aspetto cruciale. Ciò comprende la selezione dei materiali, i fattori di progettazione e le strategie per gestire potenziali problemi come l'incrostazione delle membrane. Mantenendo questi aspetti, è possibile ottenere prestazioni sostenute per lunghi periodi. Inoltre, questi elettrolizzatori offrono una certa versatilità e scalabilità nella progettazione. La loro adattabilità abbraccia uno spettro di dimensioni e capacità, rendendoli adatti a varie applicazioni, da quelle su scala modesta a contesti di rilevanza industriale. In conclusione, gli elettrolizzatori a membrana a scambio anionico si presentano come una strada promettente per lo sfruttamento efficiente dell'H₂. Le loro prestazioni, che comprendono un intervallo di temperature operative equilibrato, pressioni ragionevoli, efficienza lodevole e adattabilità in termini di dimensioni, li rendono un concorrente degno di nota nel guidare il passaggio verso un'economia dell'H₂ caratterizzata da emissioni minime.

Questo tipo di elettrolizzatori stanno riscuotendo un crescente interesse grazie alle migliori prestazioni e ai costi più contenuti. Tra i costruttori di elettrolizzatori AEM vi sono Enapter (Italia/Germania) ed EnStack (Italia), Giner ELX (USA), Hydrogen Technologies Europe (Germania).

- **Elettrolisi alcalina** (elettrolizzatori AEL): è una tecnologia matura e consolidata per la produzione industriale di H₂ fino a una potenza di diversi megawatt in applicazioni commerciali in tutto il mondo. Gli elettrolizzatori alcalini sono costituiti da due elettrodi, una membrana di separazione microporosa e un elettrolita alcalino acquoso, generalmente composto dal 30% in peso di idrossido di potassio (KOH) o idrossido di sodio (NaOH). Il materiale catodico più comunemente utilizzato in questi dispositivi è il nichel, rivestito - come materiale catalitico - generalmente da platino. Per l'anodo si utilizzano metalli come il nichel o il rame, ricoperti da ossidi metallici come l'ossido di manganese, il tungsteno o il rutenio. Gli elettrolizzatori alcalini funzionano a temperature moderate, tipicamente comprese tra i 50°C e gli 80°C. Questo intervallo di temperatura non solo consente un funzionamento sicuro, ma riduce anche il fabbisogno di energia termica, contribuendo alla loro efficienza complessiva. Anche le pressioni di esercizio sono degne di nota: il processo opera tra 1 e 30 bar. Questo intervallo di

pressione semplifica la progettazione e la gestione operativa, garantendo la sicurezza e supportando al contempo un'efficace produzione di H₂. L'efficienza energetica, generalmente compresa tra il 60 e il 70%, può variare in base a fattori quali la temperatura e considerazioni specifiche di progettazione. In sintesi, gli elettrolizzatori alcalini emergono come una soluzione promettente per produrre H₂ in modo efficiente e sostenibile. Le loro prestazioni e caratteristiche, tra cui le temperature moderate, le basse pressioni operative e la buona efficienza, li posizionano come una scelta significativa nella traiettoria verso un'economia dell'H₂ a emissioni zero.

Tra i principali costruttori di elettrolizzatori alcalini si trovano, ad esempio, NEL Hydrogen (Norvegia), Thyssenkrupp (Germania) che opera in collaborazione con De Nora (Italia), Cummins-Hydrogenics (USA/Canada), McPhy (Francia), ErreDue (Italia).

2.2 Caratterizzazione prestazioni di sistemi di accumulo H₂ in idruri metallici

Sono stati caratterizzati materiali e serbatoi per lo stoccaggio a bassa pressione tramite idruri metallici. Tali soluzioni si sono dimostrate particolarmente adatte a contesti stazionari, per la loro sicurezza e compatibilità con sistemi a emissioni zero. Le prestazioni ottenute hanno superato in parte le aspettative iniziali in termini di reversibilità ciclica e stabilità termica.

Le capacità di accumulo gravimetrico dei materiali a base di idruri metallici del gruppo degli idruri interstiziali variano da 1 a 2 wt%. Capacità gravimetriche significativamente più elevate possono essere raggiunte con idruri complessi. Il LiBH₄ è noto come il materiale MH con la più alta capacità gravimetrica teorica del 18,5% in peso. Le capacità di accumulo, le densità energetiche volumetriche, e le pressioni e temperature operative di alcuni tipi di idruro (es. AB TiFe, etc.) in confronto con quelle dell'accumulo di H₂ gassoso e liquido, sono riportati nella Figura 1 che è tratta dallo studio di Klopčič et al. [Nejc Klopčič, Ilana Grimmer, Franz Winkler, Markus Sartory, Alexander Trattne, A review on metal hydride materials for hydrogen storage, Journal of Energy Storage 72 (2023) 108456.].

Storage capacities and energy densities of different hydrogen storage technologies and metal hydride materials.

Hydrogen storage		Grav. storage capacity ^a [wt %]	Vol. energy density ^b [kWh/dm ³]	Operating pressure ^c [bar]	Operating temperature ^d [K]	Ref	
CGH ₂	350 bar	100	0.8	350	Ambient	[7]	
	700 bar	100	1.3	700	Ambient	[7]	
LH ₂		100	2.2	1–10	20	[7]	
Metal hydrides	Elemental	MgH ₂	7.6 (5.5)	3.67 (2.65)	- ^e	593	[8,9]
	AB	TiFe	1.86 (1.5)	4.03 (3.25)	4.1	265	[10]
	AB ₂	TiMn ₂	1.86 (1.15)	4.09 (2.53)	8.4	252	[10]
	AB ₅	LaNi ₅	1.49 (1.28)	4.12 (3.53)	1.8	285	[10]
	Complex hydrides	LiBH ₄	18.5 (13.4)	4.08 (3.02)	- ^e	573	[11,12]
		NaAlH ₄	7.5 (3.7)	3.20 (1.58)	- ^e	473	[11,12]

Author's note: smaller discrepancies regarding the gravimetric capacities and vol. energy densities may occur among different literature sources.

^a Gravimetric capacity of the pure substance (without tank); for the metal hydrides the maximum theoretical storage capacities with the reversible capacity in brackets are given.

^b Volumetric energy density of the pure substance; volume increase of metal hydrides during absorption is not considered.

^c The given values for the metal hydrides are equilibrium pressures at 25 °C.

^d For the metal hydrides the temperatures represent isotherms at 1 bar.

^e The equilibrium pressure at 25 °C of those hydrides is well below any practical applications (vacuum).

Figura 1 – Confronto delle capacità di accumulo e densità energetiche dei sistemi di accumulo H₂.

I valori presentati in tabella si riferiscono alla sostanza pura. Per il livello del sistema (serbatoio) si prevede un aumento di peso di circa il 50% e un aumento di volume del 100% per gli idruri metallici come specificato da Lototsky et al. [M. Lototsky, V.A. Yartys, Comparative analysis

of the efficiencies of hydrogen storage systems utilising solid state H storage materials, J. Alloys Compd. 645 (2015) S365–S37].

La scelta sul tipo di idruro più idoneo alla specifica applicazione nel progetto è stata condotta partendo da quella che è la loro classificazione in base alle specie metalliche di partenza, come illustrato in Figura 2.

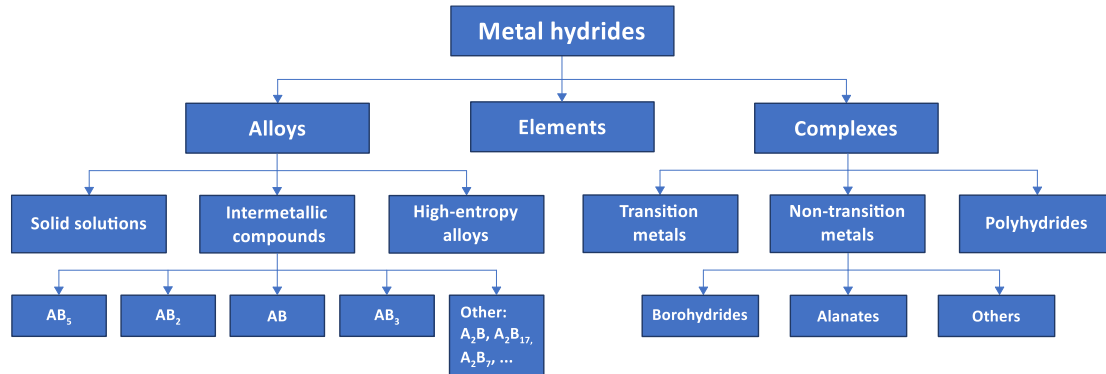


Figura 2 – Classificazione di idruri metallici

Le specie maggiormente utilizzate sono quelle che sottostanno alle leghe (alloys), nelle quali l'H₂ atomico è legato nei siti interstiziali della struttura cristallina della specie metallica ospite, con distorsioni di bassa entità rispetto alla forma stabile.

Al fine di migliorare le proprietà di utilizzo pratico degli idruri metallici, è opportuno unire in leghe metalli con un'elevata tendenza a formare idruri (A) con metalli scarsamente idrogenabili (B). Ciò consente di "interpolare" le proprietà delle due specie, in modo da ottenere la reversibilità richiesta per la specie nel suo insieme (generalmente si tratta di composti intermetallici). La distinzione tra elementi del tipo A e del tipo B può essere fatta sulla base dell'entalpia di formazione del composto EI-H (EI = "elemento"), come riportato in Figura 3.

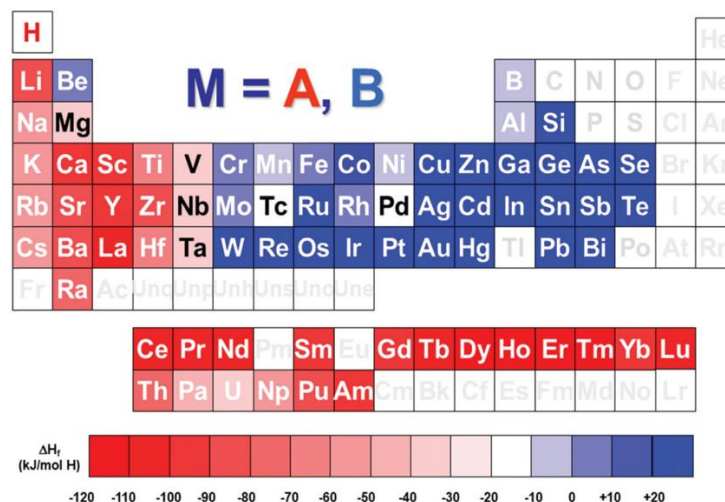


Figura 3 – Valori dell'entalpia di formazione del composto binario EI-H

Da un punto di vista strutturale, tipicamente l'elemento A ha pochi elettroni di tipo d, una struttura cristallina bcc, un raggio atomico grande e la preferenza per siti con numero di coordinazione elevato; al contrario, l'elemento B ha molti elettroni d, presenta una struttura cristallina fcc o hcp, un raggio atomico contenuto e predilige siti con basso numero di coordinazione.

2.3 Sviluppo e validazione di modelli numerici avanzati

Sono stati sviluppati modelli termo-elettrochimici e termo-fluidodinamici per simulare il comportamento dei singoli componenti. I modelli sono stati utilizzati per identificare strategie di gestione energetica e termica, migliorando l'efficienza complessiva e supportando la progettazione del prototipo.

Per i componenti quali l'elettrolizzatore e la cella a combustibile sono stati sviluppati modelli termo-elettrochimici in ambiente Aspen Plus. Tali modelli sono stati sviluppati secondo l'approccio black-box che, attraverso l'implementazione delle curve di performance (polarizzazione), ha consentito di stimare il funzionamento di tali componenti, attraverso bilanci di massa e di energia, in tutto il loro campo operativo. I modelli sono stati realizzati sia integrando componenti fisici, che consentono di simulare i processi termochimici/termodinamici (es. conversione dell'acqua in H₂ e ossigeno o viceversa), sia utilizzando un Fortran Block Calculator (blocco operativo previsto in Aspen Plus) che, attraverso l'implementazione delle equazioni che definiscono l'elettrochimica dei processi, consente nel caso dell'elettrolizzatore di determinarne la produzione di H₂ a partire da un certo flusso di corrente e nel caso della cella di determinare la corrente e la tensione (potenza elettrica prodotta) ottenute in base al consumo di H₂.

Per il sistema di stoccaggio a H₂ con serbatoi ad idruri metallici sono stati sviluppati più modelli: un modello 1D termodinamico, un modello 2D ed un modello 3D, entrambi agli elementi finiti.

Il primo modello ha consentito di valutare le prestazioni del sistema di stoccaggio sulla base di parametri macroscopici. L'analisi è stata condotta in maniera parametrica, prendendo in esame un singolo modulo (serbatoio cilindrico), variandone pertanto sia la sua geometria (raggio), che le caratteristiche del flusso esterno impiegato per il condizionamento.

Il secondo ha permesso un'analisi più dettagliata dei meccanismi di assorbimento e desorbimento dell'H₂ dagli idruri metallici. Poiché la gestione termica di questi meccanismi ha un ruolo determinante, sono state studiate soluzioni sia di condizionamento termico interno (es. canali interni al serbatoio) che esterno. L'analisi è stata effettuata mediante il software agli elementi finiti Comsol Multiphysics v.5.6. Sono state effettuate numerose simulazioni, al fine di valutare sia la geometria del cilindro (aspect ratio), sia il tipo di condizionamento termico impiegato. Per quanto riguarda quest'ultimo, sono state prese in esame diverse tipologie, prevedendo sia un condizionamento interno, mediante canali passanti all'interno del cilindro lungo la direzione assiale, che esterno, o contemporaneamente interno ed esterno. Inoltre, è stata valutata la possibilità di impiegare diversi sistemi di scambio termico (convezione/conduzione) con diversi fluidi refrigeranti (aria, acqua, freon).

I modelli sviluppati sono stati quindi impiegati per valutare le prestazioni di diverse geometrie in diverse condizioni operative.

Inoltre, in ambiente Matlab è stato messo a punto il modello per l'ottimizzazione dell'integrazione del sistema al fine di individuare la gestione ottimale dei flussi energetici legati al funzionamento dei componenti in riferimento alla disponibilità della risorsa rinnovabile, con l'obiettivo di massimizzarne lo sfruttamento, e quindi di massimizzare la resa energetica del sistema di energy storage.

2.4 Progettazione e realizzazione di un prototipo in scala di laboratorio

È stato progettato e realizzato un sistema completo di energy storage in grado di funzionare sia in modalità *power-to-fuel* che in modalità *power-to-power*. Nel caso di modalità operativa "power to fuel" l'H₂ è direttamente a disposizione per l'utility, nel caso di modalità operativa "power to power" l'H₂ viene inviato nella FC per la produzione di energia elettrica. La definizione dell'architettura è basata su un approccio modulare che consente al sistema sviluppato di soddisfare utenze diverse, semplicemente integrando più moduli in parallelo nel caso di impianti a fonte rinnovabile di taglia maggiore.

La configurazione del modulo di energy storage sviluppato è schematicamente illustrata in figura 4.

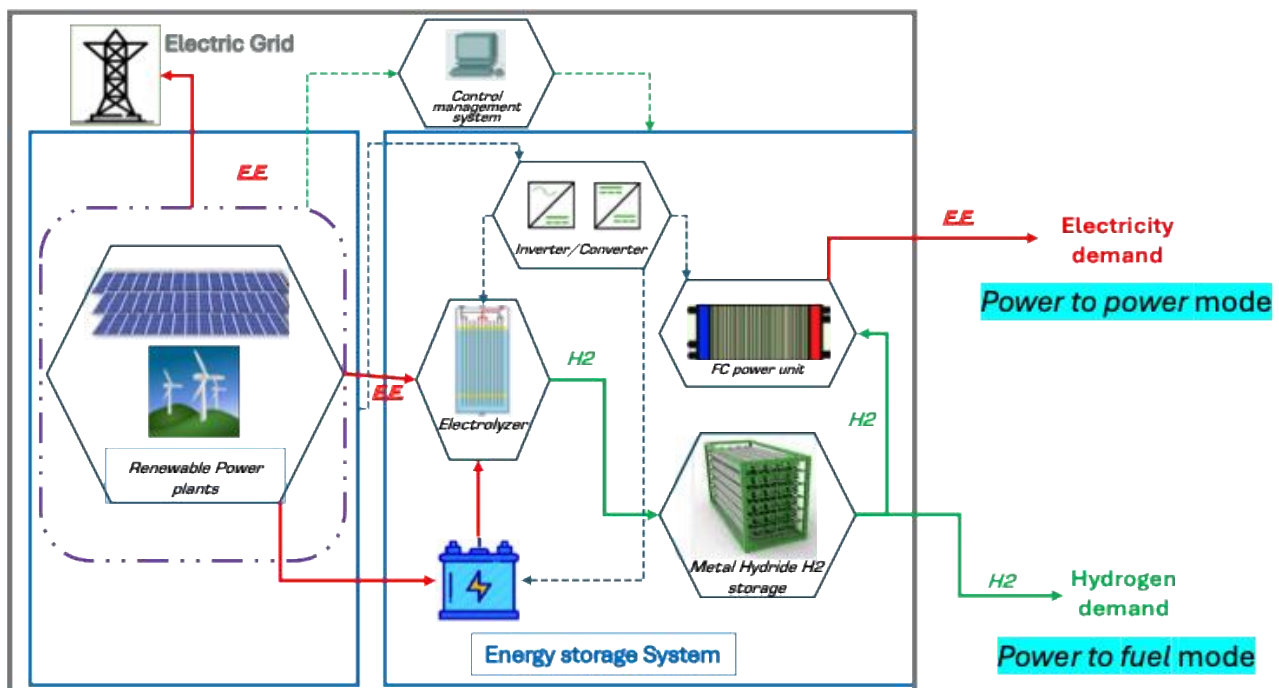


Figura 4 - Configurazione del sistema di Energy storage

Il sistema è quindi costituito da: a) un elettrolizzatore PEM che consente di raggiungere una purezza dell'H₂ del 99.99%, b) un sistema di accumulo H₂ con idruri metallici operanti a basse pressioni (max 30 bar) e temperature, c) una cella a combustibile PEM per la produzione di energia elettrica, d) un convertitore di interfaccia rete, e) un sistemi di gestione e controllo per l'ottimizzazione del funzionamento in tutte le condizioni operative, f) sistemi ausiliari (es. batteria) necessari per la sua installazione non solo in configurazione grid-connected, ma anche stand-alone. Dalla figura è possibile osservare che il sistema di energy storage è progettato per produrre solo H₂ green. Infatti, l'impianto a fonte rinnovabile (eolico o fotovoltaico) è collegato all'elettrolizzatore per la produzione di H₂. Il surplus dell'energia elettrica non utilizzata dall'elettrolizzatore è esportato in rete. L'H₂ prodotto alla pressione di 30 bar (come da specifica dell'elettrolizzatore scelto) è stoccato nel sistema di accumulo con idruri metallici senza la necessità di un sistema di compressione intermedio.

Il sistema di energy storage è stato dimensionato con l'obiettivo di soddisfare la richiesta di accumulo di energia rinnovabile di utilities che, nell'ottica della modularità, siano medio-piccole. Nella progettazione si è tenuto conto sia dei requisiti tecnici dei componenti

(efficienza elettrolizzatori e fuel cell, durata ed affidabilità, costi, etc.) che dei requisiti prestazionali del sistema (es. capacità di accumulo e efficienza complessiva).

Il sistema è stato realizzato e testato presso il centro di ricerca ATENA.

2.5 Risultati aggiuntivi rispetto al capitolato

Oltre agli obiettivi previsti dal capitolato tecnico, l'attività di ricerca ha prodotto una serie di risultati aggiuntivi che rafforzano ulteriormente la validità scientifica e tecnologica del progetto e ne ampliano l'impatto potenziale in termini di trasferibilità, replicabilità e contributo al sistema elettrico nazionale.

In primo luogo, è stato sviluppato uno schema logico-funzionale completo del sistema, che descrive in modo chiaro e strutturato l'interazione tra i diversi sottosistemi – produzione, accumulo, riconversione e gestione energetica – e ne formalizza i flussi di energia e informazioni. Questo schema costituisce un riferimento fondamentale per la futura replica del sistema su scala superiore, in contesti applicativi differenti o con configurazioni impiantistiche più complesse. Si tratta di un risultato particolarmente rilevante in vista di potenziali sviluppi dimostrativi o preindustriali, in quanto offre uno strumento operativo per la progettazione modulare e scalabile. Parallelamente, sono stati costruiti e simulati scenari dinamici di esercizio del sistema, finalizzati a valutarne il comportamento nel corso dell'intero ciclo stagionale. Le simulazioni hanno considerato variabili come la disponibilità discontinua di energia solare ed eolica, il profilo di carico delle utenze e l'accumulo termico necessario per il corretto funzionamento dei serbatoi a idruri. In particolare, è stato studiato il comportamento del sistema in condizioni critiche, come la presenza di blackout temporanei o la necessità di funzionamento in modalità completamente stand-alone. I risultati ottenuti confermano l'efficacia della soluzione sviluppata nel garantire continuità di alimentazione e flessibilità di esercizio anche in condizioni non ottimali. Infine, l'intero lavoro ha generato un insieme organico di conoscenze che può rappresentare un contributo utile e concreto a futuri processi di standardizzazione e normazione nel settore dello stoccaggio distribuito a H₂. In particolare, le evidenze raccolte sui materiali, sull'integrazione dei sottosistemi, sulle strategie di gestione e sulle logiche di controllo forniscono una base tecnica su cui costruire criteri prestazionali, linee guida progettuali e requisiti di sicurezza applicabili a soluzioni analoghe. Questi risultati aggiuntivi, sebbene non espressamente richiesti dal capitolato, rappresentano un valore significativo per lo sviluppo di sistemi energetici innovativi e decentralizzati, coerenti con gli obiettivi della transizione energetica nazionale.

2.6 Benefici per il sistema elettrico nazionale e per i suoi utenti

I risultati ottenuti nell'ambito del progetto generano benefici rilevanti per il sistema elettrico nazionale, in linea con gli obiettivi strategici di transizione energetica e decarbonizzazione. L'integrazione di un sistema di energy storage basato sull'H₂ consente infatti di affrontare alcune delle principali criticità associate alla crescente penetrazione delle fonti rinnovabili non programmabili, quali la loro variabilità e l'intermittenza nella produzione.

Il sistema sviluppato, grazie alla sua capacità di accumulare energia prodotta da impianti fotovoltaici ed eolici per soddisfare i fabbisogni energetici di utenze elettriche, quando tali

fonti non sono disponibili, migliora significativamente le problematiche della aleatorietà delle fonti rinnovabili contribuendo alla gestione ottimizzata dei carichi elettrici sulla rete nazionale. Allo stesso tempo, nel caso di funzionamento power-to-fuel, mettendo a disposizione H₂ per applicazioni di mobilità, il sistema sviluppato può rappresentare una soluzione e strategia utile al problema del curtailment dell'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili; infatti l'energia elettrica "tagliata" con il curtailment, ossia l'energia prodotta da fonti rinnovabili che non viene immessa nella rete elettrica a causa di una produzione eccessiva o di limitazioni sulla rete (energia prodotta ma non utilizzata) dovute al bilanciamento della rete stessa, può essere utilizzata per rendere disponibile H₂ in stazioni di rifornimento dedicate.

Inoltre, l'adozione di una tecnologia di accumulo basata su idruri metallici, operante a bassa pressione e con requisiti di sicurezza elevati, rende possibile l'impiego del sistema in contesti decentralizzati e in prossimità del punto di utilizzo. Questo rafforza l'autonomia energetica di utenze localizzate in aree remote o soggette a discontinuità nell'approvvigionamento elettrico, come piccoli insediamenti, infrastrutture critiche, presidi sanitari o installazioni industriali con elevata esigenza di continuità operativa.

Un ulteriore beneficio risiede nel contributo alla decarbonizzazione del sistema elettrico. Il sistema sviluppato funziona interamente senza emissioni dirette di CO₂, e la sua operatività è compatibile con l'impiego esclusivo di energia rinnovabile. Ciò rende possibile la creazione di microreti e impianti autonomi a emissioni zero, favorendo la diffusione di modelli di produzione e consumo energetico sostenibili. Infine, la flessibilità del sistema – che può operare sia in modalità connessa alla rete che in modalità stand-alone – consente di affrontare in modo efficace situazioni di emergenza, instabilità della rete o interruzioni temporanee del servizio, offrendo una risposta rapida e resiliente alle esigenze del sistema elettrico e dei suoi utenti.

Nel complesso, il progetto contribuisce a rafforzare la sicurezza, l'affidabilità e la sostenibilità del sistema energetico nazionale, ponendo le basi per l'adozione diffusa di tecnologie di accumulo basate sull'H₂ in un'ottica di lungo periodo:

- Migliorare la programmabilità delle fonti rinnovabili non dispacciabili;
- Ridurre la dipendenza da fonti fossili;
- Rafforzare l'autonomia energetica delle utenze isolate o in aree a rischio di instabilità;
- Contribuire alla decarbonizzazione e alla flessibilità del sistema elettrico nazionale.
- Supportare lo sviluppo dell'infrastruttura per la mobilità a H₂

3 Prodotti attesi

Lista dei prodotti hardware/software eventualmente attesi per la LA

Il capitolato tecnico prevedeva, nell'ambito della linea di attività, lo sviluppo come principale risultato di un sistema innovativo di energy storage ad alto contenuto tecnologico, progettato per contribuire in modo significativo all'incremento della produzione di energia da fonte rinnovabile, in particolare eolica e fotovoltaica. Il sistema doveva essere in grado di operare in modo efficiente ed efficace anche in presenza delle criticità tipiche delle fonti non programmabili, come l'intermittenza e la variabilità della disponibilità energetica.

Il prodotto atteso consisteva nella realizzazione di un sistema completo di accumulo energetico, costruito integrando in modo funzionale e compatto tutti i sottosistemi necessari. In particolare, il capitolato prevedeva l'inclusione di: un elettrolizzatore per la generazione di H₂ ad elevata purezza; un modulo di accumulo basato su idruri metallici operanti a bassa pressione e temperatura, per uno stoccaggio sicuro e reversibile; una cella a combustibile PEM per la riconversione dell'H₂ in energia elettrica; un convertitore di interfaccia rete per il collegamento a sistemi grid-connected o a carichi isolati; un sistema di controllo per la gestione integrata delle condizioni operative e un insieme di dispositivi ausiliari destinati al bilanciamento e alla sicurezza complessiva dell'impianto.

Oltre alla realizzazione fisica del sistema, il capitolato prevedeva la produzione di strumenti software di supporto, tra cui modelli numerici e ambienti di simulazione termo-fluidodinamica per l'analisi e la previsione del comportamento dei componenti in diverse condizioni di esercizio. Tali modelli dovevano essere utilizzati non solo per ottimizzare la fase di progettazione e prototipazione, ma anche per sviluppare strategie di controllo avanzate e per supportare futuri processi di scalabilità e industrializzazione. Erano inoltre attesi software di gestione operativa del sistema, dotati di interfacce grafiche per il monitoraggio in tempo reale e l'archiviazione dei dati sperimentali.

Complessivamente, i prodotti previsti dalla linea di attività dovevano fornire una dimostrazione concreta della fattibilità tecnico-funzionale di un sistema di accumulo basato sull'H₂ completamente integrato, modulare e replicabile, da impiegare in scenari energetici distribuiti e ad elevata penetrazione di fonti rinnovabili.

4 Prodotti sviluppati

Lista dei prodotti hardware/software eventualmente sviluppati nella LA, illustrando, per il software, le modalità di accesso per gli utenti (*Aggiungere eventuali prodotti sviluppati non previsti nel capitolato*)

L'attività di ricerca ha portato allo sviluppo effettivo di tutti i prodotti previsti nella pianificazione iniziale, con un livello di maturità e completezza in linea con gli obiettivi progettuali. I prodotti sviluppati rappresentano il risultato concreto del processo di progettazione, modellazione, realizzazione e sperimentazione condotto nell'ambito del sistema di accumulo power-to-fuel-to-power basato sull'H₂. Tali prodotti non solo validano le soluzioni tecnologiche individuate, ma costituiscono una base solida per applicazioni future e per eventuali sviluppi in scala preindustriale.

È stato sviluppato e realizzato un prototipo integrato di sistema di energy storage in scala di laboratorio, comprendente un elettrolizzatore per la produzione di H₂, un modulo di accumulo basato su idruri metallici operanti a bassa pressione e temperatura, una fuel cell PEM per la riconversione dell'H₂ in energia elettrica, nonché tutti i sottosistemi ausiliari necessari, tra cui i convertitori di potenza, i sistemi di controllo, il bilanciamento termico e gli interfacciamenti con la rete elettrica o con utenze isolate. Il prototipo è stato installato e testato presso il centro di ricerca ATENA, dimostrando piena operatività sia in configurazione connessa alla rete (grid-connected) sia in modalità autonoma (stand-alone).

Il sistema è stato concepito come una piattaforma compatta, modulare e facilmente installabile, pensata per operare sia in modalità power-to-fuel che power-to-power. Nel primo caso, il processo si concentra sulla produzione e sull'accumulo dell'H₂, con l'elettrolizzatore e il sistema a idruri metallici come componenti principali. Nel secondo caso, la cella a combustibile entra in funzione per la riconversione dell'H₂ accumulato, completando il ciclo e rendendo disponibile energia elettrica in assenza di fonti rinnovabili dirette, ad esempio durante le ore notturne o in situazioni di emergenza.

Il sistema di energy storage è stato dimensionato scegliendo come requisito principale la *capacità di produzione di H₂* rispetto alla quale si sono selezionate le taglie dell'elettrolizzatore, del sistema di accumulo e del sistema con celle a combustibile.

La capacità di produzione dell'elettrolizzatore è stata scelta pari a 10 Nm³/h (ossia una produzione di poco meno di 1 kg/h) e quindi, secondo l'approccio *power to fuel*, la disponibilità di energia chimica in seno all'H₂ prodotto, è circa pari a 30 kWh. Assumendo 6 ore di funzionamento a massima potenza è necessario prevedere un accumulo di H₂ minimo di 6 kg. Nel caso dell'approccio *power to power*, considerando una configurazione off-grid, assumendo un fattore di utilizzo annuale della fonte rinnovabile nel range 25-35% (che assicurerebbe un funzionamento dell'elettrolizzatore a massima produzione per 6 ore), e un utilizzo della cella nelle ore di non funzionamento dell'elettrolizzatore (18 ore), risulta che la taglia da scegliere per la cella sia nel range 4-5 kW (assumendo un'efficienza di una cella PEM nel range 40-50%). Chiaramente, nell'ottica di una progettazione modulare, è possibile arrivare a soddisfare utility di maggiore potenza (utility medie con P>20 kW) integrando più moduli.

In parallelo è stato sviluppato un pacchetto software composto da modelli numerici, strumenti di simulazione e ambienti di gestione. I modelli sono stati realizzati in Matlab/Simulink e in Aspen Plus e permettono la simulazione termo-fluidodinamica e termo-elettrochimica dei componenti, l'ottimizzazione del sistema integrato e l'analisi delle condizioni operative in

scenari realistici, anche su base stagionale. È stato inoltre sviluppato un software di interfaccia per la gestione del prototipo sperimentale, che consente il monitoraggio e il controllo remoto del funzionamento del sistema, anche con possibilità di esportazione dei dati in tempo reale.

Per quanto riguarda le modalità di accesso, i modelli numerici sono disponibili su richiesta per gli utenti accreditati del laboratorio, previa firma di un accordo di riservatezza e uso non commerciale. L'ambiente di simulazione può essere utilizzato per scopi di ricerca, didattica avanzata e testing di scenari, con possibilità di supporto tecnico da parte del personale di progetto. La documentazione tecnica associata (manuali utente, esempi di simulazione, casi di studio) è accessibile tramite repository interno previa registrazione.

Un ulteriore prodotto sviluppato riguarda lo schema logico-funzionale del sistema, che formalizza la sequenza e le modalità di interazione tra i sottosistemi e rappresenta uno strumento fondamentale per la replicabilità e la scalabilità del progetto. Questo schema è stato corredato da specifica documentazione tecnica, utile in particolare per la progettazione modulare e per l'adattamento del sistema a contesti applicativi diversi da quello di riferimento.

Infine, il progetto ha portato alla redazione di un corpus documentale tecnico che comprende rapporti descrittivi, e note di progettazione, pensati sia come strumenti di supporto alla fase sperimentale che come base informativa per un eventuale trasferimento tecnologico o per iniziative di formazione e disseminazione.

Nel complesso, l'integrazione tra prodotti hardware e software rappresenta un elemento distintivo del progetto, fornendo una piattaforma sperimentale e digitale completa, replicabile e adattabile a differenti esigenze applicative nel contesto della transizione energetica.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

(8000 caratteri max)

Descrivere le motivazioni di eventuali scostamenti tecnici/economici rispetto al preventivo e criticità riscontrate (*Evidenziare il contenuto in riferimento al piano di rischi presentato*)

Nel corso dell'attuazione delle attività progettuali non si sono verificati scostamenti rilevanti rispetto agli obiettivi tecnici definiti in fase di pianificazione. Tuttavia, alcune variazioni puntuali si sono rese necessarie per adattare la realizzazione del prototipo e la gestione sperimentale alle condizioni operative emerse durante le fasi di progettazione e testing nonché per ottimizzare il rapporto tra costi, tempi e risultati effettivamente conseguibili. Dal punto di vista tecnico, uno dei principali adeguamenti ha riguardato la selezione dei componenti per il sistema di accumulo a idruri metallici. Durante l'analisi preliminare, alcuni dei materiali inizialmente individuati si sono rivelati difficilmente reperibili sul mercato in tempi compatibili con il cronoprogramma. Di conseguenza, si è proceduto a una ridefinizione del lotto di materiali da testare, individuando soluzioni equivalenti dal punto di vista termodinamico ma più facilmente approvvigionabili. Tale scelta ha comportato una lieve revisione dei modelli numerici iniziali per l'adeguamento alle nuove curve di assorbimento/rilascio dell'H₂, ma non ha inciso sugli obiettivi prestazionali previsti dal progetto.

Un secondo ambito in cui si è registrato uno scostamento, di natura positiva, riguarda l'approfondimento delle strategie di gestione termica del sistema. Originariamente previsto come aspetto secondario, il controllo attivo dei flussi termici si è rivelato determinante per ottimizzare le fasi di carica e scarica dell'H₂ e garantire la stabilità operativa della fuel cell in esercizio continuo. Questo ha portato allo sviluppo di una porzione aggiuntiva del software di simulazione, dedicata alla regolazione dinamica della temperatura interna del sistema, andando oltre quanto inizialmente pianificato. Dal punto di vista economico, i costi sostenuti sono rimasti complessivamente in linea con quanto previsto nel preventivo di spesa, grazie a una gestione attenta delle risorse e a un utilizzo flessibile delle competenze disponibili all'interno del partenariato. Tuttavia, si segnala un incremento moderato delle spese relative alla realizzazione dei serbatoi di stoccaggio idruri e alla strumentazione di misura e monitoraggio, dovuto alla necessità di dotarsi di sensori ad alta precisione per la raccolta dei dati termici e fluidodinamici nelle prove sperimentali. Questo adeguamento è stato considerato giustificato e coerente con il piano dei rischi approvato, che già identificava come possibile criticità la necessità di strumentazioni specialistiche non disponibili in dotazione iniziale. L'incremento dei costi legati all'acquisizione di tali strumentazioni è stato comunque mitigato attraverso una razionalizzazione dei costi complessivi di personale, ottenuta grazie all'ottimizzazione delle risorse interne e alla parziale redistribuzione delle attività all'interno del team di progetto. Tale rimodulazione ha consentito di mantenere l'equilibrio economico complessivo della linea di attività, garantendo al tempo stesso il raggiungimento degli obiettivi tecnici e la qualità dei risultati ottenuti.

Per quanto riguarda la tempistica di esecuzione, le attività sono state svolte nel rispetto delle scadenze chiave previste, nonostante alcune difficoltà logistiche legate alla fornitura dei componenti, in particolare durante le fasi di approvvigionamento dell'elettrolizzatore. Il ritardo iniziale di alcune settimane è stato compensato attraverso una riorganizzazione interna delle attività di simulazione e modellazione, che sono state anticipate rispetto al cronoprogramma originario. Questo ha permesso non solo di evitare impatti negativi sullo sviluppo complessivo, ma anche di disporre di modelli più maturi al momento della messa in servizio del prototipo.

Dal punto di vista del rischio progettuale, le criticità affrontate sono state tutte riconducibili a scenari già mappati nel piano di rischio allegato alla proposta iniziale. Nello specifico, erano già stati identificati come elementi di attenzione l'accesso ai materiali per l'accumulo, la disponibilità dei componenti elettronici avanzati e l'equilibrio tra costo e precisione della sensoristica. La mitigazione è avvenuta tramite soluzioni alternative di fornitura, revisione dei criteri di selezione dei materiali e razionalizzazione della configurazione del banco di prova. Non si sono verificati eventi imprevisti di tipo tecnico o gestionale che abbiano compromesso le finalità generali del progetto.

In conclusione, eventuali scostamenti tecnici ed economici osservati durante la realizzazione delle attività sono da considerarsi fisiologici in un contesto di sperimentazione avanzata e sono stati affrontati in modo coerente con quanto previsto nei meccanismi di gestione del rischio. Al contrario, in diversi casi le azioni intraprese hanno portato a un miglioramento delle soluzioni adottate e a un'estensione positiva degli obiettivi iniziali, con effetti favorevoli anche sul trasferimento tecnologico e sulla futura scalabilità del sistema.

6 Sintesi delle attività svolte

(1000 caratteri max)

Sintesi delle attività svolte e dei risultati ottenuti in relazione ai risultati attesi.

Le attività svolte hanno riguardato tutte le fasi necessarie alla realizzazione di un innovativo sistema di energy storage, ossia la progettazione, lo sviluppo, la sua costruzione ed il testing delle prestazioni. Le attività condotte sono riconducibili a:

- Selezione componenti e definizione dell'architettura ottimale: sono stati scelti i componenti più idonei, dal punto di vista di prestazioni e mercato, e definita l'architettura per la loro integrazione
- Modellazione componenti e sistemi: sono stati sviluppati modelli elettrochimici (Aspen Plus code) per l'elettrolizzatore e la cella a combustibile, un modello 1D termodinamico e modelli FEM (modelli 2D/3D) con Comsol Multiphysics per i serbatoi ad idruri metallici
- Sviluppo e realizzazione del sistema di energy storage: il sistema è stato realizzato integrando un elettrolizzatore, un sistema di accumulo H₂ con idruri metallici, una cella a combustibile PEM, un convertitore di interfaccia rete e un sistema di gestione e controllo

7 Dettaglio delle attività svolte

(15000 caratteri max)

Descrivere in dettaglio le attività svolte nella LA (*Evidenziare come si sono ottenuti i risultati. Descrivere brevemente anche le attività, per le quali si sono spese delle risorse, che tuttavia non hanno portato all'ottenimento dei risultati previsti al fine di permettere la corretta valutazione di congruità e pertinenza dei costi rendicontati.*)

Le attività svolte nell'ambito della linea di attività hanno contribuito in modo sostanziale al raggiungimento dei risultati previsti, articolandosi in fasi operative ben definite che hanno riguardato l'analisi preliminare, la progettazione, la modellazione, la realizzazione prototipale e la sperimentazione del sistema integrato di energy storage basato sull'H₂.

7.1 Selezione componenti e definizione dell'architettura ottimale

In una prima fase dell'attività, l'attenzione si è concentrata sulla valutazione delle tecnologie da integrarsi per la realizzazione del sistema di energy storage.

Per quanto riguarda la *produzione di H₂* sono stati considerate come tecnologie potenzialmente idonee gli elettrolizzatori di tipo PEM (Proton Exchange Membrane), AEM (Anion Exchange Membrane) ed AEL (Alkaline). Per tali elettrolizzatori sono state analizzate le caratteristiche costruttive, le condizioni operative e le prestazioni attese. Dallo studio è emerso che la tecnologia più idonea è la **tecnologia PEM** in quanto rappresenta una soluzione all'avanguardia ed efficiente per la produzione di H₂. Questa scelta progettuale garantisce che il processo avvenga entro limiti termici sicuri, cercando al tempo stesso di ottenere la massima efficienza energetica possibile (> 50%).

Dall'analisi del mercato si è selezionato un produttore di elettrolizzatori PEM, il cui prodotto può assicurare i requisiti richiesti.

A valle dell'analisi sul processo di produzione di H₂ sono valutati studiati i sistemi per il suo accumulo. In figura 5 sono illustrati i tre sistemi di accumulo H₂, ossia sistemi per l'accumulo in forma gassosa (bombole), in forma liquida (serbatoi criogenici) o in forma solida con gli idruri [P. Pal et al. Reactions 2 (2021) 333–364].

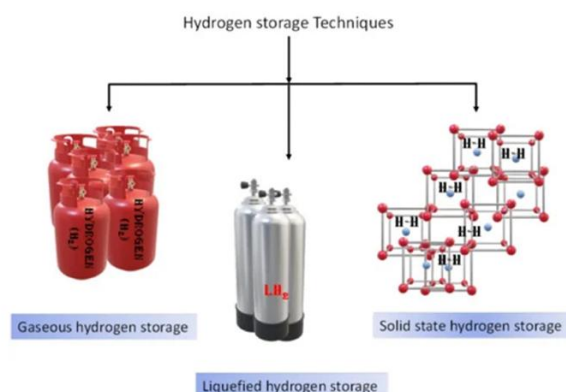


Figura 5 – Tecniche di accumulo H₂

Per l'accumulo H₂ è stato scelto di utilizzare la **tecnologia degli idruri metallici**. Nello specifico sono stati analizzati diversi tipi di idruri che possono essere utilizzati in base alla loro capacità di assorbimento di H₂, alla disponibilità sul mercato e ai costi. Le valutazioni effettuate hanno individuato come tipo di idruro idoneo al progetto l'Hydralloy C5, che, come illustrato nella figura 6 è una polvere con una dimensione delle particelle nel range 0-2 mm.



Figura 6 - Polvere di Idruro metallico Hydralloy C5

L'Hydralloy C5 è una lega metallica che presenta una struttura AB₂ e la sua formulazione chimica è Ti_{0.95}Zr_{0.05}Mn_{1.46}V_{0.45}Fe_{0.09}. Questo materiale presenta un range di temperatura tra i 5 e i 50 °C per pressioni da 3 a 30 bar; queste caratteristiche rendono tale lega particolarmente adatta per applicazioni in ambito di mobilità e per sistemi di stoccaggio integrati con elettrolizzatori (la cui pressione di esercizio è proprio sui 30 bar). La sua capacità gravimetrica si attesta intorno all'1.8wt%, mostrando inoltre buona stabilità e una cinetica sufficientemente elevata, caratteristiche che la rendono una tra le migliori alternative disponibili sul mercato.

Le tecnologie fuel cell studiate per la specifica applicazione sono state le celle a bassa temperatura e quindi sia le PEM che le celle alcaline.

La scelta della cella a combustibile è stata quindi orientata alla **tecnologia delle celle a membrana polimerica (PEM)** in quanto sono la tecnologia più matura, ed hanno una vasta disponibilità di taglie. Le celle PEM offrono diversi vantaggi quali: un impatto ambientale nullo sia per le emissioni gassose (se alimentate con H₂ puro) che per l'inquinamento acustico, un ottimo rapporto potenza peso, una temperatura di funzionamento bassa e quindi una facilità di gestione delle fasi di startup, shutdown e variazioni di carico e una buona efficienza.

Per la realizzazione del prototipo del sistema di energy storage è stata utilizzata una cella PEM che assicura i requisiti richiesti. Tale componente è già presente presso l'Università di Napoli Parthenope, che lo ha reso disponibile per il progetto.

Una volta definiti e selezionati i componenti si è passati alla definizione dell'architettura del sistematale architettura è bastata su un approccio modulare che consente al sistema sviluppato di soddisfare utenze diverse, semplicemente integrando più moduli in parallelo nel caso di impianti a fonte rinnovabile di taglia maggiore.

La configurazione del modulo di energy storage, così come definito sulla base dell'architettura prevista è stato illustrato in figura 4.

7.2 Modellazione componenti e sistemi

7.2.1 Modello PEMFC

Il modello della cella a combustibile PEM è stato realizzato sia integrando componenti fisici (scambiatori di calore, separatori, reattori chimici), che consentono di simulare i processi termochimici/termodinamici (es. conversione H₂ ed ossigeno in acqua e produzione di calore da asportare per effetto delle reazioni elettrochimiche) che utilizzando componenti virtuali come il *Fortran Block Calculator*, che consente di definire il comportamento elettrochimico della cella attraverso l'implementazione delle equazioni per la determinazione della curva di polarizzazione e la corrente. Il flowsheet del modello è illustrato in figura 7.

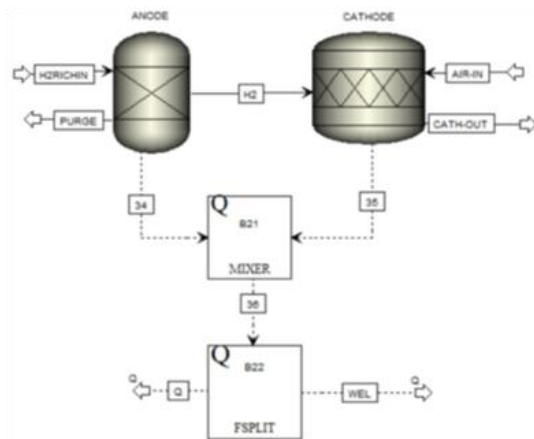


Figura 7 – Flowsheet del modello della cella a combustibile

Come si vede dalla figura, dal punto di vista fisico l'anodo è simulato con un Separator block (ANODE) nel quale si definisce il coefficiente di utilizzazione della cella; l'H₂ non utilizzato uscirà dal comparto anodico come purge gas che potrà essere ricircolato; il catodo è simulato con un RStoich block (CATHODE), dove l'H₂ (dall'anodo) reagisce con l'ossigeno dell'aria producendo acqua come risultato della reazione. Il flusso in uscita dal catodo (CATH-OUT) contiene l'acqua, l'ossigeno in eccesso e l'azoto. Nel Fortran Block Calculator è implementata l'equazione della curva di polarizzazione secondo la nota espressione di Kim [Kim J., J Electrochem Soc 1995]:

$$V_{cell} = V_0 - b \cdot \ln(J) - R \cdot J - m \cdot \exp(-n \cdot J)$$

I coefficienti V_0 , b , R , m ed n , sono stati calibrati sulla base della curva di polarizzazione disponibile dal costruttore.

7.2.2 Modello PEMEL

Il modello dell'elettrolizzatore a membrana polimerica è stato realizzato seguendo lo stesso approccio modellistico applicato per la modellazione della cella PEM ossia, integrando componenti specifici ed utilizzando un *Fortran Block Calculator* nel quale sono state implementate le note equazioni elettrochimiche che regolano la produzione di H₂ partendo da acqua ed energia elettrica. Il flowsheet del modello è illustrato in figura 8.

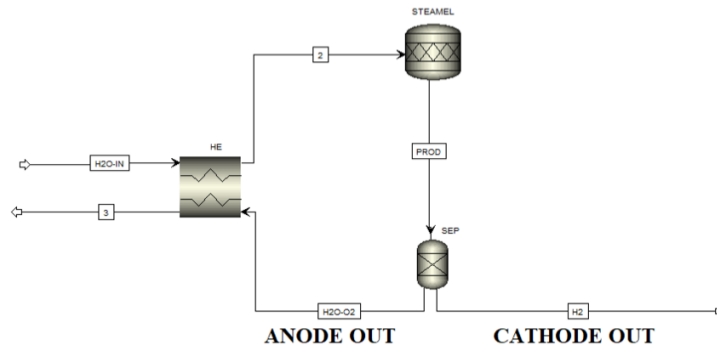


Figura 8 – Flowsheet del modello dell'elettrolizzatore

Come si vede dalla figura, dal punto di vista fisico è stato utilizzato un unico componente che il *RStoich block* (STEAMEL) nel quale ha luogo la reazione di decomposizione dell'acqua in O_2 e H_2 . Il flusso in uscita è separato in un *Separator block* (SEP) in H_2 (Cathode out), ed ossigeno ed acqua (Anode out). Uno scambiatore di calore (HE) sulla linea di alimentazione dell'acqua consente di preriscaldare questo flusso recuperando calore dalla corrente in uscita dall'anodo. La portata di H_2 prodotta è calcolata utilizzando la seguente equazione:

$$m_{H_2} = \frac{n_f * N_C * I_{EI}}{2F}$$

dove N_c è il numero di celle, I_{EI} (A) è la corrente dell'elettrolizzatore, F (96485 C/mol) è la costante di Faraday e η_f è l'efficienza di Faraday.

7.2.3 Modelli serbatoio a idruri

Il sistema di accumulo H_2 è stato progettato per avere una capacità di H_2 pari a circa 15 kg ed è stato sviluppato secondo un approccio modulare, in modo da dare flessibilità al sistema stesso, in termini di trasporto, facilità di installazione, ottimizzazione degli spazi e scalabilità a taglie superiori.

Nello specifico il sistema di accumulo, è costituito da due moduli di forma cilindrica, interconnessi tra loro, le cui dimensioni sono state determinate sulla base di una attività di analisi, modellazione e ottimizzazione numerica.

La maggiore criticità relativa alla fase di progettazione del serbatoio risiede nella opportuna determinazione del sistema di gestione termica dei serbatoi. Infatti, l'assorbimento dell' H_2 all'interno della matrice metallica del materiale è un processo esotermico, mentre il desorbimento avviene secondo un processo endotermico. Ciò implica la necessità di raffreddare (durante la fase di ricarica) e di riscaldare (durante la fase di scarica) il sistema al fine di consentire l'efficace stoccaggio e rilascio dell' H_2 dai serbatoi.

Al fine di definire la configurazione ottimale del sistema di stoccaggio, sono stati sviluppati tre modelli numerici: un modello preliminare 1D termodinamico, un modello preliminare 2D ed un modello definitivo 3D entrambi agli elementi finiti.

Il primo modello ha consentito di valutare le prestazioni generali del singolo serbatoio sulla base di parametri macroscopici; successivamente è stato sviluppato un modello 2D al fine sia di individuare la geometria di serbatoio più idonea sia per caratterizzare il comportamento del

sistema di stoccaggio pensato costituito da più serbatoi. Il modello 3D ha consentito di effettuare un'analisi più dettagliata del meccanismo di assorbimento e desorbimento dell'H₂ dagli idruri metallici per poter arrivare a individuare la configurazione definitiva.

L'analisi mediante modello 1D termodinamico è stata condotta in maniera parametrica, prendendo in esame un singolo modulo (serbatoio cilindrico), e variandone pertanto sia la sua geometria (raggio), che le caratteristiche del flusso esterno impiegato per il condizionamento. Per quest'ultimo, come anticipato, è stato scelto di utilizzare aria come fluido termovettore, al fine di esplorare una soluzione semplice di riferimento.

La completa caratterizzazione del sistema di accumulo con idruri metallici è stata successivamente effettuata mediante simulazione numerica agli elementi finiti (sia 2D che 3D), utilizzando il software Comsol Multiphysics. L'obiettivo di tali modelli è stato quello di valutare accuratamente il comportamento transitorio dei serbatoi durante il loro funzionamento (campi di temperatura, pressione e concentrazione), e di validare diversi sistemi di gestione termica. In particolare, sono state considerate soluzioni a) di condizionamento termico interno (canali passanti all'interno del serbatoio lungo la direzione assiale e tubazione elicoidale posta all'interno del serbatoio) b) di condizionamento termico esterno (convezione forzata di aria o acqua), c) soluzioni miste di condizionamento termico interno ed esterno contemporaneamente. Inoltre, è stata valutata la possibilità di impiegare diversi fluidi termovettori.

In Figura 9, viene mostrata la configurazione finale ottenuta come soluzione ottimale per la specifica applicazione e per gli assegnati requisiti di progetto. La figura 9 mostra il serbatoio nel quale è realizzata l'integrazione di una tubazione elicoidale, all'interno della quale scorre un fluido termovettore, per il suo condizionamento termico. Nella figura inoltre sono riassunte le caratteristiche principali del serbatoio in termini di volume, peso e capacità di H₂.



Volume utile [L]	156
Peso dell'involucro di alluminio [kg]	215
Peso degli idruri metallici [kg]	398
Peso complessivo, incluso l'H ₂ [kg]	620
Capacità di idrogeno [kg]	7.2

Figura 9 – Modello 3D di serbatoio a idruri metallici (sinistra) e relativi parametri caratteristici (destra).

7.3 Sviluppo e realizzazione del sistema di energy storage

7.3.1 Progettazione del prototipo

Il prototipo è stato costruito secondo criteri di modularità e facilità di installazione e integrazione. La progettazione ha seguito un approccio sistemico, mirato a garantire la coerenza funzionale tra i diversi sottosistemi e a massimizzare l'efficienza complessiva del ciclo power-to-fuel-to-power.

L'architettura del prototipo prevede l'integrazione di un elettrolizzatore per la produzione di H₂ a partire da energia elettrica rinnovabile, un modulo di accumulo basato su idruri metallici e una fuel cell PEM destinata alla riconversione dell'H₂ in energia elettrica. A questi sottosistemi principali si affiancano i convertitori di potenza necessari per l'interfacciamento con la rete o con carichi stand-alone, sistemi di gestione termica per il controllo attivo delle temperature nei serbatoi e nella cella a combustibile, e una sensoristica diffusa per il monitoraggio in tempo reale dei parametri di processo. Per migliorare la gestione dinamica della produzione da fonte rinnovabile, è stato previsto come sistema ausiliare un pacco batterie a ioni di litio. Tale scelta consente di stabilizzare il funzionamento dell'elettrolizzatore nei momenti di rapida variazione dell'irraggiamento solare, come in caso di passaggio di nuvole.

Questa fase progettuale ha costituito la base per le successive attività di realizzazione fisica del prototipo e di validazione sperimentale in condizioni operative reali.

7.3.2 Sviluppo e sperimentazione del prototipo di Energy Storage

La realizzazione del prototipo è stata curata da ATENA, sotto la supervisione scientifica dei ricercatori dell'Università degli Studi di Napoli "Parthenope". L'attività ha comportato l'integrazione di componenti appositamente sviluppati o messi a disposizione dalle due strutture, con dispositivi forniti da ENEA, secondo una logica di co-progettazione tecnica basata su contributi complementari. In particolare, l'Università Parthenope ha fornito i moduli di fuel cell PEM già disponibili nei propri laboratori, nonché il supporto tecnico per la modellazione e la definizione dei parametri funzionali di progetto. ATENA ha contribuito con la progettazione e la realizzazione dei serbatoi a idruri metallici, mentre ENEA ha messo a disposizione l'elettrolizzatore, selezionato sulla base delle analisi comparative svolte nella fase iniziale del progetto e le polveri di idruri.

Il sistema prototipale è stato assemblato e installato presso il centro di ricerca di ATENA, all'interno di un'area dedicata dotata delle infrastrutture necessarie per la conduzione di test in condizioni operative reali. La figura 10 illustra i principali componenti assemblati per arrivare allo sviluppo del prototipo del sistema di energy storage.

L'impianto è stato connesso agli impianti esistenti del centro, in particolare al campo fotovoltaico da circa 80 kW di potenza di picco, consentendo la sperimentazione del sistema in un contesto rappresentativo di produzione da fonte rinnovabile non programmabile.

In figura 11 è illustrata l'interfaccia grafica del sistema per la gestione del prototipo che consente di visualizzare il funzionamento del sistema durante le attività di testing, in termini di scambi di energia tra PV, elettrolizzatore, batteria, rete elettrica e carico dell'utility.



Figura 10 – Componenti presso i laboratori del centro di ricerca di ATENA.



Figura 11 – Interfaccia grafica del sistema per la gestione del prototipo con i relativi scambi di energia.

Le attività si sono concluse con l'elaborazione di scenari di esercizio dinamico del sistema, utili a verificarne le prestazioni su base stagionale e in diverse condizioni di esercizio.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

(2000 caratteri max)

Se una o più consulenze sono state utilizzate all'interno della LA, spiegare il loro contributo riferito all'esecuzione delle attività di ricerca e l'ottenimento dei risultati.

Nell'ambito della linea di attività, ATENA ha svolto un ruolo centrale non solo nella realizzazione del sistema integrato di energy storage a H₂, come previsto dal capitolato tecnico, ma anche nella messa a disposizione del proprio centro di ricerca per lo svolgimento delle attività sperimentali in condizioni operative reali. Questo ha consentito di verificare in modo completo ed efficace le prestazioni del sistema in tutte le modalità previste, contribuendo in modo sostanziale al raggiungimento degli obiettivi del progetto.

ATENA si è occupata della costruzione dei serbatoi di accumulo basati su idruri metallici, sulla base delle specifiche progettuali definite in collaborazione con l'Università degli Studi di Napoli Parthenope. I serbatoi, realizzati in configurazione cilindrica, sono stati progettati per favorire un'efficiente gestione termica durante le fasi di assorbimento e rilascio dell'H₂. Inoltre, ATENA ha curato l'integrazione di tutti i componenti principali – elettrolizzatore, sistema di accumulo e fuel cell – all'interno di un'unica architettura compatta e modulare, provvedendo al montaggio, al collaudo e all'avviamento funzionale del sistema.

Il centro di ricerca ATENA, già dotato di infrastrutture per la sperimentazione di sistemi energetici innovativi, è stato utilizzato per testare il funzionamento del sistema in condizioni reali, valutandone il comportamento in cicli completi di carica e scarica, in scenari stagionali e in risposta a variazioni di carico. Attraverso il sistema di monitoraggio e controllo installato, è stato possibile raccogliere dati dettagliati sull'efficienza del sistema, sulla qualità dell'energia erogata e sulla stabilità operativa in tutte le configurazioni previste.

Il contributo di ATENA si è dunque rivelato determinante sia nella fase realizzativa che in quella di validazione sperimentale del sistema di energy storage.

9 Pubblicazioni scientifiche

Nel corso dello svolgimento delle attività previste dalla linea di attività, i risultati scientifici e tecnologici ottenuti sono stati oggetto di interesse e approfondimento anche in ambito accademico. Sebbene la priorità del progetto sia stata rivolta alla realizzazione pratica e alla validazione sperimentale del sistema di energy storage, sono emersi contenuti di rilevanza scientifica che hanno generato l'avvio di attività di disseminazione a livello tecnico e universitario. Al momento, i dati raccolti e le soluzioni sviluppate sono in fase di rielaborazione per la redazione di contributi scientifici destinati a riviste internazionali peer-reviewed e a conferenze specialistiche nei settori dell'energia, della transizione energetica e dei sistemi a H₂. In particolare, è in preparazione un articolo tecnico riguardante la modellazione numerica e il controllo termo-fluidodinamico del sistema di accumulo a idruri metallici, con l'obiettivo di condividerne l'architettura e le prestazioni in condizioni reali di esercizio.

Nel corso delle attività di progetto, i risultati ottenuti hanno suscitato interesse anche in ambito scientifico, generando opportunità concrete di disseminazione attraverso conferenze e contributi accademici. In particolare, i risultati preliminari della modellazione e sperimentazione del sistema ibrido di accumulo H₂/batteria sono stati presentati alla conferenza European Fuel Cells and Hydrogen Conference (EFC 2023) tenutasi a Capri. Il lavoro, dal titolo "*Analysis of hydrogen/battery hybrid energy storage systems in building microgrids*", è stato presentato da Elio Simeoni (Università degli Studi di Napoli "Parthenope") ed è stato accolto con interesse per l'approccio integrato alla gestione energetica in contesti residenziali.

Inoltre, è già stata pianificata una nuova pubblicazione scientifica che sarà presentata al 1st International Congress on Sustainable Energy and Related Technologies (ICSET 2025), in programma a Lipari dal 22 al 26 giugno 2025. Il contributo, dal titolo "*Design and management of a hydrogen-based electrical energy storage system for small-medium sized residential utilities*", è firmato da Giovanni Di Ilio, Sohaib Raza, Gabriele Scarpati, Mariagiovanna Minutillo, Viviana Cigolotti, Simona Di Micco. Questo lavoro approfondirà gli aspetti ingegneristici e gestionali del sistema sviluppato, con un focus specifico sulla sua applicazione a utenze residenziali di piccole e medie dimensioni.

Entrambe le pubblicazioni si inseriscono in un più ampio programma di valorizzazione scientifica dei risultati, che prevede ulteriori contributi su riviste peer-reviewed internazionali e la partecipazione a eventi tematici dedicati all'energia, all'H₂ e alla transizione ecologica. Infine, i ricercatori coinvolti stanno pianificando la presentazione di un paper in occasione di una conferenza scientifica internazionale sull'H₂ (EFCH2 2025), con l'obiettivo di confrontare i risultati del progetto con altre esperienze maturate in contesti analoghi e raccogliere feedback per il potenziamento del sistema in vista di una futura scalabilità.

Elenco delle pubblicazioni scientifiche eventualmente risultanti dall'attività svolta

- Elio Simeoni, Giovanni Di Ilio, Elio Jannelli - Analysis of hydrogen/battery hybrid energy storage systems in building microgrids EFC2023 European Fuel Cell and Hydrogen Conference - Piero Lunghi Conference, September 13-15, 2023, Capri, Italy.
- Giovanni Di Ilio, Sohaib Raza, Gabriele Scarpati, Mariagiovanna Minutillo, Viviana Cigolotti, Simona Di Micco, Design and Management of a Hydrogen-Based Electrical Energy Storage System for Small-Medium Sized Residential Utilities, 1st International Congress on Sustainable Energy and related Technologies (ICSET 2025). Lipari (Italy), 22-26 June 2025.

10 Eventi di disseminazione

Durante lo svolgimento del progetto, sono state attuate diverse azioni di disseminazione dei risultati, con l'obiettivo di condividere le conoscenze acquisite, valorizzare il lavoro svolto e promuovere l'interesse verso soluzioni di accumulo energetico basate sull'H₂ nel contesto della transizione energetica.

Un primo evento di rilievo è stato rappresentato dalla partecipazione alla conferenza EFC 2023 – European Fuel Cells and Hydrogen Conference, tenutasi a Capri nel settembre 2023. Nell'ambito della sessione dedicata ai sistemi integrati di accumulo, è stato presentato il contributo tecnico "Analysis of hydrogen/battery hybrid energy storage systems in building microgrids", illustrando le potenzialità del sistema sviluppato nel progetto per applicazioni in microreti energetiche residenziali.

Oltre all'attività congressuale, i risultati intermedi del progetto sono stati oggetto di incontri tecnici con stakeholder territoriali, enti pubblici e aziende interessate all'impiego di soluzioni di storage innovative in ambito civile e industriale. Questi momenti di confronto hanno contribuito a far emergere nuovi spunti applicativi e a rafforzare le prospettive di trasferimento tecnologico.

È inoltre prevista la partecipazione al 1st International Congress on Sustainable Energy and Related Technologies (ICSET 2025), in programma a Lipari dal 22 al 26 giugno 2025, dove sarà presentato il lavoro "Design and management of a hydrogen-based electrical energy storage system for small-medium sized residential utilities". Questo evento rappresenterà un'importante occasione di confronto tecnico-scientifico sul tema dello storage distribuito.

Infine, gli ultimi risultati ottenuti nell'ambito del progetto saranno presentati alla conferenza EFCH₂ – European Fuel Cells and Hydrogen Conference 2025, che si terrà nuovamente a Capri nel mese di settembre 2025. In questa occasione verranno illustrati i dati più recenti emersi dalla fase di testing finale, le performance del sistema in condizioni reali e le prospettive di replica e applicazione in ambito residenziale e industriale.

A completamento delle attività, è in programma anche un seminario tecnico divulgativo presso il centro di ricerca ATENA, rivolto a operatori del settore, ricercatori e rappresentanti istituzionali, per condividere i risultati sperimentali, le soluzioni implementate e gli scenari futuri di sviluppo