

Ricerca di Sistema elettrico



Capitolato tecnico per la realizzazione del prototipo di un sistema di accumulo freddo e della sua test-facility. (LA4.4)

G. Messina, G. Massarenti, A. Giovannelli, C. Stringola, E. Giulietti,
S. Attanasi, E. Giacomazzi, G. Guidarelli, A. Assettati, D. Cerere

CAPITOLATO TECNICO PER LA REALIZZAZIONE DEL PROTOTIPO DI UN SISTEMA DI ACCUMULO FREDDO E DELLA SUA TEST-FACILITY

Giuseppe Messina, Caterino Stringola, Emanuele Giulietti, Salvatore Attanasi, Eugenio Giacomazzi, Giuliano Guidarelli, Andrea Assettati, Donato Cerere (ENEA), Gabriele Massarenti, Ambra Giovannelli (Università degli Studi Roma Tre)

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: Tema di ricerca 1.2 - Progetto integrato Tecnologie di accumulo elettrochimico e termico.

Linea di attività: LA4.4

Responsabile del Progetto: Margherita Moreno, ENEA.

Responsabile Linea di Attività: Giuseppe Messina, ENEA

Mese inizio previsto: 1 (gennaio 2022)

Mese inizio effettivo: 1 (gennaio 2022)

Mese fine previsto: 36 (dicembre 2024)

Mese fine effettivo: 36 (dicembre 2024)

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: Si ringrazia per la collaborazione alle attività svolte

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti.....	4
3	Prodotti attesi	5
4	Prodotti sviluppati	5
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	6
6	Sintesi delle attività svolte	6
7	Dettaglio delle attività svolte.....	6
7.1	Realizzazione dei componenti chiave della test-facility	7
7.2	Procurement dell'hardware del sistema di controllo	8
7.3	Procurement dei componenti commerciali e degli strumenti di misura.....	9
7.4	Redazione del capitolato tecnico e dei deliverable	9
8	Posizionamento della ricerca rispetto allo stato dell'arte internazionale.....	10
9	Eventi di disseminazione	11
10	Bibliografia.....	11

Indice delle figure

Figura 1. CAD 3D dell'impianto assemblato.	4
Figura 2. Targa di uno dei sette scambiatori di calore PCHE (Printed Circuit Heat Exchanger).	7
Figura 3. Targa del vessel ad alta pressione (pressione di collaudo pari a 320.81 bar).	8

1 Risultati attesi

Al termine della Linea di Attività (LA) 4.4 erano attesi i seguenti risultati:

- Rapporto tecnico contenente il capitolato per il commissioning del prototipo di un sistema di accumulo freddo e della sua test-facility;
- fascicolo tecnico con test di collaudo dei componenti customizzati,

2 Risultati ottenuti

In questa linea di attività sono stati raggiunti tutti i risultati previsti. Sono stati specificati, costruiti e collaudati i componenti chiave della test facility. Nello specifico, sono stati realizzati sette scambiatori di calore con una pressione di progetto pari a 185 bar e una pressione di collaudo pari a 256 bar; due vessel di accumulo, ad alta e bassa pressione, con pressioni di progetto pari rispettivamente a 200 e 55 bar e con pressioni di collaudo pari rispettivamente a 320 e 84.77 bar. Sono state avviate e gestite le attività di procurement per i componenti commerciali della test-facility, è stata predisposta la lista linee che specifica il materiale da fornire per ciascuna linea ed è stato acquisito l'hardware del sistema di controllo.

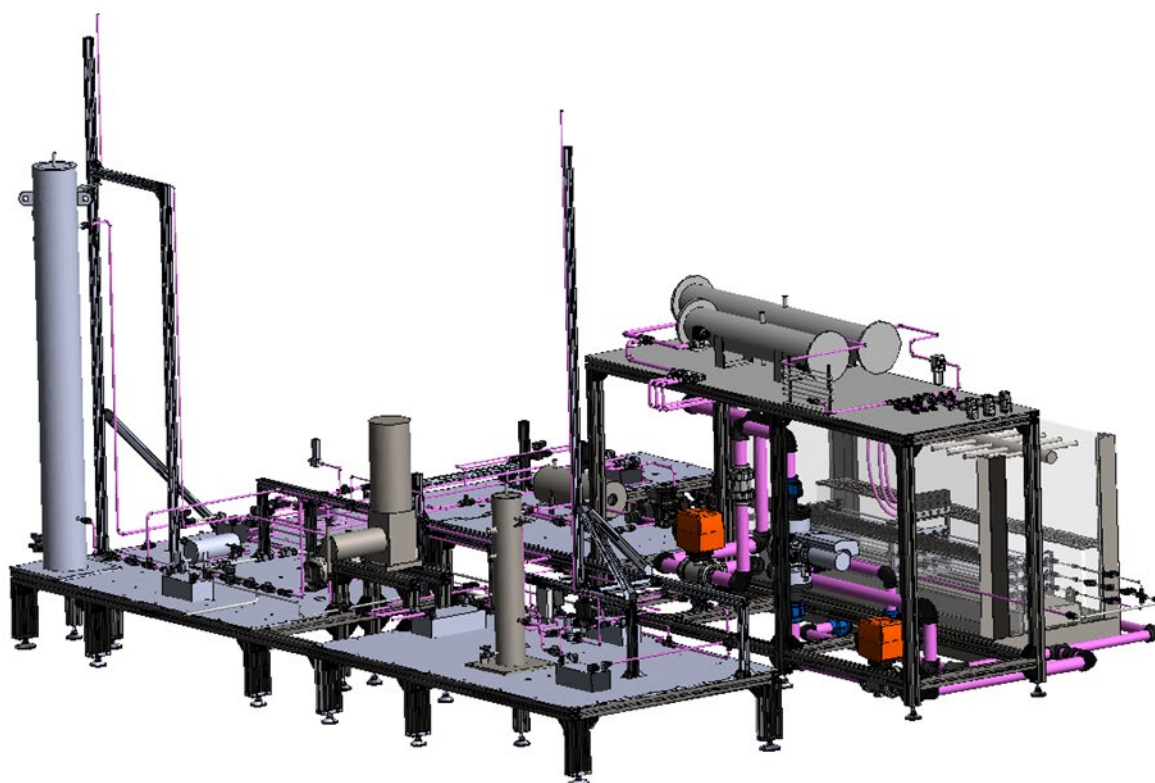


Figura 1. CAD 3D dell'impianto assemblato.

Con riferimento agli eventuali benefici per il sistema elettrico nazionale e per i suoi utenti, il concept proposto può potenzialmente ampliare la platea delle potenziali soluzioni di accumulo

termico a bassa temperatura utili per: (I) applicazioni elettriche utility scale; (II) utenze che richiedono grandi quantità di energia per il raffrescamento degli edifici e (III) per il migliore sfruttamento del potenziale in termini di energia rinnovabile non programmabile. La generazione termoelettrica (I) può trarre vantaggio dall'utilizzo di un sistema di accumulo a bassa temperatura, che può essere funzionalizzato, per esempio, come sorgente fredda per ridurre la temperatura di aspirazione delle turbine a gas in ciclo semplice o in ciclo combinato, con conseguente incremento dell'efficienza e della potenza di picco; (II) utenze che richiedono grandi quantità di energia per il raffrescamento, come i centri commerciali, i data center o i servizi alberghieri delle navi da crociera, possono trarre vantaggio dalla soluzione proposta, perché consentirebbe di stoccare energia frigorifera sfruttando energia elettrica a basso costo (quando c'è abbondanza di produzione) o finestre temporali notturne in cui la generazione elettrica è più efficiente per la ridotta temperatura ambiente; inoltre (III) la soluzione proposta consentirebbe un migliore sfruttamento delle fonti rinnovabili non programmabili, convertendo l'eccesso di produzione elettrica (o la produzione elettrica a bassa marginalità) in energia frigorifera utilizzabile durante i picchi di domanda elettrica, quando i costi sono superiori e il sistema elettrico è sotto stress.

3 Prodotti attesi

La presente LA prevede:

- la specifica e la realizzazione dei componenti chiave del prototipo del sistema di accumulo e della test-facility;
- la specifica e l'acquisizione dei componenti commerciali, che comprendono raccorderia, tubing, valvole e strumenti di misura;
- la specifica e l'acquisizione dell'hardware per la realizzazione del sistema di controllo;
- il capitolato tecnico per la realizzazione del prototipo e della sua test-facility;
- deliverable: "Capitolato tecnico per la realizzazione del prototipo di un sistema di accumulo freddo e della sua test-facility".

4 Prodotti sviluppati

- Fascicolo tecnico contenente le specifiche e i report di realizzazione e collaudo dei componenti chiave del prototipo del sistema di accumulo e della test-facility (allegati 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30).
- Emissione delle specifiche e acquisizione dell'hardware del sistema di controllo (allegato 33).
- Emissione delle specifiche e acquisizione dei componenti commerciali, comprendenti raccorderia, tubing e strumenti di misura (allegato 34).
- Capitolato tecnico per la realizzazione del prototipo di un sistema di accumulo freddo e della sua test-facility.
- Deliverable: "Capitolato tecnico per la realizzazione del prototipo di un sistema di accumulo freddo e della sua test-facility".

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non si evidenziano scostamenti rispetto alle attività e ai risultati previsti.

6 Sintesi delle attività svolte

Nell'ambito della realizzazione della test-facility per l'accumulo termico a bassa temperatura, sono state eseguite tutte le attività tecniche e gestionali necessarie alla specifica, realizzazione, collaudo e documentazione dei nove componenti chiave, inclusi sette scambiatori di calore (collaudati a 265 bar) e due vessel in pressione (vessel di alta pressione collaudato a 320 bar). Ogni componente è corredato di fascicolo tecnico completo. È stato inoltre effettuato il procurement dei componenti commerciali (raccorderia, tubing, strumentazione) e dell'hardware del sistema di controllo (cRIO), selezionato per garantire compatibilità con LabVIEW e gestire oltre 100 segnali. L'intero sistema è stato descritto in un capitolato tecnico articolato in 34 allegati organizzati per supportare la costruzione dell'impianto.

7 Dettaglio delle attività svolte

In questa linea di attività sono state eseguite l'insieme delle operazioni tecniche e gestionali finalizzate alla predisposizione della documentazione tecnica, alla definizione delle specifiche, alla realizzazione e al collaudo dei componenti chiave del prototipo di sistema di accumulo termico a bassa temperatura e della relativa test-facility. L'attività ha incluso, in modo integrato, la specifica, la realizzazione il collaudo e la redazione del fascicolo tecnico per i nove componenti chiave realizzati su misura; l'emissione delle specifiche e l'approvvigionamento dei materiali dei componenti commerciali comprendenti raccorderia, tubing e strumenti di misura; l'emissione delle specifiche e l'acquisizione dell'hardware del sistema di controllo e la redazione del capitolato tecnico per la realizzazione dell'impianto. L'attività svolta si caratterizza per un'elevata complessità tecnica e gestionale, in quanto ha richiesto:

- interazione costante con fornitori, officine e laboratori;
- supervisione delle lavorazioni meccaniche e dei test funzionali;
- emissione di documentazione tecnica coerente, tracciabile e validabile secondo criteri di ingegneria di sistema;
- capacità di integrare normative europee (PED, EN, ISO) e standard industriali con le esigenze sperimentali di una facility di ricerca.

Il risultato è un corpo documentale completo, multilivello e direttamente impiegabile sia in fase di costruzione che nella successiva gestione operativa e manutentiva dell'impianto.

7.1 Realizzazione dei componenti chiave della test-facility

L'attività svolta ha condotto alla realizzazione di sette scambiatori di calore con una pressione di progetto pari a 185 bar e una pressione di collaudo pari a 265 bar; due vessel di accumulo, ad alta e bassa pressione, con pressioni di progetto pari rispettivamente a 200 e 55 bar e con pressioni di collaudo pari rispettivamente a 320 e 84.77 bar.

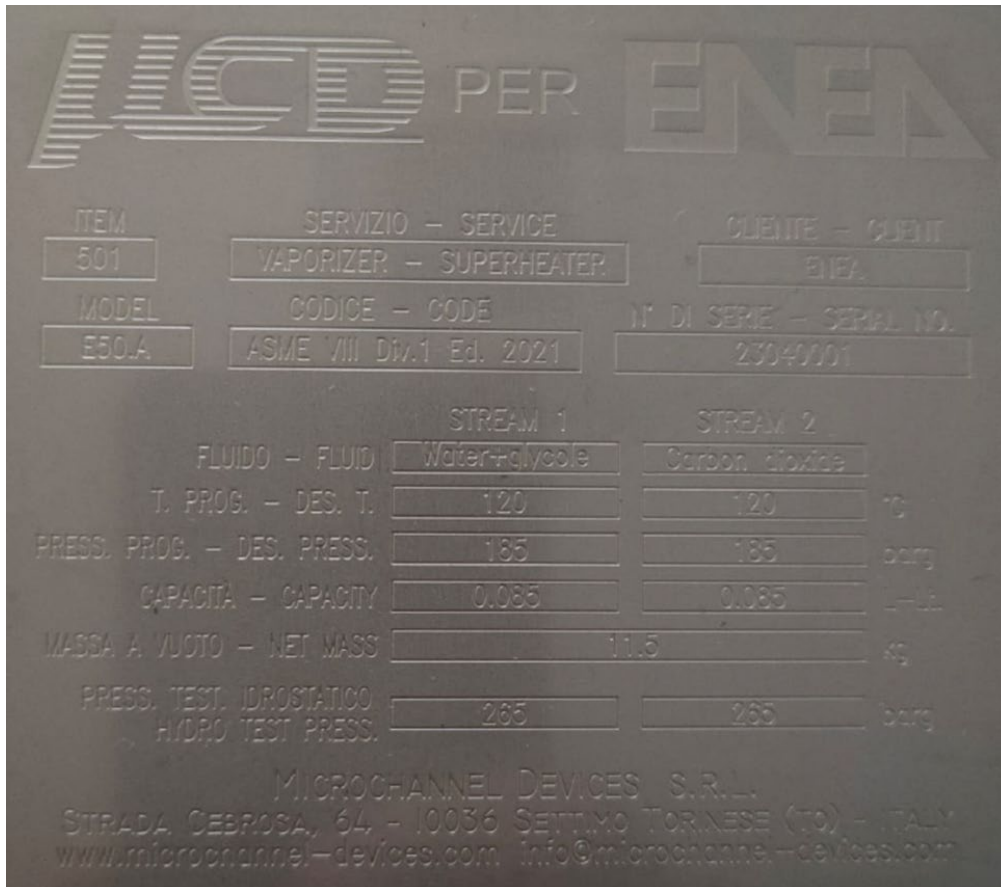


Figura 2. Targa di uno dei sette scambiatori di calore PCHE (Printed Circuit Heat Exchanger).

La fase iniziale ha previsto l'identificazione e la caratterizzazione delle condizioni operative del sistema di accumulo termico e della relativa test facility, con particolare attenzione ai regimi termici, alle pressioni di esercizio, ai fluidi coinvolti e alle interfacce funzionali con gli altri sottosistemi. A partire da tali informazioni, sono stati estrapolati i requisiti funzionali e prestazionali dei componenti customizzati, con particolare riferimento agli scambiatori di calore e ai recipienti in pressione.

Per ciascun componente realizzato è stato emesso un fascicolo tecnico (**Allegati 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29 e 30**) che è stato strutturato secondo uno standard omogeneo e validato, articolato nelle seguenti sezioni principali:

1. Descrizione generale dell'apparecchiatura
2. Requisiti essenziali di sicurezza
3. Analisi dei rischi
4. Disegni
5. Verifica strutturale

6. Manuale d'uso e manutenzione
7. Welding book
8. Piano di controllo qualità
9. Rapporto controllo qualità
10. Certificati dei materiali
11. Controlli non distruttivi
12. Report di collaudo
13. Controlli finali
14. Targa
15. Dichiarazione di conformità

La redazione di tali fascicoli ha richiesto un'approfondita attività di ingegneria di dettaglio, nonché l'interfacciamento continuo con i produttori. Il collaudo di ogni componente è stato condotto secondo protocolli EN/PED e ASME laddove applicabili, con supervisione da parte di personale ispettivo qualificato.

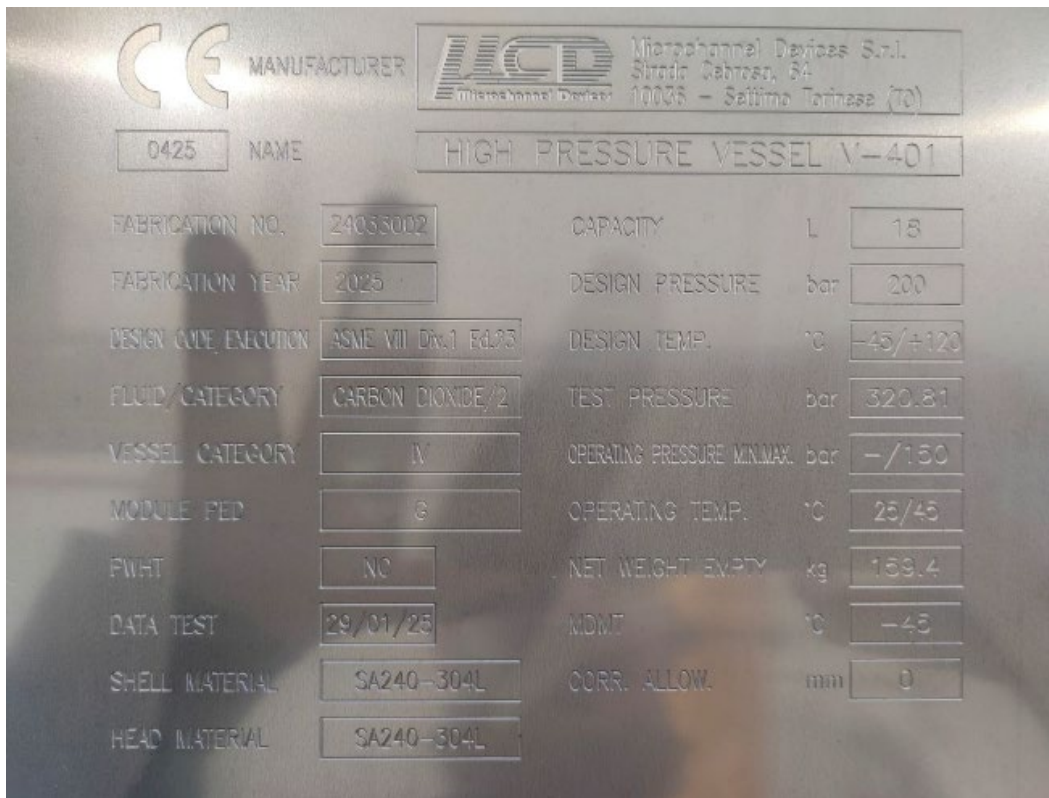


Figura 3. Targa del vessel ad alta pressione (pressione di collaudo pari a 320.81 bar).

7.2 Procurement dell'hardware del sistema di controllo

L'hardware del sistema di controllo della test-facility è stato specificato per garantire la supervisione, l'automazione e l'acquisizione dei dati in tempo reale, durante le fasi di esercizio e test. L'attività, basata sull'esperienza acquisita dalla realizzazione di una facility di complessità analoga (AGATUR), ha incluso:

- analisi dei requisiti funzionali e operativi del sistema;
- identificazione delle variabili da monitorare e controllare;

- definizione dell'architettura del sistema di controllo (PLC/cRIO, I/O remoti, moduli analogici/digitali, comunicazione ethernet/modbus);
- selezione dei moduli National Instruments (NI);
- redazione della specifica tecnica (**Allegato 33**) contenente l'elenco dei moduli NI selezionati

L'acquisizione dell'hardware è stata realizzata sulla base degli strumenti di misura già acquisiti, garantendo la compatibilità con LabVIEW Real-Time e la scalabilità per futuri upgrade dell'impianto. Il sistema è stato dimensionato per la gestione simultanea di oltre cento segnali analogici e digitali.

7.3 Procurement dei componenti commerciali e degli strumenti di misura

Per garantire la funzionalità impiantistica e il corretto interfacciamento dei dispositivi con il sistema di controllo, è stata condotta un'attività strutturata di specifica e selezione di componenti commerciali, con particolare riferimento a:

- raccorderia ad alta pressione;
- tubing in acciaio INOX;
- valvole di regolazione e intercettazione;
- trasduttori di pressione e temperatura;
- misuratori di portata.

La specifica tecnica (**Allegato 34**) è stata elaborata partendo dall'analisi delle condizioni operative (pressione, temperatura, portata, fase del fluido), dal P&ID e dalla disposizione planimetrica del layout impiantistico. È stato necessario effettuare un bilanciamento tra performance tecniche, disponibilità commerciale e compatibilità con gli standard di accoppiamento tra i componenti. La selezione dei codici articolo ha incluso un confronto tecnico-economico tra diversi fornitori internazionali.

7.4 Redazione del capitolato tecnico e dei deliverable

La redazione del capitolato tecnico ha rappresentato l'attività di sintesi e formalizzazione di tutte le specifiche progettuali, costruttive e impiantistiche relative alla realizzazione del prototipo e della sua test-facility. Il capitolato è stato strutturato in:

- sezioni descrittive (panoramica impianto, guida alla lettura, normativa di riferimento)
- 34 allegati tecnici, che comprendono disegni esecutivi, schemi funzionali, distinta materiali, modello 3D o fascicolo tecnico.

L'organizzazione e classificazione dei documenti ha richiesto una complessa attività di coordinamento interdisciplinare tra ingegneria meccanica, termotecnica, elettrica e controllo. Alcuni di questi documenti, provengono dall'attività di progettazione eseguita preliminarmente all'esecuzione del presente piano triennale¹. È stato predisposto un indice tecnico che consente l'identificazione immediata del contenuto documentale.

¹ L'attività di concettualizzazione e progettazione del dispositivo di accumulo e della sua test-facility è stata svolta preliminarmente, con risorse umane e finanziarie interne dell'ENEA non rendicontate nel presente Piano Triennale di Realizzazione.

8 Posizionamento della ricerca rispetto allo stato dell'arte internazionale

L'accumulo di energia frigorifera mediante formazione di ghiaccio ha una lunga tradizione applicativa, sia in Italia sia a livello internazionale. Le tecnologie attualmente più mature sul mercato si basano sul principio "ice-on-coil", in cui la stessa superficie (tipicamente un fascio tubiero o una piastra) viene impiegata sia per l'accumulo di ghiaccio sia per lo scambio termico. Questa configurazione, seppur consolidata, presenta una limitazione intrinseca: non consente una separazione funzionale tra i due principali parametri di progetto di un sistema di accumulo - energia e potenza - rendendo così più complessa e limitata la scalabilità e influenzando negativamente sui costi unitari in applicazioni su larga scala.

Nell'ambito dello stoccaggio elettrico *utility-scale*, l'unica tecnologia basata sull'utilizzo della CO₂ transcritica attualmente in fase pre-commerciale è rappresentata dalla "CO₂ Battery" sviluppata da Energy Dome, una un'azienda italiana di recente costituzione. Questa tecnologia condivide con la proposta di ENEA l'impiego di CO₂, ma differisce sostanzialmente per quanto riguarda il concetto di accumulo e il mezzo impiegato: nel caso di Energy Dome, il fluido è CO₂ a circa 70 bar, mentre nella soluzione ENEA si utilizza un sistema acqua/ghiaccio a pressione atmosferica.

Su scala globale, si prevede che nei prossimi trent'anni la capacità installata di fonti rinnovabili non programmabili (VRES) possa aumentare fino a 16 volte rispetto al livello attuale. Tale incremento sarà accompagnato dalla diffusione di sistemi di accumulo in grado di garantire la stabilità e la flessibilità della rete elettrica. Attualmente gli impianti di pompaggio idroelettrico rappresentano la principale tecnologia di storage, ma la loro espandibilità è limitata dalla disponibilità di siti geologicamente idonei, ormai quasi completamente sfruttati. Di conseguenza, si prevede che il loro contributo futuro all'aumento della capacità di accumulo sarà marginale.

Nel segmento *utility-scale*, le batterie agli ioni di litio costituiscono la tecnologia di riferimento per le nuove installazioni, con un'elevata penetrazione nei mercati di Cina, Corea del Sud, Giappone e Stati Uniti. Tuttavia, si osserva un'evoluzione delle esigenze applicative e dei modelli di business: superata la soglia dello 0,5% della capacità di rete, i sistemi devono fornire non solo servizi di risposta rapida (stabilizzazione della frequenza di rete), ma anche funzioni di arbitraggio energetico e gestione della capacità. Ciò ha determinato un'estensione della durata tipica dei cicli di accumulo/scarica da 2 a 4 ore, con crescente interesse verso tecnologie con durate comprese tra 8 e 24 ore.

In tale contesto, si stanno affermando alternative tecnologiche come batterie a flusso, sistemi a zinco, aria compressa (CAES), aria liquida (LAES), accumulo a CO₂ liquida e sistemi gravitazionali. Si prevede che molte di queste tecnologie diventeranno economicamente competitive nella seconda metà degli anni 2030.

In ambito nazionale, secondo il report "Electricity Market Report 2022" del Politecnico di Milano, la potenza installata da fonti rinnovabili è cresciuta da meno di 5 GW nel 2008 a oltre 33 GW nel 2021, con circa 22,5 GW di fotovoltaico e 11,3 GW di eolico. A livello normativo, la proposta di revisione della Renewable Energy Directive da parte della Commissione Europea (luglio 2021) ha fissato un obiettivo del 40% di rinnovabili sul consumo finale di energia al 2030,

successivamente portato al 45% dal Parlamento Europeo (settembre 2022) nell'ambito del piano RepowerEU.

In Italia, il mercato dei sistemi di accumulo sta evolvendo rapidamente. L'asta del Capacity Market 2024 ha assegnato circa 1,1 GW di Capacità Disponibile Programmabile (CDP) in sistemi di accumulo elettrochimico, pari al 29,7% del totale. Gli scenari congiunti Terna-Snam stimano la necessità di circa 95 GWh di nuova capacità di accumulo per centrare gli obiettivi del pacchetto "Fit-for-55", di cui 71 GWh in impianti utility-scale, 16 GWh in impianti distribuiti e 8 GWh già assegnati.

La soluzione proposta da ENEA, basata su un sistema *power-to-cold-to-power*, si colloca all'interno di questi scenari come tecnologia innovativa di accumulo *utility-scale*. Essa è progettata per il *time shifting* dell'energia e presenta le seguenti specifiche operative: potenza tra 5 e 500 MW, durata di accumulo tra 1 e 10 ore, frequenza di cicli annua tra 50 e 365, tempo di risposta inferiore a 10 minuti. Un ulteriore vantaggio è la ridotta esposizione a criticità nella *supply chain*: fatta eccezione per l'elettronica di controllo, i materiali impiegati sono essenzialmente acciaio, acqua e CO₂, tutti abbondantemente disponibili e non soggetti alle tensioni di mercato che riguardano metalli rari e tecnologie critiche per la transizione verde.

9 Eventi di disseminazione

- Workshop "RdS Prog 1.2 PTR 22-24", "LA4.9 – Progettazione delle turbomacchine di un ciclo di potenza integrato con un sistema di accumulo freddo", A. Giovannelli e G. Messina, 18 Aprile 2024.
- NanoInnovation Conference & Exhibition 2024, "Preliminary turbomachinery design of a power cycle integrated with a cold storage system", A. Giovannelli e G. Messina, 12 Settembre 2024, Roma.

10 Bibliografia

- [1] Energy Dome S.p.A. (2022). *The CO₂ Battery Technology*. - <https://energydome.com>
- [2] International Energy Agency (IEA). (2023). *Energy Storage – Tracking Clean Energy Progress*. IEA. <https://www.iea.org/reports/energy-storage>
- [3] Politecnico di Milano – Energy & Strategy Group. (2022). *Electricity Market Report 2022*. Dipartimento di Ingegneria Gestionale, Politecnico di Milano.
- [4] Commissione Europea. (2021). *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast)*, COM(2021) 557 final, 14 luglio 2021.
- [5] Parlamento Europeo. (2022). *Amendments adopted by the European Parliament on 14 September 2022 on the proposal for a directive. 2022/2008(COD)*.
- [6] Terna S.p.A. – Snam S.p.A. (2021). *Scenari di evoluzione del sistema energetico nazionale – Analisi congiunta Terna-Snam*. Roma, Italia.