

# PIANO TRIENNALE DI REALIZZAZIONE 2025-2027 DELLA RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE

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

## Tema di ricerca 1.2

### Titolo del progetto

#### Progetto Integrato Tecnologie di accumulo elettrochimico e termico

- Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile [ENEA]
- Consiglio Nazionale delle Ricerche [CNR]
- Ricerca sul Sistema Energetico [RSE]
- Università degli Studi di Catania - Dipartimento di Ingegneria Elettrica Elettronica e Informatica [UNICT DIEEI ]
- Alma Mater Studiorum Università di Bologna - Dipartimento di Chimica "Giacomo Ciamician" [UNIBO DICH RB]
- Alma Mater Studiorum Università di Bologna - Dipartimento di Chimica "Giacomo Ciamician" [UNIBO DICH SV]
- Alma Mater Studiorum Università di Bologna - Dipartimento di Chimica Industriale, Distretto Navile [UNIBO DCHIND GR]
- Politecnico di Milano - Dipartimento di Energia [POLIMI DE BZ]
- Politecnico di Torino - Dipartimento di Scienze Applicate e Tecnologia (DISAT) [POLITO DISAT FR]
- Politecnico di Torino - Dipartimento di Scienze Applicate e Tecnologia (DISAT) [POLITO DISAT LE]
- Università degli Studi di Camerino - Scuola di Scienze e Tecnologie Sezione di Chimica [UNICAM SSTCH NB]
- Università degli Studi di Foggia - Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimenti, Risorse Naturali e Ingegneria [UNIFG DAFNE]
- Università degli Studi di Messina Dipartimento di Ingegneria

- [UNIME DIML]
- Università degli Studi di Napoli Federico II - Dipartimento di Scienze Chimiche [UNINA DISCH PV]
- Università degli Studi di Palermo [UNIPA DI]
- Università degli Studi di Palermo Dipartimento di Fisica e Chimica - Emilio Segrè [UNIPA DFC]
- Università degli Studi di Pavia - Dipartimento di Chimica [UNIPV DICH QR]
- Università degli Studi di Perugia Dipartimento di Ingegneria civile ed ambientale [UNIPG DICEA]
- Università degli Studi di Roma "La Sapienza"- Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali, Ambiente [UNIRM1 DICMA DR]
- Università degli Studi di Roma "La Sapienza"- Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali, Ambiente [UNIRM1 DICMA MR]
- Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"- Centro Interdipartimentale Nanoscienze, Nanotecnologie e Strumentazione [UNIRM2 NAST]
- Università degli Studi di Roma La Sapienza - Centro di Ricerca Hydro-Eco [UNIRM1 HYECONV]
- Università degli Studi di Roma La Sapienza - Dipartimento di Chimica [UNIRM1 DICH BR]
- Università degli Studi di Roma La Sapienza - Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica [UNIRM1 DIAEERN]
- Università degli Studi di Roma La Sapienza - Dipartimento di Scienze di Base e Applicate per l'Ingegneria (SBAI) [UNIRM1 SBAISC]
- Università degli Studi di Roma Tor Vergata - Dipartimento di Fisica [UNIRM2 DIF PL]
- Università degli Studi di Roma Tor Vergata - Dipartimento di Ingegneria Industriale [UNIRM2 DIIML]
- Università degli Studi Roma Tre - Dipartimento di Ingegneria Industriale, Elettronica e Meccanica [UNIRM3 DIEM]
- Università Mediterranea della Calabria [UNIRC]
- UNIVERSITA' degli Studi di Messina-Dipartimento di ingegneria [UNIME DI DC]
- UNIVERSITA' degli Studi di Messina-Dipartimento di ingegneria

- [UNIME DICB]
- UNIVERSITA' degli Studi di Messina-Dipartimento di ingegneria [UNIME DIPR]

**Durata del progetto: 36 mesi**

**Costo proposto: 17.336.916,41 €**

## 2. DATI GENERALI DEL PROGETTO

### 2.1 Dati progetto

**Titolo del progetto**

Progetto Integrato Tecnologie di accumulo elettrochimico e termico

**Durata del progetto**

36 mesi

### 2.2 Descrizione progetto

**Abstract del progetto**

Il nuovo progetto integrato "Tecnologie di accumulo elettrochimico e termico" è strutturato per coprire i diversi segmenti della catena del valore dei sistemi di accumulo, in continuità con il precedente piano triennale di realizzazione (PTR).

Nel presente progetto si propongono attività sperimentali su due direttrici principali, entrambe fondamentali per contribuire al raggiungimento degli obiettivi previsti dal nuovo Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) entro il 2030. In primis, c'è un impegno costante nell'ottimizzazione di tecnologie già consolidate e mature, con attività mirate alla riduzione di costi operativi, al miglioramento di affidabilità e sicurezza, all'aumento delle prestazioni e curando gli aspetti di sostenibilità, rendendo così queste soluzioni sempre più competitive. Parallelamente, molte attività guardano a soluzioni di accumulo più innovative o di frontiera, capaci di contribuire nel medio-lungo termine alle crescenti esigenze energetiche derivanti dall'integrazione su larga scala di fonti rinnovabili non programmabili. Tali nuove tecnologie devono garantire non solo adeguate prestazioni in termini di capacità e durata (a confronto con le tecnologie consolidate), ma anche un impatto ambientale ridotto, in linea con i principi di sostenibilità e decarbonizzazione.

Il progetto è costituito da 5 work package (WP) all'interno dei quali si delineano le diverse Linee di Attività (LA).

Il WP1 è dedicato allo sviluppo di materiali per accumulo elettrochimico. Le attività sono rivolte alla sintesi e caratterizzazione di materiali elettrodici ed elettroliti innovativi per batterie a diverso grado di sviluppo tecnologico. Attenzione particolare è posta al miglioramento di prestazioni, sicurezza e sostenibilità di tecnologie consolidate (Li-ione gen.3 e 4) e innovative (Li-metallico, Na-ione e batterie a flusso). Altrettanti sforzi di ricerca sono rivolti a esplorare tecnologie di frontiera, per risolvere tra l'altro criticità quali la scarsa reversibilità cinetica e/o resistenza all'interfaccia di reazione. Tra le tecnologie in studio, si citano le batterie a ioni metallici diversi da Li e Na (es. Mg, Zn, Al), le batterie metallo-aria (es. Li-aria), le batterie anodeless, o i sistemi a metalli fusi. Si evidenzia che un'intensa attività di sviluppo, intrapresa da tutta la compagine progettuale, riguarda la tecnologia ritenuta più valida e strategica per il nostro Paese, quella Na-ione. In quest'ambito, le attività sono rivolte all'ottimizzazione dei materiali anodici, quali ad es. MAXphase/MXeni e hard carbon, e dei materiali catodici, quali ad es. i Nasicon e gli ossidi layered, nonché degli elettroliti liquidi, polimerici e solidi. Queste attività sulla tecnologia a ioni-Na saranno fortemente coordinate, in quanto è previsto uno scambio di materiali tra i tre affidatari per valutarne le prestazioni in semicella o monocella con il fine di ottimizzare le procedure di assemblaggio e i trattamenti e identificare un percorso comune che porti a concepire una cella completa a ioni Na di progetto.

Il WP2 si concentra sullo sviluppo di strumenti avanzati per la diagnostica, il monitoraggio e il controllo dei sistemi di accumulo elettrochimico, utilizzando sia modelli data-driven supportati dall'intelligenza artificiale che modelli fisici e chimici. L'obiettivo principale è stimare lo stato di salute (SoH) e la vita residua (RUL) delle batterie, eseguendo test in laboratorio su celle ioni Li e altre tecnologie (es. ioni Na). Le attività includono la condivisione dei dati di invecchiamento delle celle in database comuni, sviluppati e resi pubblici nel triennio precedente, che verranno arricchiti con nuovi dataset, tra cui quelli relativi agli effetti dei ripple di corrente ad alta frequenza e dei fenomeni di invecchiamento su celle second-life. In particolare, saranno condotti studi per perfezionare i modelli di invecchiamento delle celle, migliorando la comprensione dei processi che influenzano la durata e le prestazioni. I modelli saranno ottimizzati con nuovi dati raccolti dai test. Verranno sviluppati sistemi avanzati per monitorare le deformazioni meccaniche delle celle causate da cicli termici ed elettrici. Inoltre, sarà progettato un sistema di controllo attivo, che integra un convertitore, per gestire gli sbilanciamenti nei moduli di batterie second-life, ottimizzando la distribuzione dell'energia e migliorando l'affidabilità dei sistemi di accumulo.

Il WP3 si concentra su attività trasversali che riguardano le diverse tecnologie, materiali e sistemi esplorati nei WP1-2. Le principali attività includono gli studi di LCA/LCI dedicati alla produzione dei materiali sviluppati nel WP1 e nel precedente PTR. Si prevede la raccolta di dati primari per creare un inventario condiviso, coordinando i gruppi affidatari nel definire un protocollo comune. Sono incluse anche attività relative alla produzione di elettrodi, focalizzandosi su aspetti di manufacturability e sulla modellazione dei processi (con approccio digital twin). Inoltre, è proposto lo sviluppo di tecniche di caratterizzazione innovative per studiare i materiali emergenti e comprenderne meglio il comportamento in condizioni operative. Una delle principali difficoltà attuali è che le tecniche di caratterizzazione in esercizio sono poco utilizzate in modo sistematico su materiali di nuova generazione. Per migliorare la comprensione dei meccanismi di degradazione delle celle, è fondamentale approfondire la conoscenza dei materiali e dei processi di invecchiamento che portano a guasti.

Il WP4 si propone di sviluppare sistemi di accumulo termico efficienti e sostenibili. Le sfide principali includono: l'uso di materiali ad elevata densità energetica per ridurre gli ingombri, la creazione di materiali resistenti e ciclabili per migliorare stabilità e durata, la progettazione di sistemi che si adattino rapidamente alla velocità di carica/scarica e la riduzione dei costi con soluzioni a basso impatto ambientale. Le attività si concentreranno su diversi intervalli di temperatura: 1) Bassa temperatura (<0°C a T amb): sviluppo e test di un prototipo con ciclo di potenza e sistema di accumulo freddo (CO<sub>2</sub> trans-critica) integrati; sistemi ATES, che accumulano energia termica nel sottosuolo tramite iniezioni ed estrazioni di acqua calda e fredda negli acquiferi; ottimizzazione di materiali e processi di accumulo termochimico per il riscaldamento degli edifici. 2) Media temperatura (< 300°C): accumuli termochimici con zeoliti, sia commerciali sia sintetizzate per adattarsi a diverse condizioni operative; materiali cementizi per accumulo termico che assorbono calore tramite fluido termico o induzione elettrica; verifica della stabilità di moduli compositi di materiali cementizi e nitrati attraverso prove di lunga durata. 3) Alta temperatura (< 900°C): studio di materiali a cambiamento di fase per calore latente, selezionati per le loro proprietà termiche, sicurezza e disponibilità; sperimentazione di accumuli termochimici ibridi, alimentati da energia rinnovabile, con sintesi di materiali e prove su reattori prototipali.

Il WP5 è dedicato alle attività di gestione e comunicazione interna al progetto, disseminazione dei risultati e coinvolgimento degli stakeholder, attraverso l'organizzazione di eventi, seminari e workshop. È anche importante il lavoro svolto dai tre affidatari nelle iniziative internazionali, europee e nazionali che riguardano i sistemi di accumulo elettrochimico e termico.

L'obiettivo finale del progetto è fungere da catalizzatore per lo sviluppo e l'innovazione di materiali e tecnologie d'accumulo, con un focus primario sul miglioramento di prestazioni, sicurezza e sostenibilità. Grazie all'approccio integrato e alla sinergia tra i diversi settori coinvolti, il progetto agirà come volano per accelerare lo sviluppo di tecnologie capaci di rispondere alle esigenze di un mercato globale in continua evoluzione.

### Abstract del progetto ENG

The new integrated project "Electrochemical and thermal storage technologies" is structured to cover the different segments of the storage systems value chain, in continuity with the previous three-year implementation plan (PTR).

This project proposes experimental activities along two main lines, both of which are essential to contribute to achieving the objectives set by the new National Integrated Plan for Energy and Climate (PNIEC) by 2030. There is a constant commitment to optimizing already consolidated and mature technologies, with activities aimed at reducing operating costs, improving reliability and safety, increasing performance and taking care of sustainability aspects, thus making these solutions increasingly competitive. At the same time, many activities look at more innovative or cutting-edge storage solutions, capable of contributing in the medium-long term to the growing energy needs resulting from the large-scale integration of non-programmable renewable sources. These new technologies must guarantee not only adequate performance in terms of capacity and duration (compared to consolidated technologies), but also a reduced environmental impact, in line with the principles of sustainability and decarbonization.

The project consists of 5 work packages (WP) within which the different Activity Lines (LA) are outlined.

WP1 is dedicated to the development of materials for electrochemical storage. The activities focus on the synthesis and characterization of innovative electrode materials and electrolytes for batteries at various stages of technological development. Special attention is given to improving the performance, safety, and sustainability of established technologies (Li-ion gen.3 and 4) and innovative technologies (Li-metal, Na-ion, and flow batteries). At the same time, significant research efforts are directed toward exploring frontier technologies to address critical issues such as poor kinetic reversibility and/or resistance at the reaction interface. Among the technologies being studied are metal-ion batteries beyond Li and Na (e.g., Mg, Zn, Al), metal-air batteries (e.g., Li-air), anodeless batteries, and molten metal systems. It is important to note that a major development effort, undertaken by the entire project team, focuses on Na-ion technology, which is considered one of the most promising and strategically important for our country. In this context, the activities aim to optimize anode materials such as MAXphase/MXeni and hard carbon, and cathode materials like Nasicon and layered oxides, as well as liquid, polymeric, and solid electrolytes. The activities on Na-ion technology will be strongly coordinated, with material exchanges planned between the three G.A. to assess their performance in half-cell or single-cell configurations. The goal is to optimize assembly procedures and treatments and to identify a common path that will lead to the development of a complete Na-ion cell within the project.

WP2 is dedicated to the development of advanced tools for the diagnostics, monitoring, and control of electrochemical storage systems. These tools will combine data-driven models, supported by artificial intelligence, with physical and chemical models. The primary objective is to estimate the State of Health (SoH) and the Residual Useful Life (RUL) of batteries by conducting laboratory tests on Li-ion cells and other technologies, such as Na-ion. The activities will involve sharing aging data for cells through common databases, which were developed and made public in the previous PTR, and will be updated with new datasets. These will include data on the effects of high-frequency current ripples and aging phenomena in second-life cells.

Research efforts will focus on refining cell aging models to enhance the understanding of processes that impact battery lifetime and performance. These models will be further optimized using new data collected from tests. Additionally, advanced systems will be developed to monitor mechanical deformations of cells, particularly those caused by thermal and electrical cycles. Furthermore, an active control system, integrated with a converter, will be designed to manage imbalances in second-life battery modules, optimizing energy distribution and improving the overall reliability of storage systems.

WP3 focuses on cross-cutting activities that span the different technologies, materials, and systems explored in WP1 and WP2. The main activities include Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Inventory (LCI) studies, which are dedicated to evaluating the production of

materials developed in WP1 and in the previous PTR. Primary data collection is planned to create a shared inventory, with task forces working together to define a common protocol.

The project also includes activities related to electrode production, with an emphasis on manufacturability aspects and process modeling using a digital twin approach. In addition, the development of innovative characterization techniques is proposed to study emerging materials and better understand their behavior under operational conditions. One of the current challenges is that operando characterization techniques are not systematically applied to next-generation materials. To enhance the understanding of cell degradation mechanisms, it is crucial to deepen the knowledge of materials and aging processes that ultimately lead to failure.

WP4 focuses on the development of efficient and sustainable thermal storage systems. The key challenges include the use of high-energy density materials to reduce volume, the creation of durable and cyclable materials to enhance stability and lifespan, the design of systems that can quickly adapt to varying charge/discharge rates, and the reduction of costs with environmentally friendly solutions. The activities will target different temperature ranges: 1) Low Temperature (<0°C to T ambient): Development and testing of a prototype with an integrated power cycle and cold storage system (trans-critical CO<sub>2</sub>); ATEs (Aquifer Thermal Energy Storage) systems, which store thermal energy underground through the injection and extraction of hot and cold water in aquifers; optimization of thermochemical storage materials and processes for building heating. 2) Medium Temperature (<300°C): Thermochemical storage using zeolites, both commercial and synthesized to suit various operating conditions; cementitious materials for thermal storage, which absorb heat through thermal fluid or electrical induction; long-term tests to verify the stability of composite modules made from cementitious and nitrated materials. 3) High Temperature (<900°C): Study of phase change materials for latent heat storage, selected for their thermal properties, safety, and availability; testing of hybrid thermochemical storage powered by renewable energy, including the synthesis of materials and testing of prototype reactors.

WP5 is dedicated to the management and internal communication of the project, as well as the dissemination of results and stakeholder engagement through the organization of events, seminars, and workshops. The collaboration of the three G.A. in international, European, and national initiatives related to electrochemical and thermal storage systems is also crucial.

The primary goal of the project is to serve as a catalyst for the development and innovation of storage materials and technologies, with a strong emphasis on enhancing performance, safety, and sustainability. Through its integrated approach and the synergy between the different sectors involved, the project will act as a driving force to accelerate the development of technologies capable of meeting the demands of a rapidly evolving global market.

## 2.3 TRL progetto

TRL iniziale: 3

TRL finale: 5

I valori di TRL assegnati sono da intendersi come valori medi di progetto, ossia il TRL iniziale medio e il TRL finale medio sono calcolati come media pesata di tutte le LA dell'intero progetto. Tuttavia, alcune attività si discostano dai valori segnalati o perché più di frontiera (TRL iniziale e finale più bassi, come nel caso di alcuni materiali per accumulo elettrochimico e termico in cui lo sviluppo è stato solo formulato e non si trova riscontro sperimentale in letteratura) o perché più mature (TRL iniziale e finale più alti, come nel caso di alcuni prototipi di accumulo termico di taglia sufficientemente grande da considerarsi adatti all'installazione in ambiente - industrialmente - rilevante).

Inoltre, si è considerato il TRL di solo quelle attività che ambiscono a produrre manufatti, prototipi, impianti pilota. Per le attività i cui prodotti sono software, analisi e studi non è stato definito un TRL.

Si rimanda ai singoli WP per una definizione più puntuale del TRL, dove possibile.

## 2.4 Inquadramento del progetto nello stato dell'arte

### a) Stato dell'arte nazionale e internazionale relativamente alle attività previste nel progetto

Un'analisi dettagliata dello stato dell'arte delle tecnologie sviluppate nel presente progetto integrato è riportata nella descrizione delle singole LA. In questa sezione generale è riportato, invece, un inquadramento del progetto rispetto alle azioni europee e internazionali in corso, considerate strumenti di indirizzo delle esigenze di sviluppo dei sistemi d'accumulo, condivise nel definire le LA del presente progetto. È riportata, anche, un'analisi dello stato dell'arte ad alto livello per macroaree.

Le attività proposte all'interno del progetto integrato sono totalmente in linea con i nuovi target europei sul clima dettati dal GREEN

DEAL, rivolti al raggiungimento della neutralità climatica al 2050, contribuendo ad accelerare di fatto il processo di decarbonizzazione. Alla luce degli ultimi accadimenti politici ancora in atto, tutti i paesi europei stanno velocizzando il processo di transizione verso l'impiego sempre più massivo di fonti energetiche rinnovabili non programmabili e con esse, anche il processo di ottimizzazione e diversificazione delle tecnologie di accumulo a supporto e integrazione delle stesse; quindi l'impiego dei sistemi di accumulo diventa più che mai inderogabile dovendo essere garantiti stabilità, continuità e sicurezza della fornitura dell'energia elettrica.

Anche la crescente elettrificazione dei trasporti genera la necessità di sviluppo di sistemi d'accumulo con maggiore esigenza di prestazioni in termini di capacità e vita utile, se pensati come propulsori dei veicoli elettrici, o in termini di affidabilità e flessibilità, se pensati come aiuto alla rete per il sovraccarico dovuto alla ricarica dei veicoli.

Secondo le stime aggiornate (Bloomberg, 1H 2023 Energy Storage Market Outlook, 2023.), la capacità globale di accumulo energetico ha subito un notevole incremento negli ultimi anni. Nel 2024, si prevede che la nuova capacità installata supererà i 100 GWh, con un aumento del 76% rispetto all'anno precedente, pari a oltre 69 GW di potenza e 169 GWh di capacità.

Per quanto riguarda la distribuzione per tecnologia, l'accumulo idroelettrico a pompaggio (PHES) continua a rappresentare la maggior parte della capacità installata: secondo l'International Energy Agency (IEA, Energy Technology Perspectives, 2023) gli accumuli idroelettrici globali arrivano a circa 160 GW a livello mondiale, di cui 50 GW in Europa. Si prevede che entro il 2026, a livello globale, si raggiungerà quota 201 GW con la crescita più attesa in Asia (47%) e solo una crescita limitata in Europa (5%), in quanto tale tecnologia risulta già ampiamente sfruttata nel vecchio continente (IEA, Renewables 2021 - Analysis and forecast to 2026, 2021).

Per quanto riguarda le batterie al litio, come riportato nello studio di Terna di Agosto 2023, nel mondo sono installate circa 16 GW/35 GWh (Bloomberg, 1H 2023 Energy Storage Market Outlook, 2023.) di impianti utility-scale e le previsioni stimano un target di 63 GW al 2026; a livello europeo, nel 2021 si segnalano circa 4,6 GW/7,7 GWh di installato. Inoltre, la capacità globale installata delle batterie Li-Ion per tutte le applicazioni (e-mobility, elettronica, accumulo residenziale, UPS, ecc.) raggiunge circa 1.500 GWh (S&P Global Mobility su dati "IHS market", 2022). Solo nel 2022, si sono raggiunti i 700 GWh/anno (McKinsey, Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular, 2023) di produzione globale di celle al litio (a copertura anche del settore della mobilità elettrica), con vari player attivi sul mercato da più di 10 anni.

Tutte le altre tecnologie di accumulo mostrano un livello di installato globale di ordini di grandezza inferiore rispetto a batterie al litio e pompaggi. I sistemi ad aria compressa, tradizionali e innovativi, presentano una capacità installata di 0,5 GW (Bloomberg, Beyond Lithium-ion long duration storage technologies, 2022); l'insieme delle batterie basate su chimiche diverse da Li-Ion raggiunge una capacità installata di 0,9 GW (Bloomberg, Beyond Lithium-ion long duration storage technologies, 2022, e BASF, Stationary Energy Storage); gli accumuli con Flywheel installati risultano circa 0,9 GW (Frost & Sullivan, Future Developments for Global Energy Storage, 2020).

Questi sviluppi evidenziano una crescita significativa nel settore dell'accumulo energetico, con un aumento della capacità installata e una diversificazione delle tecnologie utilizzate a livello globale.

Nel settore dell'accumulo elettrochimico (AE) sono nate importanti azioni comunitarie per favorire tecnologie "made in Europe", efficienti, sostenibili e di rapida implementazione per rispondere all'imminente crescita del mercato. Allo scopo di aumentare la competitività dell'industria europea è nata nel 2017 l'iniziativa comunitaria European Battery Alliance (EBA), atta a far crescere la capacità produttiva, favorendo la creazione di giga-factory europee per la produzione di batterie a ioni litio per applicazioni automotive e stazionarie. L'iniziativa si sta scontrando con uno dei principali problemi legati allo sviluppo del settore, comune a tutte le tecnologie della doppia transizione (ecologica e digitale): il problema delle materie prime critiche, la cui catena di approvvigionamento è al momento fuori dal controllo dell'Europa. La Cina è il principale fornitore di numerosi minerali critici e detiene un quasi-monopolio sulla loro trasformazione-raffinazione. Nel 2024 è stato emesso il Regolamento Europeo 2024/1252 (Critical raw Material Act) che pone obiettivi sfidanti su capacità estrattiva, di trasformazione e di riciclaggio, nonché impone di diversificare le importazioni, per garantire un approvvigionamento sicuro e sostenibile di materie prime critiche. Contestualmente, sono in corso diverse iniziative europee di ricerca e innovazione per stendere roadmap e piani di implementazione sui sistemi di AE del prossimo futuro e per definire opportuni strumenti di finanziamento: l'evoluzione nel medio-lungo termine è rivolta verso batterie di nuova concezione, costituite non solo da nuove chimiche, ma anche basate su nuovi meccanismi di funzionamento (es: sistemi a conversione, stato solido) e materiali alternativi, meno costosi e a ridotto impatto sociale ed ambientale. Esiste una specifica partnership Horizon rivolta allo sviluppo delle batterie tra la EC e

l'associazione Batteries European Partnership Association (BEPA). I working group dell'associazione coprono l'intera catena del valore delle batterie. Inoltre, si sono concretizzate azioni di medio-lungo termine a vantaggio della ricerca, come Battery2030+ e la European Energy Research Alliance (EERA), il cui Joint Programme Energy Storage (JP ES) propone un confronto scientifico sulle diverse tipologie di accumulo, inclusi quelli elettrochimico e termico.

Il presente progetto propone sviluppi tecnologici sull'intera catena del valore, partendo dai risultati conseguiti dal passato triennio RdS 2022-2024 e considerando i recenti sviluppi del settore.

In particolare, i tre enti porteranno avanti azioni di sviluppo materiali di AE (WP1) sulle seguenti macroaree:

Batterie Li-ione (LIB) e Li-metallico. La tecnologia delle LIB si può ancora considerare la tecnologia regina per quanto riguarda l'accumulo elettrochimico. Tra le diverse chimiche utilizzate, ad oggi, le batterie Li-ione sono quelle con il maggiore grado di maturità e che presentano la maggiore densità di energia e di potenza (ad esempio, 250 Wh/Kg per le LIB contro 150 Wh/Kg per le ioni-sodio). La predominanza delle LIB sul mercato per le applicazioni sia veicolari che stazionarie le rende comunque un argomento chiave della ricerca sull'accumulo elettrochimico. Per questo motivo sono ancora molti gli sforzi dedicati a migliorare le prestazioni, la sicurezza e la sostenibilità di tali batterie. Al momento, la tecnologia più matura e assestata riguarda ancora le batterie con elettrolita liquido e con materiali catodici e anodici "classici" come LFP e Grafite. L'innovazione industriale è rivolta verso materiali che mirano ad aumentare le prestazioni di cella: materiali catodici ad alto potenziale (NMC) e la miscela di Si e grafite all'anodo. Tuttavia, nel loro stato attuale, tali sistemi rappresentano solo una soluzione a breve termine a causa di alcune limitazioni intrinseche che le contraddistinguono tra cui il costo elevato, l'utilizzo di materie prime critiche come il litio o il cobalto e prestazioni ancora migliorabili. Un ulteriore fattore che ancora deve essere migliorato nelle LIB è sicuramente la sicurezza. In questa direzione vanno gli studi sulle batterie allo stato solido o che utilizzano elettroliti intrinsecamente sicuri e che porteranno nel futuro a poter utilizzare all'anodo il Li metallico. Grossi sforzi di ricerca e innovazione sono volti anche verso l'utilizzo di nuovi concetti (come le batterie anodeless e cioè inizialmente senza materiale anodico sull'elettrodo negativo) o di additivi autoriparanti per mantenere le prestazioni e la sicurezza dei componenti delle celle. Questi additivi, insieme all'utilizzo di sensori smart, potrebbero allungare la vita delle batterie in maniera significativa migliorandone la sicurezza e la sostenibilità.

Batterie sodio-ione (NIB), tecnologia complementare alle LIB che dovrebbe supportare l'elevata richiesta di batterie stazionarie. L'attenzione alle NIB si origina sia dal fatto che si basino su meccanismi di accumulo simili a quelli per le LIB sia perché, in ottica industriale, lo sviluppo di nuovi impianti automatizzati potrebbe originarsi da una facile conversione di quelli esistenti per la produzione di LIB. Proprio per queste ragioni, si susseguono gli annunci di come alcuni dei principali player mondiali per lo sviluppo di LIB (es: CATL, SVolt, etc) abbiano aperto linee di produzione di accumulatori NIB. Rispetto alle LIB, le NIB godono di alcuni vantaggi intrinseci come: i) l'utilizzo del sodio che è presente ben distribuito a livello globale, ii) l'impiego del solo alluminio per la produzione di elettrodi, evitando la richiesta del costoso e pesante rame indispensabile negli anodi in presenza di litio e, iii) la possibilità di scaricare a 0 V i dispositivi (ottimale per la sicurezza durante il trasporto). Dall'altra parte, le prestazioni di accumulo e la produzione su larga scala delle NIB sono estremamente correlate a un costante e progressivo miglioramento dei materiali utilizzati sia nel comparto anodico, quello più critico, che in quello catodico. Infatti, se da una parte la diffusione di massa delle LIB passa dal fatto che, almeno in uno dei due comparti, quello anodico, si possa utilizzare un materiale presente in natura come la grafite, dall'altra, nelle NIB, le chimiche ottimali per i materiali attivi sono tutte da consolidare. Guardando nello specifico al comparto anodico, il materiale più diffuso per lo sviluppo di celle complete è noto come Hard Carbon (HC) e sarà oggetto di studio in diverse LA di questo progetto triennale. Purtroppo, il processo di produzione oltre a manifestare scarse rese (<25-30%) è intrinsecamente complesso da controllare in quanto, sono numerosi i parametri che giocano un ruolo fondamentale nelle prestazioni di accumulo finale. Sia a livello del singolo parametro che di correlazioni tra questi, esiste solo una parziale/scarsa comprensione su come i vari aspetti/fasi del processo concorrano al risultato finale. Da qui trae origine il fatto che gli HC sono identificati in una famiglia di materiali con prestazioni di accumulo che abbiano una forchetta molto ampia di capacità che va da 100 a 200 mAh/g, per processi più convenzionali implementabili anche su scala industriale, fino ai 300-400 mAh/g per prototipi di laboratorio da realizzarsi con protocolli di preparazione molto complessi. Poiché a livello dei materiali catodici più consolidati per NIB si hanno capacità specifiche teoriche non superiori ai 120-170 mAh/g, la ricerca di materiali anodici ad elevate prestazioni, se da una parte è auspicabile, dall'altra non è strettamente vincolante per un rapido sviluppo di questa tecnologia. Per questo la ricerca del presente

progetto prevede lo sviluppo anche di altri materiali anodici per NIB.

In merito al materiale catodico per batterie NIB, tre differenti famiglie sono attualmente oggetto di sviluppi tecnologici, di cui di seguito si riassumono i principali vantaggi e difetti riscontrati in letteratura: 1) Ossidi. Pro: buona cinetica di trasporto e alte capacità teoriche; Contro: scarsa stabilità durante le lunghe ciclazioni; 2) Polianioni. Pro: struttura stabile e potenziali di lavoro alti; Contro: bassa capacità teorica e bassa densità energetica; 3) PBA (Prussian Blue Analoghi). Pro: struttura stabile e molti siti di intercalazione; Contro: le vacanze nella struttura cristallina riducono le prestazioni della batteria, poiché influenzano la migrazione degli ioni sodio all'interno del materiale, in aggiunta i PBA sono generalmente tossici e con un forte impatto ambientale a livello di produzione. I tre enti stanno lavorando sulle soluzioni più promettenti, cercando di affrontare i problemi sopracitati e affrontando anche lo sviluppo dell'elettrolita più adatto, in quanto impatta sulle prestazioni dei materiali sia anodici, sia catodici.

Nuove generazioni di batterie post-litio. All'interno del progetto un'ampia attività è dedicata allo studio delle tecnologie di accumulo post-litio, ovvero quelle tecnologie di frontiera ancora in una fase embrionale della ricerca, ritenute altrettanto strategiche in un'ottica di diversificazione energetica, in grado di collocarsi sul mercato emergente come prive di limitazioni legate alla disponibilità delle materie prime, ai costi e agli impatti ambientali. Nello specifico, saranno investigate batterie agli ioni di magnesio, calcio, alluminio, zinco, ma anche batterie metallo-zolfo (es. Li-S, Mg-S), tutte tecnologie che offrono vantaggi in termini di sicurezza e densità energetiche, potenzialmente elevate; di contro ancora esistono criticità legate alla lenta cinetica di reazione, alla bassa stabilità degli elettroliti e alla bassa mobilità ionica, nonché resistenza all'interfaccia di reazione. Pertanto, l'attività sarà fortemente incentrata sulla risoluzione delle criticità esistenti in un'ottica di ottimizzazione e superamento delle stesse al fine di renderle disponibili su larga scala con obiettivi che pertanto si configurano a lungo termine.

Sono previste azioni di sviluppo di sistemi di AE (WP2) sulle seguenti macroaree:

Diagnostica e monitoraggio. La caratterizzazione e la modellazione dei sistemi di accumulo sono fondamentali per la loro gestione. La letteratura propone diversi modelli elettrici, termici e di degrado per le celle. La modellazione può essere estesa ai moduli, trattandoli come celle equivalenti o considerando la connessione fisica tra le celle. Recentemente, la ricerca si è concentrata su tecnologie con materiali più abbondanti ed economici per lo sviluppo di batterie; tra queste, la tecnologia agli ioni sodio è considerata l'opzione più promettente. È fondamentale applicare a queste nuove celle le metodologie sviluppate per il litio, per caratterizzarle e gestirle in modo efficace.

Sistemi di controllo e Second-life. Il riutilizzo delle batterie a fine vita da una prima vita veicolare in applicazioni meno esigenti, come quelle stazionarie, è promosso dall'Unione Europea al fine di ridurre l'impatto ambientale e incentivare l'economia circolare. Tuttavia, la sfida principale è la valutazione dell'invecchiamento delle batterie in assenza di dati sulla loro prima vita. Una soluzione è utilizzare test diagnostici per comprendere i meccanismi di degrado. Inoltre, è essenziale identificare le applicazioni più adatte per le batterie second-life e sviluppare metodi di gestione efficaci. L'impiego di Modular Multilevel Converter (MMC) connessi alla rete, che fungano anche da BMS attivi, rappresenta una promettente applicazione e, in generale, l'utilizzo di BMS attivi in grado di adattare il loro funzionamento al progressivo degrado delle celle è un ambito di sviluppo del presente progetto.

Nel progetto sono previste attività cosiddette trasversali, alcune integrate direttamente nei WP1 e WP2, perché direttamente funzionali alle attività presenti in tali WP, mentre altre sono considerate a sé stanti e per questo inserite nel WP3. Tali attività trasversali possono essere suddivise nelle seguenti macroaree:

Sostenibilità ambientale (LCA) ed economica (LCC), e aspetti socioeconomici. L'analisi del ciclo di vita (Life Cycle Assessment, LCA) è uno strumento fondamentale per valutare l'impatto ambientale delle batterie di nuova generazione metallo-ione (Al, Zn, Ca ecc.) e metallo-zolfo (Li-S, Mg-S ecc.), nonché quella ritenuta strategica dai tre gruppi affidatari, ovvero la sodio-ione. In un'ottica di sostenibilità e non solo di efficienza e prestazione della tecnologia, questo approccio rappresenta uno strumento essenziale in grado di analizzare ogni fase della vita di una batteria, dalla selezione delle materie prime fino al riciclo o smaltimento, con l'obiettivo di individuare soluzioni più sostenibili e ottimizzare la catena del valore. Essendo tecnologie emergenti, ben poca è la conoscenza degli impatti dei materiali per la specifica utilizzazione; il popolamento dei database con dati e metadati è ai suoi inizi. Ogni tecnologia offre vantaggi e svantaggi che necessitano di studi ed approfondimenti a partire dalla valutazione delle tecniche di estrazione, della resa dei processi e/o della difficoltà estrattiva; in questo ad es. analisi LCA aiutano a identificare le fonti più sostenibili e a ridurre il consumo di acqua e energia in un'ottica di riduzione dell'impatto ambientale. Una scelta più consapevole sui materiali nasce grazie al supporto di metodologie di comparazione che tengono conto non solo di input di letteratura ma soprattutto si arricchiscono grazie al popolamento fornito dai dati sperimentali offerti dalle attività di progetto.

Strumenti computazionali a servizio del progetto. Studi computazionali dei materiali (per definire nuove formulazioni), delle interfacce (per la comprensione dei principali meccanismi che avvengono all'interfaccia elettrodo-elettrolita), dei processi (per simulare il funzionamento di un dispositivo), nonché la modellistica applicata alle analisi ambientali ed economiche (per stimare impatti ambientali ed economici), saranno di aiuto per comprendere i meccanismi interni alla batteria. Questa modellistica è ancora in una fase preliminare di apprendimento. Diversi gruppi di ricerca a livello nazionale, europeo e internazionale stanno implementando strumenti modellistici per simulare meccanismi di funzionamento di un dispositivo, dalla scala nano-micro (per comprendere e predire ad esempio i meccanismi di degrado, o per studiare a livello numerico nuove formulazioni, o per simulare uno sforzo meccanico dovuto a fenomeni di alligazione), alla scala macro (per simulare ad esempio il funzionamento di un controllo). Il progetto si propone di implementare studi computazionali ai vari livelli elencati, allo scopo di accelerare la ricerca sullo scouting dei materiali, sulla comprensione di un fenomeno fisico, sull'implementazione di algoritmi di diagnostica e controllo.

Materie prime. Come già dichiarato in precedenza, lo sfruttamento delle materie prime è uno dei punti deboli della sostenibilità delle batterie e in particolare delle LIB. Si è creato un grosso interesse verso lo sfruttamento di risorse locali (nazionali o europee) e, per questo, già nei precedenti PTR sono state portate avanti attività riguardanti la disponibilità di litio in Italia. In questo progetto prosegue l'attività con un caso specifico (un caso studio) di valutazione del potenziale di Litio naturale, con l'analisi di carotaggi in zona Casaccia (sede di ENEA). Lo studio potrà essere utile, tra le altre cose, come approfondimento sito-specifico degli studi sulle potenzialità geominerarie condotti nel progetto P1.4 "Materiali e dispositivi di frontiera per applicazioni energetiche". L'interazione tra i due progetti è descritta nel successivo paragrafo d) "Eventuali collegamenti con altri progetti relativamente alle attività previste nel progetto".

Caratterizzazione avanzata. A livello globale ed europeo, la comunità scientifica sta focalizzando sempre di più l'attenzione sulla necessità di affinare le tecniche di caratterizzazione ad alte prestazioni, come l'uso della luce di sincrotrone, applicandole in particolare alle batterie. Questo argomento apre la strada a numerosi aspetti, tra cui la standardizzazione dei set-up e degli ambienti di campionamento, nonché l'uso di piattaforme per la ricerca accelerata di nuovi materiali, come il progetto "IEMAP" di Mission Innovation recentemente concluso. Una caratterizzazione sistematica, che copra tutte le dimensioni dei dispositivi (dal nano al macro), può infatti contribuire a una migliore comprensione dei meccanismi alla base della degradazione dei materiali, e di conseguenza della perdita di prestazioni e sicurezza. Recentemente, sono emerse diverse iniziative in Europa che affrontano questa tematica da prospettive diverse: ad esempio, all'interno di Battery2030+ e nel progetto LEAPS-INNOV, che unisce tutti i sincrotroni d'Europa.

In merito all'AT, l'International Energy Agency (IEA) è particolarmente attiva con progetti a diverse temperature utili per utenze domestiche e industriali, che spaziano dalla flessibilità, allo sviluppo di materiali utili per lo sfruttamento del calore latente o di reazioni termochimiche, nonché a soluzioni in grado di accumulare calore sia termico che elettrico o a grandi stoccaggi per District Heating, con attenzione anche ai modelli economici per verificarne la loro convenienza e sostenibilità. Sono, inoltre, in corso diverse iniziative europee, tra cui EERA JP Energy Storage che ha un sub programme dedicato all'accumulo termico.

Nel contesto dell'accumulo di energia frigorifera mediante ghiaccio, i sistemi industriali attualmente disponibili, sia in Italia che a livello internazionale, sono principalmente "ice-on-coil". Questi utilizzano la stessa superficie di scambio per trasferire calore e accumulare ghiaccio, comportando l'impossibilità di rendere indipendenti i due parametri fondamentali dei sistemi di accumulo: energia e potenza. Esistono studi che propongono soluzioni (tra cui una proposta nel presente progetto) che consentano di separare i due parametri, migliorando la flessibilità operativa e permettendo una scalabilità più efficiente e competitiva.

Nel contesto dell'accumulo a bassa temperatura, è considerata tecnologia promettente quella termochimica che è in grado di garantire elevate densità energetiche e ridotte perdite di calore nel tempo. Gli studi si stanno concentrando sui materiali assorbenti, sui compositi degli stessi con supporti porosi e su materiali innovativi porosi che possono fungere sia da materiale attivo che da supporto (es. MOF).

In merito ai grandi sistemi di accumulo in acquifero (ATES), attualmente sono ampiamente diffusi in nord Europa, con più di 2500 impianti installati; recentemente è stato predisposto un piano per l'installazione di un impianto in Italia nel sito dimostrativo di Riva del Garda (TN), grazie all'avvio del progetto europeo (USES4HEAT), ma si tratta di studi sito-specifici.

Riguardo alla media temperatura, notevole interesse è riposto nello sviluppo di sistemi di accumulo termochimico (TCES) basato sul processo reversibile di adsorbimento di vapori su solidi porosi. Fino a 200°C; il TCES offre una capacità di stoccaggio a lunghissimo termine che permette di raccogliere energia solare o cascami termici industriali durante la stagione estiva, che saranno poi sfruttabili nei mesi invernali.

Studi su materiali a cambiamento di fase sono in corso per le diverse temperature in particolare per sviluppo materiali e componenti di scambio termico per aumentarne la diffusività nonché per accoppiamento con altri PCM e/o con sistemi a calore sensibile per migliorare la gestione della temperatura del calore all'utilizzatore ed aumentare la densità di energia. Sistemi che utilizzano materiali a basso costo, quali miscele cementizie iniziano ad essere commerciali, ma necessitano di un miglioramento della capacità termica, nella stabilità del materiale e nella minimizzazione degli scambiatori interni per l'accoppiamento con il produttore di energia e l'utente.

Sull'accumulo termochimico ad alta temperatura, ci si sta focalizzando su più fronti: i) materiali innovativi, ii) sviluppo della configurazione e dei componenti d'impianto, con particolare attenzione al reattore e iii) integrazione ottimale del processo con l'utenza termica servita.

#### **b) Attività svolte nel triennio precedente**

CNR, ENEA e RSE svolgono da diversi anni attività di ricerca rivolta allo sviluppo tecnologico di sistemi di AE e AT, fino al 2021 indipendentemente attraverso propri piani di sviluppo individuali, con il triennio 2022-2024 attraverso lo sviluppo di progetti integrati.

Nel precedente progetto PTR 22-24, le attività dei 3 gruppi affidatari (g.a.) sono state indirizzate verso lo sviluppo tecnologico dei sistemi d'accumulo (SdA) elettrochimico (AE) e termico (AT) lungo tutta la catena del valore, secondo un approccio multidisciplinare, multisettoriale e multi-obiettivo.

In merito allo sviluppo di materiali per l'AE, il progetto PTR 22-24 ha implementato attività sperimentali di ottimizzazione di SdA più maturi a base di ioni-litio, di materiali ad alte prestazioni e sostenibili per tecnologie ioni-litio di nuova generazione (GEN3-4), Li-aria e litio metallico, nonché post-lithium, quali Na-aria, Mg-ione. Un particolare segmento di interesse per i tre enti affidatari è rappresentato dalle batterie a ioni-sodio e ha riguardato lo sviluppo di materiali innovativi di anodo, catodo ed elettrolita.

Sempre relativamente all'AE nel precedente triennio erano presenti attività indirizzate allo sviluppo di sistemi, con la realizzazione di modelli di invecchiamento per batterie agli ioni di litio con diversi chimismi, tenendo conto di diversi fattori di stress e del comportamento durante la loro second-life. I modelli sono stati applicati a strumenti di diagnostica per la valutazione dello stato di salute (State of Health - SoH) e della vita residua (Residual Useful Life - RUL) delle batterie in esame. Lo sviluppo riguardava anche gli strumenti di controllo attivi di sistemi stazionari con moduli second-life. Tra questi è stato definito e sviluppato un digital twin di una batteria litio-ioni, utilizzando tecniche di online learning per l'aggiornamento dei parametri in tempo reale.

In seno a tali attività, i tre enti hanno portato avanti obiettivi congiunti nell'ambito dello sviluppo e caratterizzazione di materiali attivi e nell'ambito dei test di diagnostica. Nello specifico, le attività comuni si sono concretizzate: 1) nello sviluppo e validazione di metodologie di assemblaggio e caratterizzazione di celle a ioni sodio, attraverso un'attività di round robin test per garantire riproducibilità e confronto

tra i risultati; 2) nella realizzazione di una prima cella prototipale a ioni litio, con materiali sviluppati nei laboratori di ENEA e RSE; 3) nella condivisione di una matrice di test di invecchiamento comune, nella sua implementazione nei test per la valutazione di SoH e RUL (in ottica di utilizzo 2nd-life per i servizi di rete) eseguiti su vari chimismi di celle litio-ione commerciali nei laboratori di CNR e RSE. I dati ottenuti sono stati raccolti nei database realizzati da RSE e CNR e resi disponibili al pubblico per validare metodi semi-empirici per valutare SoH e RUL di batterie second-life.

Ancora in merito all'AE nel precedente triennio erano presenti attività legate al tema delle materie prime, con indagini geologiche su miniere nazionali e su brine-mining, ossia l'uso della risorsa geotermica per estrazione di litio dal sottosuolo. L'indagine ha coinvolto anche il settore del urban-mining, ossia quello del riciclo e rigenerazione di materiali e dispositivi. Infine, altre attività trasversali hanno impegnato i tre enti sul tema della sostenibilità, attraverso le analisi di Life Cycle Assessment (LCA) e Life Cycle Costing (LCC) svolte su sistemi litio-ione, sodio-ione e su altre tecnologie, nonché attraverso indagini economiche e sociali sulla realizzazione di giga-factory sul territorio italiano.

Nel presente progetto PTR 25-27, molte attività vengono svolte in continuità con quelle del PTR 22-24, in quanto attività di ricerca fondamentale, rivolte al raggiungimento di obiettivi di lungo termine. Pertanto, continua e si amplia verso nuovi elementi l'attività rivolta alla sintesi e ottimizzazione di materiali per batterie a ioni-litio GEN3-4 e post-litio, quali metallo-ione (es. Zn, Ca, Mg e Al) e metallo-zolfo (Li-S, Mg-S), finalizzate all'ottimizzazione dei materiali in un'ottica di sostenibilità ambientale e prestazionale. Prosegue e si rafforza anche l'attività di sviluppo della tecnologia a ioni-sodio, con lo scale-up di alcuni materiali, l'ottimizzazione di alcuni processi di sintesi e trattamenti termici.

Rispetto al precedente PTR, l'attività interna al WP2 (sistemi di AE) continua e si amplia in termini di popolamento dei database sviluppati nel PTR 22-24 e allo stesso tempo si apre verso studi specifici finalizzati a valutare la conseguenza degli effetti indotti dai ripple di corrente ad alta frequenza, generati dai moderni convertitori di potenza, sulle prestazioni e sul degrado delle batterie. Sarà altresì sviluppato un sistema avanzato per il monitoraggio delle deformazioni meccaniche indotte sia da cicli termici che elettrici sulle celle agli ioni di litio. Tali attività contribuiranno non solo alla definizione di modelli più accurati per la stima dello stato di salute delle celle, ma saranno utili nell'ottica di una implementazione di nuove misure di sicurezza per migliorare l'affidabilità e la gestione operativa dei sistemi di accumulo. Si amplia anche il panorama di chimiche analizzate, estendendo i test di aging a nuove tecnologie (es. ioni-sodio). Prosegue il percorso di studio e implementazione di sistemi second-life, con l'implementazione di BMS innovativi che integrano il convertitore.

In merito al WP3 (attività trasversali di AE), rispetto al precedente PTR 22-24, nel presente progetto verrà condotta un'attività congiunta tra CNR ed ENEA rivolta alla definizione di un protocollo comune per la raccolta di dati primari e la definizione di linee guida per l'interoperabilità dei dati e dei relativi metadati. Questo processo sarà essenziale per la redazione di analisi LCA comparabili, finalizzate alla valutazione degli eco-profilo di batterie innovative, con il proposito di popolare un inventario comune. L'attività sulle Materie Prime Critiche rimane limitata ad un'indagine sui carotaggi in zona Casaccia (sede di ENEA) per il recupero di litio geotermico. Tuttavia, è prevista un'interazione con il progetto P1.4 "Materiali e dispositivi di frontiera per applicazioni energetiche", dove proseguono le indagini geologiche su mining, brine-mining e urban-mining. L'interazione è descritta nel successivo paragrafo d) "Eventuali collegamenti con altri progetti relativamente alle attività previste nel progetto".

Per quanto riguarda l'AT, le attività nel precedente piano triennale sono state portate avanti nei diversi ambiti di bassa, media e alta temperatura.

In merito alla bassa temperatura, nel precedente PTR è stata effettuata la modellazione di un ciclo di potenza integrato con un sistema di accumulo, inclusa la progettazione delle turbomacchine, e predisposto il capitolato tecnico per la realizzazione del prototipo del sistema di accumulo e della sua test-facility. Studi di prefattibilità che tengono in considerazione gli aspetti geologici, l'analisi energetica, economica e d'impatto ambientale sono stati effettuati nell'ambito dei sistemi ATES (Aquifer Thermal Energy Storage) di grandi dimensioni. Nel settore dell'accumulo termochimico a medio-bassa temperatura ( $T < 250^{\circ}\text{C}$ ), sono stati sviluppati innovativi materiali compositi e/o nanostrutturati a base di liquidi ionici (LI), sali igroscopici e a cambiamento di fase integrati e stabilizzati in matrici solide e fibre ad elevata conducibilità termica ed alta area superficiale. Nello specifico, sono stati identificati e caratterizzati alcuni composti ad elevata idrofilicità costituiti da una combinazione di cationi a base di imidazolio e vari anioni idrofilici quali alogenuri (Br-, Cl-, I-), acetato ([Ac]), dimetilfosfato ([DMP]). Sono stati effettuati anche dei promettenti test impiegando sali inorganici (cloruro di calcio -CaCl<sub>2</sub> e solfato di magnesio -MgSO<sub>4</sub>) opportunamente stabilizzati in matrici polimeriche. Inoltre, è stato effettuato uno studio dei materiali e del processo di accumulo termochimico per il riscaldamento di edifici, con la valutazione di un sistema integrato edificio/impianto termochimico e la realizzazione di supporti a porosità ottimizzata per materiali a base di solfato di magnesio e analisi sperimentali con un reattore prototipale appositamente sviluppato e aggiornato.

Per più alte temperature sono stati testati moduli di materiali cementizi realizzati con miscele in grado di esaltare la densità di energia e la ciclabilità del materiale accoppiati con moduli di materiali a cambiamento di fase e, inoltre, sono stati testati alcuni elementi di questi materiali cementizi con prove di carico e scarico che includessero, per il riscaldamento, l'uso sia di un liquido termovettore che della corrente elettrica per effetto Joule.

Infine, per l'alta temperatura, fino a 900°C sono stati sintetizzati e testati in un reattore a letto fluidizzato appositamente realizzato, polveri reagenti di carbonati ed ossidi metallici. Il tutto è stato corredato da modellizzazione e, nel caso di moduli cementizi e a cambiamento di fase, anche con la realizzazione di un SW.

In molti casi, le attività sull'AT proposte e sviluppate nello scorso triennio proseguono nel presente triennio con l'obiettivo di ottimizzare i materiali, migliorare la resa dei processi, implementare nuove configurazioni impiantistiche.

### **c) Obiettivi scientifici e tecnologici e progressi attesi rispetto allo stato dell'arte**

Un'analisi degli obiettivi scientifici e tecnologici e i progressi rispetto allo stato dell'arte delle tecnologie sviluppate nel presente progetto integrato è riportata con dettaglio nella descrizione delle singole LA. In questa sezione generale gli obiettivi sono riportati per macroaree inerenti all'attività progettuale.

Per quanto riguarda l'accumulo elettrochimico (WP1), in continuità con quanto avviato nel precedente PTR, il nuovo progetto integrato si pone come obiettivo quello di contribuire alla crescita dell'innovazione tecnologica dei dispositivi di accumulo elettrochimico, attraverso la sintesi di materiali più sostenibili e performanti, indispensabili a migliorare la prestazione elettrochimica e termica, l'impatto ambientale e a diminuire i costi di ogni tecnologia in studio, allo scopo di renderla più competitiva, pronta a rispondere alle esigenze della rete nel lungo termine; il fine ultimo è contribuire al rafforzamento della catena del valore in Europa. Pertanto, a livello progettuale l'attenzione è indirizzata verso lo sviluppo di materiali in grado di offrire elevate capacità di carica/scarica, grazie a studi incentrati su metodologie di sintesi innovative, processi in grado di aumentare la reversibilità cinetica all'interfaccia di reazione elettrodo/elettrolita, la conduttività di elettroliti di celle elettrochimiche, con miglioramenti in termini di capacity retention e di densità di energia. Il miglioramento dei parametri elettrochimici e termici dei materiali sviluppati è fondamentale sia per l'ottimizzazione delle tecnologie già consolidate (es. batteria a ioni litio di generazione 3-4) che per le tecnologie più innovative (es. batterie a ioni sodio), fino alle tecnologie ritenute ancora di frontiera, rivolte a obiettivi di lungo termine (es. batteria al sodio fuso, batterie metallo-ione). Pertanto, allo scopo di migliorare la prestazione in un'ottica di sostenibilità e sicurezza, si lavora sull'ottimizzazione dell'elettrolita liquido e a stato solido per batterie Li-ione avanzate e Li-metallico (gen.3 e 4); si lavora anche sulle tecnologie definite post-litio, tra cui le batterie a ioni metallici (Mg, Al, Ca ecc.), metallo-aria (come le celle litio-aria) e sistemi a metalli fusi, operando sulle principali criticità, quali la bassa reversibilità cinetica, l'elevata resistenza all'interfaccia di reazione e problematiche legate alla sicurezza. Un'attività di ricerca particolarmente intensa è dedicata alla tecnologia considerata strategica per il panorama nazionale, quella sodio-ione; gli enti affidatari e i loro partner di ricerca investono importanti risorse per convergere verso materiali performanti e facilmente disponibili sul territorio nazionale ed europeo, in un'ottica di contribuire all'abbassamento dei costi e velocizzarne l'introduzione sul mercato. Gli sforzi, dunque, si concentrano sull'ottimizzazione dei materiali anodici, con particolare attenzione a MAXphase/MXeni e hard carbon, questi ultimi ottenuti da precursori organici o di origine naturale, in un'ottica di sostenibilità. Sul fronte dei materiali catodici, la ricerca è indirizzata verso composti innovativi, come le strutture Nasicon e gli ossidi stratificati (NMO), al fine di migliorare le prestazioni complessive del sistema e favorirne la scalabilità industriale. Infine, sono condotti studi su diverse formulazioni di elettrolita, liquido o polimerico o a stato solido, per adattarlo agli elettrodi in studio e garantirne durabilità e sicurezza.

Alcune attività condotte all'interno del WP2 sono in continuità con il precedente PTR, altre sono nuove e arricchiranno ancora di più i database sviluppati dagli affidatari nello scorso triennio con dati provenienti dai test di aging di celle e moduli, svolti su nuove chimiche e/o su dispositivi provenienti da una prima vita veicolare per verificarne il comportamento second-life. Tra i nuovi test previsti si cita, ad esempio, l'analisi degli effetti indotti dai ripple di corrente ad alta frequenza, generati dai moderni convertitori di potenza. Verrà altresì sviluppato un sistema avanzato per il monitoraggio in tempo reale delle deformazioni meccaniche subite dalle celle agli ioni di litio a seguito di sollecitazioni termiche ed elettriche durante i cicli di carica e scarica. Questo sistema si baserà sull'integrazione di sensori di deformazione posizionati strategicamente sulle celle, in grado di rilevare variazioni dimensionali e stress meccanici con elevata precisione. I dati acquisiti saranno analizzati per identificare correlazioni tra le variazioni meccaniche e il degrado elettrochimico delle celle, permettendo di affinare i modelli previsionali per la stima dello stato di salute (State of Health, SoH) e della vita utile delle batterie. Inoltre, queste informazioni saranno fondamentali per sviluppare algoritmi avanzati di diagnostica e prognostica, migliorando l'affidabilità complessiva dei sistemi di accumulo. Parallelamente, lo studio delle deformazioni meccaniche consentirà di individuare precocemente segnali di potenziali criticità, come rigonfiamenti anomali o instabilità strutturali, che potrebbero preludere a fenomeni di degrado

accelerato o guasti catastrofici. Tali dati saranno utilizzati per un avanzamento delle conoscenze rispetto all'attuale stato dell'arte, consentendo di implementare una diagnostica efficace ai fini della sicurezza e che contribuirà a migliorare la gestione operativa delle batterie. Si aggiungono anche altri obiettivi che riguardano la diagnostica dei sistemi d'accumulo e tra questi si citano: la modellazione di moduli batterie, inclusi il BMS e la gestione termica; lo sviluppo e validazione di un Digital Twin applicato a sistemi di accumulo per una gestione affidabile ed economica della batteria; la modellazione di nuove tecnologie di cella, usando e migliorando la metodologia sviluppata nei precedenti PTR. Infine, è tema del presente WP2 lo sviluppo di sistemi di accumulo da Second-Life, con la realizzazione di BMS attivi che integrano convertitori MMC e l'implementazione di metodi di stima della vita residua. In particolare, il focus dell'attività riguarderà lo sviluppo di un metodo per la stima della vita residua delle batterie da second-life e lo sviluppo e validazione di sistemi di gestione delle batterie second-life attraverso l'utilizzo di convertitori MMC. Il prodotto dell'attività sarà un prototipo di sistema d'accumulo che integra moduli second life e il convertitore MMC.

I dati sperimentali provenienti dalle attività interne al WP1 (e dai precedenti PTR) saranno altresì utili per accrescere la disponibilità di dati primari (WP3) di interesse per la produzione di batterie di nuova generazione, ad oggi fortemente limitati a dati per lo più su scala industriale e quindi rivolte a tecnologie più mature; questi dati alimenteranno un database condiviso con i gruppi affidatari, utile all'analisi del ciclo di vita dei materiali/componenti investigati contribuendo ad ampliare lo SoA nel settore della LCA per la specifica tematica. Sarà svolta una analisi degli impatti sociali della diffusione dei sistemi di accumulo nel contesto delle energy social innovations (ESIs) in Italia. Le ESIs sono riconosciute come strumenti di coinvolgimento della cittadinanza nella transizione energetica e potenziale strumento di inclusione sociale. Prosegue anche in questo triennio, inoltre, l'attività di modellazione delle prospettive di competitività tecnico-economica e profittabilità delle diverse tipologie di accumulo in varie traiettorie di decarbonizzazione; un importante obiettivo sarà l'ottenimento di un database "aperto" dedicato alla descrizione delle caratteristiche tecnico-economiche delle tecnologie di accumulo e la messa a punto di un modello dimostrativo del sistema elettrico italiano basato su linguaggio open source (ad es. Pypsa, Irena FlexTool 3).

Per quanto riguarda lo sfruttamento di materie prime locali, verrà condotto un caso studio nel sito C.R Enea Casaccia che intende valutare il potenziale di Litio naturale, in ottica di futuri studi pilota sull'estrazione sostenibile e sulla cogenerazione di calore e/o stoccaggio di CO<sub>2</sub>. Un importante aspetto trasversale alle attività di ricerca su AE di questo progetto è quello legato al concetto di manufacturability; proseguirà, anche in questo triennio, l'attività che riguarda l'ottimizzazione della produzione di elettrodi, andando a considerare diverse tecniche di stampa o coating, tale attività verrà affiancata dalla messa a punto di uno o più modelli digital twin della cella e di alcuni step della produzione degli elettrodi/elettroliti.

Infine, si metterà molta attenzione sulla caratterizzazione avanzata di materiali per le batterie e allo sviluppo di set-up per misure operando, in situ o post-mortem. L'intento è quello di sviluppare tecniche innovative e non convenzionali per lo studio di materiali emergenti, per approfondire la conoscenza dei materiali che costituiscono il dispositivo ed il loro comportamento in condizioni operative.

Una delle principali criticità esistenti, infatti, risiede nel fatto che le tecniche di caratterizzazione operando sono poco diffuse e poco utilizzate in modo sistematico su materiali di nuova generazione. La conoscenza approfondita dei materiali e dei loro meccanismi di degradazione in cella (operando), è fondamentale per comprendere e intervenire sui meccanismi che portano ad invecchiamento e failure delle batterie. I dati delle caratterizzazioni avanzate andranno, inoltre, ad alimentare i modelli digitali e validarne le prestazioni.

Il WP4 è dedicato all'accumulo termico. Con riferimento ai sistemi di accumulo termico a bassa temperatura, gli studi si concentrano su sistemi ad alta densità energetica o ad alta capacità. Sono in studio sistemi di accumulo termochimico ad alta densità energetica grazie alla ricerca su materiali attivi e supporti e alla sperimentazione condotta su diversi processi e configurazioni impiantistiche. Sono, inoltre in studio sistemi di accumulo termico in acquiferi (ATES), in grado di gestire grosse capacità di calore per lungo periodo. Ci si pone come obiettivo, quello di valutare, a livello modellistico, l'impatto dei fattori che maggiormente influenzano il rendimento di questa tecnologia. Sempre con riferimento alla bassa temperatura, si vuole dimostrare un concept, con la realizzazione e il test di un apposito prototipo, per l'accumulo di energia frigorifera accoppiato a un ciclo a CO<sub>2</sub> transcritica con finalità power-to-cold-to-power, per fornire servizi ancillari per la stabilizzazione della rete elettrica e migliorare l'accoppiamento tra le curve di domanda e di produzione delle FER non programmabili.

Riguardo alla media temperatura, relativamente allo studio del calore sensibile e latente attraverso materiali cementizi e a cambiamento di fase, l'attività proposta consentirà di realizzare un modello matematico che si avvarrà del deep learning, sfruttando prove di lunga durata che si eseguiranno su moduli cementizi e a cambiamento di fase per l'inserimento in un ambiente SW adatto ad analisi di sistema. Parallelamente, sarà sviluppato un nuovo concetto di sistema di accumulo a base cementizia in grado di convertire energia elettrica in calore per induzione elettrica, i cui materiali saranno sintetizzati e caratterizzati anche attraverso una campagna sperimentale.

Riguardo all'accumulo termochimico sull'alta temperatura si lavorerà sulla sintesi di carbonati supportati e di ossidi metallici, non tossici e facilmente reperibili, in linea con quanto fatto nel precedente PTR, ma in questo caso aumentando le caratteristiche di stabilità in modo da essere in grado di ricevere calore anche per contatto con una fonte di calore incandescente (esempio riscaldatore elettrico) oltre che da contatto con gas, incrementando altresì la durata delle prove e la loro ciclabilità. Ampio risalto, inoltre, è fornito all'applicazione di materiali adsorbenti, con attività complementari e parallele in grado di ottenere un ampio spettro di applicazioni.

Gli obiettivi del WP5 sono quelli di mettere a sistema i risultati delle linee di attività più prettamente "scientifiche": da una parte assicurando la diffusione dei risultati tramite canali come riviste di settore, congressi, workshop, ma anche riunioni con gli stakeholder; dall'altra supportando lo scambio di conoscenza e la collaborazione lungo tutto il progetto. Inoltre, verrà assicurato un continuo confronto con le iniziative nazionali, europee e internazionali sul tema, per dare supporto agli operatori nazionali che operano in questo settore e alle istituzioni nello sviluppo di politiche a vantaggio della filiera nazionale.

#### **d) Eventuali collegamenti con altri progetti relativamente alle attività previste nel progetto**

Da Maggio 2023 CNR, ENEA e RSE sono coinvolti insieme ai partner INSTM, IIT ed il partner industriale STANDEX International, all'interno del progetto competitivo del Bando A della RdS, denominato ORANGEES. Il progetto è al suo secondo anno di attività, quest'ultima incentrata sullo sviluppo di materiali ibridi (inorganici e organici) e puramente organici, sia di origine naturale che da scarti di processo, per sistemi di AE di nuova generazione. L'attività è rivolta a materiali ancora poco o per nulla esplorati e guarda nel lungo periodo all'integrazione e/o potenziale sostituzione dei materiali inorganici comunemente impiegati all'interno delle attuali tecnologie di AE. Si tratta di un'attività di ricerca a basso TRL (1-3) che punta a validare materiali sia dal punto di vista delle prestazioni elettrochimiche che della sostenibilità ambientale, attraverso un'attività di scouting, sintesi e caratterizzazione degli stessi. Nel presente progetto (PTR 25-27), si abbracciano TRL più ampi, che coprono sia attività aventi TRL 3 inerenti materiali non esplicitamente di natura organica e/o ibrida per tecnologie di frontiera come le sodio-fuso a bassa temperatura, alluminio-ione, zinco-ione, calcio-ione e magnesio-ione e litio ione di nuova generazione Gen 3 e Gen 4, fino ad arrivare a tematiche a TRL 4-5, su tematiche inerenti le batterie sodio-ione, a flusso di vanadio (VRFB), nonché l'ottimizzazione di materiali per litio-ione.

Le attività di sviluppo materiali per l'AE sono in parte svolti nel progetto EuBatIn a cui partecipa ENEA (IPCEI Batterie). Nel caso del progetto IPCEI, ENEA ha il compito di svolgere alcune attività preliminari di ricerca su materiali innovativi per batterie litio-ione Gen3-4, su tecniche di riciclo dirette dei materiali, ma soprattutto di costruire una infrastruttura con pilot-lines che facilitino l'introduzione delle innovazioni tecnologiche verso l'applicazione industriale. Esiste, quindi, una complementarità con il presente progetto 1.2, in quanto i materiali investigati da ENEA in EuBatIn non sono gli stessi delle linee di attività LA1.11 e LA1.12 di questo progetto e la costruzione di pilot-lines pre-industriali non è tra gli obiettivi di questo progetto.

Ancora in merito all'AE, si segnala che le attività di sviluppo di algoritmi di diagnostica e controllo di batterie con BMS innovativi (P1.02-WP2) sono finalizzate a rendere il sistema d'accumulo più efficiente e resistente, ma questi algoritmi possono costituire la base per lo sviluppo di strumenti di flessibilità per reti attive. Esiste dunque una correlazione in input alle attività dei progetti RdS P2.3 b) "Innovazione nella gestione ed esercizio delle reti elettriche in corrente alternata (AC) e in corrente continua (CC)" e P2.10 "Flessibilità del sistema energetico integrato". Sugli stessi temi esiste una correlazione anche con il progetto RdS P2.7 "Mobilità sostenibile e interazione con il sistema energetico", dove gli strumenti di diagnostica first-life, sviluppati nello scorso triennio con prove su moduli veicolari, potranno fornire opportuno supporto allo sviluppo di quelli second-life sviluppati in questo progetto. Vista la fondamentale importanza dello sviluppo delle tecnologie di accumulo per abilitare la diffusione della mobilità elettrica si intende mantenere frequenti contatti tra i progetti P1.2 e P2.7 e anche con il progetto P1.7 "Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali", dove ENEA affronta tematiche legate alla mobilità. In particolare, il progetto P1.7 prevede studi sulla previsione di invecchiamento delle batterie rispetto ai cicli di ricarica e di utilizzo veicolare e sulle tecniche di gestione e diagnostica online dei moduli batterie. Nel P1.2 sono previsti test di invecchiamento su moduli 2nd-life (LA2.20-RSE), recuperati da fornitori che dispongono di batterie già invecchiate durante il funzionamento su un veicolo (batterie che si possono considerare a fine 1st-life in uso veicolare). Sono due approcci differenti: nel P1.2 si vogliono definire algoritmi di diagnostica e stima di SoH e RUL su batterie second-life in applicazioni stazionarie, mentre nel P1.7 la diagnostica riguarda il primo utilizzo delle batterie per applicazioni veicolari. Altre attività del P1.2 prevedono test di invecchiamento, ma indipendenti da un profilo di carica e scarica, in quanto condotti aprioristicamente su diversi fattori di stress. Inoltre, nel P1.2 è prevista un'indagine d'invecchiamento di celle innovative (es Na-ion o altre chimiche Li-ion meno comuni) per verificare i meccanismi di degrado di queste nuove tecnologie, arricchendo il database con nuovi dataset, e per definire nuovi algoritmi di diagnostica e stima di SoH e RUL in applicazioni stazionarie.

Un'altra sinergia è presente sul tema della valutazione delle criticità di approvvigionamento delle Materie Prime Critiche - MPC (P1.02-WP3) che coinvolge tutte le tecnologie legate alla Transizione Energetica, dunque non solo le tecnologie d'accumulo, ma anche altre tecnologie (es. progetti RdS 1.01 "Fotovoltaico ad alta efficienza", 1.03 "Tecnologie dell'idrogeno"). Nel passato triennio RdS PTR22-24, lo studio della disponibilità di MPC sul territorio italiano era condotto nel P1.02 a responsabilità di RSE. Nel presente triennio RdS PTR25-27 l'attività di scouting delle MPC è inserita nel capitolato del progetto P1.04 "Materiali e dispositivi di frontiera per applicazioni energetiche". Vista la fondamentale importanza degli studi relativi alle MPC si intende mantenere frequenti contatti tra i progetti P1.02 e P1.04, con particolare attenzione alle formulazioni di materiali catodici e anodici con minor ricorso di MPC. Le attività dei due progetti, infatti, si intersecano e si supportano nella ricerca volta alla sostituzione di MPC con quelle di più facile approvvigionamento. Inoltre, un'altra importante sinergia intercorre nell'ambito dell'approvvigionamento di Li da fonti geotermiche e, più in dettaglio, dell'attività di mappatura geomineraria presentata nel WP1 del P1.04. ENEA, nel progetto 1.2, porterà infatti avanti un'attività di carotaggio e analisi nella zona di Casaccia. I risultati delle analisi sui campioni raccolti nel P1.02 potranno essere messi a fattor comune con lo studio del potenziale geominerario svolto in P1.04, in un'ottica di collaborazione tra le parti.

Per quanto riguarda l'accumulo termico (AT), si segnala che il progetto 1.2 (Tecnologie di accumulo elettrochimico e termico), il progetto 1.4 (Materiali e dispositivi di frontiera per applicazioni energetiche) e il progetto 1.9 (Solare termodinamico) trattano lo sviluppo di materiali e sistemi per AT.

In particolare, in ambito di applicazioni per il settore residenziale a bassa temperatura ( $T < 100^{\circ}\text{C}$ ) sia il progetto 1.2 (attività RSE) sia il progetto 1.4 (attività CNR) sono coinvolti nello sviluppo di materiali termochimici innovativi. Non ci sono, tuttavia, sovrapposizioni tra i due progetti. Nel progetto 1.2 RSE intende sviluppare materiali compositi con la componente attiva a base di sali idrati di solfato di magnesio ( $\text{MgSO}_4$ ), supportata da una matrice porosa costituita da diversi materiali quali allumina, silica gel o precursori naturalmente porosi, come argille o cementi, agglomerati con la fase attiva. Tra i candidati che RSE intende sviluppare come materiali termochimici ci sono anche i Metal-Organic Framework (MOF) che hanno generalmente struttura nano porosa con caratteristiche promettenti sia per l'adsorbimento diretto che per l'impregnazione di sali idrati. Nel progetto 1.4, invece, CNR intende sviluppare sali idrati meno indagati in letteratura, quali ioduro di sodio o zinco ammonio solfato. Come matrici su cui impregnarli, CNR partirà dai risultati ottenuti da RSE nel precedente triennio RdS su materiali di origine naturale, quali vermiculite e carboni attivi, che RSE ha utilizzato tal quali, impregnati senza modifiche al supporto di base. CNR intende testare la loro influenza sui propri sali idrati, per poi indagare eventuali loro modifiche per aumentare la conducibilità termica dei compositi e, infine, rivolgere l'attenzione su altri materiali porosi di origine naturale, quali ad esempio la perlite. Inoltre, nel progetto 1.4 CNR intende studiare trattamenti e/o rivestimenti anticorrosione che potrebbero essere utilizzati in componenti di un possibile impianto pilota per ridurre la corrosione indotta da tali sali. Questo obiettivo non è perseguito da RSE nel progetto 1.2, in quanto RSE intende studiare l'ottimizzazione in ambito riscaldamento residenziale-terziario del sistema utenza-impianto (incluso l'apporto di un reattore solare) e del processo complessivo di adsorbimento e desorbimento nelle fasi di rilascio e prelievo di calore. Sempre relativamente all'AT in applicazioni a bassa temperatura, nel progetto 1.2 CNR intende lavorare su altri materiali, quali liquidi ionici (cationi a base di imidazolio e anioni a base di alogenuri e/o dimetilfosfato) su matrici solide fibrose, chiaramente non percorsi da altre linee progettuali.

Per quanto riguarda l'AT in applicazioni a media temperatura (intorno ai  $100\text{-}150^{\circ}\text{C}$ ), nel progetto 1.2 CNR intende sviluppare altri materiali termochimici, quali zeoliti modificate tramite scambio ionico o de-alluminazione, quindi materiali diversi e per applicazioni in range di temperatura diversi. Inoltre, nel P1.9 vi saranno studi sull'accumulo termochimico con materiali adsorbenti per il solare a concentrazione, utilizzando zeoliti commerciali, per applicazioni impianti a concentrazione solare (CSP) in un intervallo di temperature di  $90\text{-}250^{\circ}\text{C}$  che coinvolgono acqua pressurizzata e olio diatermico su prototipi a TRL più alto, con fini differenti dallo sviluppo di materiali.

Infine, relativamente ad applicazioni a temperature molto elevate ( $600\text{-}900^{\circ}\text{C}$ ), nel progetto 1.2 ENEA (assieme a propri co-beneficiari) studia materiali termochimici, quali ossidi metallici o carbonati, con sperimentazione in appositi reattori per future applicazioni industriali.

Per quanto riguarda l'AT a media temperatura a calore sensibile/latente, il progetto è complementare al Progetto 3 ("CSP & Accumulo Termico") JCA (Joint Cooperation Agreement) che mira tra l'altro alla realizzazione di un impianto che impiega in cascata moduli di accumulo che utilizzano materiali a cambiamento di fase e un modulo termocline in calcestruzzo, anche se di tipo e dimensioni diverse da quello proposto nel progetto 1.2. Nel JCA, infatti, le temperature in gioco sono più alte e viene utilizzato come fluido termovettore il sale solare fuso (anziché l'olio diatermico), che necessita di un diverso design e controllo delle apparecchiature e un diverso tipo di materiali di

accumulo, come per esempio carbonati di sodio, litio e potassio.

Infine, i tre enti affidatari partecipano al Progetto europeo StoRIES, che nel WP3 studia in maniera teorica l'ibridizzazione di sistemi e componenti di accumulo e in tale ambito viene anche analizzata l'integrazione di tecnologie di accumulo termico quali quelle a cambiamento di fase e termochimiche ad alta temperatura con tecnologie di accumulo a batterie e supercapacitori.

Pertanto, non sussistono criticità in termini di potenziali sovrapposizioni con le attività presentate nel presente progetto 1.2 PTR 25-27.

## 2.5 Obiettivi e risultati

### a) Obiettivi finali del progetto

Di seguito si elencano i principali obiettivi finali del progetto di carattere generale, utili a rendere evidente l'aspetto innovativo alla luce delle ricadute applicate e/o sperimentali verso i diversi stakeholder (operatori industriali, centri di ricerca, autorità, istituzioni ecc.):

**O1: Sistemi di accumulo sostenibili.** Il progetto si propone di contribuire allo sviluppo di sistemi di accumulo sostenibili per favorire la decarbonizzazione del sistema energetico nazionale e promuovere tecnologie di accumulo innovative, efficienti, economiche e a basso impatto ambientale. Questo obiettivo sarà raggiunto con un approccio centrato sulla "circularità" economica e ambientale, risolvendo le criticità del settore e ottenendo risultati utili per gli stakeholder industriali nel mercato nazionale ed europeo. In particolare, il progetto lavora sia sullo sviluppo tecnologico, per migliorare le prestazioni delle tecnologie in studio, inclusa la vita utile, sia sulla riduzione della dipendenza da materie prime critiche, anche ragionando su tecnologie alternative come la sodio-ione, sia pensando a strumenti quali il riuso, sfruttando la vita residua delle batterie veicolari per un secondo uso in applicazioni stazionarie. Sebbene le ricadute industriali non siano immediatamente disponibili sul mercato, l'attivazione della catena del valore della ricerca sui sistemi di accumulo beneficia tutto l'ecosistema dei portatori di interesse.

**O2: approccio olistico:** nel progetto sono presenti linee di ricerca su diverse tecnologie (es Li-ione, Na-ione, redox flow), diversi ambiti applicativi (es. accumulo termico a media bassa o alta temperatura) e diversi segmenti della catena del valore. Le attività saranno condotte in maniera sinergica da tutta la compagine progettuale attraverso il raggiungimento di obiettivi specifici ed il monitoraggio di ogni segmento costituente l'intera catena del valore. Pertanto, il progetto vaglia ogni aspetto delle criticità legate all'accumulo, a partire dalla scelta di materie prime a basso costo e meno critiche, allo sviluppo di materiali avanzati con tecniche e processi che ne massimizzino le prestazioni o riducano il costo energetico della realizzazione, allo scouting di processi sempre più efficienti, fino all'eco-design prototipale del sistema di accumulo di interesse. L'innovazione proposta mira a offrire alternative e soluzioni valide per tutte le aziende coinvolte nel settore, affinché possano guardare verso nuove possibilità, intese come nuove tecnologie, processi più efficienti, sistemi più affidabili, in un'ottica di investimento futuro e ripresa industriale. Tutto questo porterà alla richiesta di nuove figure professionali, altamente qualificate, lungo tutta la catena del valore, dall'ottimizzazione delle tecnologie di accumulo esistenti, fino a quelle di nuova generazione.

**O3: forte propensione sperimentale:** il progetto nei 4 WP tecnici include una percentuale elevata di attività di laboratorio, dallo sviluppo di materiali, a quello di prototipi e sistemi di accumulo, al test di dispositivi. L'attività sperimentale permette di mettere in pratica le ricerche commissionate. Ha un alto grado di innovazione ed è l'unica strada per ottenere elevati livelli di decarbonizzazione del settore energetico che gli studi teorici non possono garantire. L'attività sperimentale è supportata da attività modellistica su vari livelli, dai chimismi (analisi computazionale per definire nuove formulazioni), alle simulazioni dei processi, fino alla modellistica applicata alle analisi ambientali ed economiche. Questo rende il progetto solido nella validazione dei risultati.

Nel contesto dell'AE, sono previsti avanzamenti scientifici e tecnologici riguardanti le diverse tecnologie e i processi chimici in fase di studio. Sono stati individuati tre principali ambiti di intervento o obiettivi generali: 1) i materiali, 2) i sistemi e 3) la circolarità/sostenibilità. Si prevede che i risultati ottenuti in queste tre aree possano contribuire a rafforzare alcune delle attuali criticità delle tecnologie e della catena del valore nazionale.

1) Molto peso viene dato ai segmenti upstream della catena del valore, che riguardano cioè le materie prime e i materiali avanzati, in quanto il costo, le prestazioni e la sostenibilità del sistema finale sono fortemente influenzati da essi. Materiali più performanti, stabili e sostenibili saranno la chiave per abilitare le generazioni avanzate delle batterie Li-ione, incluse quelle a stato solido, ma renderanno anche possibile lo sviluppo industriale di tecnologie post-litio di notevole interesse per applicazioni stazionarie. Tra queste la tecnologia agli ioni sodio è considerata l'opzione più promettente per uno sviluppo industriale, ampiamente studiata nel presente progetto. Altresì, la scelta di materiali più sostenibili per lo studio di tecnologie di frontiera (es. ioni di magnesio, calcio, alluminio, zinco, ma anche batterie metallo-zolfo) è maggiormente rivolta ad aspetti, non tanto prestazionali di cella, quanto più ambientali ed economici, in termini di abbondanza e disponibilità a più basso costo, nell'ottica di attuare, sin da subito, scelte più consapevoli.

2) Di interesse strategico sono anche le attività di diagnostica e monitoraggio dei sistemi d'accumulo. La caratterizzazione e la modellazione dei sistemi di accumulo sono fondamentali per la loro gestione nel tempo. Essere in grado di riconoscere i parametri che ne influenzano l'invecchiamento, gestire il funzionamento dei componenti e dispositivi (celle, moduli e pacchi batteria) per allungare la vita utile sono elementi indispensabili per introdurre le nuove tecnologie nel mercato. Lo sviluppo di sistemi di controllo attivi, in grado di gestire le disomogeneità dei vari elementi costituenti, capaci di interfacciarsi alla rete e di fornire opportuni servizi, senza introdurre meccanismi di degrado aggiuntivi, consente di ripensare i modelli di business. In quest'ottica, è di fondamentale interesse lo studio di batterie second-life, sulla carta più economiche, ma che richiedono di attestarne l'affidabilità per poter essere introdotte nel mercato.

3) Il concetto di circolarità e sostenibilità è ormai imprescindibile se si vuole rafforzare la competitività industriale del nostro paese e dell'Europa. Lo studio dell'impatto ambientale ed economico delle tecnologie proposte, svolto con logica "cradle to grave", è la chiave per centrare questi obiettivi. Inoltre, sono fondamentali gli sforzi profusi per indirizzare verso standard qualitativi la caratterizzazione di materiali, dispositivi e sistemi, per sviluppare dispositivi sicuri, efficaci e sostenibili.

Per quanto riguarda gli obiettivi specifici dell'AT, i principali risultati attesi sono di tipo sperimentale e prevedono la preparazione di materiali ibridi avanzati a base di liquidi ionici, sali igroscopici, materiali a transizione di fase, materiali termochimici, che vengono integrati in matrici solide e fibrose ad elevata conducibilità termica ed alta area superficiale.

In particolare, sono distinti 2 livelli di studio (materiali e sistemi) e 3 ambiti applicativi di accumulo termico in base alla temperatura di storage:

1) Nel caso della bassa temperatura sono in sviluppo sistemi ad alta densità energetica e/o capacità come i sistemi termochimici o l'accumulo termico in acquiferi, con la prospettiva di migliorarne le prestazioni e la flessibilità d'uso a beneficio dell'accoppiamento con le rinnovabili termiche. Inoltre, sarà realizzato e testato il prototipo inerente la tecnologia di power-to-cold-power integrata con un sistema di accumulo utility-scale concepita per rispondere a funzionalità energy time shifting, seguendo le specifiche tecniche e il capitolato, che sono stati individuati nel PTR22-24. Per la sua specifica concezione, questa tecnologia risulta svincolata dalle dinamiche di mercato relative all'approvvigionamento di terre rare, materiali e componenti strategici che, sempre più nel prossimo futuro, risentiranno della crescita concomitante di diversi comparti afferenti la "transizione verde".

2) Nel caso della media temperatura si punterà all'ottimizzazione e alla stabilità del materiale da sottoporsi a cicli di carico e scarico con alimentazione di tipo elettrico e termico, che dovranno essere in grado, anche con prove sperimentali, di riscaldarsi per induzione elettrica, anche senza l'effetto della conduzione di un tubo riscaldato, mentre in riferimento ai SW, essi sono sviluppati anche con tecniche di machine learning per essere inseriti in ambienti di sviluppo per analisi di sistema. Prove sperimentali di lunga durata ad hoc saranno essenziali a processo.

3) Riguardo all'accumulo termochimico ad HT si propone lo sviluppo e la sintesi di materiali quali carbonati appositamente supportati e ossidi metallici che possano ricevere calore sia per contatto con gas caldi che con corrente elettrica con prove di lunga durata in un reattore a temperature di 600-900°C, realizzato nel PTR22\_24 e qui appositamente aggiornato, coadiuvati da analisi tecnico economiche di casi studio.

Ampio risalto, inoltre, è fornito all'applicazione di materiali adsorbenti, con attività complementari e parallele in grado di ottenere un ampio spettro di applicazioni:

1) Liquidi ionici impregnati in matrici solide porose per applicazioni a medio-bassa T nel settore domestico o industriale - TRL da 3 a 4 (piccolo prototipo in scala di laboratorio) - livello termico 50-100°C;

2) Zeoliti modificate tramite scambio ionico o dealluminazione - TRL da 2 a 3 (studio del materiale) - livello termico 100-150°C;

3) MOFs specifici per l'adsorbimento di vapor d'acqua, utilizzati sia come materiale adsorbente che come matrice porosa per l'inclusione di sali idrati. L'idea è quella di ottenere un materiale ad altissima densità energetica che sia attivo anche a basse temperature (T di accumulo sotto i 100 °C e T di utilizzo intorno ai 40 °C), ottimale quindi per le applicazioni domestiche;

4) Materiali aggregati composti da argille (o altri materiali porosi) e sali idrati, formati in pellet attraverso l'uso di binder a basso costo (es. cementi). L'obiettivo è ottenere materiali termochimici con prestazioni paragonabili a materiali commerciali (es. zeoliti) ma con costi di sintesi ridotti. Si ipotizza di operare con temperature di carica di 150°C e scarica intorno ai 40°C.

5) Proseguimento delle attività su materiali porosi sintetici impregnati con sali idrati. Si deve ancora identificare il materiale con cui proseguire le attività. Anche qui l'idea è quella di ottenere materiale con massima densità energetica per temperature di carica di 150°C e scarica intorno ai 40°C. Per i MOF il TRL è basso (2); Per i materiali aggregati e materiali basati su sali idrati supportati il TRL è un po' più alto (da 3 a 4).

#### **b) Principali risultati attesi/deliverable**

In funzione dell'obiettivo prefissato dalla specifica LA e della tecnica di indagine condotta e/o della metodologia seguita per il suo conseguimento, è possibile esprimere i principali risultati attesi sia in termini di prestazione qualitativa che quantitativa, laddove possibile.

#### **WP1 Accumulo elettrochimico: materiali avanzati**

LA1.1 (CNR): Sviluppo di elettroliti NaSiCON dopati con Fe, Co e Ni, con conducibilità ionica superiore a  $10^{-3}$  S/cm e stabilità termica fino a 800°C. Validazione della struttura e distribuzione uniforme dei dopanti attraverso XRD e SEM. Pubblicazione di articoli scientifici e deposito di brevetti relativi ai nuovi materiali elettrolitici sviluppati. Rapporto tecnico: RT-1.02-1.01-1 Report sulla Sintesi e Caratterizzazione di NaSiCON Dopati

LA1.2 (CNR): Sviluppo di catoliti a base di grafene e nanotubi di carbonio con capacità specifica superiore a 200 mAh/g e stabilità elettrochimica per oltre 150 cicli. Miglioramento delle interazioni elettrochimiche tramite doping con eteroatomi. Pubblicazione di risultati su riviste scientifiche e deposito di brevetti sui nuovi materiali catolitici. Rapporto tecnico: RT-1.02-1.02-1 Report sui parametri di sintesi e le proprietà del materiale.

LA1.3 (CNR): Prototipo funzionante di cella LTMSB con capacità specifica di 150-200 mAh/g e efficienza coulombica superiore al 90%.

Stabilità ciclica mantenendo l'80% della capacità iniziale dopo 150 cicli. Validazione delle prestazioni tramite test elettrochimici dettagliati. Pubblicazione dei risultati su riviste scientifiche e sviluppo di brevetti sui design e metodi di assemblaggio. Rapporto tecnico: RT-1.02-1.03-1 Report sui parametri di progettazione e test.

LA1.4 (CNR-UNIME DIPR) Sviluppo di materiali catolitici supportati su grafene o nanotubi di carbonio, con capacità specifiche ~150 mAh/g, efficienza coulombica (CE)  $\geq$  90%, e stabilità elettrochimica con retention capacity  $\geq$  80% dopo 150 cicli. Determinazione precisa dei diagrammi di fase per i sistemi NaI/AlCl<sub>3</sub>, con identificazione dei punti di fusione e delle strutture cristalline tramite tecniche di diffrazione a raggi X (XRD) e calorimetria differenziale a scansione (DSC). Fornitura di campioni di materiali da testare su prototipi di batterie per ulteriori test e validazioni. Rapporto tecnico: RT-1.02-1.04-1 Studio e Realizzazione dei Diagrammi di Fase dei Materiali Catolitici

LA 1.5 (CNR): Sintesi di materiali a base di Na<sub>4</sub>MnCr(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>/CNF e Na<sub>4</sub>MnAl(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>/CNF, con un contenuto di materia attiva minimo del 70%wt rispetto a CNF mediante un'ottimizzazione del processo di sintesi ed eventuale sviluppo di un metodo di sintesi in due fasi. Si prevede un miglioramento delle prestazioni elettrochimiche sia in termini di capacità specifica (>125 mAhg<sup>-1</sup> per Na<sub>4</sub>MnCr(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>/CNF e >108mAhg<sup>-1</sup> per Na<sub>4</sub>MnAl(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>/CNF ad 1C) e stabilità ciclica (retention capacity >70% dopo 100 cicli di carica-scarica a 0.1C e 1C) sia come efficienza coulombica (>90%). Rapporto tecnico: RT-1.02-1.05-1 Report inerente la sintesi e caratterizzazione di elettrofilati a base di Na<sub>x</sub>MnM'(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>/CNF.

LA1.6 (CNR): L'obiettivo dell'attività è la sintesi di materiali catodici per NIB a base di Na<sub>x</sub>MM'(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> (M=Fe; M'= Fe, Ti, Cr) mediante electrospinning puntando ad una capacità specifica reversibile >101 mAhg<sup>-1</sup> a 0,1C e retention capacity >80% dopo 500 cicli a 1C con un significativo avanzamento rispetto ai 96 mAh/g attualmente riportati, suggerendo una maggiore stabilità del materiale catodico. Infine, si mira a raggiungere un'efficienza coulombica > 90% durante i cicli di carica e scarica, assicurando un utilizzo ottimale del materiale catodico e minimizzando le perdite energetiche. Risultati dei test elettrochimici in semicelle o monocelle, realizzate combinando materiali anodici, catodici e/o elettrolitici prodotti dai tre affidatari. Rapporto tecnico: RT-1.02-1.06-1 Report inerente lo sviluppo di materiali a base di Na<sub>x</sub>FeM'(PO<sub>4</sub>).

LA 1.7 (CNR-UNIPA DFT): Utilizzo di calcoli basati sulla teoria del funzionale della densità per la determinazione dell'effetto della sostituzione in quantità minime dello zirconio con altri metalli sulle geometrie locali e sull'energetica di migrazione dello ione sodio nel NaSICON di formula Na<sub>3+4y-x</sub>Zr<sub>2-y-z</sub>MzSi<sub>2-x</sub>P<sub>1+x</sub>O<sub>12</sub>. Sviluppo di un codice di calcolo per la determinazione di descrittori macroscopici della diffusione tramite simulazioni numeriche che fanno uso dei dati energetici calcolati. Rapporto tecnico: RT-1.02-1.07-1 Report sulla caratterizzazione computazionale del NaSICON in funzione della composizione e simulazione dei processi diffusivi dello ione sodio.

LA 1.8 (CNR-UNIME DIML): Conoscenza dettagliata del ciclo di vita degli accumulatori in studio ed identificazione dei rischi associati ad ogni fase del ciclo di vita; tale attività è finalizzata ad identificare degli indicatori di soglia di sicurezza, al fine di effettuare un confronto in forma numerica e grafica dei benefici e rischi associati alle due tipologie di accumulatori. Conoscenza dettagliata ciclo di vita e n° 1 Report descrittivo dei processi di realizzazione e utilizzo (RT-1.02-1.08-1); Analisi del rischio e n° 1 Report descrittivo dell'analisi del rischio (RT-1.02-1.08-2); Set di indicatori di sicurezza e n° 1 Report descrittivo indicatori (RT-1.02-1.08-3); Confronto sistemi di accumulo e n° 1 Report confronto accumulatori ((RT-1.02-1.08-4).

LA 1.9 (CNR) L'obiettivo della ricerca è ottenere materiali carboniosi amorfi e grafitici con morfologia porosa e superficie specifica tra 500 e 1000 m<sup>2</sup>/g. Per i parametri elettrochimici, si punta a una capacità specifica di 100 mAh/g a 1 A/g e densità energetica di 90 Wh/kg, promuovendo soluzioni di stoccaggio energetico sostenibili. Nei materiali commerciali, si mira a risultati di capacità specifica del catodo fino a 100 mAh/g a 1 A/g, densità energetica di 150 Wh/kg e retention >80% dopo 1000 cicli, in linea con quanto riportato in letteratura.

Rapporto tecnico: RT-1.02-1.09-1 Report sulla sintesi e caratterizzazione chimico-fisica ed elettrochimica di materiali carboniosi

LA 1.10 (CNR) L'attività di ricerca mira a sviluppare materiali elettrodi sostenibili e performanti derivanti da Bio-MOF per VRFB con l'obiettivo di migliorarne la conducibilità e l'attività elettrocatalitica, riducendo i costi e l'impatto ambientale. I materiali ottenuti saranno sottoposti a caratterizzazioni chimico-fisiche per ottimizzare parametri come EE (>80 %), CE (90÷100 %), VE (80÷100 %), densità di corrente applicata (>150 mA cm<sup>-2</sup>), profondità di carica e di scarica (>70 %). Rapporto tecnico: RT-1.02-1.10-1 Report sulla sintesi e caratterizzazione di materiali catodici a base di Bio-MOF.

LA1.11 (ENEA) Principali risultati attesi: - Sintesi di un materiale catodico che sia in grado di erogare una capacità specifica di circa 200 mAh/g a una densità di corrente di 38 mA/g e di circa 120 mAh/g a 380 mA/g con una ritenzione di capacità dopo 100 cicli maggiore del 80%; - preparazione elettroliti polimerici con eccesso di liquido ionico aventi conducibilità ionica > 10<sup>-3</sup> S cm<sup>-1</sup> a 20 °C e stabilità anodica > 4.7 V (vs Li<sup>+</sup>/Li<sup>0</sup>) - Studio di diverse composizioni elettrolitiche che testati in celle di tipo anode-less permettano di ottenere un'efficienza coulombica media superiore al 98% per almeno 50 cicli reversibili di elettrodeposizione e dissoluzione di litio, con una capacità minima di 1 mAh/cm<sup>2</sup> di litio; - Costruzione di un modello predittivo per la caratterizzazione di nuovi materiali destinati allo sviluppo di batterie e validazione di tale modello.

LA1.12 (ENEA) Principali risultati attesi: - preparazione elettrolita ternario polimero (PAN-PCL o PEO)-liquido ionico-LiTFSI con il catodo Li-rich utilizzando il litio metallico come anodo. Caratteristiche di semi-cella: capacità specifica del 30% rispetto a quella teorica (C/10, 50 cicli), efficienza Coulombica > 90%; - preparazione elettrolita ternario polimero (PAN-PCI o PEO)-liquido ionico-sale di litio in configurazione anode-less. Caratteristiche di semi-cella: efficienza coulombica media superiore al 98% per almeno 50 cicli reversibili di elettrodeposizione e dissoluzione di litio, con una capacità minima di 1 mAh/cm<sup>2</sup> di litio; - Sviluppo di una cella completa in formato coin-cell contenente elettrolita ternario polimero (PAN-PCI o PEO) -liquido ionico-sale di litio con catodo Li-rich e anodo a base di grafite o in configurazione anode-less. Caratteristiche di cella: capacità specifica del 30% rispetto a quella teorica a C/10 per almeno 30 cicli, efficienza Coulombica > 90%.

LA1.13 (ENEA-UNIBO DICH RB) Principali risultati attesi: Separatori polimerici con spessori < 50 µm, numero di MacMullin < 20, con almeno 25 % di materiale di partenza proveniente da materiali naturali e/o biodegradabili, e con almeno 50 % in peso del solvente utilizzato per il processo di preparazione pari ad acqua o solvente ottenibile da processi bio-based. Sintesi di elettroliti solidi ibridi con spessore < 100 µm, stabilità elettrochimica da 0 a 4.5 V vs Li e conducibilità a 30°C > 10<sup>-5</sup> S cm<sup>-1</sup>, a 70°C > 10<sup>-4</sup> S cm<sup>-1</sup>.

LA1.14 (ENEA - POLITO DISAT LE) Sviluppo e ottimizzazione di elettroliti polimerici con conducibilità ionica ≥ 0.1 mS/cm a 20 °C, numero di trasporto ionico ≥ 0.4 e finestra di stabilità elettrochimica ≥ 4.3 V vs. Li<sup>+</sup>/Li. Compatibilità con catodi ad alta tensione (NMC811, Li-Rich) e anodi in litio metallico. Resistenza interfaccia-elettrolita ≤ 50 Ω·cm<sup>2</sup>. Ritenzione di capacità ≥ 80% a 1C dopo 1000 cicli. Esplorazione di elettroliti polimerici per sistemi Zn-ione.

LA1.15 (ENEA - UNIRM1 DICH BR) Principali risultati attesi: P1) Relazione tecnica relativa allo SoA con quantificazione degli Index di benchmark (Index-1>40); P2) Manufatto: almeno una formulazione e di un batch di non meno di 10 elettrodi oCNEs con Index-2 > 10%; P3) Manufatto: almeno una formulazione e di un batch di non meno di 10 mL di elettrolita oAEs con Index-2 > 10%; P4) Relazione tecnica di fine LA con dimostrazione sperimentale delle tre formulazioni di celle con oCNEs/oAEs e (PE-I), (PE-S) e (PE-O) con Index-3 > 10%.

LA1.16 (ENEA - UNIPV DICH QR) Principali risultati attesi: -Design di leganti polimerici supramolecolari auto-riparanti con proprietà adesive comparabili con quelle dei binder di riferimento (ad es. PVDF); -Sviluppo di materiali avanzati per l'ottimizzazione di anodi a base

di Silicio (in termine di controllo dei fenomeni di espansione irreversibile) per catodi a base NMC; -Elettroliti polimerici con capacità self-healing, proprietà meccaniche migliorate rispetto i separatori di riferimento, spessori inferiori a 50  $\mu\text{m}$ , conducibilità ionica di almeno  $1 \text{ mS cm}^{-1}$  @40°C e finestra di stabilità elettrochimica >4.7V; -Comprensione dei meccanismi self-healing; -Celle self-healing con anodo di Litio, NMC ed elettroliti polimerici auto-riparanti con efficienza coulombica >90% e ritenzione della capacità >80% @1C dopo 500 cicli; -Caratterizzazione in-situ, ex-situ e operando di celle self-healing

#### LA1.17 (ENEA) Principali risultati attesi:

Catodi: 1) Produzione di materiale catodico (10 g circa) ottimizzato in PTR 22-24 per validazione con tecniche di produzione di elettrodi di interesse industriale; 2) Sintesi, caratterizzazione di materiali di stechiometria  $\text{Na}_x\text{A}_y\text{Fe}_{1-y}\text{O}_2$  (A=Zr, Ca); 3) Caratterizzazioni elettrochimiche consistenti in: 100 cicli di ciclaggi galvanostatici a C/10 nell'intervallo 1.5V e 4.5V o intervalli più stretti; 50 cicli di ciclaggi galvanostatici a 5 C-rate progressivi (da 0.1C fino a 10C); voltammetrie cicliche

Anodi: Sintesi, caratterizzazione chimico-fisica ed elettrochimica: voltammetrie cicliche a varie velocità di scansione di HC templati. Inoltre, le prestazioni della batteria assemblata con HC commerciali si riterranno valide in seguito a: 100 cicli di carica e scarica a C/5 nell'intervallo 0.002V e 2.2V; 50 cicli di carica e scarica a C-rate diversi: C/10, C/5, C, 2C, 3C, 5C e 10C.

#### LA1.18 (ENEA) Principali risultati attesi:

Anodi: Relazione bibliografica sull'utilizzo di fosforo negli anodi per le NIB; sintesi caratterizzazione e studi elettrochimici sugli anodi a base di fosforo; ciclaggi galvanostatici nell'intervallo 0.0V-2.2V a C/10; ciclaggi galvanostatici a vari C-rate.

Catodi: Sintesi e caratterizzazioni di ossidi lamellari di stechiometria  $\text{Na}_x\text{A}_y\text{Fe}_z(\text{Mn,Cu})_{1-y-z}\text{O}_2$  con A=Ca,Zr e TM=Cu, Mn. Test elettrochimici: ciclaggi galvanostatici nell'intervallo 1.5V-4.5V a 0.1C; ciclaggi galvanostatici a vari C-rate nell'intervallo 1.5V-4.5V. In situ XRD durante i processi di carica e scarica nell'intervallo 1.5V-4.5V. Test elettrochimici tramite ciclaggi galvanostatici nell'intervallo 1.5V-4.5V a 0.1C e ciclaggi a vari C-rate su celle costituite da liquidi ionici quali elettroliti e da catodi prodotti con tecniche di "tape casting" e "stampa e coating"

LA1.19 (ENEA) Principali risultati attesi: - Sviluppo elettroliti per batterie al sodio aventi: tenore purezza > 99%; stabilità termica > 100°C; ininfiammabilità; conducibilità >  $10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$  (10°C) e >  $10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$  (-20°C); stabilità elettrochimica > 4.2 V e < 0.01 V; > 50 % capacità teorica a 1C dopo 500 cicli; realizzazione prototipi sodio-ione; - Rapporto tecnico [M36]; -Sintesi/caratterizzazione di formulazioni elettrolitiche per batterie al sodio ad elevata sicurezza/affidabilità; - Realizzazione/testing prototipi sodio-ione [M36]; - Produzione in scala da 1-2kg di liquidi ionici con lo stesso tenore di purezza (entro l'errore dell'0,5%) delle sintesi in scala di laboratorio; risultati dei test elettrochimici in semicelle o monocelle, realizzate combinando materiali anodici, catodici e/o elettrolitici prodotti dai tre affidatari.

LA 1.20 (ENEA) I principali risultati attesi saranno la struttura a bande elettronica e densità degli stati proiettata (PDOS) in manganiti drogate con Zr per almeno due composizioni e in manganiti co-drogate con Zr e Fe per almeno una composizione. Indicatori quantitativi: Struttura a bande elettronica e densità degli stati proiettata (PDOS) in manganiti drogate con Zr per almeno due composizioni, e co-drogate con Zr e Fe per almeno una composizione.

#### LA1.21 (ENEA - UNICAM SSTCH NB) Principali risultati attesi:

KPI 1: quantitativo di sodio in struttura  $\geq 0.6$  nei materiali catodici layered

KPI 2: assenza di formazione di NaOH e/o  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  per almeno 48 ore dopo esposizione della polvere catodica all'aria.

KPI 3: capacità specifica tra 120 e 160 mAh g<sup>-1</sup> (riferita alla massa di materiale attivo) per i catodi layered.

KPI 4: efficienza coulombica  $\geq 95\%$  per i catodi layered dopo cicli di formazione.

LA1.22 (ENEA - UNIRM1 SBAI SC) -Sintesi e caratterizzazione di materiali micro e nanostrutturati a partire da scarti minerali; -Caratterizzazione delle performances in batterie Na-ione, Zn-ione e Al-ione dei nuovi materiali elettrodi e dei nanotubi di biossido di titanio.

LA1.23 (ENEA - UNIRM2 DIF PL) Calcolo del potenziale di intercalazione medio del sodio in manganiti drogate con Zr per due composizioni, e co-drogate con Zr e Fe per una composizione.

LA1.24 (ENEA - UNINA DISCH PV) Principali risultati attesi: -indagine computazionale sul Na metallo e interfacce con elettrolita; -indagine computazionale sulla struttura e stabilità di elettrodi positivi basati su ossidi a strati di metalli di transizione; -Confronto con dati sperimentali; - Modelli atomistici quanto-meccanici di elettrodi ed interfacce in batterie al sodio ione.

LA1.25 (ENEA) Principali risultati attesi: 1) Sintesi OF elettroattivi o composti OF/materiali elettroattivi per tecnologie M-ione diverse dal litio, in grado di ciclare reversibilmente per 20 cicli una capacità specifica superiore al 30% della capacità specifica teorica o non inferiore a 50mAh/g; 2) 200mg di 4 OF da passare alla linea di attività 3.7; 3) Cella M-ione dimostrativa, con elettrodo a base di OF; 4) Protocollo sintesi materiali nanofibrosi elettrochimicamente attivi alla reazione di ossidazione dell'ossigeno per batterie base Zn.

LA 1.26 (ENEA - UNIBO DICH SV) Principali risultati attesi:

- 1) Analisi dello stato dell'arte degli elettroliti redox per sistemi elettrochimici di accumulo dell'energia di nuova generazione.
- 2) Formulazione di un elettrolita attivo a base di metalli polivalenti per supercapacitori redox operanti a  $> 1.8$  V e con energia specifica  $> 25$  Wh/kg e vita di ciclo dimostrata su 500 cicli.

LA 1.27 (ENEA - UNIRM1 HYECO NV) Principali risultati attesi:

- 1) composizione degli elettroliti LTTM/DES (relazione tecnica su O1 e O2)
- 2) preparazione degli elettroliti LTTM/DES (manufatto: almeno una formulazione di 10 ml rispondente agli O3, O4, O5)
- 3) prestazioni in cella con zinco metallico (relazione tecnica di fine LA con dimostrazione dell'O6).

LA 1.28 (ENEA - POLITO DISAT FR) Principali risultati attesi: 1) Sintesi materiale catodico avente capacità specifica  $\sim 5$  mAh/cm<sup>2</sup> in condizione di scarica (e ricarica) completa alla densità di corrente di 0.1mA/cm<sup>2</sup>; 2) Numero di cicli di carica-scarica superiore a 100 cicli in condizioni di capacità fissa (0.5 mAh/cm<sup>2</sup>) a densità di corrente di 0.1mA/cm<sup>2</sup>

LA1.29, LA1.30, LA1.31 (RSE - MAX): LA tra loro connesse. Sviluppo di materiali anodici per batterie agli ioni sodio e ioni litio a base di

MAXphase o MXeni. Si intendono realizzare campioni massivi ad elevata purezza (>75%), campioni compositi con materiali/elementi in grado di accumulare sodio mediante conversione/alligazione, valutare coating carboniosi con cui rivestire le polveri e processi di ossidazione per migliorare le prestazioni di cella, valutare soluzioni anode-less. A seconda del materiale realizzato, si ipotizzano prestazioni in semicella prossime a quelle teoriche (es. MAXphase ossidate e con rivestimento carbonioso: capacità > 130mAh/g a C/10 vs. Na/Na+).

Prodotti:

- rapporto tecnico (RT-1.02-1.29-1) "Anodi innovativi per NIB e LIB: sviluppo di MAX phase, MXeni e soluzioni anode-less"
- rapporto tecnico (RT-1.02-1.30-1) "Anodi innovativi per NIB e LIB: formulazioni innovative di MAX phase e miglioramento delle prestazioni in sistemi anode-less"
- rapporto tecnico (RT-1.02-1.31-1) "Nuove soluzioni per anodi NIB e LIB: verifica delle potenzialità oltre la scala di laboratorio"

LA1.32, LA1.33, LA1.34 (RSE – CARBON): LA tra loro connesse. Sviluppo di materiali anodici per batterie agli ioni sodio: 1) a base di Hard Carbon derivati da lignina, ottimizzati attraverso trattamenti chimici e fisici, mirati a modificare la loro microstruttura e/o la funzionalizzazione della superficie carboniosa (capacità specifica di scarica >100 mAh/g); 2) in grado di formare leghe con Na con ottimizzata composizione e spessore dell'inchiostro, a base di nanocompositi GFO/C, (capacità specifica di scarica >130 mAh/g), e a base di Sn (capacità specifica di scarica >200 mAh/g).

Prodotti:

- rapporto tecnico (RT-1.02-1.32-1) "Studio della lignina come biomassa per lo sviluppo di Hard Carbon e sviluppo di materiali nanocompositi ibridizzati con carbone come anodi a lega per batterie a ioni sodio"
- rapporto tecnico (RT-1.02-1.33-1) "Produzione di Hard Carbon e sviluppo di anodi a lega migliorando il processo di rivestimento carbonioso sui GFO e il controllo della morfologia durante la sintesi dei materiali a base di Sn"
- rapporto tecnico (RT-1.02-1.34-1) "Ottimizzazione degli elettrodi anodici per batterie a ioni sodio a base di Hard Carbon da lignina e di anodi a lega a base Sn e GFO"

LA1.35, LA1.36, LA1.37 (RSE – CATODI): LA tra loro connesse. Sviluppo di elettrodi catodici a base di ossidi layered ( $\text{Na}_0.66\text{MnO}_2$ ), di cui si vuole progressivamente aumentare le dimensioni dei batch di sintesi, con elevati standard di riproducibilità della sintesi (misure attraverso analisi XRD) e mantenendo elevate le prestazioni in semicella, o altri materiali ad esempio delle famiglie dei fosfati o pirofosfati, con l'obiettivo di trovare formulazioni con elevata sostenibilità e ottimizzati nelle prestazioni (efficienza Coulombica >70% per diversi cicli di carica e scarica). Contestuale sviluppo di elettroliti liquidi (liquidi ionici o mix di elettroliti organici e liquidi ionici), polimerici e solidi. Ci si propone di identificare la composizione migliore per garantire un'elevata stabilità e conducibilità ionica della coppia elettrodo-elettrolita.

Prodotti:

- rapporto tecnico (RT-1.02-1.35-1) "Metodi per l'implementazione delle prestazioni elettrochimiche di catodi a base  $\text{Na}_0.66\text{MnO}_2$ "
- rapporto tecnico (RT-1.02-1.36-1) "Indagine di materiali catodici ed elettrolitici per batterie a ioni sodio"
- rapporto tecnico (RT-1.02-1.37-1) "Produzione e caratterizzazione elettrochimica di elettrodi ed elettroliti in semicelle catodiche per batterie a ioni sodio"

LA1.38, LA1.39, LA1.40 (RSE – SCALE-UP): LA tra loro connesse. Sviluppo di monocelle alcalino-ione formato Honsen o Pouch. Ci si

propone di ottimizzare il protocollo di preparazione di elettrodi (composizione dell'inchiostro), lo sviluppo di additivi per la presodiazione/prelitazione e la stabilizzazione dell'interfaccia SEI, con l'obiettivo finale di una caratterizzazione elettrochimica in celle complete di materiali anodici, catodici ed elettroliti realizzati in RSE e/o dagli altri affidatari (miglioramento dell'efficienza Coulombica del primo ciclo: >90%; Capacity Retention tra il primo ciclo dopo la degradazione completa degli additivi e il 50-esimo ciclo: >80% della capacità iniziale).

Prodotti:

- rapporto tecnico (RT-1.02-1.38-1) "Formulazione di elettrodi per batterie agli ioni alcalini a basso contenuto di componenti inerti"
- rapporto tecnico (RT-1.02-1.39-1) "Sviluppo di metodi per la stabilizzazione di celle agli ioni alcalini"
- rapporto tecnico (RT-1.02-1.40-1) "Sviluppo e ottimizzazione di celle agli ioni alcalini ad alta efficienza e stabilità mediante mitigazione dell'irreversibilità"

WP2 Accumulo elettrochimico: sistemi innovativi

LA2.1 (CNR): Sviluppo di un modello di stima dei fenomeni di invecchiamento che integri i vincoli fisici dei dispositivi studiati per la riduzione della complessità pattern recognition di fenomeni di degradazione di dispositivi di accumulo di energia in tecnologia litio. Il modello di apprendimento data driven richiederà, a parità di input, un training più breve rispetto a modelli di reti neurali profonde già consolidati in letteratura. L'implementazione su tre differenti tipologie di hardware (in termini di memoria, processore, architettura) valuterà la scalabilità della soluzione rispetto alle risorse disponibili. RT-1.02-2.1-1 Relazione su modello basato su pattern recognition per la stima di fenomeni di invecchiamento di dispositivi di storage elettrico

LA2.2 (CNR): Sviluppo di un algoritmo di stima dei fenomeni di invecchiamento di celle litio, che integri vincoli fisici dei dispositivi studiati per ridurre la complessità di elaborazione e aumentare la robustezza avverso dati parzialmente corrotti. Ai fini della validazione dell'algoritmo sviluppato, i risultati saranno confrontati con quelli ottenuti nella prima parte della linea di attività (miglioramento delle figure di merito) e con altre attività di progetto (cross validazione dei risultati). RT-1.02-2.2-1: Relazione su tool numerici physics informed per la stima di fenomeni di invecchiamento di dispositivi di storage elettrico

LA2.3 (CNR): Sviluppo di un sistema in grado di monitorare le deformazioni meccaniche subite da celle commerciali durante i cicli di carica e scarica, utilizzando estensimetri a variazione di resistenza elettrica. L'efficacia del metodo sarà validata su diverse geometrie di cella e chimiche, ed eventualmente adattato per altre tecnologie esistenti. RT-1.02-2.3-1 Relazione sui risultati del monitoraggio della deformazione meccanica di batterie commerciali durante cicli di carica e scarica tramite sensori di deformazione

LA2.4 (CNR): Un sistema basato su sensori di deformazione strategicamente posizionati sulle celle, sarà utilizzato per monitorare le deformazioni meccaniche indotte dai cicli operativi. L'obiettivo è dimostrare l'efficacia del sistema per identificare il livello di invecchiamento delle batterie, analizzando l'influenza della tipologia di cella e della sua chimica. I dati raccolti saranno utilizzati per creare un dataset utile allo sviluppo di metodi predittivi di stima della vita residua delle batterie. RT-1.02-2.4-1 Relazione sui risultati del monitoraggio della deformazione meccanica di batterie commerciali durante invecchiamento ciclico.

LA2.5 (CNR): Creazione di un Set-up 3D di simulazione fluidodinamica computazionale di una semi-cella per l'estrazione di parametri elettrochimici, quali diffusione e costante cinetica della reazione elettrochimica, di materiali catodi e anodici di batterie agli ioni di Sodio, mediante fitting parametrico di curve sperimentali di scarica-rilassamento oppure carica-rilassamento. Creazione di un modello di cella completa capace di simulare processi di scarica e carica a diversi C-rate con RMSE > 0.9 e R2 prossimi ad 1. RT-1.02-2.5-1 Relazione sulla realizzazione del set-up di simulazione 3D.

LA2.6 (CNR): Screening di diverse configurazioni morfologiche sulla base della dispersione granulometrica, la dimensione radiale delle particelle oppure la forma geometrica di riferimento, che possono includere sfere, ellissoidi o nanotubi. Al fine di valutare quale massimizza l'immagazzinamento di Sodio, migliorando la capacità effettiva, oppure la stabilità ciclica della batteria, nell'eventualità di fenomeni di invecchiamento. RT-1.02-2.6-1 Relazione su simulazione computazionale per valutare capacità immagazzinata e ciclabilità

LA2.7 (CNR-UNIME DICB): Implementazione di modelli per celle post-litio basati su tecniche di intelligenza artificiale di tipo deep-learning funzionali alla stima di SoH e RUL; i modelli saranno resi disponibili in forma di codice sorgente sviluppato in linguaggio Python. RT-1.02-2.7-1 Report inerente le tecniche di Intelligenza Artificiale per la stima di SoH e la predizione del RUL di batterie post-litio.

LA 2.8 (CNR): Definizione di protocolli di test per l'analisi dell'impatto delle componenti armoniche ad elevata frequenza sull'invecchiamento delle batterie. I risultati ottenuti porteranno alla creazione di un dataset che verrà analizzato per valutare possibili correlazioni con il degrado ottenuto e definire gli eventuali meccanismi interni che lo hanno determinato. Scambio di dati e metadati tra i gruppi affidatari, secondo definite modalità. RT-1.02-2.8-1 Report inerente lo studio dell'impatto di componenti ad elevata frequenza sul degrado delle batterie.

LA2.9 (CNR-UNIME DIDC): Progettazione e simulazione di un convertitore statico di potenza a frequenza variabile (10kHz – 200 kHz). RT-1.02-2.9-1 Relazione tecnica sulla progettazione e risultati della simulazione del convertitore di potenza

LA2.10 (CNR-UNIME DIDC): Sviluppo di un convertitore bidirezionale con dispositivi a semiconduttore di tipo SiC e GaN in grado di generare armoniche di corrente ad alte frequenze. RT-1.02-2.10-1 Relazione tecnica sulla realizzazione del prototipo sperimentale con dispositivi a semiconduttore di tipo SiC e GaN.

LA2.11 (CNR-UNICT DIEEI): Sviluppo di un modello ECM a parametri variabili in grado di descrivere la dinamica di batterie al litio sottoposte ad eccitazione ad alta frequenza (fino a 100kHz) e della relativa procedura di identificazione parametrica. RT-1.02-2.11-1 Relazione tecnica sulle indagini iniziali, e sulla selezione della struttura del modello e della relativa procedura di identificazione parametrica. RT-1.02-2.11-2 Relazione tecnica su realizzazione del test-bench e sullo sviluppo e sulla validazione finale del modello.

LA2.12 (CNR-UNICT DIEEI): Sviluppo di un modello di invecchiamento per batterie al Litio connesse a convertitori statici di potenza ad elevata frequenza di commutazione equipaggiati con dispositivi WBG. RT-1.02-2.12-1 Relazione tecnica sull'analisi degli effetti delle componenti alternate di corrente e tensione a frequenze elevate sul cycle-aging.

RT-1.02-2.12-2 Relazione tecnica su realizzazione del test-bench e sullo sviluppo e sulla validazione finale del modello di ageing

LA 2.13 (CNR): Progettazione ottimale di strutture TPMS per scambiatori di calore aria-liquido da impiegare come struttura CORE dello scambiatore da integrare nelle strutture di manifolding per distribuzione dei fluidi e sviluppo di un modello di un Energy Management System (EMS) avanzato, in grado di ottimizzare la gestione energetica di un sistema di accumulo ibrido VRFB-LiB. RT-1.02-2.13-1 Relazione tecnica su studio termofluidodinamico di Strutture geometriche idonee per la realizzazione di superfici di scambio termico (TPMS strutture a lattice); RT-1.02-2.13-2 Report sulla metodologia di progetto di uno scambiatore di calore innovativo per impiego in sistemi VRFB; RT-1.02-2.13-3 Report sullo sviluppo di un modello matematico per il controllo e la gestione ottimizzata del sistema di accumulo ibrido.

LA2.14 (CNR): L'attività prevede la realizzazione di un prototipo di sistema di storage energetico ibrido VRFB - LiB. I principali risultati attesi includono: la validazione delle logiche di controllo ottimizzate, il miglioramento dell'efficienza termica del sistema tramite lo scambiatore di calore in plastica stampato in 3D, e l'ottimizzazione delle prestazioni complessive del sistema ibrido in condizioni operative reali. RT-1.02-2.14-1 Relazione inerente la realizzazione di scambiatore di calore per VRFB, ottenuto mediante manifattura additiva ad elevata area superficiale; RT-1.02-2.14-2 Report inerente la realizzazione di una piattaforma di controllo e gestione ottimizzata del sistema di accumulo ibrido.

LA2.16 (CNR): progettazione e realizzazione di un prototipo definito come Smart By-Pass (SBP) Progettazione di una centralina master di comando. L'insieme di tali elementi rappresenta la base per la realizzazione di un sistema di storage elettrico avente caratteristiche "Fault Tolerant. Indici quantitativi: 1) Tempo di commutazione totale minore di 0,02s 2) rendimento totale di commutazione >99% @ 1Hz di frequenza di variazione di stato, al passaggio di 500A di corrente. RT-1.02-2.16-1 Report sulla validazione di un prototipo sperimentale di Smart By Pass da applicare a sistemi di storage di tipo configurabile a servizio di impianti di generazione rinnovabile.

LA2.17 (CNR) RT-1.02-2.17 Indici quantitativi: 1) Capacità di limitare lo sbilanciamento in carica ed in scarica a meno di 0,02V rispetto al valore medio delle celle che compongono il sistema di accumulo 2) Fluttuazione della tensione totale durante ogni commutazione < 0,1V. RT-1.02-2.17 -1 Validazione di un prototipo sperimentale di sistema di storage di tipo configurabile con caratteristiche "Fault-Tolerant" a servizio di impianti di generazione rinnovabile di scala residenziale

LA2.18 (ENEA) Creazione di un repository contenente tutti i dati utili raccolti (tensione, corrente, impedenza, temperatura ecc.) durante la campagna sperimentale relativa ad invecchiamento delle celle elettrochimiche.

LA2.19 (ENEA - UNIRM2 DIII ML) -Modello di rappresentazione di un edificio e modello semplificato di una piccola comunità energetica per la valutazione delle logiche di controllo più efficaci per l'aggregazione di edifici a uso residenziale, considerando la scala delle comunità energetiche, concentrato sull'ottimizzazione degli scambi di energia all'interno della comunità stessa. -Gemello digitale semplificato di una batteria stazionaria Li-ion (in forte interazione con la LA3.6), in grado di restituirne il comportamento termico in funzione dei diversi dimensionamenti e delle diverse strategie di controllo identificate nel WP2.

LA2.20, LA2.21, LA2.22 (RSE - AGING): LA tra loro connesse. Sviluppo e validazione di modelli elettro-termici e di invecchiamento di moduli e celle innovative, allo scopo di implementare metodi diagnostici per la stima della vita residua di batterie innovative (es. sodio-ione). Implementazione della gestione ottimale di un sistema di accumulo tramite digital twin (considerando almeno tre scenari operativi). Realizzazione e implementazione del controllo di un convertitore MMC, utilizzato come BMS attivo di un sistema d'accumulo (costituito da almeno 6 moduli).

Prodotti:

- rapporto tecnico (RT-1.02-2.20-1) "Analisi di metodi diagnostici e di strumenti per batterie da second-life"
- rapporto tecnico (RT-1.02-2.21-1) "Sviluppo di metodi diagnostici e di strumenti per batterie da second-life"
- rapporto tecnico (RT-1.02-2.22-1) "Validazione di metodi diagnostici e strumenti per batterie second-life"
- Prototipo (HW-1.02-2.22-1) "Sistema di accumulo per applicazioni second life combinato a un convertitore MMC"

WP3 Accumulo elettrochimico: aspetti ambientali, economici e sociali e argomenti trasversali.

LA3.1 (CNR): creazione di un database LCI, basato principalmente su dati primari, di materiali/componenti innovativi per tecnologie di accumulo elettrico. RT-1.02-3.1-1 Report tecnico-scientifico su "Life Cycle Inventory (LCI) di materiali/componenti innovativi per batterie sodio-ione, alluminio-ione e redox a flusso di vanadio".

LA3.2 (CNR-UNIPA DI): Definizione di eco-profilo e di impatti energetico-ambientali di ciclo di vita di celle innovative e identificazione degli hot-spots energetico-ambientali, da sviluppare attraverso l'applicazione della metodologia Life Cycle Assessment al fine di supportare lo sviluppo di sistemi di accumulo di energia a più basso impatto ambientale. RT-1.02-3.2-1 Report su "Life Cycle Assessment applicata ai sistemi di accumulo di energia: analisi degli eco-profilo e stima degli impatti energetico-ambientali di ciclo di vita di celle/materiali innovativi".

LA 3.3 (ENEA) Principali risultati attesi: -Rapporto tecnico descrittivo delle attività svolte e dei risultati conseguiti; -File. CIF con le caratteristiche cristallografiche delle fasi mineralogiche individuate tramite diffrattometria a raggi X su polveri e su cristallo singolo, analisi composizionali qualitative e quantitative ottenute tramite microsonda elettronica e ICP, mappe su scala micrometrica delle fasi mineralogiche ottenute con spettroscopia Raman (immagini iperspettrali, ovvero matrici di spettri in formato ASCII).

LA 3.4 (ENEA) Principali risultati attesi: -Revisione TIMES-Italia con granularità temporale maggiore dello standard TIMES; -Estensione delle opzioni di flessibilità nel modello SAInt del sistema elettrico italiano; -Report su impatti sul sistema elettrico di diversi scenari di decarbonizzazione; -Database "aperto" sulle caratteristiche tecnico-economiche delle tecnologie di accumulo; -Report sui linguaggi open source per la modellazione dei sistemi elettrici; -Modello dimostrativo open source del sistema elettrico italiano.

LA 3.6 (ENEA) Principali risultati attesi: Ottimizzazione di almeno quattro formulazioni funzionali (che consentano un mass loading  $\geq 1$  mg/cm<sup>2</sup>) per la produzione di film con almeno due tecniche (rotocalco, bar coating, serigrafia e/o blade); Test delle formulazioni: viscosità e tensione superficiale; Test di stabilità delle formulazioni; Produzione di film attraverso almeno due tra le tecniche individuate; Mass loading dei film ottimizzati  $\geq 1$  mg/cm<sup>2</sup>; Caratterizzazione morfologica e funzionale dei film; Modello COMSOL di digital twin di batteria.

LA 3.7 (ENEA - UNIRM1 DIAEE RN) Principali risultati attesi: modello in ambiente FEM utilizzando il software COMSOL Multiphysics per analisi computazionali elettro-fluidodinamiche. Modello multi-modulo versatile ed efficiente al fine di essere utilizzato nell'ambito di un "digital twin" della batteria.

LA 3.8 (ENEA) La linea si pone l'obiettivo di sviluppare set up per la caratterizzazione e lo studio di materiali emergenti, come ad esempio hard carbons, membrane elettrofilate e MOF attraverso l'utilizzo di tecniche microscopiche, spettroscopiche con sorgenti anche non convenzionali, raggi X in diffrazione o in scattering, e modalità operando. Le tecniche permetteranno di andare più a fondo nella conoscenza dei materiali selezionati ed il loro comportamento in condizioni operative.

LA 3.9 (ENEA - UNIBO DCHIND GR) Definizioni di protocolli di misure con tecniche di raggi X a valersi sui materiali investigati, definizione ed individuazione dei vari standard per gruppi di materiali, definizione di protocolli per le analisi post-mortem per grippi di materiali, per applicazioni di stazionarie e per la mobilità elettrica; creazione di un dataset dataset contenete tutti i dati utili raccolti (XRD, XAS, XRF..) durante le varie campagne sperimentali.

LA 3.10 (ENEA - POLIMI DE BZ) Principali risultati attesi:

- Protocolli di sintesi di elettrocatalizzatori bifunzionali base Mn e Ni.
- Formulazione di GDE con processi water-based che assicurino stress catodico ed anodico minimale in condizioni operative di storage stazionario.
- Protocolli e test-rig di caratterizzazione elettrochimica rapida e per l'attività elettrocatalitica e per la performance di GDE in condizioni operative.
- Definizione di protocolli spettroscopici per la caratterizzazione morfochimica della durabilità di GDE.

WP4 Accumulo termico: materiali e sistemi innovativi

LA4.1 (CNR): Sintesi, caratterizzazione e verifica della stabilità dei materiali ottimizzati per la realizzazione del sistema di accumulo (SdA) da testare. Verifica della funzionalità tramite stazione di prova realizzata in condizioni termo-pressorie realistiche e tipiche dell'accumulo termico a medio-bassa temp. ( $T < 250^{\circ}\text{C}$ ). Verifica dei target di progetto: densità energetica volumetrica  $> 150 \text{ kWh/m}^3$  (stato arte =  $30\text{-}140 \text{ kWh/m}^3$ ); potenza specifica volumetrica di scarica  $> 20 \text{ kW/m}^3$  (stato arte =  $15 \text{ kW/m}^3$ ). RT-1.02-4.1-1 Report inerente lo sviluppo di un sistema di accumulo termochimico a medio-bassa temperatura ( $T < 250^{\circ}\text{C}$ ), basato sull'impiego di materiali compositi e/o nanostrutturati.

LA 4.2 (CNR): Caratterizzazione di materiali micro-mesoporosi funzionalizzati prodotti da UniRC tramite tecnica NMR allo stato solido, ATR-FTIR, SEM-EDX, DSC/TG e misura delle isoterme di adsorbimento tramite ttermogravimetria. Valutazione delle proprietà termiche, entalpia di adsorbimento e della stabilità strutturale a ripetuti cicli di adsorbimento/desorbimento dei materiali più promettenti. Analisi termodinamica e valutazione delle prestazioni di accumulo termico attese in confronto allo SoA. RT-1.02-4.2-1 Report inerente la caratterizzazione di materiali micro-mesoporosi funzionalizzati per l'accumulo termochimico a medio-bassa temperatura.

LA 4.3 (CNR-UNIRC): Realizzazione di un tessuto polimerico costituito da microfibre ibride con PCM stabilizzati all'interno della loro

struttura e con la presenza di additivi. I tessuti ottimizzati nella composizione polimerica e nel contenuto di PCM saranno caratterizzati da adeguate proprietà di stabilità, conducibilità termica, densità di accumulo energetico, performance meccaniche. Verrà inoltre valutata la sostenibilità ambientale del processo produttivo. RT-1.02-4.3-1 report di ottimizzazione, caratterizzazione e prototipazione di microfibre ibride con PCM stabilizzati e additivi.

LA 4.4 (CNR-UNIRC): Campioni di zeoliti modificate che avranno raggiunto una densità di energia > 300 GJ/m<sup>3</sup> con una temperatura di attivazione compresa tra 150 °C e 250 °C. Definizione dei protocolli di trattamento per zeoliti commerciali allumino-silicatiche per il raggiungimento del target di densità di energia di accumulo previsto. Caratterizzazione strutturale e definizione delle proprietà delle zeoliti modificate in termini di composizione chimica, proprietà termiche, capacità di adsorbimento, isobare di adsorbimento/desorbimento. RT-1.02-4.4-1 Report su sviluppo di materiali micro-mesoporosi funzionalizzati.

LA4.5 (ENEA): I principali risultati attesi dall'attività consistono in un prototipo operativo del sistema di accumulo termico a bassa temperatura e in un rapporto tecnico che documenta il collaudo e la campagna sperimentale. Il rapporto fornirà risultati utili per la validazione e l'ottimizzazione del sistema, contribuendo a migliorare le sue prestazioni e la sua efficienza operativa.

LA4.6 (ENEA): Il principale risultato atteso dall'attività consiste in un rapporto tecnico che descrive le curve ai carichi parziali, derivate dal modello termodinamico del ciclo di potenza integrato con il sistema di accumulo freddo, e gli esiti dell'applicazione della correlazione tra la posizione angolare delle VGV dei compressori e la performance del ciclo di potenza ai carichi parziali.

LA4.7 (ENEA): Valutazione della fattibilità tecnologica di un nuovo sistema di conversione elettro-termica e accumulo termico dell'energia con materiale a base cementizia con proprietà dissipative (conduttive/resistive), attraverso la realizzazione e lo studio del comportamento termodinamico di un modello numerico computazionale di un prototipo da laboratorio.

LA4.8 (ENEA): Dimostrazione della validità tecnologica e della fattibilità di un nuovo sistema di conversione elettro-termica e accumulo termico dell'energia con l'utilizzo di un materiale a base cementizia con proprietà dissipative (conduttive/resistive), attraverso la realizzazione e la caratterizzazione di un prototipo di laboratorio.

LA4.9 (ENEA): Verifica sperimentale della stabilità di moduli di materiali per accumulo termico sensibile latente a media temperatura attraverso prove di lunga durata e previsione del suo comportamento attraverso modellistica di sistema.

LA4.10 (ENEA) raccolta di proprietà termofisiche e di stabilità, e relativi modelli predittivi, riguardo sistemi di accumulo termico. Sviluppo software stand-alone scaricabile: database/calcolatore sviluppato open-source.

LA4.11 (ENEA): il Software database/calcolatore, sviluppato nella precedente LA, sarà implementato su sito web nel dominio ENEA. Verrà fornita una guida utilizzo sito web contenente database/calcolatore per dati riguardanti materiali per accumulo termico.

LA4.12 (ENEA): Verifica sperimentale della stabilità di materiali per accumulo termochimico ad alta temperatura attraverso prove di lunga durata.

LA4.13 (ENEA): Analisi preliminare delle prestazioni di un sistema di accumulo termochimico ad alta temperatura con alimentazione ibrida termica ed elettrica.

LA4.14 (ENEA - UNIRM3 DIEM): Studiare gli esiti relativi all'utilizzo del Codice ARGO® potenziato per il pre-dimensionamento dei compressori centrifughi; i modelli CFD dettagliati delle turbomacchine con la definizione della funzione di trasferimento per la gestione della posizione angolare delle VGV dei compressori; l'analisi delle prestazioni termiche degli scambiatori di calore accoppiata alla modellazione ai carichi parziali delle turbomacchine.

LA4.15 (ENEA - UNIPG DICEA): Ricavare le proprietà caratteristiche di una o più formulazioni di calcestruzzo con buone proprietà conduttive-dissipative e caratteristiche di capacità termica (P2H-TES-CLS). Un P2H-CLS può essere considerato performante se riduce circa due ordini di grandezza la resistività elettrica rispetto al CLS standard ( $R_s(W\cdot m)$  CLSref=104-103 W·m CLSP2H=102-101 W·m). La formulazione con le migliori caratteristiche sarà utilizzata per produrre un modulo in scala da laboratorio per verificare i risultati ottenuti. Tale modulo sarà quindi inviato ad ENEA per la realizzazione di un prototipo funzionale alla sua linea di ricerca.

LA4.16 (ENEA - UNIPG DICEA): Sintesi e caratterizzazione di un materiale a cambio di fase per alte temperature ( $T > 300$  °C) adatto alla stabilizzazione per incapsulamento in mezzo poroso assorbente. Sintesi e caratterizzazione di un PCM micro-incapsulato con un livello incapsulamento maggiore del 50% in massa, per applicazioni in alte temperature. Sintesi di pellets o strutture bulk a base di mEPCM per applicazioni di stoccaggio e scambio di calore ad alta temperatura con entalpie di cambio di fase maggiori di 50 kJ/kg.

LA4.17 (ENEA - UNIRM1 DICMA DR): identificazione di una configurazione ottima del componente a materiale di cambiamento di fase e l'identificazione di una configurazione ottima per lo scambiatore di calore ad aria.

LA4.18 (ENEA- UNIFG DAFNE): Software: Modulo di OpenModelica per l'analisi del comportamento termico di un sistema di accumulo "tube&shell" con materiali cementizi additivati con piccole quantità di PCM; Software: Modulo di OpenModelica per l'analisi del comportamento termico di un sistema di accumulo "tube&shell" con materiali a cambiamento di fase (PCM); Report riportante le fasi di sviluppo e validazione dei due moduli in OpenModelica.

LA4.19 (ENEA - UNIRM1 DICMA MR): l'identificazione di un processo industriale che richieda calore in condizioni di temperatura compatibili con quelle della fase di carica del sistema CaO/CaCO<sub>3</sub>, sviluppo di modelli a parametri concentrati per la descrizione dell'andamento nel tempo della disponibilità di calore derivante da un sistema a concentrazione solare e della richiesta di calore da parte di tale processo, integrazione delle tre unità in uno schema di processo.

LA4.20 (ENEA - UNIRM1 DICMA MR): proposta di schema di processo che comprenda la fonte di calore, l'unità di stoccaggio termochimico e un processo industriale che utilizzi il calore rilasciato in fase di scarica.

LA4.21 (ENEA - UNIRM2 NAST): Caratterizzazione e valutazione di materiali di storage termico, per accumulo di energia termica proveniente da calore ed energia elettrica.

LA4.23, LA2.24, LA2.25 (RSE - TERMOCHIMICO): LA tra loro connesse. Studio di materiali termochimici composti avanzati e di altri materiali termochimici porosi. Si intende lavorare su due strade: materiali ad alte prestazioni (densità target: 300 kWh/mc) o a basso costo (densità target: 150 kWh/mc). Sviluppo di un ambiente simulativo completo per valutare l'integrazione ottimale del sistema di accumulo termochimico con un'utenza termica domestica. Realizzazione di un impianto dimostrativo di rigenerazione solare di materiali termochimici in configurazione a reattore separato per l'accumulo di calore stagionale.

Prodotti:

- rapporto tecnico (RT-1.02-4.23-1) "Definizione di una metodologia di test per soluzioni di accumulo TCES e progettazione di un impianto dimostrativo solare per l'analisi del processo estivo di accumulo termico stagionale"
- rapporto tecnico (RT-1.02-4.24-1) "Studio di materiali termochimici composti avanzati e sviluppo di un ambiente simulativo completo per valutare l'integrazione ottimale del sistema di accumulo termochimico con una utenza termica domestica"
- Modello (MD-1.02-4.24-1) "Modello numerico di un reattore per accumulo termochimico basato su materiali composti"
- Impianto (HW-1.02-4.24-1) "Impianto dimostrativo di rigenerazione solare di materiali termochimici in configurazione a reattore separato per l'accumulo di calore stagionale"
- rapporto tecnico (RT-1.02-4.25-1) "Sviluppo e caratterizzazione di materiali termochimici avanzati, prove di rigenerazione materiali con impianto solare e ottimizzazione parametrica dell'integrazione di un sistema di accumulo termochimico all'interno di un'utenza domestica"

LA4.26, LA2.27, LA2.28 (RSE - ATEs): LA tra loro connesse. Sviluppo di modelli integrati geologico fluidodinamico ed energetico utenza-impianto di sistemi di accumulo termico in acquifero (ATES). Si intende proporre uno strumento comparativo delle migliori configurazioni progettuali individuate per le quali si presentano le condizioni ideali per la realizzazione di impianti ATES, accoppiati alle tipologie di utenza analizzate (parametri idrogeologici in esame: spessore acquifero, tipologia di acquifero, conducibilità idraulica e gradiente idraulico; parametri impiantistici: zona climatica, fabbisogni energetici, configurazione delle utenze).

Prodotti:

- rapporto tecnico (RT-1.02-4.26-1) "Sistema integrato ATES-impianto: analisi dei parametri geologici ed energetici e impostazione del modello geologico"
- rapporto tecnico (RT-1.02-4.27-1) "Sistema integrato ATES-impianto: impostazione delle simulazioni fluidodinamiche e definizione del modello utenza-impianto"
- rapporto tecnico (RT-1.02-4.28-1) "Sistema integrato ATES-impianto: identificazione delle condizioni progettuali ottimali"

WP5 Diffusione dei Risultati

LA 5.1 (CNR): RT-1.02-5.01-: Coordinamento delle attività progettuali, divulgazione della progettualità attraverso eventi in presenza e da remoto, congressi, incontri tavoli europei, organizzazione workshop. RT-1.02-5.01-1: Report di ATTIVITA' DI DIFFUSIONE.

RT-1.02-5.01-2, RT-1.02-5.01-3

LA 5.2 (ENEA) Gestione del progetto: 3 riunioni fisiche, almeno 4 online e monitoraggio continuo dello stato di avanzamento del progetto. Facilitazione dei flussi di informazione e materiale delle LA collegate. Diffusione dei risultati: almeno 3 eventi di diffusione aperti al pubblico, un evento dedicato a stakeholder specifici per la miglior valorizzazione dei risultati e un evento/scuola dedicato ai giovani ricercatori e/o forza lavoro specializzata. Partecipazione a convegni, meeting, network europee e internazionali; pubblicazioni su riviste e notizie sui canali web di ENEA.

LA5.03 (RSE). Monitoraggio e partecipazione ai gruppi di lavoro di molteplici iniziative internazionali, europee e nazionali che riguardano i sistemi di accumulo elettrochimico e termico, esaminando la redazione delle agende strategiche, delle roadmap tecnologiche e dei piani di implementazione, nonché di tutte le azioni di sviluppo tecnologico e promozione dei SdA. Comunicazione diffusione dei risultati del progetto. Le attività includono la partecipazione e organizzazione di conferenze, eventi, workshop e seminari, l'uso dei social media come LinkedIn e la produzione di materiali di comunicazione come articoli, blog, comunicati stampa, presentazioni e video. L'obiettivo è creare network tra università, centri di ricerca, industrie e istituzioni sui risultati di progetto. Obiettivo trasversale della linea è anche la gestione tecnica delle LA di RSE, la comunicazione interna al progetto con gli altri affidatari, il monitoraggio continuo dello stato di avanzamento del progetto, delle attività tecniche di RSE e dei partner con cui RSE collabora.

Prodotti:

- rapporto tecnico (RT-1.02-5.03-1) "Attività internazionali, europee e nazionali sui sistemi di accumulo elettrochimico e termico"

## 2.6 Fattibilità tecnico-scientifica

### a) Fattibilità tecnico-scientifica

Il progetto integrato 1.2 racchiude una grande complessità di partner e attività; per garantirne la riuscita è necessario un monitoraggio e coordinamento continuo. Per questo è stato definito innanzitutto un modello di gestione a partire dai tre gruppi affidatari.

Il modello di gestione si basa sulla forte collaborazione instaurata negli anni tra i tre affidatari. È stato istituito, già a partire dal precedente triennio RdS, un organo di gestione primario del progetto, definito management board (MB) che raggruppa i referenti dei tre gruppi affidatari, in cui CNR agisce da coordinatore.

Il MB si riunisce almeno 6 volte l'anno per questioni di ordine generale: riunioni periodiche online, per discutere di opportunità e criticità, per gestire la comunicazione interna e verso l'esterno, per condividere materiale e informazioni di vario tipo.

Vengono poi indette delle riunioni straordinarie al bisogno o per affrontare argomenti specifici come le attività comuni ai tre affidatari o l'organizzazione di attività di disseminazione comuni.

Ad un secondo livello di gestione, ciascun ente fungerà da hub organizzativo per gestire le interazioni e gli scambi di materiale e conoscenza con i propri co-beneficiari o collaboratori. In particolare, il rapporto tra affidatario e co-beneficiario (ENEA e CNR) è regolato da contratti specifici ed esiste un responsabile di parte per ogni contratto. Stessa cosa vale per RSE che con i propri partner e collaboratori scientifici attiva contratti di collaborazione onerosi o non onerosi. In tali accordi e contratti sono definiti gli obiettivi, le attività e i risultati/prodotti concordati attesi dalla collaborazione e definite specifiche milestone tecniche sul cui rispetto e, quindi, sul pieno raggiungimento degli obiettivi intermedi e finali della collaborazione, vigila il ricercatore identificato come referente scientifico del contratto/accordo di collaborazione.

A tutelare il rispetto di obiettivi e tempi di consegna dei prodotti richiesti ai co-beneficiari (ENEA e CNR) e collaboratori (RSE) vigilano anche gli stessi responsabili di progetto dei tre enti con azioni di verifica periodica sui singoli contratti.

Nel corso dello svolgimento del progetto avverranno riunioni periodiche ristrette a determinate linee di ricerca o che coinvolgono tutti i beneficiari/collaboratori di un ente a seconda dell'esigenza, in modo da raccogliere le esigenze e criticità e riportarle nel management board meeting. Il MB può decidere se intervenire sulle criticità attraverso il coinvolgimento di un intero WP del progetto, chiamando tutti i responsabili di linee di attività a condividere le loro conoscenze con gli altri partecipanti attraverso workshop o meeting specifici. In

questo modo le criticità potrebbero essere ridotte o annullate, grazie all'azione collettiva dei partner di progetto.

Il WP5, attraverso le attività di gestione e comunicazione interna e di disseminazione esterna, diventa un ulteriore strumento del MB per assicurare il flusso di conoscenza e informazione all'interno del progetto e ovviamente anche verso gli stakeholder esterni e il pubblico in generale. Nello stesso convogliano i risultati delle attività comuni sulle batterie sodio-ione per avere una maggiore risonanza.

Per garantire il raggiungimento degli obiettivi del progetto e monitorarne l'andamento, sono stati individuati strumenti efficaci per l'identificazione delle principali criticità associate a ciascuna Linea di Attività (LA). Contestualmente, sono state definite le opportune contromisure per mitigare o eliminare eventuali effetti negativi. Questi aspetti sono descritti in dettaglio nella sezione dedicata agli output del progetto (scheda 9 - Tabella riassuntiva prodotti della ricerca ed elementi di verifica del progetto) e all'analisi dei rischi e dei processi di mitigazione (scheda 10 - Piano di rischio).

In generale, la misura del conseguimento degli obiettivi del progetto è dettagliata all'interno di ogni singola LA in termini di target sperimentali qualitativi e numerici, laddove possibile applicarli. All'interno del WP1, i test di caratterizzazione chimico-fisica (XRD, SEM, TEM, BET ecc.) eseguiti sui materiali oggetto di studio quali elettrolita, binder e/o materiale elettrodico, saranno propedeutici per la determinazione della qualità della sintesi e dei processi scelti per lo sviluppo degli stessi. Tali studi consentiranno di agire per il superamento di eventuali criticità, attuando soluzioni utili all'ottimizzazione morfologica-strutturale del materiale attraverso modifiche alla procedura e/o alle condizioni di sintesi fino a valutare una metodologia di sintesi alternativa. Definita la qualità da un punto di vista chimico-fisico, i campioni saranno sottoposti a test di caratterizzazione elettrochimica (voltammetria ciclica ed impedenza complessa e cicli di carica / scarica) al fine di valutarne le prestazioni in semicella e/o monocella, attraverso la determinazione di parametri fondamentali quali reversibilità cinetica, conducibilità ionica, resistenza di cella, capacità specifica ecc., determinanti al fine della prestazione di cella quale ad esempio la ciclabilità.

La presenza di possibili criticità per le attività di diagnostica e controllo condotte all'interno del WP2 è monitorabile basandosi sulla reperibilità di dispositivi, dati e modelli e dalla complessità realizzativa di test, per le quali sussistono contromisure stimate e dettagliate nel piano di rischio. Tra le azioni di mitigazione, sono previsti il reperimento di moduli, celle attraverso un opportuno scouting di fornitori, nonché il reperimento di dati pubblici, l'attuazione di strategie alternative di diagnostica e controllo e il ricorso a simulazioni (quali modelli analitici di letteratura).

Analoghi rischi dovuti al reperimento di dati primari si possono presentare all'interno del WP3; questi possono essere sostituiti o integrati (laddove incompleti) da dati presenti in letteratura o facendo ricorso alla libreria implementata da dati sperimentali acquisiti nelle precedenti annualità su analoga tematica.

I rischi associati alle attività del WP4 riguardano lo sviluppo dei materiali; la criticità principale è determinata dalle facility di prova che spesso sono impianti prototipali soggetti a rotture. Il controllo e il ripristino immediato dei componenti guasti è la chiave del successo di queste attività; in alcuni casi sono previsti sensori, apparecchiature per la circolazione di fluidi in numero ridondante. Anche nel WP4 sono presenti diverse attività modellistiche, di simulazione e controllo, facendo in alcuni casi uso anche di tecniche di deep learning.

Il WP5 non comporta particolari rischi, per lo meno tali da impedire una regolare comunicazione sia da remoto che in presenza. Pertanto, il rispetto degli impegni di comunicazione e divulgazione sarà gestito tra i tre enti con il supporto delle rispettive strutture di comunicazione, oltre che dal supporto di CSEA. Un numero adeguato di risorse sarà focalizzato sulla diffusione dei risultati e sul sostegno alle imprese e alle istituzioni italiane nei tavoli di lavoro a livello nazionale, europeo e internazionale.

Una particolare attenzione è dedicata alle diverse interazioni tra le LA nei singoli WP, sia interne ai singoli gruppi affidatari con i rispettivi co-beneficiari e sub-contractor, sia tra gli affidatari stessi. Il dettaglio di ogni interazione tra WP e LA è riportato nelle singole LA, nella tabella dei prodotti (scheda 9) e in quella di valutazione dei rischi (scheda 10), nonché a livello di descrizione generale degli obiettivi di WP. Di seguito si richiamano le principali interazioni tra gli affidatari nei singoli WP e le criticità.

Relativamente al WP1, i tre gruppi affidatari svolgeranno attività integrate riguardanti la caratterizzazione elettrochimica in semicella e/o monocella dei materiali sviluppati dai partner coinvolti nella collaborazione congiunta. L'attività si svolgerà in stretta interazione tra la LA1.6 (CNR), la LA1.19 (ENEA) e la LA1.40 (RSE) e sarà fondamentale per identificare un futuro percorso finalizzato alla realizzazione di una cella completa a ioni sodio, analizzando la compatibilità e le prestazioni dei diversi componenti. Nello specifico, i dettagli operativi, i dati sperimentali raccolti e un'analisi critica dei risultati derivanti dalla caratterizzazione elettrochimica di semicelle o monocelle ottenute combinando materiali anodici, catodici ed elettrolitici prodotti dai tre affidatari saranno documentati in un rapporto tecnico dedicato.

Questa attività potrebbe comportare alcuni rischi, principalmente legati al possibile deterioramento dei campioni durante la fase di trasporto. Per mitigare tali criticità, verranno adottate misure preventive adeguate, tra cui l'isolamento efficace dei campioni dagli agenti esterni e l'applicazione di procedure ottimali per la loro manipolazione. Inoltre, per garantire la continuità delle attività sperimentali e ridurre l'impatto di eventuali imprevisti, verranno inviati lotti separati atti a coprire un quantitativo di materiale superiore al necessario, così da compensare possibili perdite o errori di utilizzo.

Relativamente al WP2, i rischi associati alle interazioni tra le LA2.8 (CNR), LA 2.18 (ENEA), LA 2.22 (RSE) nella raccolta di dataset di aging si possono ritenere trascurabili (rischio residuo accettabile) avendo già sviluppato un'esperienza durante il precedente triennio di attività sulla medesima tematica. Pertanto, l'unica fonte di rischio può essere la consistenza intrinseca delle misure svolte nelle stesse attività, che quindi sono state riportate nei relativi piani di rischio.

In merito alle attività congiunte sui temi della sostenibilità affrontati nel WP3, l'interazione tra le LA3.1, LA3.2, LA3.5 è favorita dalle diverse progettualità condivise in ambito europeo (Mission Innovation, RdS, StoRIES, RISE). Pertanto, la definizione di un database di dati primari condivisi sulle tecnologie di accumulo in studio, comporta solo rischi imputabili al reperimento degli stessi.

Per quanto riguarda l'analisi costi-benefici, sebbene non sia possibile quantificare direttamente i benefici economici derivanti dall'attività, è comunque possibile fornire una valutazione dell'importanza economica dell'area di ricerca. Per costruire una filiera europea solida lungo l'intera catena del valore delle batterie, così come per altre tecnologie e processi ad alta intensità energetica e ad elevate emissioni, è fondamentale ridurre la dipendenza attuale dalle importazioni di materiali definiti "critici" e "strategici". Questi materiali sono essenziali per i processi produttivi, la lavorazione e il funzionamento di molte tecnologie avanzate. Per questo motivo, è necessario adottare una politica ambiziosa che richieda un impegno congiunto da parte degli Stati membri dell'UE, incentivando la ricerca e lo sfruttamento sostenibile delle risorse disponibili all'interno dei territori comunitari, ma anche incentivando la diversificazione di approvvigionamento. Questo approccio mira a favorire uno sviluppo tecnologico innovativo e sostenibile, in linea con le direttive europee e gli obiettivi del Green Deal. In questa direzione si colloca il Net Zero Industry Act (NZIA), il cui obiettivo è accelerare lo sviluppo e la produzione di tecnologie a zero emissioni, rafforzando la competitività e la resilienza dell'industria europea nel settore della transizione energetica. Il regolamento stabilisce un quadro normativo per la produzione di tecnologie pulite, includendo prodotti, componenti e attrezzature essenziali per la realizzazione di soluzioni a impatto ambientale nullo o ridotto. Il target prefissato guarda al raggiungimento del 40% della produzione nazionale di tecnologie strategiche entro il 2030; dare enfasi all'avanzamento delle tecnologie di accumulo, soprattutto batterie. Ancora più specifico sul tema materie prime è il Critical Raw Material Act che definisce target sfidanti di produzione (estrazione), trasformazione (raffinazione) e riciclo di materie prime in Europa e suggerisce una diversificazione degli approvvigionamenti extra-comunitari per limitare il rischio legato al predominio sul mercato da parte di pochi Paesi, primo tra tutti la Cina.

Nel corso del 2023, in Italia sono stati installati complessivamente circa 69 GW di rinnovabili, con il fotovoltaico che ha superato i 30 GW e l'eolico poco sopra i 12 GW. Tale dato è indicativo del notevole incremento nell'installazione di capacità di energia rinnovabile rispetto al passato, raggiungendo un record di 5,7 GW. Sebbene questo incremento sia positivo, è importante notare che la quantità installata non è ancora allineata con gli obiettivi di decarbonizzazione fissati per il 2030, come delineato nel Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC). Nonostante le criticità ad oggi evidenti, la crescita è stimata in forte ascesa al 2050 proprio come diretta conseguenza della transizione verso sistemi di produzione di energia non programmabile. A luglio 2024, l'Italia ha presentato la versione finale del PNIEC aggiornato che stabilisce un obiettivo ambizioso del 63% della domanda di elettricità da fonti rinnovabili entro il 2030. Ha inoltre delineato piani per significative espansioni di capacità, tra cui obiettivi di 80 GW di energia solare fotovoltaica e 28 GW di energia eolica entro il 2030.

Nel settore dell'AE, a distanza di solo 1 anno dalle dichiarazioni di Stellantis e Italtel su importanti investimenti per la costruzione di Gigafactory di batterie al litio sul territorio nazionale, si registra un cambio di marcia verso altre tipologie di investimento. Pertanto, nonostante la forte crescita nel settore delle rinnovabili, sussistono ancora difficoltà concrete dettate soprattutto dalla competitività straniera. Stellantis, che aveva pianificato la realizzazione di una gigafactory per batterie elettriche presso lo stabilimento di Termoli, a febbraio 2025, ha annunciato l'avvio della produzione di trasmissioni a doppia frizione per veicoli ibridi nello stesso sito, posticipando a metà anno le decisioni sull'investimento per la gigafactory. Italtel, che aveva annunciato l'intenzione di costruire una delle più grandi

gigafactory d'Europa a Scarmagno (TO), con una capacità produttiva prevista di 45 GWh all'anno, ha deciso di abbandonare il progetto italiano, optando per la realizzazione di un impianto analogo negli Emirati Arabi Uniti, citando condizioni commerciali più favorevoli. Attualmente l'unica fabbrica di celle di batterie in Italia è rappresentata dalla sede SERI/FAAM di Teverola che intende espandere le proprie linee di produzione celle LFP fino a raggiungere alcuni GWh/anno nei prossimi anni. Ci sono poi le linee di produzione di sistemi d'accumulo elettrochimico di Flash Battery e MIDAC, che assemblano tecnologie celle provenienti da mercati internazionali.

Sebbene attualmente non vi siano gigafactory operative in Italia per la produzione di batterie, sono in corso iniziative significative in altri settori tecnologici che potrebbero portare benefici sulla filiera delle batterie in Italia. L'azienda 3Sun a Catania prevede la costruzione di una gigafactory per la produzione di pannelli solari che, dichiarando una capacità produttiva di 3 GW/anno, diventerà la più grande fabbrica di pannelli solari in Europa, con conseguenti ripercussioni nell'indotto dei sistemi di accumulo.

Infine, a livello mondiale, l'attuazione delle politiche del NZIA porteranno, secondo le proiezioni dell'IEA, alla generazione di energia elettrica da rinnovabili dagli attuali 10.000 TWh a fronte di circa 18.000 TWh da combustibili fossili a 70.000 TWh al 2050 e il raggiungimento della decarbonizzazione, con un totale di capacità installata proveniente da sistemi di accumulo elettrochimico pari a 5500 GW al 2050 con una riduzione dei costi delle celle che compongono i pacchi batteria, dagli attuali 150 €/kWh, ai 55-80 €/kWh. Alla luce di quanto esposto, sussistono innegabili difficoltà burocratiche che si scontrano con i costi di installazione poco competitivi rispetto ad altri Paesi. L'attività progettuale, pertanto, contribuisce all'individuazione di materiali innovativi, sostenibili e facilmente reperibili per aumentare la competitività degli stessi in un'ottica di riduzione dei costi.

## 2.7 Impatto sul sistema energetico e benefici attesi

### a) Impatto e benefici sul sistema energetico

Gli eventi politici degli ultimi anni hanno evidenziato la vulnerabilità energetica dell'Europa; le ricadute si sono tradotte in forti aumenti dei costi delle materie prime a base di combustibili fossili, con sostanziali ripercussioni tecniche ed economiche, dalla rete all'utente finale, beneficiario dei servizi energetici. Da allora, l'EU ha messo in campo diverse misure ritenute strategiche per svincolarsi dalla dipendenza energetica di Paesi politicamente instabili. Queste si concretizzano in finanziamenti e normative atte ad accelerare verso soluzioni energetiche alternative ai combustibili fossili e orientate verso i net-zero emission target al 2050, a partire dalla diversificazione delle fonti di approvvigionamento energetico fino agli investimenti nelle fonti rinnovabili (FER). In Italia, l'obiettivo della produzione e dell'integrazione delle FER non programmabili (FRNP), previsto dal PNIEC aggiornato a giugno 2024, è incrementato a +39,4% di energia da FRNP entro il 2030; tale aumento è attribuibile al recente Green Deal, anch'esso aggiornato, in cui emerge la fiducia a favore della crescita esponenziale delle tecnologie di accumulo, sempre più cruciali per garantire la stabilità della rete elettrica e massimizzare l'efficienza delle energie rinnovabili. Parallelamente, emergono nuove fragilità dettate dall'aumento della domanda di materie prime ritenute critiche e strategiche (CRM e SRM), che impattano gravosamente su tutti i settori legati alla doppia transizione digitale ed ecologica e, in particolare, in un settore come quello dell'accumulo elettrochimico, in cui la disponibilità di risorse diventa un fattore chiave per lo sviluppo tecnologico. Basti pensare che negli ultimi 10 anni, il solo costo del materiale catodico per batterie a ioni-litio, alla base del funzionamento della tecnologia e costituito da elementi ritenuti critici, è in forte ascesa mostrando un trend dei prezzi in costante aumento arrivando oggi a rappresentare il 30% del costo totale di una batteria, oggi stimato pari a 163€/kW in EU, ovvero il 40% in più rispetto al costo nei paesi asiatici (116€/kW). Ad oggi, il mercato delle batterie è dunque sotto un nuovo monopolio che vede i Paesi asiatici, come Cina, Giappone e Korea, leader incontrastati lungo tutto la catena del valore dei sistemi di accumulo, dall'estrazione dei materiali, alla raffinazione, alla manifattura dei componenti fino ad arrivare all'assemblaggio di celle, moduli e pacchi batteria. A tale scopo, l'EU ha messo di recente in atto azioni rivolte ad accelerare e rafforzare la filiera europea del settore a partire da normative quali il recente Critical Raw Material Act (CRMA), che pone obiettivi sfidanti per l'Europa su incremento di estrazione, trasformazione e riciclo, e il Net Zero Industry Act (NZIA), orientato proprio a migliorare la capacità produttiva europea di tecnologie a impatto zero e dei loro componenti chiave, affrontando gli ostacoli all'aumento della produzione in Europa. Il presente progetto si trova ad affrontare attività sfidanti consapevole del lungo percorso ancora necessario per raggiungere gli obiettivi 2030 ed oltre; alla luce della situazione nazionale, caratterizzata da un limitato accesso alle risorse minerarie essenziali per la produzione di materiali per batterie e altri sistemi di stoccaggio, l'attività progettuale, basata su studi ritenuti strategici su materiali alternativi e sostenibili per tecnologie di accumulo sia più mature che di frontiera, contribuirà al superamento di importanti criticità ancora esistenti e soluzioni più efficienti alla sicurezza energetica della fornitura, contribuendo così all'aumento della competitività in un'ottica di abbassamento dei costi degli stessi. La grande mobilitazione nel settore dell'accumulo dell'energia è tale da prevedere risvolti importanti in termini di impatti ambientali e socio-economici, contribuendo alla riduzione delle emissioni per il 30% e allo sviluppo di oltre 10 milioni di nuovi posti di lavoro, riconducibili alla nascita di nuove figure professionali in tutta la filiera industriale che ruota attorno al settore dei sistemi di accumulo. È proprio il coinvolgimento del mondo delle imprese che sarà fortemente attenzionato dalla compagine progettuale, attraverso la creazione di incontri periodici con stakeholder coinvolti e non nello specifico settore; diffondere la consapevolezza di nuovi mercati emergenti consentirà il rilancio dell'impresa con la crescita di nuove piccole e/o grandi realtà industriali specializzate sul territorio.

**b) Benefici per gli utenti**

Il progetto fornirà un contributo rilevante a tutti i soggetti coinvolti nello sviluppo e nell'utilizzo di tecnologie di accumulo: costruttori di tecnologie d'accumulo, operatori di reti energetiche, industria e utenti finali dei servizi energetici. Il beneficio per tutti gli utenti è prevedibile nel medio-lungo termine e sarà essenzialmente di natura economica (riduzione dei costi delle tecnologie) e di sostenibilità ambientale (grosso impatto sulla decarbonizzazione), ma anche di natura tecnica (accesso a tecnologie più affidabili, sicure e ad alte prestazioni). Nello specifico, lo sviluppo di filiere nazionali, lungo l'intera catena del valore, consentirà di svincolarsi progressivamente dalla sudditanza energetica da altri paesi. Il tutto comporterà dei benefici che avranno ripercussioni in bolletta, con conseguente abbassamento dei costi per gli utenti finali. A livello ambientale, la produzione di energia da FR non programmabili genererà benefici sia a livello locale che a scala globale, ma lo sviluppo di questo scenario dovrà essere sostenuto necessariamente dallo sviluppo e dalla penetrazione delle tecnologie di accumulo.

Per quanto riguarda il settore dell'accumulo elettrochimico, si sta assistendo a un aumento della richiesta di batterie, dovuto principalmente alla mobilità elettrica, ma anche il sistema elettrico è diventato un driver importante. Al momento, questa richiesta è soddisfatta da prodotti che arrivano dall'Asia e dal Nord America. In futuro si auspica una produzione europea di batterie, a coprire almeno in parte questo fabbisogno, con l'Italia player importante. La realizzazione di giga-factory europee necessita di un opportuno sviluppo tecnologico competitivo. Lo sviluppo tecnologico, svolto nel presente progetto, tramite attività sperimentali, può consentire un miglioramento delle prestazioni delle batterie, una riduzione dei costi e un incremento della loro vita utile, anche mediante l'utilizzo di materiali economicamente e ambientalmente più sostenibili la cui localizzazione geo politica non risulti critica. Questo potrebbe consentire un rilancio del settore delle batterie in Europa e in Italia. Un esempio di rilancio del settore potrebbe avvenire con lo sviluppo di una filiera produttiva di batterie a sodio-ione, a partire da quanto sviluppato nel progetto, a disposizione di quelle realtà industriali nazionali che volessero sviluppare questa tecnologia di accumulo elettrochimico.

Inoltre, i sistemi di accumulo commercialmente già disponibili (es. batterie litio-ione) presentano elevati margini di miglioramento dal punto di vista della gestione. Nuovi algoritmi di diagnostica e controllo possono aumentare prestazioni e affidabilità del sistema, riducendone quindi il costo totale, senza cambiare la tecnologia chimica delle batterie utilizzate. Inoltre, a breve, molte batterie di seconda mano saranno disponibili sul mercato, provenienti dal settore veicolare. Per poterle riutilizzare per applicazioni stazionarie è necessario prevedere appositi dispositivi di diagnostica, monitoraggio e controllo che possano limitare il degrado dei materiali e aumentare la manutenibilità degli algoritmi di controllo. L'attività prevista nel progetto permetterà di ridurre il costo dei sistemi d'accumulo, integrando batterie usate (più economiche di quelle nuove), garantendo elevate performance, in termini di energia disponibile e vita utile, e un elevato grado di sicurezza e affidabilità.

Per quanto riguarda il settore termico, gli obiettivi di crescita al 2030 della quota rinnovabile determinano un notevole utilizzo di accumuli termici a diverse temperature, finalizzati a supportare l'integrazione, la penetrazione e gestire le discontinuità di generazione.

I sistemi di Accumulo Termico (AT), infatti, offrono vantaggi significativi in diversi settori industriali, contribuendo a migliorare l'efficienza energetica e a ridurre la dipendenza dai combustibili fossili. Questo si traduce in un risparmio economico grazie alla diminuzione dei costi di approvvigionamento, ad esempio per il gas naturale, attualmente utilizzato anche per il riscaldamento industriale.

L'adozione di sistemi di AT è cruciale per una maggiore integrazione delle fonti rinnovabili nel settore termico, aprendo la strada a un futuro energetico più sostenibile. Un aspetto importante è il loro basso impatto ambientale: i materiali da studiare in questo progetto sono da ricercarsi tra quelli facilmente disponibili in Italia, tipo calcestruzzi, carbonati o ossidi metallici, evitando quelli tossici o nocivi, in modo da non comportare rischi di esaurimento delle risorse o di inquinamento, e al contempo ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub>, permettendo l'utilizzo in continuità delle risorse rinnovabili. In particolare, in questo progetto si perseguono i seguenti benefici:

Sviluppo di materiali innovativi: ricerca e sviluppo di materiali adatti a processi industriali specifici, come quelli che richiedono intervalli di temperatura ristretti o elevata potenza di scarica, evitando l'uso di materiali strategici o provenienti da forniture limitate; ricerca e sviluppo di materiali ad alta densità adatti all'accumulo stagionale per il riscaldamento di edifici.

Sviluppo di database sui materiali in modo che siano facilmente fruibili per istituti di ricerca, università, industrie, professionisti e singoli utenti che potrebbero trarne beneficio diretto per applicazioni di accumulo di energia termica o contribuire ad uno sviluppo scientifico,

anche con integrazioni o accoppiamenti a processi già esistenti.

Progettazione di sistemi innovativi e integrati: creazione di approcci sistemici per una migliore integrazione delle energie rinnovabili nei processi industriali, attraverso una maggiore modularità, un design ottimizzato e soluzioni ingegneristiche efficienti per l'accumulo e il trasferimento di calore a diverse temperature (da 0 a 900°C).

Sviluppo di tecniche di deep learning, addestrati con campagne di dati sperimentali ad hoc per meglio simulare processi ed i sistemi.

### c) Previsione delle ricadute applicative

Ad oggi, la Cina rappresenta il Paese economicamente più vantaggioso per realizzare fabbriche di tutte le principali tecnologie di energia pulita (solare, eolico, batterie, elettrolizzatori, veicoli elettrici e pompe di calore); un'analisi dell'IEA (Energy Technology Perspective 2024, IEA 2024c) condotta su oltre 750 impianti di produzione indica che i costi di capitale e di finanziamento sostenuti per costruire un impianto di produzione di energia pulita negli Stati Uniti e in Europa sono in genere superiori del 70-130% per unità di capacità produttiva rispetto a quelli in Cina. Pertanto, alla luce di questi dati è chiaro come per i Paesi europei diventi ancora più sfidante il lungo percorso di transizione appena avviato. Le azioni politiche messe in atto dalla comunità europea si stanno dimostrando "disruptive", analogamente alle soluzioni tecnologiche verso cui è invitata a orientarsi la comunità scientifica. Il mondo della R&S deve proporre soluzioni innovative verso quei settori ritenuti strategici alla crescita del Paese, interagendo sinergicamente con il crescente tessuto industriale in progressiva espansione. L'obiettivo ultimo è quello di contribuire alla sostenibilità e alla innovazione tecnologica, attraverso studi su materiali che siano sempre più performanti, facilmente reperibili e a basso impatto ambientale, attraverso il controllo e l'ottimizzazione dei parametri elettrochimici e termici e dei processi di produzione, allo scopo di favorire l'aumento della competitività del settore. L'approfondimento degli studi avanzati su tecniche di analisi computazionale e predittiva, nonché valutazioni di Life Cycle Assessment (LCA) applicate alle tecnologie di accumulo elettrochimico permetteranno di massimizzare l'utilizzo degli output del progetto per accelerare verso soluzioni e scelte più consapevoli. Gli obiettivi scientifici del progetto mostrano la coerenza delle attività proposte rispetto alle direttive europee e del recente PNIEC; le soluzioni validate nell'ambito del progetto rivestono un ruolo strategico sia nel breve che nel lungo termine. Nell'immediato, favoriscono la formazione di nuove figure professionali altamente qualificate, tra cui ricercatori, dottorandi, assegnisti di ricerca e tecnici, contribuendo alla progressiva crescita di un tessuto industriale in continua evoluzione. Nel medio-lungo termine, tali attività permetteranno lo sviluppo di competenze specializzate lungo l'intera filiera, inclusi i settori del riciclo dei materiali e del riuso delle batterie, incentivando la nascita di nuove realtà imprenditoriali e favorendo la creazione di posti di lavoro ad alta qualificazione. La progressiva strutturazione di un mercato dedicato all'introduzione di tecnologie innovative e poco diffuse consentirà alle aziende manifatturiere di esplorare nuove prospettive di crescita, favorendo il rinnovamento industriale, l'ottimizzazione delle risorse e la valorizzazione delle proprie competenze in ottica di innovazione e sostenibilità.

Un discorso analogo riguarda l'accumulo termico. L'adozione di tecnologie di stoccaggio termico, basate su materiali comuni e facilmente reperibili, è cruciale per incrementare l'utilizzo di fonti rinnovabili non programmabili e per ammodernare le infrastrutture energetiche. Queste soluzioni abilitano l'erogazione di servizi di flessibilità alla rete elettrica in contesti industriali e terziari, preparando gli utenti a partecipare, autonomamente o in gruppi, al Mercato dei Servizi per il Dispacciamento elettrico (MSD). In particolare, i sistemi di accumulo termico a media e alta temperatura sono essenziali per ottimizzare la gestione dei flussi termici in settori chiave come l'industria, soprattutto per processi endotermici ad elevato consumo energetico, o la produzione di energia da fonti rinnovabili.

Nello specifico, l'accumulo termico promuove un uso più efficiente dell'energia attraverso il recupero e il riutilizzo del calore di scarto, l'immagazzinamento di calore prodotto da fonti rinnovabili (solare termico e termodinamico, biomasse, pompe di calore) e la produzione combinata di energia elettrica e calore/freddo tramite co/trigenerazione.

Nonostante il suo elevato potenziale, il recupero del calore di scarto industriale è ancora ampiamente sottoutilizzato a causa di difficoltà tecniche ed economiche nell'applicazione dei metodi tradizionali di recupero del calore, nonché a causa di una mancata corrispondenza tra l'energia rilasciata e il calore richiesto. Queste problematiche possono essere facilmente superate attraverso l'impiego di tecnologie di accumulo termico.

Per quanto riguarda l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili nel settore produttivo, l'industria è in ritardo, con solo il 14% dei consumi finali coperto da fonti rinnovabili. Al contrario, l'industria a livello mondiale consuma il 32% dell'energia globale, di cui il 74% è attribuibile ai consumi termici. Pertanto, vi è un ampio spazio per l'applicazione di soluzioni di accumulo termico volte a supportare l'integrazione e la penetrazione delle energie rinnovabili.

In riferimento all'accumulo di energia frigorifera sotto forma di ghiaccio, in Italia e a livello internazionale esistono prodotti industriali consolidati. Tuttavia, la soluzione di accumulo di ghiaccio proposta mira a sviluppare e testare soluzioni tecnologiche per applicazioni su scala industriale, agendo indipendentemente sulle dimensioni dell'energia e della potenza. In questo modo, la capacità del sistema di

accumulo termico diventa una funzione lineare del volume d'acqua, rendendo la scalabilità del sistema economicamente competitiva.

Di seguito sono evidenziati i settori che offrono il maggior potenziale applicativo in corrispondenza dei differenti livelli termici di funzionamento dei sistemi di accumulo termico:

Accumuli termici a bassa temperatura (generalmente tra 10°C e 150/200°C): principalmente impiegabili nei settori alimentare, cartario e tessile, oltre che per il riscaldamento degli ambienti in tutti i settori.

Accumuli termici a media temperatura (150/200°C - 250/400°C): possono essere impiegati nei settori chimico, alimentare e cartario.

Accumuli termici ad alta temperatura (generalmente superiori a 250/400°C): le maggiori necessità si riscontrano nei settori della lavorazione dei metalli e dei minerali non metalliferi (ad esempio, vetro, ceramica) e nel settore chimico.

Da ciò si evince il grande interesse per lo sviluppo dell'accumulo di energia, in tutte le forme e livelli di temperatura trattati nel presente progetto.

## 2.8 Verifica dell'esito del progetto

### a) Oggetti e documentazione dei risultati finali

Ogni linea di attività prevista presenta almeno un rapporto tecnico. In sintesi: il WP1 produrrà circa 40 rapporti tecnici, descrittivi degli sviluppi effettuati sui materiali avanzati e dispositivi di accumulo elettrochimico (elettrodi, elettroliti, binder, semicelle, monocelle ecc.); il WP2 produrrà circa 20 rapporti tecnici, descrittivi degli sviluppi effettuati sui sistemi innovativi di accumulo elettrochimico (strumenti di diagnostica, monitoraggio e controllo); il WP3 produrrà circa 10 rapporti tecnici, descrittivi degli aspetti ambientali ed economici legati allo sviluppo delle tecnologie di accumulo elettrochimico (analisi delle potenzialità di estrazione geotermica di litio, studi LCA/LCC); il WP4 produrrà circa 30 rapporti tecnici, descrittivi degli sviluppi effettuati su materiali, processi e sistemi di accumulo termico (materiali attivi, supporti, modelli, prototipi ecc.), il WP5 produrrà 3 rapporti tecnici, descrittivi delle attività di diffusione dei risultati di progetto e delle attività nei gruppi di lavoro di tutte le iniziative internazionali, europee e nazionali che riguardano le tecnologie di accumulo elettrochimico e termico.

La verifica dei prodotti sarà possibile accertandosi che i risultati intermedi e finali rispecchino quanto riportato nel capitolato di progetto. Gli elementi per il test di verifica di ciascun prodotto, sia qualitativi che quantitativi (se applicabili), sono elencati nella scheda 9: "Tabella riassuntiva prodotti della ricerca ed elementi di verifica del progetto".

Il progetto darà luogo a diverse tipologie di output, che si concretizzano nelle seguenti macro-tipologie:

- rapporti tecnici, descrittivi delle attività svolte; la verifica sarà effettuata accertandosi che i contenuti e i risultati siano rispondenti a quanto indicato nella descrizione di LA e nella scheda 9: "Tabella riassuntiva prodotti della ricerca ed elementi di verifica del progetto";

- materiali (campioni massivi, polveri, stese, elettrodi ecc.); la verifica sarà effettuata accertandosi che i risultati delle caratterizzazioni chimico-fisiche effettuate in laboratorio siano opportunamente descritti nei rapporti tecnici corrispondenti o in altra documentazione prodotta dagli enti (es. articoli su riviste);

- prototipi/impianti/dispositivi/dimostratori (semicelle, monocelle, sistemi, impianti, test-facility, ecc.); la verifica sarà effettuata accertandosi che i risultati delle caratterizzazioni di funzionamento effettuate in laboratorio, mediante ad esempio cicli di carica e scarica di una cella, cicli di assorbimento e cessione calore, siano opportunamente descritti nei rapporti tecnici corrispondenti o in altra documentazione prodotta dagli enti (es. articoli su riviste); in alcuni casi i prodotti potranno essere visionabili presso i laboratori in cui

sono stati realizzati; in questo caso potrà capitare che il prodotto sia stato oggetto di cicli di caratterizzazioni che ne hanno compromesso il funzionamento (es. cicli di carica e scarica fino a fine vita del dispositivo) e, quindi, il prodotto sia smaltito a fine vita o oggetto di analisi post-mortem che ne ha richiesto il disassemblaggio;

- software (modelli, codici, algoritmi, ecc.); la verifica sarà effettuata accertandosi che i risultati delle simulazioni di funzionamento, effettuate con gli strumenti di calcolo disponibili presso ciascun ente, siano opportunamente descritti nei rapporti tecnici corrispondenti o in altra documentazione prodotta dagli enti (es. articoli su riviste); in alcuni casi, il listato del software, o l'eseguibile, o il manuale operativo sarà reso disponibile attraverso il sito internet dell'ente sviluppatore o attraverso altri canali più appropriati (es. Git-Hub);

- data-set (tabelle, file, schede, ecc.); la verifica sarà effettuata accertandosi che i dati, resi disponibili, siano opportunamente descritti nei rapporti tecnici corrispondenti o in altra documentazione prodotta dagli enti (es. articoli su riviste); in alcuni casi, i data-set saranno consultabili direttamente tramite un database realizzato dall'ente che ha prodotto i dati;

- Metodologie (matrici di prova, protocolli di test, assunzioni modellistiche, ecc.); la verifica sarà effettuata accertandosi che le metodologie siano opportunamente descritte nei rapporti tecnici corrispondenti o in altra documentazione prodotta dagli enti (es. articoli su riviste).

Una sinossi di tutti i prodotti intermedi e finali del progetto (hardware, software e documenti) è riportata nella scheda 9: "Tabella riassuntiva prodotti della ricerca ed elementi di verifica del progetto", cui si rimanda per l'indicazione dei principali elementi per il test di verifica.

Si riportano di seguito alcuni indicatori quantitativi, adottati per la valutazione intermedia e finale degli esiti delle attività, presenti nella scheda 9: "Tabella riassuntiva prodotti della ricerca ed elementi di verifica del progetto":

- purezza dei materiali, indica la percentuale della fase cercata, rispetto al totale della massa di un prodotto di sintesi
- capacità di un materiale elettrochimico, indica l'energia che il materiale è in grado di immagazzinare/restituire durante i cicli di carica e scarica (in genere la capacità è espressa in termini specifici rispetto alla massa di materiale, mAh/g)
- potenziale di un elettrodo, indica la tensione elettrica che si stabilisce fra l'elettrodo e il metallo alcalino
- resa di un processo di sintesi, rappresenta in genere la percentuale di massa di un prodotto finale cercato rispetto alla massa dei precursori utilizzati
- efficienza Coulombica, rapporto percentuale tra la capacità fornita in fase di scarica e la capacità accumulata in fase di carica
- capacity retention, misura il degrado di una cella elettrochimica dopo diversi cicli di carica e scarica, rispetto ai valori di capacità iniziali
- accuratezza, indica quanto un dato teorico, desumibile da un algoritmo, un codice, un modello ecc. sia prossimo a un valore misurato in test di validazione
- errore di previsione, è il duale dell'accuratezza
- densità energetica, indica l'energia che un materiale d'accumulo è in grado di immagazzinare rispetto alla sua massa o volume, kWh/mc
- capacità di accumulo termico: quantità di energia termica che il sistema di accumulo termico può fornire con una scarica completa, in

condizioni iniziali e finali ben definite. Si differenzia dalla densità energetica, dove si considerano trasferimenti di calore ideali, kWh/mc.

- tasso di utilizzo: rapporto, espresso in percentuale, tra la capacità di accumulo e la capacità di accumulo teorica del sistema di accumulo di energia termica nelle condizioni nominali. Il tasso di utilizzo nominale si ottiene quando si considera una scarica completa. Per valutare questo parametro, si deve indicare chiaramente cosa è considerato o meno nella capacità di accumulo teorica: fluido, materiale di riempimento, pareti, cestelli, scambiatori di calore integrati, isolamento termico e così via.

-tempo di carica/scarica: è il tempo necessario al sistema di accumulo termico per caricarsi/scaricarsi da un livello di accumulo inferiore/superiore B a un altro livello di accumulo superiore/inferiore A in condizioni di carica/scarica nominali. Il tempo di carica/scarica nominale si ottiene quando si esegue una carica/scarica completa, s.

- perdite termiche: energia termica persa dal sistema di accumulo durante un intervallo di tempo dall'istante in cui si trova nello stato di accumulo A (a  $t=t_A$ ) all'istante in cui si trova nello stato di accumulo B (a  $t=t_B$ ), kWh. Le perdite termiche devono essere fornite a un livello di temperatura specificato.

- efficienza energetica dell'accumulo termico: rapporto tra l'energia guadagnata dal fluido termovettore dal dispositivo di accumulo durante la scarica e l'energia fornita ad esso dal fluido termovettore durante la carica, in cicli consecutivi di carica e scarica. Quando si applicano le condizioni nominali, cioè carica e scarica complete, si ottiene l'efficienza di accumulo nominale.

- efficienza exergetica dell'accumulo termico: Rapporto tra l'exergia guadagnata dal fluido termovettore dal dispositivo di accumulo durante la scarica e l'energia fornita ad esso dal fluido termovettore durante la carica. L'exergia (nota anche come energia disponibile) rappresenta quella parte di una quantità convertibile in lavoro in un dispositivo reversibile all'interno di un ambiente di riferimento. L'analisi exergetica considera il livello di temperatura (e quindi la qualità) dell'energia trasferita.