

# PIANO TRIENNALE DI REALIZZAZIONE 2022-2024 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]
- 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]
- 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 Bari Aldo Moro - Dipartimento di Scienze del Suolo, della Pianta e degli Alimenti (DiSSPA) [UNIBA DiSSPA]
- Università degli Studi di Camerino - Scuola di Scienze e Tecnologie Sezione di Chimica [UNICAM SSTCH NB]
- Università degli Studi di Napoli Federico II - Dipartimento di Scienze Chimiche [UNINA DISCH PV]
- Università degli studi di Padova - Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale (ICEA) [UNIPD ICEA]
- Università degli Studi di Palermo CLLMRZ63E04E573C [UNIPA]

- DI]
- Università degli Studi di Perugia - Dipartimento di Ingegneria civile ed ambientale [UNIPG DICEA]
- Università degli Studi di Roma "La Sapienza" - Dipartimento di Scienze di Base e Applicate per l'Ingegneria (SBAI) [UNIRM1 SBAI SC]
- Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"- Dipartimento di Ingegneria e dell'Impresa "Mario Lucertini" [UNIRM2 CM]
- Università degli Studi di Roma La Sapienza - Dipartimento di Chimica [UNIRM1 DICH BR]
- Università degli Studi di Roma La Sapienza - Dipartimento di Chimica [UNIRM1 HYECO NV]
- Università degli Studi di Roma La Sapienza - Dipartimento Ingegneria Chimica, Materiali, Ambiente (DR) [UNIRM1 DICMA DR]
- Università degli Studi di Roma La Sapienza - Dipartimento Ingegneria Chimica, Materiali, Ambiente (MR) [UNIRM1 DICMA MR]
- Università degli Studi di Roma Tor Vergata - Centro Interdipartimentale Nanoscienze, Nanotecnologie & Strumentazione (NAST) [UNIRM2 NAST LC]
- 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 DIII ML]
- Università degli Studi Roma Tre - Dipartimento di Ingegneria Industriale, Elettronica e Meccanica [UNIRM3 DIIEM]
- Università di Foggia - Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimenti, Risorse Naturali e Ingegneria [UNIFG DAFNE]
- Università Mediterranea della Calabria [UNIRC]
- UNIVERSITA' degli Studi di Messina-Dipartimento di ingegneria [UNIME DICB]
- UNIVERSITA' degli Studi di Messina-Dipartimento di ingegneria [UNIME DICP]
- UNIVERSITA' degli Studi di Messina-Dipartimento di ingegneria [UNIME DIML]
- UNIVERSITA' degli Studi di Messina-Dipartimento di ingegneria

- [UNIME DIPR]
- UNIVERSITA' degli Studi di Messina-Dipartimento di ingegneria [UNIME DIXB]
- UNIVERSITA' degli Studi di Palermo [UNIPA DFC]

**Durata del progetto: 36 mesi**

**Costo proposto: 15.953.439,39 €**

## 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 progetto integrato "Tecnologie di accumulo elettrochimico e termico" vede i tre enti di ricerca italiani, CNR, ENEA e RSE, coinvolti nel piano triennale PT 22-24 per il raggiungimento di uno dei due obiettivi generali del nuovo accordo di Programma (AdP), ovvero quello della decarbonizzazione al 2050. L'approccio è rivolto allo sviluppo tecnologico dei sistemi d'accumulo (SA) lungo tutta la catena del valore (cdv), abbracciandone i diversi settori o segmenti costituenti. L'intento è quello di indirizzare gli sforzi dei tre enti in maniera massiva e puntuale, con un approccio multidisciplinare, multisettoriale e multi-obiettivo, in grado di esplorare i sistemi più promettenti in termini di tecnologie, taglie, chimismi, processi e applicazioni, in un'ottica di sostenibilità ambientale, economica e sociale.

Per l'accumulo elettrochimico (AE), particolare attenzione è posta sugli aspetti di reperimento e sviluppo dei materiali, primo e più importante tassello della cdv del settore, in quanto responsabili del 60% del costo totale della tecnologia e degli aspetti legati alla sicurezza. Il maggiore sforzo è rivolto verso materiali attivi meno costosi e anche più sostenibili da un punto di vista ambientale. Questo discorso è rivolto sia a tecnologie più mature, per avere già a oggi KPI di partenza affidabili e consolidati, sia a tecnologie di frontiera, con l'obiettivo di consolidarne e validarne le performance nell'ottica dello sviluppo della batteria sostenibile del futuro. Si esploreranno le potenzialità delle risorse geominerarie del territorio; si realizzeranno materiali sempre più performanti, meno costosi e a basso impatto sociale e ambientale da impiegare nelle diverse tecnologie trattate. Sono, inoltre, proposti studi sull'eco-design di cella e di batteria, lavorando sui processi produttivi di componenti, pensando allo smaltimento, riuso e riciclo nell'ottica della circolarità e sostenibilità. Con lo stesso intento, sono avviati studi riguardanti la diagnostica e il controllo dei SA che mirano a incrementarne la vita utile, lavorando sulla loro gestione ottimizzata e sulla stima del tempo di vita utile rimanente, anche in applicazioni di second life. Infine, sono proposte analisi di sostenibilità mediante studi LCC, LCA e di impatto socioeconomico, nonché attività di modellazione chimico fisica su materiali, interfacce e cella completa e attività modellistiche di simulazione dell'intero SA. Tutti questi strumenti sono intesi a supporto delle attività proposte, allo scopo di accelerare il raggiungimento degli obiettivi del progetto ed esaltarne le potenzialità in ambito applicativo, primariamente rivolto a una mitigazione dell'impatto ambientale e del costo su tutto il ciclo di vita, in un'ottica "cradle-to-grave".

Anche le attività riguardanti l'accumulo termico (AT) sono distribuite sull'intera cdv, in quanto sono affrontate tematiche di sviluppo di materiali, tecnologie e processi, con l'obiettivo di aumentare la densità energetica delle diverse soluzioni proposte, garantendo maggiore stabilità e ciclabilità dei materiali, perseguendo un maggiore allineamento tra i tempi di carica e scarica del sistema AT e del processo industriale al quale è accoppiato, mantenendo centrali gli aspetti economici e ambientali.

In generale, la presente proposta è fortemente indirizzata su attività sperimentali che vogliono essere rappresentative proprio di quei segmenti della cdv che devono essere rafforzati, attraverso il raggiungimento di obiettivi specifici condotti in maniera sinergica da tutta la compagine progettuale. Tale approccio consente di monitorare ogni segmento della cdv, massimizzando le azioni rivolte alla risoluzione delle specifiche criticità del settore e al raggiungimento di risultati che possano essere sfruttati al meglio dagli stakeholder industriali nel mercato nazionale ed europeo. In tale contesto, i 3 enti affidatari, in collaborazione con importanti università italiane, intervengono sugli aspetti cruciali dell'intera tematica di interesse, argomentati all'interno dei singoli Work-Package (WP), contenenti le Linee di Attività (LA) attraverso le quali si sviluppa tutta l'attività progettuale, ponendosi obiettivi quantitativi, ove possibile, e tempistiche realizzative. Nello specifico, il progetto consta di un totale di n°5 WP, di cui n°3 WP dedicati all'AE, n°1 WP dedicato all'AT e infine n° 1 WP dedicato alla diffusione dei risultati. Le LA del WP1 sono rivolte alla realizzazione di materiali elettrochimici di elettrodi ed elettroliti. L'obiettivo proposto per i materiali elettrodici, anodici e catodici, è quello di aumentarne la sicurezza, la sostenibilità e le prestazioni, sia per tecnologie più mature del tipo litio-ione e redox a flusso, ma anche per tecnologie di nuova generazione (litio GEN 4-5), o alternative al litio, come le sodium-based, nonché di frontiera. Obiettivo analogo è proposto sullo sviluppo degli elettroliti (liquidi, solidi, quasi-solidi, ecc.) che devono essere stabili, sicuri e in grado di migliorare le prestazioni elettrodiche. Parallelamente, si affrontano studi computazionali e di caratterizzazione per lo screening di materiali e la modellazione di problematiche d'interfaccia. Si evidenziano nel WP1 due attività fortemente sinergiche: realizzazione di una cella pouch completa con elettrodi sviluppati da diversi affidatari; realizzazione di un Round Robin test presso i laboratori dei tre enti per lo screening di materiali e procedure d'assemblaggio di semicelle sodio-ione. All'interno del WP2 sono trattati i sistemi di AE; sono condotti studi di eco-design e realizzazione di celle complete per uno scale up applicativo (dai materiali alla cella) finalizzato alla produzione sostenibile di batterie innovative; sono affrontate problematiche di

diagnostica e controllo, definendo e adottando processi innovativi, funzionali a diverse strategie di ricarica e applicazioni, per migliorare le prestazioni delle batterie in termini di vita operativa, efficienza, affidabilità e sicurezza. Si evidenzia nel WP2 un'attività fortemente sinergica: la definizione di una matrice di prova di invecchiamento comune e la condivisione dei dataset di prova acquisiti da ciascun ente presso i propri laboratori. Il WP3 riguarda gli aspetti trasversali dei sistemi AE, legati alla loro sostenibilità; sono affrontati studi dedicati alla validazione della sostenibilità ambientale ed economica delle tecnologie in esame, inclusi studi LCA/LCC; sono proposti studi di impatto socio-economico sulla realizzazione di giga-factory; è fatta una valutazione delle potenzialità geominerarie di materie prime in ottica di una maggiore sicurezza e sostenibilità di approvvigionamento, valutando in particolare la risorsa delle brine geotermiche, oggetto di attività sperimentale, e le prospettive dell'urban mining. Le LA del WP4 sono dedicate all'AT; sono studiate diverse tipologie di materiali ad alta densità energetica e supporti in grado di migliorarne le prestazioni in termini di resistenza, stabilità e sicurezza; sono sviluppati processi e tecnologie a diversa temperatura d'esercizio, dalle alte temperature adatte ad applicazioni di produzione di energia elettrica o a processi industriali, alle medie e basse temperature adatte ad applicazioni di climatizzazione residenziale (raffrescamento e riscaldamento), con focus sull'accumulo stagionale (dinamiche lente) o su dinamiche di risposta più rapide, conformi a sistemi power to heat. Il WP5 è dedicato alle attività di diffusione e al supporto delle istituzioni e degli stakeholder italiani in tutte le iniziative nazionali, europee e internazionali riguardanti i sistemi d'accumulo, iniziative che vedono i 3 enti collaborare nei vari gruppi di lavoro e negli organismi di coordinamento.

L'obiettivo finale del progetto è quello di agire da volano per lo sviluppo di materiali e tecnologie innovative di accumulo nell'ottica di migliorare performance, resilienza, sicurezza e sostenibilità economica e ambientale.

Il modello di gestione del progetto si basa sulla forte collaborazione instaurata negli anni tra i tre enti affidatari. I referenti di CNR, ENEA e RSE, sotto la guida di CNR, fungeranno da management board e saranno assicurate frequenti interazioni attraverso riunioni periodiche on-line (ogni mese e mezzo circa) per tenere sotto controllo l'andamento del progetto e organizzare le attività di disseminazione comuni. 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 attiva contratti di collaborazione onerosi o non onerosi con elementi di verifica, tipo milestone, con i quali procede alla verifica dell'obiettivo fissato e al pagamento della quota dovuta al raggiungimento dell'obiettivo. Stessa cosa vale per RSE che con i propri partner e collaboratori attiva contratti di collaborazione onerosi o non onerosi; in tali 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 RSE identificato come referente scientifico del contratto 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 management board 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 comuni di disseminazione diventa un ulteriore strumento del management board per assicurare il flusso di conoscenza e informazione all'interno del progetto e ovviamente anche verso gli stakeholder esterni e il pubblico in generale.

### Abstract del progetto ENG

The integrated project "Electrochemical and thermal storage technologies" involves CNR, ENEA and RSE in the three-year plan PT 22-24 for the achievement of one of the two general objectives of the new Program Agreement (AdP): the decarbonisation by 2050. The approach is aimed at the technological development of storage systems (SS) along the entire value chain (vc), embracing the various sectors or constituent segments. The intent is to direct the efforts of the three research entities in a massive and timely manner, with a multidisciplinary, multi-sectoral and multi-objective approach, capable of exploring the most promising systems in terms of technologies, sizes, chemicals, processes and applications, with a view to environmental, economic and social sustainability.

Regarding electrochemical storage (ES), particular attention is paid to material R&D aspects, the first and most important element of the sector's VC, as they are responsible for 60% of the total cost of the technology and closely related to battery's safety. The greatest effort is directed towards less expensive and more sustainable active materials from an environmental point of view. This discussion is aimed both at more mature technologies, in order to already have reliable and consolidated starting KPIs today, and at frontier technologies, with the aim of consolidating and validating their performance with a view to developing the sustainable battery of the future. The potential of the geo-mineral resources of the territory will also be explored; materials will be prepared that are increasingly performing, less expensive and with low social and environmental impact to be used in the various technologies dealt with. Furthermore, studies on cell and battery eco-design are proposed, working on the production processes of components, thinking about disposal, reuse and recycling with a view to circularity and sustainability. With the same intention, studies have been launched concerning the diagnostics and control of SSs which aim to increase their useful life, working on their optimized management and on the end-of-life estimation, also in

second life applications. Finally, sustainability analyzes are proposed through LCC, LCA and socio-economic impact studies, as well as chemical-physical modeling activities on materials, interfaces and the complete cell and simulation modeling activities of the entire SS. All these tools are intended to support the proposed activities, in order to accelerate the achievement of the project objectives and enhance its potential in the application field, primarily aimed at mitigating the environmental impact and cost over the entire life cycle, in a "cradle-to-grave" optics.

The activities concerning thermal storage (TS) are also distributed over the entire vc, as issues of development of materials, technologies and processes are addressed, with the aim of increasing the energy density of the various solutions proposed, guaranteeing greater stability and cyclability of materials, pursuing greater alignment between the charge and discharge times of the TS system and the industrial process to which it is coupled, keeping the economic and environmental aspects central.

In general, this proposal is strongly oriented towards experimental activities that want to be representative of those segments of the VC that need to be strengthened, through the achievement of specific objectives conducted in a synergistic way by the entire project team. This approach makes it possible to monitor each segment of the VC, maximizing the actions aimed at solving the specific critical issues of the sector and achieving results that can be exploited to the fullest by industrial stakeholders in the national and European market. In this project, CNR ENEA and RSE, in collaboration with important Italian universities, intervene on all the crucial aspects, setting quantitative objectives, where possible, and implementation timeline. Specifically, the project consists of a total of 5 WPs, of which 3 WPs dedicated to ES, 1 WP dedicated to TS and finally 1 WP dedicated to the dissemination of results. The WP1 work tasks are aimed at the realization of electrochemical materials, electrodes and electrolytes. The proposed objective for electrode, anodic and cathodic materials is to increase their safety, sustainability and performance, both for more mature technologies such as lithium-ion and redox flow, but also for new generation technologies (lithium GEN 4-5), or alternatives to lithium, such as sodium-based, as well as frontier research. A similar objective is proposed on the development of electrolytes (liquid, solid, quasi-solid, etc.) which must be stable, safe and able to improve electrode performance. At the same time, computational and characterization studies are addressed for the screening of materials and the modeling of interface problems. Two highly synergistic activities are highlighted in WP1: creation of a complete pouch cell with electrodes developed by various contractors; implementation of a Round Robin test in the laboratories of the three entities for the screening of materials in the half-cell and assembly procedures. Within WP2, ES systems are dealt with; eco-design studies are conducted and the creation of complete cells for an application scale up (from materials to the cell) aimed at the sustainable production of innovative batteries; diagnostic and control issues are addressed, defining and adopting innovative processes, functional to various recharging strategies and applications, to improve battery performance in terms of operational life, efficiency, reliability and safety. In WP2, a strongly synergistic activity is highlighted: the definition of a common aging test matrix and the sharing of test datasets acquired by each institution in its own laboratories. WP3 concerns the transversal aspects of the ES systems, linked to their sustainability; studies dedicated to the validation of the environmental and economic sustainability of the technologies under consideration are addressed, including LCA/LCC studies; socio-economic impact studies on the construction of giga-factories are proposed; an assessment of the geominig potential of raw materials is made with a view to greater security and sustainability of supply, evaluating in particular the resource of geothermal brines, subject of experimental activity, and the prospects of urban mining. The WP4 tasks are dedicated to TS; different types of high energy density materials and supports are studied which are able to improve their performance in terms of resistance, stability and safety; processes and technologies are developed at different operating temperatures, from high temperatures suitable for applications of electricity production or industrial processes, to medium and low temperatures suitable for residential air conditioning applications (cooling and heating), with a focus on seasonal storage (slow dynamics) or on faster response dynamics, compliant with "power to heat" systems. WP5 is dedicated to dissemination activities and to the support of Italian institutions and stakeholders in all national, European and international initiatives concerning storage systems, initiatives which see the 3 bodies collaborate in the various working groups and coordination bodies. The final objective of the project is to act as a driving force for the development of innovative storage materials and technologies with a view to improving their performance, resilience, safety and economic and environmental sustainability.

The description of the project management model is reported below.

It is based on a strong collaboration established over the years between the three research centers. CNR, ENEA and RSE will act as management board; frequent interactions will be ensured through periodic online meetings (approximately every month and a half) to verify the progress of the project and organize the activities of dissemination. Each institution will act as an organizational hub to manage interactions, material and knowledge exchanges with its co-beneficiaries or collaborators. In particular, CNR, ENEA and RSE will rule their relationship with co-beneficiaries and collaborations by specific contracts. A manager will be identified for each contract in order to ensure the achievement of the target activity, as well defined within the project, under the supervision of CNR, ENEA and RSE. During the project, periodic meetings will be held, involving all the co-beneficiaries/collaborators of an institution according to the need, in order to collect the needs and critical issues and report them in the management board meeting. The management board can decide to attend on critical issues through the involvement of an entire WP of the project, by meeting business managers to share their knowledge with the other participants through specific workshops or meetings. Therefore, critical issues could be reduced or deleted, thanks to the collective action of the project partners. WP5 becomes an additional tool of the management board to ensure the flow of knowledge and information within the project and obviously also towards external stakeholders and the general public.

## 2.3 TRL progetto

TRL iniziale: 2

TRL finale: 4

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) o perché più mature (TRL iniziale e finale più alti). 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 in corso, considerate strumenti di indirizzo delle esigenze di sviluppo dei sistemi d'accumulo, condivise nel definire le LA del presente progetto. Le attività proposte all'interno del progetto integrato sono fortemente 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.

Un mercato energetico integrato per l'intera UE è la strategia per garantire forniture energetiche sicure e convenienti agli utenti. Sulla base di regole comuni per il mercato energetico e infrastrutture transfrontaliere, l'energia può essere prodotta in un paese dell'UE e consegnata ai consumatori di un altro. Tutto ciò permetterebbe di calmierare i prezzi attraverso l'incremento della concorrenza, offrendo ai consumatori una scelta più ampia tra i fornitori di energia. Dato il grado di integrazione e i cambiamenti tecnologici intervenuti a partire dal 2009 e previsti negli anni a venire, il mercato elettrico dell'UE è stato progressivamente aggiornato per adeguarsi a questo scenario applicativo. In particolare, il Clean Energy for all Europeans - package 16 ha aggiornato le regole del mercato dell'energia e ne ha introdotte di nuove, incoraggiando anche i necessari investimenti pubblici e privati basati sui segnali economici di mercato. Le attuali direttive comunitarie prevedono che la quota di elettricità prodotta da fonti energetiche rinnovabili dovrebbe crescere dal 25% a più del 50% entro il 2030. Allo stesso tempo, l'elettricità deve essere prodotta e fornita in quantità sufficiente anche in assenza di vento o sole. Alla luce di tali premesse, i mercati devono essere adattati a soddisfare le specificità tecniche della produzione, trasmissione e distribuzione delle energie rinnovabili e attrarre investimenti nelle risorse, come lo stoccaggio di energia, che possono compensare l'aleatorietà delle fonti energetiche rinnovabili non programmabili.

Secondo il Global Energy Storage Database del Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti, il pompaggio rappresenta il 96% dell'attuale capacità di accumulo energetico mondiale, con il resto proveniente da accumulo termico (1,6%), accumulo elettrochimiche (1,1%) e altro accumulo meccanico (0,9%). Tuttavia, va notato che queste cifre non includono l'accumulo distribuito su piccola scala. L'accumulo elettrochimico ha conosciuto un importante incremento di recente, con una significativa capacità installata in tutto il mondo. Le batterie agli ioni litio hanno dominato il recente sviluppo grazie alla rapida riduzione dei costi fino al 73% tra il 2010 e 2016 per le applicazioni di trasporto. Le previsioni di crescita di questo settore sono guidate principalmente dal mercato dei veicoli elettrici, ma anche dalle applicazioni stazionarie a supporto del crescente sviluppo di eolico e fotovoltaico in tutto il mondo.

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 European Battery Alliance (EBA) (TRL 6-9), atta a far crescere la capacità produttiva, favorendo la creazione di gigafactory europee per la produzione di batterie a ioni litio per applicazioni automotive e stazionarie. Contestualmente, è stata avviata la piattaforma tecnologica europea ETIP Batterie Europe (TRL 4-6) per definire roadmap e piani di implementazione sui sistemi di AE del prossimo futuro: 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. Inoltre, si sono concretizzate azioni di medio-lungo termine a vantaggio della ricerca, come Battery2030+ (TRL 1-3) in cui convergono attività orientate ai diversi aspetti della catena del valore nel settore dell'AE, ivi compresi la

realizzazione di nuovi materiali e tecnologie di frontiera per le batterie europee del futuro. La “comunità della ricerca” è rappresentata anche dalla European Energy Research Alliance (EERA), il cui Joint Programme Energy Storage (JP ES) propone soluzioni tecnologiche in grado di rendere l'Europa indipendente dal punto di vista geopolitico, ad esempio, sul tema dei materiali, considerati il fattore determinante ai fini del miglioramento di prestazioni.

In merito all'AT, l'International Energy Agency (IEA) sta seguendo diversi progetti dedicati all'AT che spaziano dalla modellizzazione rivolta al controllo e automazione dell'accumulo di energia, al sector coupling flessibile, ai sistemi di AT a diverse temperature utili per utenze domestiche e industriali e anche 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. Anche nel settore dell'accumulo termico (AT) sono in corso diverse iniziative europee (lo stesso EERA JP ES ha un sub programme dedicato all'accumulo termico) orientate principalmente a ridurre i consumi di energia termica, che rappresentano una quota significativa dei consumi finali di energia primaria nel Mondo, e a indirizzare la produzione di calore verso tecnologie a energie rinnovabili, quali il solare o il recupero del calore da residui industriali. La fonte solare e il fabbisogno di energia termica sono tuttavia sfasati tra di loro: di giorno, o d'estate, dove l'energia solare captabile si concentra, il fabbisogno è minimo. Tale fatto ha limitato a oggi la diffusione del solare termico, impiegato per la sola produzione di acqua calda sanitaria e in parziale integrazione dei sistemi di riscaldamento. La possibilità di introdurre un sistema di accumulo termico ad alta densità energetica o a elevata capacità, con buone prestazioni anche in termini di temperature d'esercizio e di reversibilità, potrebbe portare a una consistente riduzione dei fabbisogni di energia primaria fossile, non solo nel settore civile, ma anche in quello dei processi industriali e della produzione di energia elettrica. Le richieste di sviluppo tecnologico in questi settori sono molteplici: ricerca di nuovi materiali (es. termochimici o a cambiamento di fase) e supporti per incrementare la densità energetica alle alte e alle basse temperature, sviluppo di nuovi processi in grado di minimizzare le perdite termiche nei vari cicli di assorbimento e rilascio di calore, validazione di nuove applicazioni in grado di sfruttare bacini di grosse dimensioni (es. gli acquiferi sotterranei) o altre sorgenti termiche (es. risorse geotermiche, cascami termici), sviluppo di controlli avanzati e processi per allineare i bisogni dell'utenza alle capacità produttive. Il presente progetto integrato vuole incentrare le singole attività su molti degli sviluppi tecnologici e di sostenibilità ritenuti critici dalle diverse iniziative europee sopra citate.

#### **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 nell'ambito di specifici AdP stipulati da ciascun Ente con il ministero di competenza, tra cui gli ultimi all'interno del PT 19-21, conclusosi il 31/12/2021.

Nel dettaglio, l'attività condotta dai tre enti sull'AE ha coperto numerosi aspetti e tecnologie, ciascuno lavorando in maniera complementare ed indipendente. Si può, però, identificare un comune denominatore tra i tre enti beneficiari nella sintesi e caratterizzazione di materiali di natura prettamente inorganica per applicazione in batteria Na-ione. Nello specifico: i) RSE si è occupato dello sviluppo di materiali per catodi, anodi ed elettroliti da utilizzare in batterie a ioni sodio; sono stati sintetizzati e caratterizzati ossidi misti di sodio manganese con opportuni drogaggi (es. Cu) quali catodi, MXeni ottenuti per esfoliazione chimica della MAXphase Ti3AlC2 come anodi ed elettroliti solidi a base di particolari strutture NASICON. ii) ENEA ha attivamente lavorato sul materiale catodico Na<sub>0</sub>xLi<sub>y</sub>Mn<sub>0</sub>Ni<sub>0</sub>Δ e su materiali anodici realizzati per pirolisi di scarti vegetali. iii) CNR ha svolto attività su materiali catodici compositi a base di fosfati di sodio e metalli di transizione del tipo Na<sub>2</sub>MPO<sub>4</sub> (M= Fe, Mn, etc.) e nanofibre di carbonio, sintetizzati mediante electrospinning. L'approccio volutamente condotto dai 3 gruppi affidatari è da sempre rivolto verso un'attività sperimentale indipendente e complementare con lo scopo di ampliare e massimizzare gli studi su materiali, processi e soluzioni innovative per più ambiti tecnologici, agevolando in maniere più estesa lo sviluppo di materiali e di sistemi di accumulo del futuro nell'ottica della sostenibilità. Anche per il nuovo PT 22-24, analogamente a quanto fatto in passato, le attività dei 3 gruppi affidatari saranno principalmente indirizzate su approcci diversificati, ma al contempo complementari, mantenendo ampio il ventaglio di possibilità nell'individuare i materiali più innovativi e promettenti, selezionati sulla base delle competenze di ognuno, guardando alla risoluzione della specifica criticità e necessità della tecnologia di accumulo. Ci sono, tuttavia, diverse azioni sinergiche: realizzazione di una cella a ioni litio, sviluppo di metodologie di assemblaggio e di caratterizzazione di celle a ioni sodio e implementazione di una matrice di test di aging. Si evidenzia, inoltre, la condivisione dei dataset di test condotti sui vari dispositivi in prova.

Per quanto riguarda l'AT, le attività nel precedente piano triennale sono state portate avanti nei diversi ambiti di bassa, media e alta temperatura. Per la bassa temperatura: i) RSE ha lavorato su due tipologie di accumulo termico stagionale: 1. ha sviluppato materiali attivi, supporti e l'intero processo di accumulo termochimico, lavorando su un sistema di reattori da ottimizzare; nel presente progetto si intende proseguire l'attività sui materiali e sul processo, ottimizzando la densità energetica dei primi e analizzando differenti configurazioni d'impianto (es. ciclo chiuso) per i secondi; 2. ha avviato un'attività modellistica per validare i sistemi di accumulo termico in acquifero (ATES); scopo del presente triennio è quello di affinare le simulazioni, ottimizzando il sistema geologico e fluidodinamico con i fabbisogni di utenza e impianto; ii) ENEA ha dimostrato la capacità di regolazione di un ciclo a CO<sub>2</sub> transcritica (tCO<sub>2</sub>) in grado di cedere e assorbire energia elettrica dalla rete in un intervallo di regolazione compreso tra +100% e -100% del carico nominale, con la promettente caratteristica di poter ottimizzare la regolazione in modo da operare la turbina alla massima efficienza anche ai carichi parziali. La strategia di regolazione è stata concepita bilanciando in tutto l'involuppo operativo la potenza elettrica e la potenza frigorifera del ciclo a tCO<sub>2</sub>, caratteristica che lo rende adatto all'integrazione con sistemi ad accumulo di ghiaccio e alla fornitura di servizi di supporto alla rete

elettrica (flessibilità e inerzia fisica) con funzionalità energy time shifting (arbitraggio e disponibilità di capacità). Il design delle turbomacchine affrontato nel precedente piano triennale ha presentato alcune criticità, che verranno affrontate in questo progetto. Riguardo alla media temperatura le attività di ENEA nel triennio precedente si sono concentrate su AT basati su calcestruzzi e a calore latente basati su materiali a cambiamento di fase (PCM), affinché le soluzioni individuate fossero flessibili in termini di dimensione (capacità) e integrabilità. Queste attività proseguono nel triennio attuale per sperimentarne l'integrabilità, accoppiando moduli a cambiamento di fase e cementizi in cascata e svolgere un'analisi di sistema, molto utile per futuri utilizzatori che potranno effettivamente conoscere le potenzialità di questi sistemi anche in termini di controllo delle temperature e delle potenze in uscita. A questa attività si affiancherà anche lo studio di sistemi di accumulo ibridi termico/elettrico con sviluppo dei materiali e analisi sperimentali. Sull'alta temperatura, le attività su cicli termochimici basati su carbonati e ossidi misti non tossici, sono state sperimentate, nel triennio 19-21, in scala di laboratorio e su un reattore a letto fisso a 3 bar e 600-900°C, che ha però evidenziato delle limitazioni nella resa di reazione. In vista dello sviluppo di questa tecnologia e del suo trasferimento all'industria, si ritiene essenziale definire e testare una configurazione reattoristica ottimizzata, del tipo a letto fluidizzato, che possa garantire il raggiungimento di una elevata resa di reazione e, conseguentemente, una elevata densità energetica di accumulo. Qui, si prevede quindi di modificare/adattare i sistemi termochimici precedentemente sviluppati, per renderli compatibili con il loro utilizzo su reattore a letto fluidizzato, più complesso ma anche più efficace, che sarà appositamente realizzato e testato con detti materiali a 600-900 °C e 5 bar, su scala da laboratorio.

### 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 si vuole invece sottolineare l'impatto dei progressi attesi a livello di WP.

Come già descritto, l'ambito del AE è molto vasto e per portare effettivi benefici è necessario stimolare gli obiettivi scientifici e tecnologici lungo tutta la catena del valore. Inoltre, le diverse tecnologie di AE, ognuna con le proprie peculiarità, hanno tutte un ruolo importante nel prossimo futuro per il raggiungimento degli obiettivi della transizione energetica. La diversificazione della ricerca rappresenta, dunque, un valore aggiunto al progetto. Per questo motivo, si propongono obiettivi di sviluppo sia su tecnologie di AE più mature e promettenti, quali Li-ione, Na-ione e redox flow, sia su quelle considerate ancora di frontiera, quali metallo-aria e le Na-fuso, con prospettive di lungo termine. Nel dettaglio, il WP1 è dedicato allo studio di materiali innovativi per tutte le tecnologie in esame. Le batterie Li-ione sono le più mature tanto che esistono diversi chimismi e diverse generazioni, a partire da quelle ormai commerciali e largamente utilizzate, fino alle generazioni attualmente oggetto di sviluppo tecnologico anche da parte delle industrie come la Gen. 3 (Li-ione con materiali avanzati) e la Gen. 4 (Li-ione con elettrolita solido). In questo progetto, le attività riguardanti queste tecnologie si concentrano sui materiali elettrodiici avanzati, a elevate prestazioni, che contribuiscono al raggiungimento dei target di performance della Gen. 3 (definiti dalla ETIP Batterie Europe), e sugli elettroliti liquidi o solidi per aprire la strada alla Gen. 4. Materiali catodici ad alto contenuto di Li, in proseguimento a quanto fatto nel precedente triennio, saranno investigati nell'ottica di ottimizzarne la sintesi e stabilizzare le prestazioni, nonché sostituendo elementi critici con elementi più sostenibili. Questi materiali hanno le potenzialità per aumentare la densità di energia della batteria finale, ma anche per limitare l'uso di materie prime critiche. Per quanto riguarda i materiali anodici, la Gen. 3 prevede l'uso di compositi C/Si, che vanno ottimizzati e stabilizzati nelle prestazioni, adottando delle strategie che non erano state proposte nel precedente triennio. Nel progetto sono percorse anche altre soluzioni per l'anodo, quali l'utilizzo di MAXphase opportunamente trattate e drogate con materiali in grado di legare con il Li, per sfruttarne le ottime caratteristiche meccaniche e la capacità di ciclare alle alte correnti. Tra catodo ed anodo è fondamentale la presenza di un separatore/elettrolita che abbia le caratteristiche adeguate: conducibilità ionica più elevata possibile, isolante elettricamente, meccanicamente stabile, alta bagnabilità (nel caso di separatore di supporto), alta stabilità termica e soprattutto ampia finestra elettrochimica, se deve essere utilizzato con materiali catodici ad alto potenziale come previsto per la Gen. 3. Il progetto propone attività di sviluppo anche di elettroliti e separatori, sia nuove rispetto al precedente triennio sia in prosecuzione. Inoltre, è previsto lo scale-up di alcuni processi di produzione di elettrodi. Infine, studi computazionali dei materiali e delle interfasi saranno di aiuto per comprendere i meccanismi interni alla batteria, così come un'ampia gamma di caratterizzazioni sperimentali (chimiche, fisiche ed elettrochimiche) è fondamentale per validare i materiali studiati. Le attività sulle batterie sodio-ione sono, invece, a uno stadio di TRL più basso e quindi il progetto si pone obiettivi di ricerca esplorativa per identificare i materiali, i parametri che influenzano la sintesi dei materiali elettrodiici e gli elettroliti più adatti per poter abilitare questa tecnologia che è molto interessante da un punto di vista della sostenibilità. L'attività guarda altresì all'applicazione di metodologie di sintesi alternative, quale ad es. la tecnica di electrospinning, nell'ottica di ottenere manufatti quali elettrodi autosupportanti (free-standing) e binder free, per ridurre i costi di processo legati alla preparativa dei componenti di cella. Lo studio dei materiali relativi a tale tecnologia, essendo ancora esplorativo e con molti elementi di incertezza su scelta del miglior candidato e miglior metodologia, si presta molto bene a un'attività comparativa che vede coinvolti i 3 affidatari e alcuni dei loro co-beneficiari. Oltre alle linee di attività di ricerca che riguarderanno elettroliti e materiali catodici/anodici stabili e/o innovativi e/o sostenibili, sarà condotto un Round Robin test in modo da rafforzare la validazione di detti materiali. Si ritiene fondamentale a questo stadio di ricerca poter condividere tra i partner materiali e metodologie di test, in questo modo, anche se il TRL finale rimane comunque relativamente basso (ambito di laboratorio), la validazione incrociata in più laboratori rafforza la convinzione che i materiali più promettenti possano passare alla fase successiva di maturazione tecnologica. Inoltre, lo scambio di

conoscenza tra i partner e (tramite il WP5) gli stakeholder, potrebbe fare da volano per far partire una catena del valore industriale italiana per le batterie sodio-ione. Nel WP2 il focus della ricerca è sui sistemi. Per un migliore utilizzo delle batterie, e anche in ottica di 2nd Life, è fondamentale che siano ben monitorati e compresi il funzionamento e l'invecchiamento delle celle. Lo scopo principale è quello di individuare parametri caratterizzanti l'evoluzione delle prestazioni della batteria durante la vita utile. Per poter ottenere una migliore e più affidabile statistica, le attività di test di aging saranno svolte in sinergia tra gli enti affidatari che intendono definire una matrice di prova di invecchiamento comune. Gli esiti saranno applicati per la definizione di algoritmi di diagnostica e controllo per applicazioni stazionarie in ottica 2nd-life, per stimare lo stato di salute e la vita residua e gestire il sistema con un ottimizzatore attivo. Il WP3 riguarda gli studi di impatto ambientale ed economico delle soluzioni proposte, per indirizzare le scelte progettuali verso obiettivi di sostenibilità. Uno degli elementi di maggiore criticità è il reperimento di materie prime critiche (tra cui compare lo stesso litio). Per questo motivo, accanto agli studi LCA e LCC sono proposti studi sulle potenzialità geominerarie del sottosuolo nazionale, con un focus sulle brine geotermiche che prevede anche attività sperimentali legate alla caratterizzazione delle brine e alla raffinazione per uso nella filiera delle batterie che richiede un certo grado di purezza.

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. Si propone lo sviluppo di materiali termochimici, in grado di assorbire e rilasciare energia termica durante la rottura e formazione di legami chimici o fisici. Questi materiali sono particolarmente adatti a un accumulo termico stagionale, in quanto sono in grado di conservare intatta l'energia chimica immagazzinata d'estate e renderla disponibile in inverno. Si vuole anche lavorare sul processo di assorbimento e desorbimento di questa tecnologia, migliorandone la resa in diverse condizioni operative (es. Ciclo aperto e ciclo chiuso). Tra gli accumuli a bassa temperatura sono in studio anche i sistemi di accumulo termico in acquiferi (ATES), in grado di gestire grosse capacità di calore per lungo periodo. L'obiettivo dell'attività è quello di validare la tecnologia nelle condizioni territoriali e di fabbisogni energetici italiane, con un'analisi modellistica ad hoc. Sempre con riferimento ai sistemi di AT a bassa temperatura, si vuole dimostrare un concept per l'accumulo di energia frigorifera accoppiato ad 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. Il raggiungimento di questo obiettivo si riassume nella dimostrazione di quattro caratteristiche del sistema: i) densità energetica coerente con il trend tecnologico dei sistemi concorrenti allo stato dell'arte, ii) capacità del dispositivo di accumulo termico di svincolare l'energia accumulata dalla potenza, iii) convertibilità dell'energia frigorifera accumulata in energia elettrica e viceversa, mediante l'accoppiamento del concetto di accumulo con un ciclo a CO<sub>2</sub> transcritica e iv), compatibilità, in termini concettuali, con i requisiti richiesti da un sistema di accumulo utility-scale con funzionalità energy time shifting. La dimostrazione delle caratteristiche appena citate comporterebbe potenziali progressi rispetto allo stato dell'arte in termini di: i) raggiungimento di densità energetiche del sistema di accumulo dieci volte superiori rispetto al CAES (riferimento 70 bar) ma a pressione atmosferica e con capacità scalabile linearmente con un volume d'acqua; ii) significativo incremento della scalabilità dei sistemi di accumulo ad acqua refrigerata rispetto allo stato dell'arte, dovuto all'indipendenza della capacità del sistema dalla dimensione delle superfici di scambio termico; iii) riconfigurazione dei cicli combinati da gas-vapore a gas-CO<sub>2</sub> con integrazione di funzionalità energy time shifting e accesso a nuovi segmenti del mercato elettrico (arbitraggio e disponibilità di capacità). Le attività correlate con i sistemi di accumulo termico a bassa temperatura proseguono in sostanziale continuità con il precedente triennio, che si è concluso con il design preliminare delle turbomacchine del ciclo a tCO<sub>2</sub> e l'evidenziazione di alcune criticità, con particolare riferimento ai compressori transcritico e supercritico. Il superamento di queste criticità, oggetto del presente piano triennale, unitamente al modello di accoppiamento delle turbomacchine sviluppato nel precedente piano triennale, consentiranno di colmare le discontinuità emerse nell'involuppo operativo del ciclo a tCO<sub>2</sub> e di ampliarne i margini di regolazione. Riguardo alla media temperatura, relativamente allo studio del calore sensibile e latente attraverso materiali cementizi e a cambiamento di fase, l'attività proposta per il prossimo triennio consentirà uno sviluppo del concetto fino a TRL 6-7 attraverso la realizzazione e lo studio di moduli di accumulo termico in calcestruzzo di piccole dimensioni e la loro caratterizzazione simulando un ambiente rilevante. A ciò dovrà essere accoppiato anche lo sviluppo di metodi e strumenti di integrazione di impianto per poterne valutare le prestazioni e l'impatto sull'efficienza energetica di un sistema produttivo, per favorire successivamente l'intervento diretto dell'industria, che potrebbe accelerare enormemente queste fasi e rendere il sistema fruibile nei successivi 1 o 2 anni. Parallelamente, sarà sviluppato un nuovo concetto di sistema di accumulo a base cementizia con o senza la presenza di materiale a cambiamento di fase (PCM) micro-incapsulato, in grado di convertire energia elettrica in calore per effetto Joule, utilizzando il tubo di scambio termico contenuto in esso, sarà qui studiato ed analizzato. Alcuni prototipi di tale concetto (Concrete/TEES) saranno dimensionati e progettati al fine di poter poi essere caratterizzati termicamente (TRL3). Per quanto riguarda l'alta temperatura si continuerà a lavorare sui materiali individuati nel precedente PTR, tuttavia siccome si è appreso dalle sperimentazioni effettuate nell'ambito del PTR2019-21 che la reazione di carbonatazione, ai fini dell'accumulo termico, è difficoltosa a causa della limitata capacità di trasferimento del calore in reattori a letto fisso si propone qui lo studio dei sistemi suddetti in un reattore a letto fluidizzato, che consente di ottenere un recupero energetico più agevole nella fase di scarica.

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 riunione 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.

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

In merito all'AE, recentemente CNR, ENEA e RSE sono stati coinvolti nella presentazione di un progetto integrato, denominato ORANGEES, finanziato nell'agosto 2022 all'interno della Ricerca di Sistema, nell'ambito del BANDO A. Tale progetto è indirizzato verso attività sperimentali 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, quindi, 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. Invece le attività del presente progetto abbracciano un range di TRL più ampio, coprendo attività a TRL 2-3, fino ad arrivare a tematiche a TRL maggiori di 4, in funzione della specifica LA di 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 SA 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 del progetto RdS 2.10 "Flessibilità del sistema energetico integrato". Sugli stessi temi esiste una correlazione anche con il progetto RdS 2.4 "Digitalizzazione del sistema energetico integrato", che prevede la realizzazione della piattaforma informatica e scambio dati che ospiterà il Digital Twin sviluppato nel presente progetto, e con il progetto RdS 2.7 "Mobilità sostenibile e interazione con il sistema energetico", dove gli strumenti di diagnostica first-life saranno integrati a 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 1.02 e 2.07 (e anche con il progetto RdS 1.07 "Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali", dove ENEA affronta le tematiche legate alla mobilità), in particolare per quanto riguarda le attività in ambito europeo e per gli aspetti legati al riuso delle batterie e al riciclo dei materiali (es. materie prime, BMS per second-life). Un'altra sinergia è presente sul tema della valutazione scenaristica delle Materie Prime Critiche (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").

Le attività di sviluppo materiali per l'AE sono in parte svolti in altri due importanti progetti come il progetto IEMAP (accordo Mission Innovation) e il progetto EuBatIn (IPCEI Batterie). Nel primo caso il focus è però maggiormente sullo sviluppo delle metodologie e degli strumenti computazionali e sperimentali che possano abilitare un cambio di paradigma nel meccanismo di ricerca e scoperta di nuovi materiali: da un approccio classico e quello accelerato e integrato con intelligenza artificiale. In pratica in IEMAP i materiali sono solo il mezzo per studiare, mettere in piedi e testare il nuovo approccio di scoperta accelerata. Il progetto può quindi essere considerato complementare al WP1 del presente progetto, dove invece sono i nuovi materiali avanzati il focus della ricerca e non gli strumenti con cui li si studia; cionondimeno, sarà importante creare sinergie con tale progetto, anche se non sono esplicitamente previste, in modo da accelerare la scoperta di nuovi materiali anche nel presente progetto. 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, ma soprattutto di costruire una infrastruttura con pilot lines che facilitino l'introduzione delle innovazioni tecnologiche verso l'applicazione industriale. Anche in questo caso c'è una complementarità con il PT 22-24 in quanto i materiali investigati non sono gli stessi delle linee di attività LA1.11 e LA1.12 di questo progetto e il raggiungimento di TRL più alti con la costruzione di pilot line pre-industriale non è tra gli obiettivi di questo progetto. Per quanto riguarda AT a media temperatura, il progetto è complementare al Progetto 3 ("CSP & Accumulo Termico") JCA (Joint Cooperation Agreement) che mira anche alla realizzazione di un impianto che utilizza 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 qui proposto. Nel JCA, infatti, le temperature in gioco sono più alte e viene utilizzato come fluido termovettore il sale solare fuso, 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. Questo progetto testimonia l'interesse anche industriale di queste tecnologie e va a estendere in modo complementare l'esperienza scientifica di progettazione e sperimentazione in tale ambito.

Infine, alcuni gruppi di ricerca, coinvolti nello sviluppo dei sistemi di accumulo termico a bassa temperatura del presente piano triennale, sono coinvolti nel progetto H2020 CO2OLHEAT, finalizzato alla realizzazione di un prototipo a scala reale (TRL 7) di un ciclo a CO<sub>2</sub> supercritica (sCO<sub>2</sub>) per la conversione in energia elettrica di cascami termici a medio/alta temperatura di origine industriale. L'esperienza maturata nell'analisi di ciclo e nello sviluppo delle turbomacchine a sCO<sub>2</sub> nell'ambito di CO2OLHEAT rappresenta un prezioso bagaglio tecnico-scientifico da riversare nel presente piano triennale, i cui obiettivi realizzativi sono relativi al raggiungimento di TRL notevolmente più bassi. Pertanto, non sussistono criticità in termini di potenziali sovrapposizioni con le attività che verranno presentate nel PT 22-24. 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 che verranno presentate nel PT 22-24.

## 2.5 Obiettivi e risultati

### a) Obiettivi finali del progetto

Di seguito si elencano i principali obiettivi finali di carattere generale del progetto:

O1: sistemi di accumulo sostenibili: contribuire allo sviluppo di sistemi di accumulo sostenibili al fine di favorire la decarbonizzazione del sistema energetico nazionale e accelerare l'adozione di tecnologie di accumulo innovative a basso costo e ridotto impatto ambientale, ottimizzando l'utilizzo delle risorse. Tale finalità sarà raggiunta attraverso un approccio attento ai principi di "circularità" economica ed ambientale, massimizzando le azioni rivolte alla risoluzione delle specifiche criticità del settore e al raggiungimento di risultati che possano essere sfruttati al meglio dagli stakeholder industriali nel mercato nazionale ed europeo. Le ricadute industriali non sono immediatamente spendibili sul mercato, ma l'attivazione della catena del valore della ricerca sui sistemi di accumulo porta effetti benefici a 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 cdv. 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 dalle potenzialità di estrazione dei minerali al recupero e riutilizzo degli stessi, alla scelta di materiali a basso costo e meno critici, fino all'eco-design prototipale del sistema di accumulo di interesse. L'innovazione proposta mira ad offrire alternative e soluzioni valide per tutte le aziende coinvolte nel settore, affinché possano guardare verso nuove possibilità, finalizzate al rinnovamento e al riutilizzo delle proprie risorse in un'ottica di cambiamento verso una ripresa industriale. Tutto questo porterà alla richiesta di nuove figure professionali, altamente qualificate nello sviluppo di processi produttivi specifici, 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 si presenta con una percentuale molto elevata di attività di laboratorio, dallo sviluppo di materiali, a quello di prototipi e sistemi d'accumulo, al test di dispositivi. L'attività sperimentale consente di mettere in pratica (realizzare) le ricerche commissionate. Presenta un altissimo grado di innovazione. L'attività sperimentale è comunque supportata da attività modellistica sui vari livelli, dai chimismi (analisi computazionale per definire nuove formulazioni), alle simulazioni dei processi, nonché alla modellistica applicata alle analisi ambientali ed economiche. Questo rende il progetto estremamente solido nella validazione dei risultati.

Nello specifico dell'AE, sono attesi risultati scientifici e tecnologici che riguardano le diverse tecnologie e chimismi oggetto di studio. Sono state identificate aree principali di azione o obiettivi specifici: i materiali, i sistemi e la circolarità/sostenibilità. Si ritiene che i risultati previsti nelle seguenti 3 aree possano contribuire a rafforzare alcune debolezze presenti attualmente nelle tecnologie e nella cdv nazionale.

1) Molto peso viene dato ai segmenti upstream della cdv, che riguardano cioè materie prime e materiali avanzati, in quanto sia il costo che le prestazioni che la sostenibilità ambientale del sistema finale sono fortemente influenzati da essi. Materiali più performanti, stabili e sostenibili saranno la chiave per abilitare le generazioni avanzate delle batterie a Li-ione e persino quelle a stato solido, ma anche renderanno possibile lo sviluppo industriale di tecnologie post-li-ione di notevole interesse per applicazioni stazionarie come le Na-ione. Altresì, la scelta di materiali più sostenibili per lo studio di tecnologie di frontiera (es. Na-aria) è maggiormente rivolta ad aspetti, non tanto prestazionali di cella, quanto più ambientali ed economici, nell'ottica di attuare, sin da subito, scelte più consapevoli.

2) Il monitoraggio della vita della batteria e il riconoscimento dei parametri che ne influenzano l'invecchiamento è un altro punto fondamentale che permetterà un salto "evolutivo" nella diffusione dell'accumulo elettrochimico stazionario e non. Attraverso la definizione di una matrice di prova di invecchiamento comune e la trasmissione dei dataset di prova acquisiti da ciascun ente verso gli altri enti, sarà possibile sviluppare un database condiviso. Ancora, nell'ottica di aumentare la flessibilità delle rete, si affronterà uno studio ancora oggi in fase embrionale e pertanto altamente innovativa, inerente la stima della capacità offerta da flussi di veicoli elettrici aggregati (UVAM), che diventano veri e propri sistemi in grado di fornire energia elettrica a supporto delle esigenze richieste dalla rete elettrica (vehicle to grid, V2G).

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.

Per quanto riguarda gli obiettivi specifici dell'AT, essi si inseriscono perfettamente negli obiettivi generali e nel quadro delineato inizialmente. 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, è in corso lo sviluppo di una tecnologia di power-to-cold-power integrata con un sistema di accumulo utility-scale concepita per rispondere a funzionalità energy time shifting con le seguenti specifiche tecniche. 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, mentre in riferimento ai SW, essi sono sviluppati per la prima volta ad hoc per questo tipo di applicazioni in modo da essere integrati in un unico ambiente per pre-dimensionamento ed analisi dell'impianto.

3) Riguardo all'accumulo termochimico ad HT si propone di realizzare l'impianto dotato di reattore a letto fluidizzato la cui caratteristica innovativa è dovuta proprio alle temperature operative, le pressioni e le modalità di reazione dei materiali, per facilitare lo scambio termico ed aumentare la densità energetica.

## 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. Alcuni di questi sono di seguito riportati, rimandando il dettaglio delle informazioni alla sezione "descrizione output" ed alla "Tabella riassuntiva prodotti della ricerca ed elementi di verifica del progetto", in cui si riportano anche i titoli dei deliverable.

WP1 Accumulo elettrochimico: materiali avanzati

LA1: Sintesi materiali ceramici innovativi a base di  $\text{Na}_{(1+x)}\text{Zr}_2\text{SixP}_{(3-x)}\text{O}_{12}$  ( $0 \leq x \leq 3$ ) con caratteristiche di elevata conducibilità ionica  $\sigma_{\text{ion}} \geq 2 \times 10^{-1} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$  @  $T \geq 100^\circ\text{C}$ ; Studio di materiali da utilizzare come coating per il NaSiCON per aumentare la bagnabilità del sodio.

LA2: Individuazione dei catoliti e acidi di Lewis da utilizzare:  $\text{NaI}/\text{AlCl}_3$ ;  $\text{NaI}/\text{GaCl}_3$ ;  $\text{NaI}/\text{AlBr}_3$ ; Individuazione di Carboni sui quali depositare il catolite; Test elettrochimici sui materiali selezionati

LA3: Realizzazione di un prototipo di batteria che racchiuda le caratteristiche individuate durante lo studio della geometria di cella; Test in cella prototipale in configurazione batteria

LA4: l'analisi strutturale e delle proprietà elettroniche (DOS, strutturazione delle bande) di materiali tipo-NaSiCON a base di sodio metallo fosfato,  $\text{Na}_x\text{MnM}(\text{PO}_4)_3$  con  $M = \{\text{Ti}, \text{Cr}, \text{Fe}, \text{Zr}\}$ , componenti catodici nelle batterie sodio-ione; studio DFT dell'energetica associabile ai processi di diffusione degli ioni  $\text{Na}^+$ , per individuare potenziali grandezze termodinamiche, elettrochimiche e cinetiche da essi derivabili nonché i meccanismi preferenziali di migrazione degli ioni  $\text{Na}^+$  nel bulk ed ai bordi di grano.

LA5: sintesi di materiale catodico con area superficiale compresa tra 150 e 300  $\text{m}^2/\text{g}$ , nanofibre di carbonio con diametro delle fibre compreso tra 200 e 300 nm e nanoparticelle di  $\text{Na}_x\text{MM}'(\text{PO}_4)_3$  aventi diametro compreso tra 10 e 20 nm.

LA6: Sintesi materiale catodico avente capacità specifica  $\sim 167 \text{ mAh g}^{-1}$  per i materiali con  $M=\text{Mn}$ ,  $\text{CE} \geq 90\%$  e potenziali di cella compresi tra 1.5 V e 4 V vs.  $\text{Na}^+/\text{Na}$  ad opportuni valori di densità di corrente (C-rate da 0.1C a 20C); retention capacity  $\geq 80\%$  a 5C dopo 500 cicli.

LA7: Quantità di I<sub>2</sub> da aggiungere alla miscela  $\text{MCl}_3/\text{NaI}$  per scegliere la SOC di partenza; Composizione della materia catodica: Acido di Lewis ( $\text{MX}_3$ : 50-75% mol) - Catolite ( $\text{NaI} + \text{I}_2$ : 50-25%); Realizzazione di un diagramma di fase per ogni miscela ioduro/catolite.

LA8: Analisi dei rischi completa, dall'estrazione delle materie prime impiegate per la loro realizzazione fino al loro utilizzo, in grado di offrire una visione dei benefici rispetto ai rischi associati alle due tecnologie.

LA9: test in semicella a tre elettrodi ed in coin cell in configurazione semicella, di una capacità specifica pari a circa 6000  $\text{mAhg}^{-1}$  a 300  $\text{mAg}^{-1}$ ; capacity retention  $> 60\%$  dopo 100 cicli a 100  $\text{mAg}^{-1}$  e maggiore al 50% dopo 50 cicli a 300  $\text{mAg}^{-1}$ .

LA10: elevata conducibilità elettronica  $> 0,04 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ , una elevata area superficiale,  $> 150\text{-}200 \text{ m}^2/\text{g}$ ; target dei parametri elettrochimici in cella singola  $\text{EE} > 80\%$ ,  $\text{CE} > 90\%$ ,  $\text{VE} > 90\%$  e profondità di carica e di scarica,  $\text{SOC} > 70\%$  e  $\text{DOD} > 70\%$ .

LA11-12 (LI-IONE): Linee di attività temporalmente consecutive dedicate ai materiali per batterie litio-ione avanzate. Per quanto riguarda i materiali catodici si studieranno e produrranno ossidi lamellari sovrastechiometrici in litio dopati con il ferro per raggiungere una capacità specifica, a 40  $\text{mA/g}$ , intorno ai 200  $\text{mAh/g}$  per almeno 100 cicli con efficienza Coulombica  $\geq 90\%$ . Tra i materiali anodici i compositi Si/grafene (capacità specifica di almeno 300  $\text{mAh/g}$  tra 0.9 e 0.007 V, con reversibilità del processo di carica/scarica  $\geq 90\%$ ) e i nanofili di silicio ricoperti di carbonio saranno oggetto di studio e caratterizzazione in semicella. Nuovi separatori sostenibili a base di biopolimeri, ottenuti per elettrofilatura in condizioni altamente controllate, saranno caratterizzati per garantire prestazioni elettrochimiche adeguate (utilizzando un catodo a base di LFP: capacità specifica di 130  $\text{mAh/g}$  tra 2-4.2 V, devono fornire il 30% della capacità specifica erogata a 0.1C). Avrà inoltre spazio la produzione di stese elettrodiche utilizzando leganti e additivi più sostenibili per ottimizzare le paste e gli inchiostri, con validazione in semi cella e cella completa: 10 cicli di carica e scarica a C/10 e C/20.

LA13 (NANOCOMPOSITI): sintesi di nanocompositi Si/C da materiali biowaste per applicazione in supercapacitori. Validazione tramite test elettrochimici: capacità superiore a 40  $\text{Fg}^{-1}$  con una ritenzione superiore all'85% per almeno 800 cicli. Sintesi di micro anodi basati su array di nanotubi di  $\text{TiO}_2$ . Validazione tramite test attività elettrochimica: capacità reversibile pari o superiore a 100  $\text{mAh/g}$  a temperatura ambiente.

LA 14-15 (NA-IONE). Linee di attività temporalmente consecutive dedicate ai materiali per batterie sodio-ione. Per materiale anodico si studierà in maniera approfondita la sintesi degli hard carbon (principalmente da lignina) variando parametri durante la pirolisi o

trattamenti post sintesi. La validazione dei materiali sarà controllata da test elettrochimici (-20 cicli di carica e scarica a C/10 nell'intervallo 0.0V e 2.2V; -70 cicli di carica e scarica a 5 C rate diversi: C/10, C/5, C, 2C, 3C, 5C e 10C). Come materiale catodico si sintetizzeranno ossidi misti di sodio nichel manganese con "drogaggio" di metalli alcalini o alcalino-terrosi, ottimizzando i parametri di sintesi e provando a sostituire il Ni con il ferro per motivi di sostenibilità (Validazione in semicella: - nel range 2.1V – 4.1V Csp di ca. 100 mAh/g; - nel range 1.5V – 4.5V Csp di 119 mAh/g; Vita utile >100 cicli di carica e scarica). L'attività di produzione elettrodi è volta a ottenere stese elettrodiche con tecniche di stampa rotativa e doctor blade e test in celle di area di ca. 20cm<sup>2</sup>, utilizzando componenti più sostenibili (validazione in semi cella e cella completa: 10 cicli di carica e scarica a C/10 e C/20).

LA16-17 (CARATTERIZZAZIONE). Linee di attività temporalmente consecutive dedicate alla messa a punto di metodologie di caratterizzazione adattabili ai diversi materiali del progetto e al round robin test. Realizzazione di un documento di metodologia ottimizzata e schede materiali per la gestione degli scambi fra partner.

LA 18-19 (CALCOLI PRINCIPI PRIMI ENDOFULLERENI) LA temporalmente consecutive. Potenziali di cella e energia di formazione calcolati con effetto dell'incapsulamento in nanogabbia BN di almeno due sistemi con anioni calcogeni e due sistemi con anioni alogeni. Tensioni di cella ottenuti con l'incapsulamento di anioni superiori ai 3.2 V. Spettri ottici calcolati con effetto dell'incapsulamento in nanogabbia BN di almeno un anione calcogeno e un anione alogeno.

LA20 (CALCOLI PRINCIPI PRIMI LIB NIB) Lo studio delle bande elettroniche del materiale drogato permetterà di predire, una volta stabilito il drogante migliore, se la struttura così ottenuta migliora il trasferimento ionico ed elettronico rispetto alla manganite pristina. Verifica tramite calcolo della tensione di funzionamento di batterie con drogaggio Fe, Ni, Li e Mg.

LA21 (SIMULAZIONI MULTISCALA) Studio di interfacce elettrodo/elettrolita, reazioni di formazione del SEI artificiale e diffusione Li attraverso anodo-SEI/elettrolita L'analisi delle proprietà di trasporto ionico all'interfaccia permetterà di capire i principali effetti dell'elettrolita sulla diffusione di Li<sup>+</sup>. Introduzione di campi elettrici nell'ambiente di simulazione per valutare le condizioni in operando della batteria.

LA22 (ELETTROLITI SOLIDI O IBRIDI) Ottimizzazione dei sistemi a base polimerica (fotoreticolati e non) tramite aggiunta di additivi specifici che garantiscano buone proprietà meccaniche, interfacce stabili con i materiali elettrodici ed elevate conducibilità ioniche (<sup>3</sup>0.1 mS/cm a 20 °C), elevato numero di trasporto ionico e ampia finestra di stabilità elettrochimica (<sup>3</sup> 4.3 V) e compatibilità all'interfaccia con catodi ad alta tensione ed anodi ad alligazione o a litio metallico.

LA23 (ELETTROLITI e SEPARATORI SOSTENIBILI) preparazione e caratterizzazione di elettroliti polimerici gel e elettroliti a base di carbonati organici con additivi come NH<sub>4</sub>PF<sub>6</sub> Validazione con cicli galvanostatici di carica/scarica: la ritenzione di carica dovrà essere almeno 80% dopo 100 cicli e l'efficienza coulombica superiore al 98% già dopo i primi 10 cicli di carica/scarica. Separatori sostenibili: ottenuti da diversi biopolimeri, quali chitosano e alginato di sodio con spessore che non deve eccedere 50 µm e il numero di MacMullin deve essere inferiore a 20 per poter essere comparabile ai separatori commerciali.

LA24 (ANODELESS) Protocolli di manifattura aggiornati riguardanti: pre-condizionamento fisico dei substrati lithiumless, pre-condizionamento chimico dei substrati lithiumless, pre-condizionamento elettrochimico, condizioni di ciclazione elettrochimica. Produzione di materiale L3ME basato sulla combinazione di tecnica LIPSS e coating chimici, validato sperimentalmente a TRL4 in test preliminari elettrochimici (target: capacità reversibile di almeno 0.5 mAhcm<sup>-2</sup> a J>0.5 mAcm<sup>-2</sup> per 200 cicli a temperatura ambiente con efficienza coulombica media >99% e capacità irreversibile cumulata <10% della capacità totale scambiata). Ottimizzazione della formulazione e manifattura per elettrodi anodeless per celle al sodio metallico che consenta la produzione di elettrodi supportati porosi, validati sperimentalmente a TRL3 in test preliminari elettrochimici (target: capacità reversibile di almeno 0.2 mAhcm<sup>-2</sup> a J>0.2 mAcm<sup>-2</sup> per 100 cicli a temperatura ambiente con efficienza coulombica media >98% e capacità irreversibile cumulata <20% della capacità totale scambiata).

LA25 (CATODI SODIO IONE) Realizzazione di materiali catodici per celle Na-ione di tipo analoghi di blu di Prussia a diversa stechiometria, struttura, morfologia. Realizzazione elettrodi a base dei materiali catodici sintetizzati preparati con formulazioni sostenibili (binder economici e a basso impatto sciolti in acqua). Realizzazione semi-celle con controlettrodo di Na e celle complete con anodo carbonioso. (target: prestazioni dei catodi in termini di capacità specifica tra i 100 e i 140 mAh per grammo di materiale attivo)

LA26 (ELETTROLITI BIOPOLIMERICI PER LI-ARIA) Ottimizzazione dei parametri di sintesi per una produzione sostenibile dell'organo gel a base di gelatina metacrilata in grado di presentare una finestra di stabilità tra 2.5-4.2V, con conducibilità ionica dell'ordine di 1.0mS<sup>cm</sup><sup>-1</sup> a temperatura ambiente. Caratterizzazione e testing delle migliori membrane prodotte in cella litio aria a temperatura ambiente per valutare le prestazioni in termini di capacità specifica e cycle life.

LA27 (ELETTROLITI ILs GREEN) sintesi green di liquidi ionici a base di anioni ortoborato o immidici e cationi piperidinici funzionalizzati. Target: riduzione nell'uso di solventi organici tossici di almeno il 50% e una resa di sintesi in acqua dell'80% per il processo di quaternarizzazione del catione piperidinico. Sviluppo di liquidi ionici a base di anioni ortoborato o immidici e cationi piperidinici, che si presentino liquidi a temperatura ambiente e solubili in elettroliti commerciali. Target: conducibilità ionica a temperatura ambiente ≥ 10<sup>-4</sup> S/cm per i liquidi ionici puri e > 10<sup>-3</sup> S/cm per le miscele liquido ionico-elettrolita commerciale.

LA28-29 (MAXphase): LA connesse temporalmente. 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%) con prestazioni in semicella prossime a quelle teoriche (es. MAXphase Ti<sub>3</sub>Al(1-x)Sn(x)C<sub>2</sub> con capacità > 150mAh/g a C/10 vs. Li/L+). Si intende

LA30-31 (ANODI A LEGA): LA connesse temporalmente. Sviluppo di materiali anodici in grado di formare leghe con Na. Si intendono

realizzare semicelle anodiche aventi capacità specifica > 100 mAh/g in cicli lunghi (> 100 cicli).

LA32-33 (CATODI): LA connesse temporalmente. Sviluppo di elettrodi catodici a base di ossidi ( $\text{Na}_0.66\text{MnO}_2$ ) e Nasicon ( $\text{Na}_3\text{MnTi}(\text{PO}_4)_4$ ) o altri materiali a medio-alto potenziale e sviluppo di elettroliti con elevato range di potenziale. Si intendono realizzare semicelle catodiche aventi capacità specifica > 100 mAh/g in cicli lunghi (> 100 cicli).

LA34-35 (IBRIDO): LA connesse temporalmente. Sviluppo di materiale anodico della famiglia dei fosfati e pirofosfati (es.  $\text{NaTi}_2(\text{PO}_4)_3$ ) e del processo di ibridizzazione con materiale conduttivo al carbonio. Si intendono realizzare semicelle in grado di operare con elettrolita acquoso in cicli di carica e scarica ad elevato C-rate (> 10 C).

LA36-37 (SOLID-STATE): LA connesse temporalmente. Sviluppo di elettroliti solidi appartenenti alla famiglia dei thio-NASICON (super conduttori ionici a base Na) con formula generale NMPS, dove N = Na ed M = Ge, Sn, Al, Si. Ci si propone di identificare la composizione migliore per garantire un'elevata stabilità e conducibilità ionica in cella allo stato solido con elettrodo anodico costituito da sodio metallico o da una lega (es. Na-Sn/Sb).

LA38-39 (SCALE-UP): LA connesse temporalmente. Sviluppo di celle litio-ione e sodio-ione formato Pouch. Ci si propone di ottimizzare il protocollo di preparazione di elettrodi (scale-up di cella), presodiazione/prelitazione e test di celle complete con i migliori anodi a base di  $\text{MXeni}$  e/o MAXPhase, sviluppati in LA28-29, e i migliori catodi sviluppati da RSE in LA32-33 (per celle sodio-ione) e da catodi sviluppati da ENEA in LA12 (per celle litio-ione). Per le celle litio-ione si intende garantire una capacità di almeno 15-20 mAh testata a temperatura ambiente e con una corrente di C/10.

WP2 Accumulo elettrochimico: sistemi innovativi

LA1: Realizzazione di un database contenente dati omogenizzati provenienti da più dataset eterogenei, rappresentativi di condizioni operative di sistemi di accumulo elettrochimico a vari stati di invecchiamento, a supporto dello sviluppo di algoritmi di features selection e patterns recognition (tipici dei sistemi di machine learning); Definizione di un'interfaccia standard per l'accesso, visualizzazione e manipolazione dei dati contenuti nel database.

LA2: Sviluppo di algoritmi di features selection che possano manipolare dati caratterizzanti l'evoluzione delle prestazioni di dispositivi di accumulo elettrico nel corso della vita utile degli stessi; definizione di metriche per il confronto di algoritmi sviluppati nella presente attività e basati su tecniche di differente natura (già presenti in letteratura) in termini di bontà della predizione dello stato di salute dei dispositivi di accumulo elettrico selezionati.

LA3: Definizioni di protocolli di test comprendenti sia l'esecuzione di profili operativi di invecchiamento accelerato che la metodologia di esecuzione dei check-up parametrici per dispositivi di accumulo elettrochimico da reimpiegare in second-life; creazione di un dataset contenente tutti i dati utili raccolti (tensione, corrente, impedenza, temperatura ecc.) durante la campagna sperimentale relativa ad invecchiamento delle celle elettrochimiche.

LA4: Individuazione dei principali fenomeni di degrado e della loro evoluzione durante la vita della cella, quantificandone il peso sulla perdita di capacità e potenza, per una più dettagliata definizione dello stato di salute (SoH) del dispositivo di accumulo elettrochimico, a supporto dello sviluppo del tool di previsione dello SoH sviluppato da parte di UNIME.

LA5: Selezione di protocolli di test ed inizio di una campagna di indagine ottimizzata in termini di quantità e tipologie di prove, per la popolazione di un database relativo all'invecchiamento di celle agli ioni di litio, espressamente dedicato alle applicazioni stazionarie a servizio della rete elettrica.

LA6: Finalizzazione del database tramite ulteriore popolazione dello stesso per mezzo di dati aggiuntivi provenienti dalla prosecuzione della campagna di indagine, utili all'allenamento e lo sviluppo del modello; validazione del tool rilasciato da UNIME, tramite test ad hoc, verifiche sperimentali, identificazione e calcolo di indici di performance del modello di previsione prodotto.

LA7: Identificare un set di features correlate con i diversi fenomeni di invecchiamento di dispositivi di accumulo elettrochimico da utilizzare come health indicators (HIs); confronto di differenti algoritmi di machine learning (ML) e statistical signal processing (SSP) funzionali alla stima dello stato di salute (SoH) e all'identificazione del meccanismo di invecchiamento subito dai dispositivi di accumulo elettrochimico a partire da dati sulle condizioni di funzionamento; realizzazione di un tool user-friendly in un opportuno ambiente di sviluppo (ad es. Matlab o Python) per la stima di SoH e previsione del vita utile (RUL) di dispositivi di accumulo elettrochimico in diversi scenari applicativi a supporto dei servizi di rete.

LA8: Selezione delle chimiche di prevalente interesse per l'analisi del comportamento di sistemi di accumulo aggregati sottoposti a cicli di carica/scarica collegati a servizi di dispacciamento. I risultati saranno funzionali all'acquisizione di celle e sistemi per la successiva caratterizzazione in laboratorio

LA9: Test di laboratorio per celle e sistemi sottoposti a cicli di carica/scarica collegati a servizi di dispacciamento. I risultati saranno funzionali alla creazione di un dataset utile al successivo sviluppo di opportuni modelli per l'analisi del comportamento di sistemi di accumulo aggregati

LA10: Sviluppo di modelli innovativi utilizzando sia il framework del calcolo di ordine non intero che metodologie a black box basate su reti neurali. I modelli ottenuti permetteranno una valutazione specifica del comportamento di sistemi di accumulo aggregati sottoposti a cicli relativi a servizi di dispacciamento

LA 11: Valutazione delle potenzialità applicative dell'erogazione di servizi V2G negli attuali scenari energetici a supporto della rete

elettrica. L'analisi orienterà lo sviluppo e la validazione di opportuni modelli di simulazione utili a stimare la capacità del parco veicoli di una determinata area geografica nell'erogazione di servizi ancillari.

LA 12: Definizione degli attributi (variabili) di input per i modelli di previsione della capacità aggregata fornita da veicoli elettrici a supporto delle esigenze della rete elettrica; i dati storici di una flotta di veicoli sonda (floating car data), insieme con le informazioni geografiche, saranno utilizzati per individuare inoltre le possibili localizzazioni delle aree in cui è possibile operare lo scambio di energia.

LA 13: Realizzazione di modelli di previsione per la stima della capacità aggregata disponibile, in una determinata area geografica, dall'impiego delle batterie presenti nei veicoli elettrici. I modelli saranno sviluppati attraverso l'applicazione di tecniche di ML con l'obiettivo di stimare la disponibilità di risorse potenzialmente impiegabili in una determinata area geografica.

LA14: Progettazione, assemblaggio e caratterizzazione di un sistema di accumulo elettrico (BESS, Battery Energy Storage System) basato su VRFB della potenza di 1-5kW; Caratterizzazione di un BESS basato su LiB; Integrazione BESS-VRFB - BESS-LiB (HESS, Hybrid Energy Storage System) e sua interfaccia con il carico.

LA15 Realizzazione di uno studio teorico per diversi dimensionamenti dei sistemi ibridi di stoccaggio elettrochimico-termico, facendo soprattutto riferimento alle metodologie di controllo predittivo - basate su algoritmi MPC Model Predictive Control - per massimizzare le prestazioni di autoconsumo dell'energia prodotta da fonti rinnovabili.

LA16-17 (DIAGNOSTICA e CONTROLLO): LA connesse temporalmente. Sviluppo di strumenti avanzati di diagnostica, monitoraggio e controllo. Ci si propone di sviluppare un modello matematico dinamico di un sistema d'accumulo elettrochimico per un Digital Twin che riproduca il comportamento elettrico e termico del SdA prevedendone l'evoluzione con l'invecchiamento. Ci si propone anche di realizzare un modello semi-empirico di invecchiamento basato sull'analisi del valore della capacità di cella, per stimare la vita residua di un dispositivo per applicazioni 2nd-life. Ci si propone anche di validare l'utilizzo di un chip low-cost (Cell Management Unit - CMU) per effettuare spettroscopia di impedenza elettrochimica (EIS) di cella, al fine di acquisire misure necessarie allo sviluppo di modelli di invecchiamento basati sull'analisi del valore della resistenza interna della cella, quindi complementari a quelli basati sull'analisi della capacità residua.

WP3 Accumulo elettrochimico: aspetti ambientali, economici e sociali

LA 1: creazione di un database LCI, basato principalmente su dati primari, di materiali/componenti innovativi per tecnologie di accumulo elettrico.

LA 2: valutazione degli eco-profilo di materiali/componenti innovativi per tecnologie di accumulo elettrochimico sviluppati dal CNR nell'ambito del progetto, in particolare: materiali catodici carboniosi provenienti da biomasse per batteria sodio-aria; materiali catodici aventi struttura tipo NASICON per batteria sodio-ione; materiali elettrodici a basso costo e sostenibili ad elevata reversibilità cinetica per batterie redox a flusso di vanadio (VRFB).

LA 3: sviluppo di un quadro metodologico multidisciplinare di valutazione della sostenibilità (economica, ambientale e sociale) per la selezione di sistemi di accumulo elettrochimico.

LA4-5 (INTEGRAZIONE) Realizzazione di scenari di integrazione dei sistemi di accumulo nel sistema energetico e analisi di sostenibilità ambientale.

LA6 (DESIGN FOR RECYCLING) recupero diretto di materiali attivi da LIB commerciali esauste, tramite solventi alternativi e biodegradabili caratterizzati e validati sia in ingresso che in uscita al processo. Target: ritenzione di capacità del 90% durante 250 cicli a C/1.

La7-8 (RAW MATERIALS): LA connesse temporalmente. Analisi dell'impiego delle materie prime critiche nelle tecnologie energetiche e analisi delle potenzialità minerarie sul territorio italiano, in particolare da brine geotermiche e da urban mining. Si intende produrre un aggiornamento delle schede tecniche dei materiali strategici delle batterie con individuati e censiti i siti di coltivazione presenti nel territorio nazionale, europeo e mondiale e con approfondimenti su: geologia ed esplorazione, mining, processing e metallurgia estrattiva, risorse e riserve, aspetti economici, rischio di approvvigionamento, sostituibilità. Si intende, inoltre, sviluppare una metodologia di raffinazione delle brine geotermiche per estrarre materiali strategici per la filiera delle batterie, tra cui il litio.

LA9-10 (LCA e IMPATTO SOCIALE): LA connesse temporalmente. Analisi di impatto ambientale, economico di tecnologie d'accumulo e sociale di una filiera produttiva italiana. Si intende sviluppare un'analisi LCA di valutazione dei potenziali impatti ambientali per i materiali e i processi più promettenti per lo sviluppo di batterie a ioni sodio. Si intende anche realizzare un pacchetto open source di statistica, trasferibile a problematiche e utenti diversi, attraverso cui l'utente possa aggiornare automaticamente i costi dei materiali per formulare analisi di Commodities Life Cycle Costing (C-LCC). Si intende, infine, effettuare una valutazione degli impatti socio-economici di un impianto di produzione di batterie, realizzato in Italia in diversi contesti regionali.

WP4 Accumulo termico: materiali e sistemi innovativi

LA1: Identificazione dei LI o miscele di LI più promettenti per le condizioni operative tipiche dell'accumulo termico a  $T=100-400^{\circ}\text{C}$ ; Preparazione materiali ibridi avanzati costituiti da LI, integrati in matrici solide ad elevata conducibilità termica; Caratterizzazione strutturale e valutazione delle proprietà termofisiche dei materiali sviluppati, Valutazione della densità di accumulo termico e confronto con lo stato dell'arte; verifica della stabilità strutturale dei campioni più promettenti, sottoposti a cicli di invecchiamento termico; esperimenti di corrosione per studiare i possibili fenomeni di degrado dei metalli normalmente impiegati nei sistemi di accumulo termico (acciaio, rame) indotti dal contatto con i LI, anche a temperatura elevata ( $T=100-400^{\circ}\text{C}$ );

LA2: Identificazione dei sistemi PCM/polimeri/additivi, Preparazione materiali ibridi avanzati costituiti dai materiali a cambiamento di

fase additivati integrati in matrici polimeriche; Caratterizzazione morfologica e meccanica dei campioni realizzati; conducibilità termica equivalente dei materiali sviluppati  $> 0.4 \text{ W/(m K)}$  (stato dell'arte:  $0.1\text{-}0.2 \text{ W/(m K)}$ ) ed alla densità di accumulo termico  $> 300 \text{ MJ/m}^3$ , più elevata rispetto alla densità di accumulo termico sensibile degli olii diatermici commerciali ( $200 \text{ MJ/m}^3$ ); Verifica della stabilità strutturale dei campioni più promettenti, sottoposti a cicli di invecchiamento termico, in collaborazione con CNR-ICCOM

LA3: modellazione di un impianto a CO<sub>2</sub> transcritica integrato con un sistema di accumulo freddo (power-to-cold-to-power), supportato dall'algoritmo di accoppiamento delle turbomacchine e dalla strategia di regolazione ai carichi parziali. Si persegue il seguente obiettivo: dimostrare la compatibilità del sistema power-to-cold-to-power per applicazioni utility scale coerenti con le specifiche tecniche della funzionalità energy time shifting.

LA4: realizzazione di un prototipo del sistema di accumulo freddo e della sua test-facility; campagna sperimentale per la caratterizzazione del prototipo. Si persegue il seguente obiettivo: dimostrare il superamento dei limiti riscontrati allo stato dell'arte sulla scalabilità dei sistemi di accumulo di ghiaccio verso applicazioni utility scale, svincolando l'energia accumulabile dalla potenza del dispositivo.

LA5: studio/analisi di funzionamento di un nuovo concetto di accumulo termo-elettrico di energia (TEES) e con progettazione di alcuni prototipi. Identificazione degli elementi di accumulo a calore sensibile ed a calore latente da utilizzare nonché dei componenti da sostituire per l'aggiornamento degli impianti Solteca3 e ATEs. Inoltre, si progetterà il sistema TES ibrido prototipale contenente modulo cementizio e modulo a cambiamento di fase.

LA6: sintesi di polveri di carbonato di calcio supportato su mayenite e selezione della frazione di polveri aventi dimensioni opportune per l'impiego in un letto fluidizzato; caratterizzazione in termobilancia della resa di reazione delle suddette polveri al fine di supportare l'analisi teorica preliminare di questi sistemi; stima teorica preliminare della densità energetica dei sistemi di accumulo termochimico per letti fluidizzati basati sulle coppie reattive CaO/CaCO<sub>3</sub> e MnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/MnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>- $\delta$ ; definizione delle specifiche di un dispositivo sperimentale su scala di laboratorio rappresentativo del funzionamento dei reattori a letto fluidizzato.

LA7: realizzazione e installazione di prototipi TEES in calcestruzzo e del sistema sensibile/latente (SH/LH TES) e prove sperimentali di caratterizzazione termica. Realizzazione di un sistema di accumulo termico con moduli integrati che privilegiano l'utilizzo del calore sensibile e latente per temperature di 200-300 °C per circa 25 kWh per effettuare un'analisi di sistema utile per l'utenza.

LA8: Realizzazione di un impianto termochimico costituito da un reattore a letto fluidizzato da laboratorio in Inconel, per la verifica delle reazioni di carico e scarico in condizioni realistiche di pressione e temperatura per reazioni di carbonati ed ossidi metallici in un range di temperatura di 600-900 °C.

LA9: design fluidodinamico delle turbomacchine di un impianto a CO<sub>2</sub> transcritica integrato con un sistema di accumulo freddo (power-to-cold-to-power). Si persegue il seguente obiettivo: rimuovere i limiti nell'involuppo operativo riscontrati nella soluzione impiantistica sviluppata nello scorso triennio e dimostrare la compatibilità del sistema power-to-cold-to-power con le specifiche tecniche della funzionalità energy time shifting.

LA10: Studio di calcestruzzi auto-riscaldanti ed accoppiamento tubo-calcestruzzo per sistemi TEES/Concrete con sviluppo di nuovi mix-design del calcestruzzo con materiali a basso costo o riciclati, in ottica di Economia Circolare ed Eco Design; sviluppo PCM micro-incapsulati potenziati con nanocariche; studio e realizzazione di compositi a matrice cementizia auto-riscaldanti innovativi per applicazioni in accumuli Termo-Elettrici (TEES).

LA11: Sviluppo, messa a punto e validazione di un modello numerico semplificato a parametri concentrati del comportamento di un SHTES in materiale cementizio e sua integrazione in un unico ambiente con un modello semplificato LHTES, con realizzazione dell'applicativo software. Analisi del comportamento termico di sistemi misti SH-LH/TES.

LA12: Sviluppo e messa a punto di un modello numerico semplificato a parametri concentrati del comportamento di un LHTES di tipo "tube&shell"

LA13: Realizzazione e validazione di un modulo software basato sul modello numerico semplificato di un LHTES di tipo "tube&shell"

LA14: Analisi tecnico-economica di tecnologie power-to-heat -to power combinate ad accumulo termico per la decarbonizzazione del settore industriale.

LA15: Modello per reattore a letto fluidizzato per la descrizione dello stoccaggio termochimico con due diversi sistemi reattivi; modello semplificato per la valutazione dei principali parametri di performance al variare delle condizioni operative del sistema reattivo stesso.

LA16: Sviluppo di metodi di sintesi e studio delle caratteristiche morfologiche e termofisiche di sistemi termochimici basati su ossidi misti ad alta temperatura di cui alle linee LA6, LA8, LA14, LA19 ed LA20.

LA17: Nei sistemi di accumulo a calore latente la differenza di prestazione tra la fase di carica e quella di scarica non è facilmente prevedibile. Numerosi sono infatti i fattori che influenzano le prestazioni termiche dei sistemi di accumulo a calore latente: la geometria, i materiali a cambiamento di fase impiegati, le condizioni di funzionamento, solo per citarne alcuni. Gli studi di letteratura mostrano che per particolari configurazioni l'effetto convettivo in fase di carica risulta influenzare positivamente lo scambio termico rispetto alla fase di scarica, in cui la convezione ha un effetto più limitato. L'inserimento delle alette è quindi volto alla promozione dello scambio termico nella fase di scarica senza pregiudicare i vantaggi riscontrati nella fase di carica del sistema.

In sintesi, l'obiettivo dello studio consiste nel rendere comparabili le prestazioni del sistema nelle due fasi di funzionamento, carica e scarica, in quelle configurazioni in cui si abbia una sensibile differenza di performance tra queste due fasi.

LA18: Analisi CFD del dispositivo di misura della conducibilità termica del PCM da utilizzarsi come accumulo termico a media temperatura.

LA19: Analisi tecnico-economica di un processo di stoccaggio termochimico ad alta temperatura in reattori a letto fluidizzato di cui alle linee LA6, LA8, LA14, LA16 ed LA20.

LA20: Test di caratterizzazione pre e post prove di materiali utilizzati nel reattore a letto fluidizzato (LA6, LA8, LA14, LA16 e LA19), per verificarne le proprietà dei sistemi strutturati selezionati; valutazione della stabilità chimica delle polveri pellettizzate al ciclaggio attraverso la post caratterizzazione mediante prove termogravimetriche.

LA21-22 (TERMOCHIMICO): LA connesse temporalmente. Sviluppo di materiali, supporti e processi di accumulo termochimico. Si intende realizzare supporti ceramici a porosità ottimizzata per la deposizione di solfato di magnesio. Si intende anche analizzare il processo di accumulo termochimico, effettuando cicli di carica/scarica in modalità a ciclo chiuso, per investigare l'effetto delle diverse condizioni operative sulle prestazioni del sistema. Infine, si intende realizzare un modello matematico di reattore termochimico, integrato da nuove funzionalità: scambio termico indiretto tramite scambiatore di calore interno.

LA23-24 (ATES): LA connesse temporalmente. Simulazioni numeriche fluidodinamiche di funzionamento di impianti di accumulo termico tramite acquiferi sotterranei. Si intende validare una metodologia di esecuzione di simulazioni numeriche geologiche e fluidodinamiche che tengano in considerazione le effettive richieste energetiche dell'utenza e dell'impianto per sistemi ATES a bassa temperatura (con gestione del calore in condizioni di carichi variabili) e alta temperatura (associati a un impianto di produzione di energia termica da fonte rinnovabile).

WP 5 Diffusione dei risultati

LA 1: creazione di un'ampia gamma di materiali di comunicazione, tra cui articoli, blog, comunicati stampa, presentazioni, video e altro ancora. Inoltre, verranno utilizzati i social media, come Facebook, Twitter, Instagram e LinkedIn; diffusione dei risultati attraverso conferenze, eventi, workshop e seminari, che avranno il compito di promuovere la diffusione dei risultati del progetto e di incentivare l'adozione delle conoscenze prodotte.

LA2 (GESTIONE e DISSEMINAZIONE) Si svolgeranno attività di informazione, diffusione ed interazione che dovranno affrontare i ricercatori per riunioni tecniche con i co-beneficiari, per workshop o congressi di interesse in modo da rendere il lavoro efficace ed omogeneo e poter divulgare il più possibile i risultati raggiunti, con un'effettiva partecipazione. Materiali come articoli scientifici e proceedings saranno raccolti e diffusi anche tramite i canali dei social media.

LA3 (DIFFUSIONE). Si intende fornire supporto alle istituzioni e agli stakeholder nazionali, in sinergia tra gli affidatari, in tutte le iniziative internazionali, europee e nazionali di sviluppo delle tecnologie di accumulo elettrochimico e termico. Si intende, inoltre, organizzare eventi di confronto e di diffusione risultati sui temi del progetto integrato, concordemente tra gli affidatari.

## 2.6 Fattibilità tecnico-scientifica

### a) Fattibilità tecnico-scientifica

Al fine di raggiungere i diversi obiettivi di progetto e verificarne l'andamento, esistono validi elementi in grado di consentire l'individuazione delle maggiori criticità, riscontrabili per ogni singola LA insieme alle relative contromisure da adottare per mitigarne o annullarne gli effetti. Tali informazioni sono dettagliate nella descrizione degli output e nel piano di rischio del progetto (capitolo 6). In generale, la misura del conseguimento degli obiettivi del progetto è data di fatto dai target sperimentali (definiti per ogni singola LA), che consentono di stabilire il raggiungimento dell'obiettivo della LA. Nel WP1 i test preliminari di caratterizzazione chimico-fisica, di tipo strutturale e morfologico, e i seguenti di caratterizzazione elettrochimica saranno alla base dei test di validazione della bontà del materiale sintetizzato sia esso un elettrolita, binder o materiale elettrodico. Misure di conducibilità ionica, resistenza di cella, bagnabilità e determinazione dell'area superficiale ecc., sono i parametri che consentono una prelievazione del materiale desiderato, da tenere sotto controllo prima della successiva validazione in semicella per la determinazione della reversibilità cinetica, resistenza ionica e di tutte le proprietà elettrochimiche di interesse. Questi dati preliminari di caratterizzazione, insieme alla verifica periodica dello stato di avanzamento delle attività sperimentali, rappresentano le principali milestone del WP1, offrendo la possibilità di poter intervenire in maniera pronta, efficace e coordinata, nel richiedere eventuali varianti in caso di necessità specifiche, rivedendo obiettivi e/o realizzando necessari approfondimenti, prima di procedere a ulteriori test. Nel WP2 i test sono fatti attraverso le simulazioni modellistiche e i confronti con le misure in campo, test di aging o test del dispositivo presso una test-facility, laddove presente, in grado di operare con i regimi di funzionamento stabiliti dagli algoritmi di controllo. È anche possibile confrontare i risultati di algoritmi differenti (data-driven o model-based). Anche in questo caso test e simulazioni preliminari possono indirizzare un cambio di direzione rispetto a un'azione pianificata. Un discorso analogo è applicabile per le simulazioni modellistiche delle analisi LCA e LCC effettuate nel progetto. La principale criticità è rappresentata dal reperimento di dati primari, ma questi possono essere sostituiti o integrati (laddove incompleti) da dati acquisiti dai diversi database presenti per questi studi. I rischi associati alle attività del WP4 riguardano lo sviluppo dei materiali, e sono analoghe a quelle descritte per il WP1, e lo sviluppo di sistemi e processi. In questo caso, la criticità principale è determinata dalle facility di prova che spesso sono impianti prototipali soggetti a rotture. Il ripristino immediato dei componenti guasti è la chiave del successo di queste attività. Anche nel WP4 sono presenti diverse attività modellistiche, di simulazione e controllo. Per queste valgono gli stessi propositi descritti per il WP2. Il WP5 è dedicato alla diffusione e alle azioni di supporto alle imprese e istituzioni italiane nei tavoli di lavoro nazionali, europei e internazionali. Per mantenere fede agli impegni di divulgazione dei risultati i tre enti saranno supportati dalle rispettive funzioni di comunicazione presenti nei tre centri e da CSEA. Saranno impiegate un numero adeguato di persone a supporto dei capi

progetto per seguire le attività dei diversi gruppi di lavoro delle numerose iniziative sulle tecnologie d'accumulo che saranno seguite. Una menzione a parte 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 e in quella di valutazione dei rischi, nonché a livello di descrizione generale degli obiettivi di WP. Una rappresentazione grafica delle interazioni (ad esempio attraverso un diagramma PERT) sarà fornita in sede di presentazione del progetto ai valutatori. Di seguito si richiamano le principali interazioni tra gli affidatari nei singoli WP e le criticità che comportano. Relativamente al WP1, i tre gruppi affidatari effettueranno un Round Robin test di materiali anodici (LA coinvolte: LA15 di ENEA e LA29 e 31 di RSE) e catodici (LA coinvolte: LA6 di CNR, LA15 di ENEA e LA33 di RSE) realizzati per batterie sodio-ione: i 3 enti si scambieranno polveri o campioni massivi per test nei reciproci laboratori. L'attività presenta degli elementi di rischio, legati soprattutto al deperimento dei campioni durante il trasporto e ai successivi trattamenti che gli stessi subiranno per la chiusura in semicella. Saranno prese le dovute precauzioni per isolare opportunamente i campioni dagli agenti esterni e si adotteranno le procedure più consone per il loro trattamento (le stesse procedure sono oggetto del Round Robin). In ogni caso, sarà spedita una quantità abbondante di materiale per compensare eventuali errori di impiego. Un'attività analoga riguarda la LA12 di ENEA e le LA 38 e 39 di RSE in cui si vuole chiudere una monocella Pouch litio-ione con i materiali anodici di RSE e catodici di ENEA. Rischi e soluzioni sono analoghe al caso dei materiali elettrodici sodio-ione. Relativamente al WP2, le interazioni di rilievo da evidenziare sono tra le LA 4 e 6 di CNR e la LA17 di RSE e riguardano le procedure di test di aging, definite secondo una matrice di prova comune ed eseguite considerando grandezze comuni su diversi dispositivi in prova. La difficoltà risiede nel concordare i diversi parametri e grandezze da acquisire, le varie convenzioni adottate ecc., in modo che i data-set acquisiti siano facilmente trasmissibili tra enti e verso la comunità scientifica con la prospettiva di realizzare un database condiviso.

Relativamente all'analisi costi benefici, pur non essendo possibile una monetizzazione dei benefici dell'attività, si può dare una stima della rilevanza economica del tema di ricerca riportando ad esempio che in Europa sono in fase di costruzione quasi 40 giga factory, stimulate dalle iniziative di EBA250, tra cui almeno tre in Italia (Seri/FAAM, Italtvolt, ACC/Stellantis). L'Italia, infatti, sta rispondendo attivamente alle direttive europee per contribuire ad accelerare il processo di transizione energetica e che ci condurrà all'ambizioso target della carbon neutrality nel 2050; importanti investimenti sono in atto e in continua crescita sul territorio nazionale. Tra questi vanno annoverati, gli investimenti riguardanti la conversione di importanti stabilimenti, alcuni dei quali presenti nel sud Italia. Tra questi, l'impianto di Termini Imerese (PA) ex stabilimento Fiat, che verrà riconvertito in una Giga Factory di batterie litio di circa 45 GWh di capacità produttiva installata, grazie ad un investimento da parte della società Italtvolt SpA di oltre 3.5 Miliardi e oltre 3000 posti di lavoro. Ancora, ACC (Automotive Cells Company), joint venture tra Stellantis, Mercedes-Benz e Total-Saft, investirà oltre 2 Miliardi € per la conversione dello stabilimento di Termoli in una Giga Factory da 40 GWh al 2030 con oltre 2000 posti di lavoro. Il gruppo Serri/FAAM ha invece già una prima fabbrica di celle operativa con una capacità produttiva di 350 MWh a Teverola e, grazie a investimenti ulteriori e finanziamenti per circa 600 M euro, sta per inaugurare un secondo stabilimento che dovrebbe entrare a pieno regime nel primo semestre del 2024 e avere una capacità produttiva di 7,5-8 GWh di batterie agli ioni di litio, destinate sia al settore delle rinnovabili che a quello automotive. Questi investimenti sono solo alcune delle realtà che si stanno concretizzando in Italia, come nel resto d'Europa, nell'ottica di una visione comune rivolta all'elettrico, sia nel settore dei trasporti che dello stazionario. La previsione di una crescita in EU della domanda produttiva delle batterie, potrebbe portarsi dagli attuali 440 GWh stimati a 570 GWh al 2030; questo favorirà la riduzione dei costi delle celle che compongono i pacchi batteria, dagli attuali 150 €/kWh, ai 70-90 €/kWh. In Italia, negli ultimi anni, sono stati investiti ingenti capitali industriali non solo per le giga-factory, ma anche lungo tutta la catena del valore dell'accumulo elettrochimico. Per parte sua il governo nazionale ha finanziato i progetti di circa 40 aziende all'interno dei due progetti IPCEI per un totale di 1.170 M euro, dedicando poi ulteriori 500 M euro del PNRR a finanziare contratti di sviluppo industriale da parte del MIMIT con lo scopo di rafforzare ulteriormente la cdv nazionale delle batterie.

Con l'aumento dell'energia prodotta da risorse rinnovabili non programmabili nella rete nazionale così come in tutti i più grandi mercati energetici mondiali (in primis Cina, Corea del Sud, Giappone, Stati Uniti ed Europa), sta risultando evidente una nuova tendenza per quanto riguarda lo storage stazionario del segmento utility-scale: quando la capacità di accumulo supera lo 0,5% della capacità della rete, la tendenza per i modelli di business è una transizione dalla gestione della risposta in frequenza come applicazione primaria, che spesso richiede una durata di un'ora o meno, all'arbitraggio dei prezzi o, in alcuni mercati, alla fornitura di capacità. La durata media dell'accumulo si estende quindi da due a quattro ore, con una tendenza in continuo aumento che si traduce in un interesse crescente verso tecnologie alternative con capacità di accumulo compresa nell'intervallo 8-24 ore: ad esempio batterie a flusso, nuove chimiche a base di zinco, aria compressa (CAES), aria liquida (LAES), CO2 liquida e tecnologie di stoccaggio basate sulla gravità. Queste soluzioni di storage alternative e di lunga durata sembrano destinate a entrare nel mercato su larga scala nella seconda metà degli anni 2030. Questo discorso è vero anche nel caso dell'Italia: nel rapporto "Electricity Market Report 2022" del Politecnico di Milano, si riporta che la potenza installata di eolico e fotovoltaico è passata da meno di 5 GW nel 2008 a più di 33 GW nel 2021, di cui circa 22,5 GW relativi a impianti fotovoltaici e 11,3 GW a impianti eolici. Questi numeri sono destinati ad aumentare ulteriormente nei prossimi anni per arrivare alla quota di rinnovabili sul mix energetico pari al 45% del consumo finale di energia entro il 2030 come previsto dal piano RepowerEU lanciato dalla Commissione Europea sull'onda delle ripercussioni sul mercato energetico europeo della guerra in Ucraina. Coerentemente, anche il mercato nazionale dei sistemi di accumulo sta registrando questi rapidi cambiamenti e, riguardo le installazioni di grande taglia, l'asta del Capacity Market relativa al 2024 si è caratterizzata per l'assegnazione, a livello nazionale, di 1,1 GW di CDP (Capacità Disponibile in Probabilità) in sistemi di accumulo elettrochimico, che rappresenta il 29,7% del totale. Il Piano Nazionale Italiano per l'Energia ed il Clima individua obiettivi pari

a 6 GW di accumulo centralizzato (utility- scale) circa equamente diviso fra accumulo elettrochimico ed idroelettrico, con rapporto tra energia/potenza (E/P) di 8h. Gli “scenari congiunti Terna-Snam” indicano che per essere in accordo con gli obiettivi del Fit-for-55 saranno necessari circa 95 GWh aggiuntivi di capacità di accumulo, in particolare 71 GWh relativi a installazioni utility-scale con E/P di 8 h, 16 GWh a impianti distribuiti e 8 GWh già assegnati tramite il Capacity Market.

## 2.7 Impatto sul sistema energetico e benefici attesi

### a) Impatto e benefici sul sistema energetico

Gli eventi politici degli ultimi mesi hanno messo a dura prova la forza nazionale di tutti i paesi europei, i quali si sono improvvisamente trovati a scontrarsi con la necessità di rispondere ai drammatici risvolti legati alla forte dipendenza energetica dettata da paesi politicamente instabili, in grado di mettere in atto azioni ricattatorie, le cui ripercussioni più pesanti si traducono ad oggi, in aumenti sul costo della bolletta del gas e dell'energia elettrica. La risposta a tale “sudditanza energetica” risulta indispensabile al fine di garantire la continuità dello sviluppo e del progresso tecnologico ed economico dell'intero sistema nazionale ed europeo. Le contromisure messe subito in atto sono state 1) la sicurezza dell'approvvigionamento degli attuali impianti di stoccaggio sotterranei del gas per garantirne la fornitura fino al 2023 e 2) una forte accelerazione verso l'aumento degli investimenti sulle fonti energetiche rinnovabili (FR), ad oggi alternativa ai combustibili fossili con maggiore accettabilità sociale. Pertanto, l'incremento verso la produzione e immissione delle FR non programmabili (FRNP), già pianificato all'interno del PNIEC (+ 30% di energia da FRNP al 2030), ha messo in essere un'ascesa sempre più incalzante anche delle tecnologie di accumulo, a supporto ed integrazione delle FRNP e di riflesso, anche delle forniture di materie prime necessarie alla loro realizzazione, soprattutto nel settore dell'accumulo elettrochimico. Tali considerazioni rendono il presente progetto ancora più sfidante, soprattutto se contestualizzato sul nostro territorio nazionale, sprovvisto di risorse primarie fondamentali alle esigenze costruttive a costi ridotti e competitivi. Le azioni che saranno svolte all'interno del progetto guardano al concetto di sviluppo di materiali e sistemi di accumulo sostenibili, puntando alla “circolarità” economica e ambientale. L'approccio seguito nel progetto copre i vari segmenti della catena del valore; prima tra tutti si evidenzia l'attività sulle materie prime critiche che prevede lo screening delle potenzialità di estrazione sul territorio nazionale, un'attività di laboratorio sulla raffinazione sostenibile e studi sulle azioni di recupero e riutilizzo da miniera urbana; un importante capitolo è dedicato allo sviluppo dei materiali avanzati, puntando su chimismi a più basso costo e meno critici; sono comprese soluzioni di eco-design, sempre nell'ottica di realizzare sistemi sostenibili.

In particolare, in merito all'accumulo elettrochimico, l'Europa con l'iniziativa European Battery Alliance punta a far crescere in modo esponenziale la capacità produttiva di batterie al Litio di generazione 3 o 4. Il problema è la sostenibilità di questa crescita esponenziale e la necessità di contenere i costi che hanno implicazioni anche sul sistema energetico. L'attività di sviluppo di batterie, svolta in questo progetto, mira a incrementare le prestazioni di tecnologie già mature (litio-ione) e di alcune tecnologie promettenti che sulla carta presentano maggiori prospettive di riduzione di costo rispetto alle tecnologie oggi presenti sul mercato: la tecnologia sodio-ione presenta maggiori margini di sostenibilità, guardando al quadro economico e geopolitico globale. Infatti, il sodio è un elemento abbondante e distribuito in natura e, quindi, in prospettiva più economico rispetto al litio. Inoltre, il progetto punta allo sviluppo di sistemi di gestione e controllo volti ad aumentare la vita utile delle batterie (con anche ipotesi di 2nd life) e, quindi, a ridurre il costo al kWh.

In merito all'accumulo termico, le soluzioni proposte possono essere abbinare a fonti energetiche rinnovabili, quali il solare termico e gli impianti di combustione a biomassa, così da sfruttare direttamente la sorgente rinnovabile per produrre calore e accumularlo per lungo periodo, nonché allo sfruttamento del calore residuale di impianti industriali, in un'ottica di risparmio di energia primaria.

Pertanto, a supporto del nuovo sistema energetico nazionale, le azioni introdotte all'interno del progetto contribuiranno ad accelerare il processo di decarbonizzazione attraverso attività rivolte a favorire la penetrazione di tecnologie di accumulo innovative, basate su materiali a basso costo e ridotto impatto ambientale. Tali scelte più consapevoli contribuiranno a favorire la riduzione delle emissioni su tutta la catena del valore, le cui previsioni al 2030 sono state stimate dalla “Global Battery Alliance” in circa il 30% in meno rispetto al 2018, tra il settore dei trasporti e generazione di potenza.

### 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. 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). 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 sarà un driver importante. Le attuali tecnologie non saranno in grado di

soddisfare questa richiesta. Lo sviluppo tecnologico, svolto nel 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. Un esempio è costituito dallo 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 gestione possono aumentare prestazioni e affidabilità del sistema, migliorandone 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 automotive. 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 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 dell'energia termica, la gran parte delle necessità è attualmente coperta tramite l'utilizzo diretto di combustibili non rinnovabili. L'autoproduzione di energia elettrica per le esigenze di processo è diffusa soprattutto nei settori Cartario, Siderurgico e Alimentare; in molti casi sono presenti impianti di cogenerazione, che spesso non lavorano in modo ottimale per il disallineamento fra le esigenze elettriche e termiche; attraverso l'utilizzo di sistemi di accumulo termico è pensabile si possa migliorare il regime di funzionamento dei cogeneratori, incrementando la produzione elettrica e/o riducendo gli sprechi termici. In aggiunta, è da considerare l'enorme spazio presente negli altri settori per l'introduzione di sistemi di cogenerazione.

IRENA stima entro il 2050 una crescita di quattro volte dell'utilizzo dell'energia rinnovabile nel settore industriale, attraverso l'implementazione di generazione solare termica e pompe di calore per le necessità termiche a bassa temperatura e il maggiore utilizzo di biomasse per impianti di cogenerazione in loco che possono generare calore a media e alta temperatura. Lo spazio applicativo per le soluzioni di AT a media e alta temperatura finalizzate a supportare l'integrazione e penetrazione delle energie rinnovabili è pertanto molto vasto.

I sistemi di AT possono quindi dare benefici in numerosi settori produttivi al fine di incrementarne l'efficienza energetica e permettere di liberare risorse di approvvigionamento per la produzione di energia elettrica, ove ora siano utilizzate anche per il settore termico, come per esempio il gas naturale, con possibilità quindi di minori approvvigionamenti e conseguente diminuzione dei costi. Inoltre, sono necessari nell'ottica di una penetrazione capillare dell'energia termica da fonte rinnovabile. L'impatto ambientale dei sistemi di accumulo a calore latente e termochimici è limitato. Infatti, i materiali impiegati non presentano particolari problematiche dal punto di vista del consumo di materie prime e tantomeno del rilascio di elementi inquinanti. Le emissioni di CO<sub>2</sub> durante l'operatività dei sistemi di accumulo termico risultano nulle.

Benefici comuni per tutte le diverse tecnologie di AT per il settore industriale sono:

- sviluppo di materiali per AT idonei all'uso in processi industriali che richiedono specifiche caratteristiche, come intervalli di temperatura operativa ristretti o elevata potenza di scarica, evitando l'utilizzo di materiali strategici a livello geopolitico e/o di forniture limitate solo da pochi Paesi;
- sviluppo di approcci sistematici per progettare sistemi di AT che permettano di integrare meglio le tecnologie rinnovabili nel processo industriale quali: una migliore modularità del sistema, che potrebbe essere utile per affrontare problemi di scala; un adeguato design; soluzioni ingegneristiche che possono migliorare l'efficienza nel trasferimento di calore.
- sviluppo di sistemi operativi e di controllo avanzati per AT, per garantire che lo stoccaggio sia stabile e flessibile.

### c) Previsione delle ricadute applicative

L'adozione sempre più consistente di tecnologie di accumulo elettrochimico nella mobilità e nel settore elettrico comporterà benefici non solo a livello ambientale, come già espresso, ma anche economico-finanziario con ricadute soprattutto in termini di nuovi posti di lavoro e di indotto. La domanda mondiale di batterie dovrebbe raggiungere quasi 1000 GWh all'anno entro il 2025 e superare i 2600 GWh entro il 2030 (fonte ETIP Batteries Europe). In Europa, la domanda di batterie per veicoli elettrici dovrebbe superare i 200 GWh all'anno entro il 2023 e raggiungere circa 400 GWh entro il 2028, creando almeno 3-4 milioni di posti di lavoro nel processo, tra personale impiegato direttamente nelle giga-factory e personale indirettamente coinvolto. In Italia sono in corso di realizzazione o autorizzazione tre giga-factory con una capacità produttiva annua di circa 100 GWh stimata per il 2030. Il panorama descritto è indicativo della grandissima opportunità di sviluppo e di crescita soprattutto in termini di nuove professionalità emergenti in ogni settore costituente la catena del valore, relativamente ai sistemi di accumulo. Infatti, le soluzioni validate dalle attività del progetto contribuiscono, nell'immediato, a dare avvio alla formazione di nuove figure professionali (borsisti, ricercatori, dottorandi, assegnisti di ricerca, tecnici), fondamentali a costruire il nuovo tessuto industriale che si va sempre più delineando e, nel medio-lungo termine, a formare professionisti e nuove figure di imprenditori su tutta la filiera, includendo il settore del riciclo materiali e del riuso di batterie. Questo contribuirà altresì alla creazione di posti di lavoro ad alta qualificazione con l'avvio di start-up, piccole-medie imprese legate allo sviluppo di uno specifico processo produttivo lungo tutta la catena del valore per l'ottimizzazione delle tecnologie già esistenti fino a quelle di nuova generazione. L'avvio verso la creazione di un mercato, che offre l'introduzione di tecnologie nuove o poco conosciute, rappresenta, per tutte le aziende manifatturiere

e non, l'opportunità ad aprirsi a nuove soluzioni di mercato finalizzate al rinnovamento, alla riutilizzazione e all'espansione della propria competenza con il reimpiego delle proprie risorse, in un'ottica di innovazione e ripresa industriale. Le attività di progetto prevedono anche studi inerenti tecniche di analisi computazionale e predittive, nonché studi di LCA ed LCC applicati alle tecnologie di accumulo elettrochimico. Grazie a tali attività sarà possibile sfruttare al meglio gli innumerevoli output di progetto per contribuire ad accelerare processi che altrimenti necessiterebbero di tempistiche troppo lunghe per concretizzarsi e offrire soluzioni utili nell'immediato (es. dati predittivi sul second life delle batterie e loro reimpiego), nonché a offrire soluzioni che guardano alla sostenibilità e circolarità, nell'ottica di accelerare verso la decarbonizzazione energetica al 2050, con il raggiungimento di risultati che potranno essere sfruttati al meglio dagli stakeholder industriali.

L'utilizzo di tecnologie di accumulo termico, che fanno tipicamente uso di materiali largamente disponibili e non strategici, è sicuramente un fattore chiave per consentire la maggiore penetrazione delle fonti rinnovabili non programmabili e la modernizzazione delle infrastrutture energetiche. Tali soluzioni possono rendere possibile anche l'attuazione, in ambienti industriali o terziari, di servizi di flessibilità verso la rete elettrica, rendendo l'utenza energetica idonea alla partecipazione, in autonomia o in aggregazione a seconda delle potenze coinvolte, al Mercato dei Servizi per il Dispacciamento elettrico (MSD). In particolare, i sistemi di AT a media e alta temperatura sono funzionali all'ottimizzazione della gestione dei flussi termici in settori chiave quale quello industriale, principalmente per i processi endotermici molto energivori, o quello della generazione energetica da fonti rinnovabili. In maggior dettaglio l'accumulo termico può consentire 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/tri-generazione. Riguardo il recupero del calore di scarto industriale, nonostante l'elevato potenziale, a oggi esso è fortemente sottoutilizzato. Ciò è dovuto sia a difficoltà tecniche ed economiche nell'applicazione dei metodi convenzionali di recupero del calore, sia ai disallineamenti tra l'energia rilasciata e il calore richiesto, facilmente risolvibili attraverso l'impiego delle tecnologie di AT. Riguardo all'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili nel settore produttivo, l'industria presenta il maggiore ritardo, con solo una quota del 14% dei consumi finali coperta da fonti rinnovabili. Di contro l'industria, a livello mondiale, consuma il 32% dell'energia globalmente richiesta, di cui il 74% è riferibile ai consumi termici [fonte ENEA]. Lo spazio applicativo per le soluzioni di AT finalizzate a supportare l'integrazione e penetrazione delle energie rinnovabili è pertanto molto vasto. Con riferimento all'accumulo di energia frigorifera sotto forma di ghiaccio, in Italia e a livello internazionale esistono prodotti industriali maturi, tuttavia la soluzione ad accumulo di ghiaccio qui proposta si propone di realizzare e testare soluzioni tecnologiche per applicazioni utility-scale, agendo indipendentemente sulle dimensioni dell'energia e della potenza. In questo modo, la capacità del sistema di AT diviene una funzione lineare del volume d'acqua, caratteristica che rende la scalabilità del sistema economicamente competitiva. Di seguito sono evidenziati i settori che offrono maggiore potenziale applicativo in corrispondenza dei differenti livelli termici di funzionamento dei sistemi di AT: 1. accumuli termici a bassa temperatura (di norma fra 10°C e 150/200°C) sono principalmente impiegabili nei settori alimentare, cartario e tessile, oltre che per il riscaldamento degli ambienti in tutti i settori; 2. accumuli termici a media temperatura (150/200°C - 250/400°C) possono essere impiegati nei settori chimico, alimentare e cartario; 3. le maggiori necessità di accumuli termici ad alta temperatura (di norma superiori ai 250/400°C) si registrano nei settori della lavorazione dei metalli e dei minerali non metalliferi (es. vetro, ceramica) e nel settore chimico. Si evince quindi il grandissimo 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 15 rapporti tecnici, descrittivi degli aspetti ambientali, economici e sociali legati allo sviluppo delle tecnologie di accumulo elettrochimico (analisi delle potenzialità di estrazione, raffinazione e riciclo delle materie prime critiche, studi LCA/LCC, studi d'impatto sociale); il WP4 produrrà circa 25 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 finale di prodotti e rapporti sarà effettuata accertandosi che i prodotti rispecchino le aspettative in termini di risultati attesi. Gli obiettivi possono essere desunti dalle descrizioni delle attività disponibili nelle sezioni dedicate alle singole LA 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;
- materiali (campioni massivi, polveri, stese, elettrodi ecc.); la verifica sarà effettuata accertandosi che i risultati delle caratterizzazioni chimico-fisiche effettuate in laboratorio (vedi nota 1); siano opportunamente descritti nei rapporti tecnici corrispondenti o in altra

documentazione prodotta dagli enti (es. articoli su riviste);

- prototipi/dispositivi/dimostratori (semicelle, monocelle, celle, 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 (caratterizzazione elettrochimica – vedi nota 1), 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 richiedono 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 finali del progetto (hardware, software e documenti) è riportata nella TABELLA 9, cui si rimanda per l'indicazione dei principali elementi per il test di verifica.

Nota 1: specifici test di caratterizzazione chimico-fisica ed elettrochimica si rendono indispensabili al fine di una preliminare valutazione sul conseguimento del risultato finale atteso per materiali e dispositivi. Pertanto, i dati sperimentali conseguiti a seguito di test di analisi qualitativa quali XRD, TEM, SEM, analisi porosimetriche e di area superficiale (BET) saranno fondamentali per una prima determinazione e conferma sulle caratteristiche morfologiche e strutturali dei materiali desiderati. Quest'ultimi, dovranno essere altresì validati dal riscontro della prestazione elettrochimica in semicella attraverso test di voltammetria ciclica, impedenza complessa ecc., utili ad una ulteriore prelievitazione inerente il comportamento elettrochimico di cella del materiale in termini di reversibilità cinetica, di resistenza al trasferimento di carica, ohmico e di trasporto. Tale riscontro è infatti propedeutico in quanto funzionale alla risposta attesa in configurazione di cella singola a diversa geometria o in coin cell per la determinazione dei parametri elettrochimici di cella (EE, CE, VE, mW/cm<sup>2</sup> a determinati valori di C-rate, ecc..).