

**PIANO TRIENNALE DI REALIZZAZIONE 2025-27 - RICERCA DI SISTEMA
ELETTRICO NAZIONALE**

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

**AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO SVILUPPO
ECONOMICO SOSTENIBILE**

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto 1.2: Progetto Integrato Tecnologie di Accumulo elettrochimico e termico

Durata: 36 mesi

Periodo attività: 01/01/2025 - 31/12/2025

ABSTRACT ATTIVITA' ANNUALE:

Il progetto è organizzato in 5 diversi WP (**WP1 Accumulo elettrochimico: materiali avanzati; WP2 Accumulo elettrochimico: sistemi innovativi; WP3 Accumulo elettrochimico: aspetti ambientali, economici e sociali e argomenti trasversali; WP4 Accumulo termico: materiali e sistemi innovativi; WP5 Diffusione dei risultati**): i primi 3 coprono diversi aspetti della catena del valore delle batterie, il WP4 riguarda l'accumulo termico e il WP5 le attività di coordinamento e disseminazione.

Le attività del **WP1** mirano a individuare soluzioni tecnologiche avanzate per l'accumulo elettrochimico (AE), con attenzione alla sostenibilità ambientale, alle prestazioni e alla riduzione dei costi, al fine di aumentare la competitività delle tecnologie e la resilienza della filiera industriale. Le attività riguarderanno materiali avanzati sostenibili e processi a basso impatto ambientale, applicati sia a tecnologie consolidate (Li-ione, Li-metallo, Na-ione, redox a flusso) sia emergenti (Zn-ione, Al-ione, Na-fuso, metallo-aria), con particolare attenzione alla scalabilità e alla sicurezza degli elettroliti. Saranno studiati materiali elettrodi ottenuti anche da biomasse e scarti, per migliorare le prestazioni delle celle riducendo perdite di potenziale e resistenza ohmica. Per le batterie a ioni sodio, i tre gruppi affidatari collaboreranno testando i materiali più promettenti in diversi laboratori, verificandone la compatibilità per lo sviluppo di celle Na-ione secondo le strategie europee e nazionali, adottando protocolli condivisi ed eventuali caratterizzazioni aggiuntive.

Il **WP2** ha l'obiettivo di sviluppare strumenti avanzati per la diagnostica, il monitoraggio e il controllo dei sistemi di accumulo elettrochimico (AE), basati su modelli data-driven di intelligenza artificiale e modelli physics-informed. Tali modelli, sviluppati a partire da simulazioni e prove sperimentali, saranno applicati a batterie agli ioni di litio e ad altre tecnologie (es. ioni sodio), con particolare attenzione alla previsione dello stato di salute (SoH) e della vita residua (RUL) in applicazioni stazionarie. Le attività sperimentali, condotte congiuntamente dai partner, comprenderanno test su celle in diverse condizioni operative e fasi di vita (prima e second-life), con l'obiettivo di affinare i modelli di invecchiamento sviluppati nel precedente PTR e integrare nei database esistenti nuovi dati relativi a chimismi emergenti.

Il **WP3** affronta la sostenibilità ambientale, economica e sociale dei sistemi di accumulo elettrochimico sviluppati nei WP1 e WP2, perseguendo tre obiettivi principali. Tra questi, la definizione di eco-profilo di batterie innovative mediante un protocollo comune per la raccolta dati, un inventario condiviso e linee guida per l'interoperabilità dei dati, finalizzati alla realizzazione di LCA comparabili. Il WP comprende inoltre attività trasversali quali l'analisi degli impatti sociali, la

valutazione della competitività tecnico-economica dei sistemi di accumulo in scenari di decarbonizzazione e lo studio del potenziale di litio naturale presso il C.R. ENEA Casaccia. Saranno inoltre valutate tecniche di deposizione degli elettrodi e sviluppati digital twin di celle e processi manifatturieri. Ampio spazio sarà dedicato alla caratterizzazione avanzata dei materiali e allo sviluppo di misure in situ, operando e post-mortem, per studiare materiali emergenti in condizioni operative.

Il **WP4** mira a sviluppare sistemi di accumulo termico efficienti e sostenibili per tutte le fasce di temperatura, con l'obiettivo di massimizzare l'impiego delle fonti rinnovabili, ridurre la pressione sulla rete elettrica e limitare l'overgeneration. Le attività riguardano sistemi ad alta densità energetica, lunga durata, rapida carica/scarica, basso impatto ambientale e costi contenuti, attraverso lo sviluppo di nuovi materiali e tecnologie per applicazioni industriali e residenziali. Per la bassa temperatura saranno sviluppati un prototipo integrato con CO₂ transcritica, analizzati sistemi ATES e ottimizzati materiali per l'accumulo termochimico negli edifici. Per la media temperatura saranno studiati zeoliti, materiali cementizi e moduli con nitrati, integrando approcci di machine learning e strumenti di modellazione. Per l'alta temperatura saranno sviluppati e valutati PCM e sistemi ibridi di accumulo termochimico, con validazione sperimentale e analisi di applicazioni industriali.

Il **WP5** ha l'obiettivo di rafforzare il posizionamento della ricerca italiana sull'accumulo elettrochimico e termico in ambito internazionale, attraverso la partecipazione di CNR, ENEA e RSE a reti e iniziative quali European Battery Alliance, ETIP Batteries Europe, Batt4EU, EERA, IEA-TCP, Battery 2030 e cluster nazionali e regionali. Il WP prevede inoltre la diffusione dei risultati verso stakeholder industriali, scientifici e istituzionali mediante eventi, fiere, workshop, pubblicazioni scientifiche e incontri pubblici, assicurandone la visibilità anche oltre la durata del progetto. Sarà inoltre promosso il coinvolgimento degli stakeholder nello sviluppo delle attività attraverso seminari tematici dedicati a batterie sodio-ione, second-life, filiera litio-ione, diagnostica e analisi LCA/LCC. Il WP comprende infine il coordinamento progettuale, la comunicazione tra i partner e le attività di divulgazione rivolte al grande pubblico attraverso canali digitali e social.

ATTIVITA' SVOLTE

WP1: Accumulo elettrochimico: materiali avanzati

<i>AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO</i>	<i>SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO</i>
ENEA	LA1.11 - Studio ed ottimizzazione di materiali elettrodici ed elettrolitici per l'utilizzo in batterie al litio Nell'ambito della LA 1.11, nel corso del 2025 sono stati sviluppati materiali catodici Li-rich mediante sintesi solvotermale del composto Li_{1.24}Mn_{0.62}Ni_{0.14}O₂, valutando l'influenza del rapporto acqua/etanolo sulle proprietà strutturali e morfologiche dei materiali ottenuti. I campioni sono stati caratterizzati mediante XRD, SEM, TEM, XPS e PALS per l'analisi della composizione, della struttura cristallina, della morfologia e della difettività. Parallelamente, è stata condotta un'analisi bibliografica finalizzata all'individuazione di elettroliti polimerici sostenibili e ad alte prestazioni. Le attività hanno riguardato l'ottimizzazione di elettroliti a base di PEO con liquidi ionici e di sistemi multistrato PEO/PAN-PCL,

	nonché lo sviluppo di elettroliti multisale per batterie in configurazione anodeless.
Università degli Studi di Bologna Alma Mater Studiorum Dipartimento di Chimica "Giacomo Ciamician"	LA 1.13 (M3-M12) - Approfondimento: Sintesi e caratterizzazione di membrane e elettroliti solidi anche inorganici e studio di interfacce Nel corso del 2025 sono state completate le attività di caratterizzazione delle interfasi di litio in celle Li//LNMO con additivo TEAPF ₆ , evidenziando un miglioramento della stabilità a temperatura ambiente fino a 400 cicli, mentre a 50 °C sono emerse prestazioni inferiori rispetto alle formulazioni prive di additivo. Sono inoltre state effettuate prove preliminari su separatori a base di EVOH-PEG per la valutazione delle proprietà meccaniche. Parallelamente è stata sviluppata una strategia di ottimizzazione data-driven per elettroliti solidi polimerici a base di PVDF-HFP, Jeffamine® ED-2003 e LiTFSI, consentendo l'identificazione e la validazione sperimentale di una formulazione autoportante ad elevata stabilità elettrochimica e buona conducibilità ionica, con una significativa riduzione dell'attività sperimentale rispetto agli approcci empirici.
Politecnico di Torino Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia	LA 1.14 (M3-M12) - Approfondimento: Ottimizzazione di elettroliti polimerici per batterie di quarta generazione (stato solido) e per accumulatori Zn-ione Nel periodo M3–M12 è stata completata l'analisi dello stato dell'arte e sono stati definiti i criteri di progettazione degli elettroliti polimerici per batterie a stato solido al litio e sistemi Zn-ione. Sono state preparate le prime formulazioni mediante selezione di matrici polimeriche, sali conduttori e additivi funzionali, inclusi composti fluorurati, e realizzati i primi film elettrolitici. È stata avviata la caratterizzazione chimico-fisica, termo-meccanica ed elettrochimica dei materiali e sono state eseguite le prime verifiche di compatibilità con i materiali elettrodi sviluppati da ENEA, individuando le formulazioni più promettenti per la successiva fase di ottimizzazione.
Sapienza Università di Roma Dipartimento di Chimica	LA 1.15 (M3-M12) - Approfondimento: Zero-excess batteries Nel corso del 2025 è stata completata l'analisi dello stato dell'arte mediante una revisione critica della letteratura, finalizzata alla definizione dei benchmark di riferimento e degli indicatori di progresso, con la redazione della relazione tecnica prevista dal PL1. Successivamente sono state avviate le attività del PL2, dedicate allo sviluppo di elettrodi negativi mediante funzionalizzazione di collettori Cu/acciaio, deposizione di film di passivazione artificiali e ottimizzazione preliminare di elettrodi negativi compositi (oCNEs). Le attività sono finalizzate al miglioramento della stabilità dei processi di plating/stripping del litio e dell'efficienza coulombica. Sono stati inoltre definiti i protocolli sperimentali e pianificate le campagne di caratterizzazione elettrochimica a supporto delle successive fasi di sviluppo.
Università degli Studi di Pavia Dipartimento di Chimica	LA 1.16 (M6-M12) - Approfondimento: Materiali autoriparanti per batterie del futuro Nell'ambito della LA 1.16, nel corso del 2025 sono state sviluppate strategie di autoriparazione per separatori polimerici destinati a batterie Li-metallo e Li-ione, con l'obiettivo di mitigare i danni meccanici indotti dai cicli di carica e scarica. In particolare, sono stati progettati e sintetizzati separatori supramolecolari basati su copolimeri PE-HEMA funzionalizzati

	con unità ureidopirimidinone (UPy), in grado di attivare meccanismi di self-healing mediante legami a idrogeno reversibili. I copolimeri, miscelati con PEO e processati mediante hot pressing solvent-free, hanno consentito di ottenere membrane uniformi caratterizzate da efficiente autoriparazione a temperature moderate, elevata bagnabilità nei confronti dell'elettrolita e buona conducibilità ionica, risultando promettenti per applicazioni in batterie di nuova generazione.
ENEA	LA1.17 - Studio e caratterizzazione di materiali avanzati per utilizzo nei componenti delle batterie sodio ione Nell'ambito della LA 1.17, nel corso del 2025, le attività di ricerca hanno riguardato lo sviluppo di materiali anodici e catodici per batterie al sodio. Per i materiali anodici è stato condotto uno studio bibliografico finalizzato alla sintesi di Zeolite Templated Carbon (ZTC) da glucosio e lignina, seguito dall'ottimizzazione del processo di sintesi templata e dalla preparazione di campioni di riferimento e carboni templati. Per i materiali catodici è stata sviluppata la sintesi di ossidi lamellari Na_xFeO_2, valutando l'effetto delle condizioni di sintesi, della stechiometria e del drogaggio con Ca e Al. I materiali ottenuti sono stati caratterizzati e testati in celle a bottone; le prove elettrochimiche hanno evidenziato la prevalenza della fase β e prestazioni non adeguate come catodi per batterie al sodio. LA1.19 - Formulazioni elettrolitiche innovative a maggiore sostenibilità per l'utilizzo in batterie al sodio di nuova generazione Nell'ambito della LA 1.19, nel corso del 2025 sono state sviluppate formulazioni elettrolitiche ibride per batterie sodio-ione basate su liquidi ionici e co-solventi organici, con l'obiettivo di coniugare elevate prestazioni di trasporto ionico e sicurezza. Le attività hanno incluso l'analisi della letteratura, la sintesi e purificazione dei liquidi ionici selezionati, la preparazione di formulazioni elettrolitiche ibride e la valutazione della loro ininfiammabilità. Successivamente sono state selezionate le formulazioni più promettenti e caratterizzate mediante misure di conducibilità ionica in funzione della temperatura, analisi DSC e TGA per la valutazione delle proprietà termiche e della stabilità. Le attività hanno consentito di individuare le formulazioni più idonee da sottoporre ai test elettrochimici previsti nella successiva annualità del progetto. LA1.20 - Calcoli <i>ab initio</i> di ossidi lamellari, sviluppati nel progetto, usati come catodi per sodio ione Il primo anno di attività è stato in parte dedicato allo studio della letteratura sia sperimentale che teorica sugli effetti del doping con Zr di manganiti come catodi per batterie sodio-ione con attenzione alle concentrazioni raggiungibili nella sintesi. Sono stati inoltre eseguiti studi di convergenza dei calcoli <i>ab initio</i> basati sulla Density Functional Theory (DFT) per definire il protocollo di calcolo per la determinazione accurata di struttura a bande e densità degli stati della fase P2 di Na_xMnO_2, investigando il doping di questo cristallo mediante la sostituzione di atomi di Mn con Zr.
Università degli Studi di Camerino Scuola di Scienze e Tecnologie	LA 1.21 (M3-M12) - Approfondimento: Sintesi, caratterizzazione e ottimizzazione strutturale/interfacciale di catodi layered per batterie Na-ione È stata ottimizzata la sintesi per coprecipitazione di materiali catodici di tipo layered oxide, nell'ottica dello sviluppo di un processo scalabile. La metodologia è stata confrontata con altre procedure di sintesi al fine di

	valutarne l'efficacia e la riproducibilità. L'ottimizzazione del protocollo ha consentito di ottenere un controllo della formazione delle fasi cristalline desiderate (P2 e O3) e della morfologia dei materiali, mediante la modulazione delle condizioni di sintesi.
Sapienza Università di Roma Dipartimento di Scienze di Base e Applicate per l'Ingegneria	LA 1.22 (M7-M12) - Approfondimento – Materiali elettrodi micro e nanostrutturati, anche da materiali di scarto, per batterie “beyond lithium” Nel corso del semestre sono state messe a punto delle procedure sintetiche per ricavare ossidi di manganese con differenti fasi cristalline a partire da scarti minerari italiani e brasiliani. In particolare, tramite trattamenti di tipo idrotermali sono stati ottenuti ossidi in fase α (cryptomelane), β (pirolusite), 3×2, δ (birnessite). È stata effettuata la caratterizzazione morfologica e strutturale. Ci si è poi dedicati alla caratterizzazione elettrochimica tramite voltammetrie cicliche e prove di carica/scarica in galvanostatica della fase δ, la più promettente per via della presenza di piani paralleli, in batterie Zn-ione.
Università degli Studi di Napoli Federico II Dipartimento di Scienze Chimiche	LA 1.24 (M6-M12) - Approfondimenti: Simulazioni delle interfacce elettrodo/elettrolita in una cella sodio-ione Nel periodo M6–M12 è stata completata l'analisi dello stato dell'arte e sono stati definiti i modelli teorico-computazionali per la descrizione delle interfacce elettrodo/elettrolita in batterie sodio-ione. Sono stati costruiti i primi modelli atomistici delle superfici di sodio metallico, nonché delle relative interfacce con elettroliti polimerici e a base di liquidi ionici. È stata avviata la caratterizzazione strutturale ed elettronica mediante metodi DFT e predisposto il workflow di simulazione per lo studio della stabilità interfacciale, propedeutico alle successive simulazioni dinamiche e al confronto con i dati sperimentali.
ENEA	LA1.25 - Nuove generazioni di batterie: esplorazione, overview. Studio e sintesi di materiali innovativi per tali tecnologie Nel corso del 2025 le attività hanno riguardato lo sviluppo di framework organici e materiali innovativi per batterie Na-, Zn-ione e Zn-aria. Dopo un'analisi della letteratura sono state definite le strategie sintetiche e avviata la preparazione di ZIF-8 e del COF TAPT-TA, privilegiando procedure sostenibili e solventi a minore impatto. I materiali ottenuti sono stati caratterizzati mediante FTIR-ATR e XPS, confermando la formazione dei framework; sono inoltre in corso l'ottimizzazione della sintesi del COF e le verifiche elettrochimiche dello ZIF-8. Parallelamente è stato sviluppato MnO_2 mediante deposizione electroless su supporti carboniosi, ottimizzando i parametri di processo. Le caratterizzazioni strutturali ed elettrochimiche hanno evidenziato materiali idonei alla realizzazione di elettrodi per batterie Zn-aria, mentre sono state avviate anche sintesi alternative assistite da microonde.
Università degli Studi di Bologna Alma Mater Studiorum Dipartimento di Chimica "Giacomo Ciamician"	LA 1.26 (M3-M12) - Approfondimento: Elettroliti redox a base di metalli multivalenti per nuove generazioni di sistemi di accumulo È stata condotta un'analisi aggiornata sullo stato dell'arte degli elettroliti a base di soluzioni eutettiche e i recenti avanzamenti nell'abito degli elettroliti redox a base di metalli polivalenti. È iniziato lo studio di soluzioni selezionate, a base di FeCl_3, Cloruro di colina, glicole etilenico. È stata valutata la conducibilità ionica a diverse temperature e la stabilità elettrochimica di tali soluzioni.

Sapienza Università di Roma Centro di Ricerca Hydro-ECO Idrogeno e Energie Alternative	LA 1.27 (M3-M12) - Approfondimento: Metalli reattivi oltre il Litio Nell'ambito della LA1.27, è stato condotto uno studio della letteratura scientifica sull'uso di "Low-Transition Temperature Mixtures" (LTTMs) e "Deep-Eutectic Solvents" (DESS) come elettroliti per batterie con anodi in zinco. È stato individuato un range di composizioni da investigare, basate su sali di zinco e litio, con anioni comunemente utilizzati in batterie, come TFSI (bis(trifluometansulfonil)immide), ed un solvente organico (i.e., urea), prevedendo l'aggiunta di piccole quantità di acqua come possibile additivo. Sono state effettuate misure preliminari di calorimetria differenziale a scansione e spettroscopia vibrazionale (Raman e IR) per lo studio delle proprietà termiche e molecolari delle miscele elettrolitiche.
Politecnico di Torino Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia	LA 1.28 (M6-M12) - Approfondimento: Elettroliti redox a base di metalli multivalenti per nuove generazioni di sistemi di accumulo È stata condotta un'analisi aggiornata sullo stato dell'arte sui catalizzatori per la riduzione/evoluzione dell'ossigeno in solventi aprotici e in particolare sull'uso della magnetite nelle celle litio-ossigeno. È iniziata la sintesi di hollow Fe ₃ O ₄ nanospheres attraverso la tecnica ALD (atomic layer deposition). Le particelle sono state caratterizzate in termini di distribuzione delle loro dimensioni (particle size distribution), di morfologia e individuazione delle fasi cristalline (analisi SEM, TEM e XRD). Inoltre, si è effettuata la voltammetria ciclica e misure con il rotating ring disk electrode (RRDE) in ambiente acquoso alcalino saturo di ossigeno, per valutare l'attività catalitica.

WP2: Accumulo elettrochimico: sistemi innovativi

AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO	SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO
ENEA	LA 2.18 - Raccolta e razionalizzazione dei test di prova vita finalizzata alla ottimizzazione dell'utilizzo dei dati nella prognostica delle batterie Durante il primo periodo di attività sono stati avviati i contatti con CNR e RSE per stabilire il flusso informativo, fare una verifica preliminare della compatibilità tra la struttura dei file esistenti in ENEA e i formati accettati dal database. È stata inoltre svolta una ricognizione preliminare sui dati effettivamente disponibili, recuperabili e fruibili nei dispositivi ENEA, sulla base delle informazioni raccolte. È stata avviata la raccolta dei dati, con sistemazione preliminare delle informazioni, non ancora strutturata.
Università degli Studi "Tor Vergata" Dipartimento di Ingegneria Industriale	LA 2.19 (M6-M12) - Approfondimento: Studio di Sistemi stazionari Ibridi con storage elettrochimico e termico per l'integrazione efficiente delle fonti rinnovabili in comunità energetiche È stata avviata la realizzazione di un modello numerico semplificato per la simulazione del comportamento termo-elettrochimico di batterie agli ioni di litio destinate ad applicazioni stazionarie. L'attività ha riguardato la validazione di modelli CFD di celle pouch NMC, l'analisi della distribuzione della temperatura e l'implementazione delle principali strategie di gestione termica. I risultati ottenuti rappresentano il primo

	nucleo del digital twin della batteria previsto nell'ambito dello sviluppo di sistemi ibridi per comunità energetiche.
--	--

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

<i>AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO</i>	<i>SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO</i>
ENEA	LA3.3 - Sfruttamento di risorse locali: analisi e stato dell'arte del sito C.R Enea Casaccia per la valutazione del potenziale di Litio naturale Nel corso del primo anno di attività è stata condotta un'analisi bibliografica dei dati geologici e stratigrafici disponibili nell'area del C.R. ENEA Casaccia, integrata con l'esame delle carote di sedimento provenienti dai geosondaggi realizzati per un impianto geotermico a bassa entalpia. Sulla base delle caratteristiche morfologiche e mineralogiche dei campioni sono stati selezionati tre livelli rappresentativi per la determinazione del contenuto di litio mediante analisi ICP. Parallelamente, la caratterizzazione mineralogica mediante diffrazione a raggi X ha evidenziato la presenza di fasi argillose cristalline potenzialmente idonee all'accumulo di litio, confermando l'interesse dei campioni per le successive attività di approfondimento.
	LA3.4 - Modellazione delle prospettive di competitività tecnico-economica e profittabilità delle diverse tipologie di accumulo in una varietà di possibili traiettorie di decarbonizzazione Nel corso del primo anno di attività è stato perfezionato il collegamento (soft-link) tra i modelli TIMES-Italia e SAInt-Italia, migliorando la rappresentazione delle batterie e della filiera dell'idrogeno e automatizzando il trasferimento dei dati tra i due strumenti. È stata inoltre sviluppata una matrice di otto scenari di decarbonizzazione al 2050, basati su differenti ipotesi relative a fonti rinnovabili, nucleare, CCS e importazioni di elettricità, successivamente analizzati con SAInt-Italia per valutarne gli impatti sul sistema elettrico e sulle prestazioni delle batterie mediante simulazioni orarie. I risultati sono stati presentati in due convegni internazionali. Il ritardo nell'avvio formale del progetto ha comportato il posticipo delle attività con il partner esterno, avviando nel contempo lo sviluppo di un modello del sistema elettrico in ambiente PyPSA e la valutazione di una maggiore granularità temporale di TIMES-Italia.
	LA3.6 - Produzione sostenibile di elettrodi attraverso tecniche di stampa e coating: dallo studio delle formulazioni ai test in batteria, attraverso l'ottimizzazione dei parametri di processo. Analisi dei dati del modello predittivo per l'industrializzazione Nel corso del 2025 sono stati sviluppati e ottimizzati inchiostri a base di Litio Ferro Fosfato (LFP), valutando l'effetto del contenuto secco sulle proprietà reologiche delle formulazioni. Gli slurry ottenuti sono stati depositati su fogli di alluminio mediante stampa serigrafica e wire coating, utilizzando differenti configurazioni di deposizione. Le condizioni di essiccazione sono state ottimizzate per garantire l'integrità degli elettrodi,

	successivamente caratterizzati mediante microscopia elettronica a scansione (SEM) e analisi dei carichi di massa e della densità apparente. Nell'ambito del progetto sono inoltre state acquisite e messe in esercizio le strumentazioni THETAFLEX e TURBISCAN, con definizione delle procedure sperimentali per la valutazione della bagnabilità e della stabilità delle formulazioni.
Sapienza Università di Roma Dipartimento di Ingegneria Elettrica ed Energetica	LA 3.7 (M3-M12) - Approfondimento: Elettrofilatura e manifattura, verso un digital twin di batteria con membrane elettrofilate Nel periodo M3–M12 è stata completata l'analisi dello stato dell'arte relativa ai processi di elettrofilatura e alla modellazione numerica di batterie con membrane elettrofilate. Sono stati definiti i requisiti del modello computazionale e avviata la realizzazione del modello tridimensionale agli elementi finiti in ambiente COMSOL Multiphysics per la simulazione della distribuzione del campo elettrico nella macchina di elettrofilatura. Parallelamente sono state individuate le principali variabili di processo e impostata l'architettura modellistica che costituirà la base per il successivo sviluppo del digital twin e dei modelli di trasporto ionico.
ENEA	LA3.8 - Caratterizzazione avanzata di materiali per le batterie e Sviluppo di set-up per misure operando Nel corso del 2025 sono state avviate le attività di caratterizzazione dei materiali sviluppati nelle LA 1.11 e 1.17, comprendenti hard carbon da biomasse di scarto e membrane polimeriche elettrofilate, al fine di ottimizzare il set-up delle strumentazioni. Sono state eseguite misure SAXS, Raman e micro-FTIR in condizioni non operando. Parallelamente è stato completato l'acquisto del laser UV e della relativa componentistica, con avvio delle attività di allineamento. Le analisi XPS sui framework metallorganici della LA 1.25 hanno confermato la corretta sintesi dei materiali. Sono inoltre stati eseguiti test sul sistema XRD operando, che hanno evidenziato criticità sperimentali, avviando l'acquisizione di un nuovo attachment e la predisposizione delle nuove celle per misure operando.
Politecnico di Milano Dipartimento di Energia	LA 3.10 (M6-M12) - Approfondimento: caratterizzazione avanzata di elettrodi innovativi per batterie a base di ossidi metalli di transizione con tecniche elettrochimiche e spettroscopiche Nel corso del semestre sono state sviluppate e validate nuove gas diffusion electrodes (GDE) bifunzionali per batterie ricaricabili Zn-aria, impiegando nanofili di α-MnO₂ come catalizzatore per la reazione di riduzione dell'ossigeno (ORR) e nanoparticelle di Ni/NiO per la reazione di evoluzione dell'ossigeno (OER). Le attività hanno riguardato la sintesi dei materiali, la formulazione degli inchiostri, la deposizione dello strato attivo mediante spray coating e l'ottimizzazione del trattamento termico finale. Le prestazioni elettrocatalitiche sono state valutate mediante misure RDE/RRDE, prove galvanostatiche ed EIS in configurazione half-cell. I risultati hanno evidenziato un miglioramento delle prestazioni dei GDE contenenti Ni/NiO, attribuito alla maggiore conducibilità elettronica, confermandone l'idoneità per applicazioni in batterie Zn-aria.

WP4: Accumulo termico: materiali e sistemi innovativi

AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO	SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO
ENEA	LA4.5 - Sviluppo e validazione di un sistema innovativo di accumulo termico a bassa temperatura per applicazioni utility-scale L'attività del primo anno si è sviluppata sulla definizione dell'architettura concettuale della strategia di controllo della test facility. Sono stati individuati i principali requisiti funzionali, i parametri di controllo e le condizioni operative di riferimento per la definizione della "control narrative" applicabile alle successive fasi sperimentali.
	LA4.6 - Analisi delle prestazioni ai carichi parziali di un ciclo di potenza integrato con un sistema di accumulo freddo Nell'ambito della LA 4.6, sono state definite le configurazioni di riferimento del ciclo di potenza integrato con il sistema di accumulo freddo alle condizioni nominali e nei primi scenari di funzionamento a carico parziale. Sono stati individuati i parametri più rilevanti per la successiva analisi delle strategie di regolazione.
	LA4.7 - Studio di una tecnologia di accumulo termico con materiale a base cementizia con proprietà dissipative (conduttive/resistive) per applicazioni termico/elettrico Studio della letteratura e riunioni di coordinamento per definire il dettaglio delle attività e l'acquisto dei software e materiali necessari. Successivamente è iniziata la messa a punto di un modello computazionale mutidimensionale, utilizzando il codice di calcolo agli elementi finiti (FEM – Finite Element Method) COMSOL Multiphysics®. Il modello sarà in grado di simulare sia la carica elettro-termica, per effetto Joule, sia la carica e scarica termica, utilizzando un fluido termovettore.
	LA4.8 - Realizzazione e caratterizzazione di un prototipo di accumulo termico con materiale a base cementizia con proprietà dissipative (conduttive/resistive) per applicazioni termico/elettrico In questo periodo è stata iniziata l'attività di progettazione di un prototipo, in scala di laboratorio, di un nuovo sistema di conversione elettro-termica e accumulo termico con l'utilizzo di un materiale a base cementizia con proprietà dissipative (conduttive resistive).
	LA4.9 - Verifica sperimentale della stabilità di moduli di materiali per accumulo termico sensibile latente a media temperatura attraverso prove di lunga durata e sviluppo di modello prestazionale con approccio machine learning Implementazione e validazione di codici MATLAB per valutazione comparativa di modelli di machine learning per previsione multivariata di parametri operativi del modulo di accumulo di calore installato all'impianto di prova SOLTECA. L'obiettivo è stato predisporre e validare i tool di analisi e comprendere quale tipologia di modelli e strumenti sia più efficace ed idonea per lo svolgimento delle attività previste nei mesi seguenti. Sono stati implementati 5 algoritmi di machine learning: Artificial Neural Network; Random Forest; Gradient Boosting; Support Vector Regression; Regressione Lineare con Ridge.

	LA 4.10 - Raccolta e predizione di proprietà fisiche di materiali per accumulo termico a media temperatura per facilitare il design dei TES: preparazione database interattivo Analisi letteratura e raccolta informazioni riguardanti le proprietà termofisiche e le temperature operative su differenti sistemi di accumulo termico. Rielaborazione e strutturazione del materiale raccolto in tabelle in formato open source, così da renderlo facilmente integrabile nel database in corso di sviluppo. Organizzazione del lavoro tramite riunioni di coordinamento per condividere l'avanzamento delle attività e definire in maniera collaborativa le fasi successive. LA4.12 - Verifica della stabilità di materiali per accumulo termochimico ad alta temperatura attraverso prove di lunga durata Verifica della funzionalità del circuito test-rig esistente, mettendo a punto un protocollo per la tenuta della pressione per 8 ore complessive, fino a 800°C ad 1,2,3 e 4 atm. Preparazione di un nuovo materiale termochimico a base di carbonati, da materiali facilmente reperibili come CaCO₃ e Al₂O₃ per migliorare la resistenza allo sgretolamento. Avviamento delle procedure per l'acquisto delle strumentazioni e delle apparecchiature previste. Incontri di coordinamento con UniRM2 ed UniRM1. LA4.13 - Applicazione di sistemi termochimici ad HT per accumuli ibridi alimentabili sia da energia rinnovabile sia termica che elettrico In questi primi 12 mesi è stata effettuata un'attività preparatoria anche con riunioni di coordinamento e definizione dei materiali necessari per l'applicazione di sistemi termochimici ad alta temperatura per accumuli ibridi alimentabili sia da energia rinnovabile di tipo sia termico che elettrico.
Università degli Studi Roma Tre Dipartimento di Ingegneria Industriale, Elettronica e Meccanica	LA4.14 - Design e validazione ai carichi parziali delle turbomacchine e degli scambiatori di calore di un ciclo di potenza integrato con un sistema di accumulo freddo Nell'ambito della LA 4.14, l'attività si è sviluppata con l'impostazione degli strumenti numerici e delle metodologie di calcolo per l'analisi delle turbomacchine e degli scambiatori di calore del ciclo integrato. Sono stati definiti i casi studio, le condizioni al contorno e le grandezze operative da utilizzare nelle simulazioni preliminari, in coerenza con i dati del ciclo forniti dalle attività ENEA. Sono state inoltre avviate le prime modellazioni del treno di compressione, con riferimento alla variazione dell'angolo delle VGV.
Università degli Studi di Perugia Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale	LA4.15 - Studio e sviluppo di materiali ibridi a matrice cementizia ecosostenibili con proprietà dissipative (conduttive/resistive) per applicazioni di accumulo termico/elettrico Reperimento delle cariche per formulazioni delle malte auto-riscaldanti per realizzazione di campioni da caratterizzare. Ottimizzazione delle formulazioni più promettenti. Produzione provini 4x4x16 cm in cui sono state immerse reti metalliche per realizzare elettrodi conduttivi. Test di conducibilità elettrica con elettrometro ed a test di riscaldamento dissipativo. Iniziato reperimento di altre tipologie di inerti come materiali residuali da altre filiere produttive e ricerca di altri filler conduttivi metallici per migliorare efficienza e/o la sostenibilità ambientale.

WP5: Diffusione dei risultati

<i>AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO</i>	<i>SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO</i>
ENEA	LA 5.2 - Gestione e disseminazione delle attività sull' accumulo di energia. Diffusione dei risultati Nel corso del 2025 le attività si sono concentrate sul coordinamento, sulla disseminazione dei risultati e sul rafforzamento delle collaborazioni nazionali e internazionali nel settore dei sistemi di accumulo. ENEA ha partecipato attivamente alle principali iniziative europee e internazionali, tra cui ETIP Batteries Europe, Batt4EU, EERA Joint Programme Energy Storage, IEA TCP Energy Storage e Battery 2030+, contribuendo a meeting tecnici, workshop e conferenze di settore. Le attività di disseminazione hanno incluso la partecipazione alla fiera E-TECH di Bologna, con workshop, incontri con stakeholder, il kick-off meeting del progetto e la prima edizione del Premio ENEA "Prof. Bruno Scrosati" per dottorandi. Nel secondo semestre sono proseguite le attività di networking attraverso eventi quali Battery Innovation Days, SolarPACES, ICSET2025 e NanoInnovation 2025, oltre alla partecipazione alla Notte Europea della Ricerca e all'evento conclusivo del PTR 2022-2024 organizzato da CSEA. Parallelamente sono state svolte numerose riunioni di coordinamento con i partner e i co-beneficiari per pianificare e monitorare l'avanzamento delle attività progettuali.