

**PIANO TRIENNALE DI REALIZZAZIONE 2022-24 - RICERCA DI SISTEMA
ELETTRICO NAZIONALE**
Progetti di ricerca di cui all'art. 10 comma 2, lettera a) del decreto 26 gennaio 2000

AFFIDATARIO ENEA

Tema - Titolo del progetto: 1.2 Progetto Integrato Tecnologie di Accumulo elettrochimico e termico.

Durata: 36 mesi

Semestre n. 5 – Periodo attività: 01/01/2024 – 30/06/2024

ABSTRACT ATTIVITA' SEMESTRALE:

Il progetto è organizzato i 5 diversi WP (**WP1 Accumulo elettrochimico: materiali avanzati; WP2 Accumulo elettrochimico: sistemi innovativi; WP3 Accumulo elettrochimico: aspetti ambientali economici e sociali; 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.

L'attività condotta all'interno del WP1 è rivolta verso la sintesi e la caratterizzazione di materiali sostenibili nonché verso studi di processo a ridotto impatto ambientale per sistemi di accumulo elettrochimico sia più maturi o innovativi (es. Li-ione, Li-metallico, Na-ione e batterie redox a flusso) che di frontiera (es. Na-fuso, Metallo-aria). L'attività è finalizzata all'individuazione di soluzioni che siano migliorative della prestazione di cella sia a livello tecnologico che ambientale, nell'intento di contribuire a sviluppare la batteria sostenibile del futuro attraverso scelte più consapevoli nel rispetto di una economia circolare. Nell'ambito della tematica dello sviluppo delle batterie a ioni sodio i tre gruppi affidatari svolgeranno un'attività congiunta rivolta alla selezione dei materiali anodici e catodici più validi sviluppati all'interno delle rispettive LA e alla definizione di un protocollo condiviso di assemblaggio e test di detti materiali in semicelle. Nello specifico, i materiali condivisi sotto forma di polveri o stese saranno sottoposti a caratterizzazioni elettrochimiche presso i laboratori dei tre enti (Round Robin test). In questo semestre si sono concluse le LA 1.12, 1.15, 1.17 e 1.19 e le LA dei co-beneficiari universitari (LA 1.13, LA 1.20, LA 1.21, LA 1.22, LA 1.23, LA 1.24, LA 1.25, LA 1.26, LA 1.27).

I principali obiettivi delle attività proposte all'interno del WP2 riguardano attività sia di tipo sperimentale che di modeling per diversi scopi applicativi in ambito stazionario. In particolare, un primo obiettivo riguarda lo sviluppo di un database condiviso dai partner di progetto contenente diversi dataset sia di letteratura che sperimentali, provenienti da test di invecchiamento condotti su batterie litio in diverse condizioni operative / fattori di stress (C-rate, T ecc.) durante la first- e la second-life ed ancora, dataset provenienti da test rappresentativi dell'uso dei sistemi di accumulo in diversi servizi di rete. Un ulteriore obiettivo riguarda i sistemi energetici ibridi come la modellazione di soluzioni ibride di accumulo termico/elettrochimico per uso stazionario per

l'integrazione efficiente di fonti rinnovabili. Su quest'ultimo argomento si concentra l'attività della LA 2.15 portata avanti da un co-beneficiario di ENEA.

Il WP3 tratta gli aspetti legati alla sostenibilità ambientale, economica e sociale dei sistemi di accumulo elettrochimico trattati nei due WP tecnici (WP1 e WP2) con analisi che rispondono ai seguenti tre obiettivi generali: 1) analisi di Life Cycle Assessment (LCA) e Life Cycle Costing (LCC); 2) analisi di un approvvigionamento sostenibile di materiali critici per le tecnologie della transizione energetica, con focus sulla filiera delle batterie; 3) analisi socio-economica della filiera di produzione di batterie in Italia. Le LA hanno concluso le loro attività secondo le previsioni.

Riguardo all'accumulo termico WP4 sono proseguiti le linee di attività riguardanti l'accumulo termico a bassa, media ed alta temperatura, come brevemente descritto nella cartella sottostante.

Il WP5 ha due principali obiettivi che si esplicano durante tutta la durata del progetto attraverso la LA5.2:

1. Fornire supporto a istituzioni e stakeholder nazionali in tutte le iniziative internazionali, europee e nazionali che riguardano lo sviluppo tecnologico dei sistemi di accumulo elettrochimico e termico;
2. Sviluppare concreti strumenti di comunicazione per diffondere i risultati della ricerca e per coinvolgere stakeholder e istituzioni in possibili scelte decisionali del progetto sfruttando i canali di comunicazione di ciascun ente e di CSEA.

ATTIVITA' SVOLTE	
AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO	SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO
ENEA	<p>WP1</p> <p>LA1.12: Questa linea di attività si è conclusa con la stesura del deliverable e il raggiungimento dei risultati. In particolare, sono stati ottenuti nei diversi filoni di ricerca i seguenti risultati.</p> <ul style="list-style-type: none">1- Anodi a base di nanofili di silicio<ul style="list-style-type: none">• Ottimizzazione della procedura di ricopertura dei nanofili di silicio con carbonio;• Sintesi di nanofili di silicio ricoperti con polidimetilsilossano;• Sintesi di nanofili di silicio decorati con nanoparticelle di rame;• Caratterizzazione chimico-fisica e test in cella a litio.2- Ossidi lamellari sovra-stechiometrici in litio<ul style="list-style-type: none">• Sintesi di $\text{Li}_{1.24}\text{Mn}_{0.62}\text{Ni}_{0.14}\text{O}_2$ mediante tre diverse procedure: solvotermale, stato solido (HEBM) e sol-gel;• Caratterizzazione chimico-fisica (XRD, Raman, SEM) e test in cella a litio;• Assemblaggio cella Li-ione con anodo a base di

	<p>$\text{Li}_{1.24}\text{Mn}_{0.62}\text{Ni}_{0.14}\text{O}_2$ e anodo a base di nanofili di silicio.</p> <p>3- Separatori polimetrici per elettrofilatura</p> <ul style="list-style-type: none"> • Progettazione secondo un disegno DOE multifattoriale di 17 membrane polimeriche; • Produzione per elettrofilatura di membrane polimeriche, analisi termogravimetrica e valutazione delle prestazioni elettrochimiche. <p>4- Elettroliti Innovativi a base di liquidi ionici</p> <p>I liquidi ionici sono stati sintetizzati, impiegando unicamente acqua, con un tenore di purezza > 99,9 %.</p> <p>5- Manufacturing</p> <ul style="list-style-type: none"> • Realizzazione di elettrodi attraverso uno studio di diverse formulazioni di inchiostri adatti alle tecnologie di stesura proposte per il manufacturing, rotocalco e Dr.Blade, con Carbossimetilcellulosa (CMC), stirene-butadiene come binder o PVDF-HFP. • Testing elettrochimici degli elettrodi come catodi in semicella nel formato <i>coin cell</i> vs Li. • Preparazione di elettrodi ad area più grande, circa 20 cm², per stampa rotocalco, con un inchiostro a base di LiFePO₄, carbone super P e legante CMC e testati in pouch cell contro litio metallico. <p>6- Prototipo batteria Li-ione</p> <p>I prototipi innovativi di batteria litio-ione sono stati realizzati e combinati con un dimostrativo.</p> <p>LA 1.15: Questa linea di attività si è conclusa con la stesura del deliverable e il raggiungimento dei risultati. In particolare, sono stati ottenuti nei diversi filoni di ricerca i seguenti risultati.</p> <p>1- Materiali anodici</p> <p>Sintesi per la produzione di HC modificando il precursore di partenza o introducendo un dopante, ad esempio Silicio. Trattamenti di attivazione su HC commerciali tramite processi di presodiazione o tecniche di irraggiamento.</p> <p>2- Materiali catodici</p> <p>Sintesi e caratterizzazione elettrochimica di ossidi lamellari a basso contenuto di materiali critici. Indagine sull'attività redox dell'ossigeno negli ossidi lamellari di interesse.</p> <p>3- Manufacturing</p> <p>Realizzazione di elettrodi con materiali commerciali selezionati nei mesi 1-18, attraverso uno studio di diverse formulazioni di inchiostri adatti alle tecniche di stesura di rotocalco e Dr.Blade. Realizzazione di inchiostri con diversi tipi di disperdenti e solventi. Test in semicella.</p> <p>4- Formulazioni elettrolitiche a base di liquidi ionici</p> <p>Indagine in letteratura per identificare liquidi ionici promettenti per batterie sodio-ione. Sintesi liquidi ionici identificati ($\text{N}_{1114}\text{FSI}$, EMIFSI). Preparazione formulazioni elettrolitiche. Investigazione della conducibilità ionica in funzione della temperatura. Determinazione della finestra di stabilità elettrochimica.</p> <p>LA1.17: Questa linea di attività si è conclusa con la stesura del</p>
--	--

	<p>deliverable e il raggiungimento dei risultati. Si è anche conclusa l'attività di gestione del round robin test con i partner di progetto. Le attività hanno compreso la definizione dei protocolli di caratterizzazione dei materiali e componenti; la redazione di un manuale metodologico; la caratterizzazione di materiali attivi anodici e catodici con i protocolli di caratterizzazione predefiniti. In particolare:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. materiali per anodi: 1 carbone (HC_1h) sintetizzato per pirolisi della lignina nell'ambito del WP1 sia as prepared (monolite) sia in polvere; 2. materiali per catodi: 2 campioni costituiti da ossidi misti di nichel, manganese, litio e sodio 1 campione commerciale e uno sintetizzato nell'ambito del Progetto <p>LA1.19: Questa linea di attività si è conclusa con la stesura del deliverable e il raggiungimento dei risultati. L'attività ha incluso uno studio DFT e TD-DFT sulle nanocapsule $B_{24}N_{24}$ e sull'effetto dell'incapsulamento di alogeni diatomici omonucleari (Cl_2, Br_2, I_2) e calcogeni (S_2, Se_2) sull'interazione delle nanocapsule $B_{24}N_{24}$ con il catione Mg^{2+} per il calcolo delle proprietà ottiche. In particolare, per prevedere se queste nanostrutture di BN possano essere utilizzate come elettrodi negativi per batterie agli ioni di magnesio, sono state calcolate le proprietà strutturali, elettroniche e vibrazionali, così come l'energia di interazione e la tensione della cella per ciascun sistema, evidenziando differenze e somiglianze. L'incapsulamento di molecole diatomiche di alogeni e calcogeni aumenta la tensione della cella, con un effetto che si intensifica scendendo lungo il gruppo, raggiungendo una notevole tensione di cella di 3.61 V per gli anodi incapsulati con iodio.</p> <p>WP3</p> <p>LA3.5: Questa linea di attività si è conclusa con la stesura del deliverable e il raggiungimento dei risultati. Le attività svolte hanno incluso lo sviluppo e la validazione di un modello UCED dettagliato, basato sulla struttura di ENTSO-E, e il suo utilizzo per il soft-link con il modello TIMES-Italia. Sono stati elaborati diversi scenari di decarbonizzazione del sistema energetico italiano, considerando vari livelli di penetrazione rinnovabile e elettrificazione, e trasferiti nel modello SAInt-Italia per analizzare mix di generazione, flessibilità e ruolo degli accumuli. Inoltre, è stata condotta una review della letteratura sulle tecnologie di accumulo, con analisi LCA sui principali sistemi di batterie (come LFP, NMC, NCA) ed è stato pubblicato, come lavoro di ricerca, uno studio di valutazione comparativa, mediante metodologia di Life Cycle Assessment (LCA), di tre percorsi tecnologici di riciclo delle batterie agli ioni di litio (LIB). I risultati includono strumenti di analisi affidabili, scenari dettagliati e una comprensione approfondita del potenziale ruolo delle tecnologie di accumulo nel sistema elettrico decarbonizzato, contribuendo in modo concreto agli obiettivi attesi dalla presente linea di attività.</p> <p>WP4</p> <p>LA4.3:</p> <p>sono state prodotte e trasmesse al gruppo di ricerca DIIEM-UniRM3, per la successiva attività di progettazione, le specifiche delle</p>
--	--

	<p>turbomacchine di un sistema di conversione a CO₂ transcritica integrato con un sistema di accumulo termico a bassa temperatura, per applicazioni power-to-cold-to-power. È stato definito l'inviluppo operativo del sistema di conversione e ne è stata calcolata la performance con l'obiettivo di valutarne la flessibilità operativa. Sono stati definiti i criteri di scalatura per il sistema di accumulo. L'analisi della performance ha dimostrato il raggiungimento di tutte le caratteristiche previste: margine di regolazione continuo pari al 136% e Round Trip Efficiency compresa tra il 50% e il 60%. Con riferimento ai criteri di scalatura del sistema di accumulo, si evidenzia un rapporto tra le potenze termiche di carica e scarica pari a 1.3 e un rapporto tra potenza termica “fredda” e potenza meccanica erogata pari a 1.25.</p> <p>LA4.4:</p> <p>Sono stati specificati, costruiti e collaudati i componenti chiave della test facility. Nello specifico, sono stati realizzati sette scambiatori di calore con una pressione di progetto pari a 185 bar e una pressione di collaudo pari a 256 bar; due vessel di accumulo, ad alta e bassa pressione, con pressioni di progetto pari rispettivamente a 200 e 55 bar e con pressioni di collaudo pari rispettivamente a 320 e 84.77 bar. Sono state avviate e gestite le attività di procurement per i componenti commerciali della test-facility, è stata predisposta la lista linee che specifica il materiale da fornire per ciascuna linea ed è stato acquisito l'hardware del sistema di controllo.</p> <p>LA4.7:</p> <p>Si è conclusa l'attività con la stesura del deliverable. Tale attività ha riguardato:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aggiornamento e implementazione degli impianti ATES e Solteca3, per la caratterizzazione sperimentale rispettivamente dei TES ad alimentazione mista termica-elettrica (TEES) e del TES ibrido sensibile-latente (HyTES). • Realizzazione di calcestruzzi con o senza l'aggiunta di PCM micro-incapsulati. • Realizzazione e caratterizzazione del sistema di accumulo ibrido ad alimentazione termica ed elettrica con prove sperimentali a carico totale, parziale e ciclico. • Realizzazione e caratterizzazione del sistema di accumulo sensibile-latente con elaborazione dei dati sperimentali su energia accumulata e scaricata dal sistema e dai singoli componenti a carico totale e parziale. È stata inoltre eseguita una prova di quattro cicli consecutivi di carico e scarico, con tempistiche costanti. • Caratterizzazione fisica del mezzo di accumulo cementizio, utilizzato sia nel TEES che nel HyTES. tramite la tecnica del “Hot Disk”. <p>LA4.8:</p> <p>è stato esplorato il comportamento di due diversi sistemi di accumulo termochimico operanti in reattore a letto fluidizzato in regime di letto bollente ad alta temperatura (600-900 °C). I sistemi testati appartengono alla categoria dei carbonati (CaO-Mayenite/CaCO₃, TCM1) e degli ossidi misti (MnAl₂O₄/MnAl₂O_{4-δ}, TCM2). Il circuito di prova è stato</p>
--	---

	<p>equipaggiato, assemblato e collaudato. Il materiale reattivo è stato granulato fino ad ottenere delle particelle con dimensione media compresa tra 180-250 µm. I test nel circuito di prova per il TCM1 hanno mostrato un efficace scambio di materia e di calore ma per tempi ridotti a causa della frantumazione del materiale e di una parziale sinterizzazione, come dimostrato dalla post-caratterizzazione. La conversione totale della fase di scarica è mediamente pari al 40%. L'aumento della temperatura del letto (zona densa) è di 150, 100 e 50°C per le temperature di prova rispettivamente di 600, 700 e 800°C a 4 bar. Per il TCM2, il materiale ha mostrato una buona resistenza meccanica. Si è ottenuto un significativo aumento del mass gain nella fase di ossidazione alla pressione di 2 e 4 bar, pari al 6 %w/w, con un incremento di temperatura limitato (10°C) ma costante durante tutta la fase di scarica.</p> <p>WP5</p> <p>LA5.2:</p> <p>Nel sesto semestre di progetto le attività riguardanti il supporto a istituzioni e stakeholder in tutte le iniziative del settore sono andate avanti, sempre attraverso la partecipazione attiva a meeting, discussioni e lavori delle numerose iniziative riguardanti i sistemi d'accumulo (la piattaforma ETIP BatteRIES Europe, le partnership Batt4EU, il Joint Programme Energy Storage di EERA, il TCP Energy Storage di IEA, e l'iniziativa Battery 2030).</p> <p>Le riunioni di coordinamento tra i tre enti sono proseguite sia in presenza (settembre 2024 presso Nanoinnovation a Roma), sia in modalità ibrida. Ad ottobre 2024 si è svolto l'evento conclusivo del progetto che ha visto coinvolti tutti partner presso l'isola di Salina.</p>
UNIRM1 SBAI SC - WP1	LA1.13: Nel corso del semestre, sono state prodotte le membrane autoportanti di arrays di nanotubi di TiO ₂ e quelle con decorazione con nanostrutture di Ag. Entrambe le tipologie di membrane sono state utilizzate come microanodi in batterie Li-ione. In questo modo è stato possibile determinare analiticamente la massa di materiale attivo e, quindi, la capacità, che -nel caso delle membrane decorate- si è rivelata prossima a quella teorica di TiO ₂ .
UNIRM2 DIF PL – WP1	LA1.20: Nel semestre si è conclusa l'investigazione al livello strutturale ed elettronico sia la manganite co-drogata con Ni e Fe, che quella con Li e Mg. I valori dei potenziali di intercalazione calcolati sono in buon accordo con le misure sperimentali. Inoltre, i percorsi di diffusione del sodio sono stati analizzati attraverso calcoli con il metodo climbing-image Nudged Elastic Band (CI-NEB), chiarendo le energie di attivazione e i meccanismi di diffusione.
UNINA DISCH PV – WP1	LA1.21: Simulazioni multiscala di interfacce eterogenee elettrodo-elettrolita in batterie di terza generazione. Si sono concluse le simulazioni multiscala avanzate per caratterizzare le interfacce eterogenee elettrodo-elettrolita in batterie al litio e sodio metallico di nuova generazione. Inoltre, mediante dinamica molecolare con potenziali derivati da tecniche

	di machine learning, sono state approfondite le proprietà dinamiche e di trasporto ionico dell'elettrolita polimerico (PEO) sulla superficie metallica anodica.
POLITO DISAT LE – WP1	LA1.22: Questa linea di attività riguarda lo studio e l'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 (≥ 0.1 mS/cm a 20 °C) e compatibilità all'interfaccia con catodi ad alto voltaggio (³ 4.3 V) e anodi ad alligazione o a litio metallico. Nel semestre conclusivo si sono svolte analisi SEM che hanno confermato una miscela omogenea e interpenetrata senza domini distinti. L'aggiunta di PC amorfi ha ridotto significativamente la cristallinità, attestata intorno al 10% con il 50% di PEO. Tutte le miscele hanno mostrato una migliorata conducibilità ionica fino a una soglia del 50% di PEO, oltre la quale la conducibilità diminuiva. Il campione PEO400k con il 50% di PEC ha mostrato la migliore conducibilità ionica di $4.6 \cdot 10^{-5}$ S cm ⁻¹ a 40 °C, con un aumento del 57% rispetto alla membrana con solo PEO 400k. La finestra di stabilità elettrochimica ha beneficiato dell'aggiunta di PC, raggiungendo un massimo di 4.68 V per PEO4M con il 50% di PPC. Le analisi statistiche hanno confermato che la quantità di PEO è il parametro più importante, mostrando un eccellente compromesso tra tutte le proprietà per un rapporto PEO 400k di 1:1. La facilità di scalare il processo di produzione senza solventi e le migliori prestazioni meccaniche ed elettrochimiche rendono il polimero misto PEO/PC un buon candidato per batterie allo stato solido al litio, offrendo prospettive promettenti per le tecnologie di stoccaggio energetico di nuova generazione.
UNIBO DICH RB – WP1	LA1.23: A completamento delle attività sugli elettroliti a base di carbonati organici è stato effettuato lo studio di additivi a base di sali di ammonio e alchilammonio, utilizzando tecniche in situ e operando quali Raman e XPS per correlare il comportamento elettrochimico con la composizione del SEI e la sua evoluzione nel tempo. Sono stati preparati e caratterizzati separatori a base di chitosano. Le tecniche utilizzate per la preparazione delle membrane sono l'inversione di fase e il casting. Sono stati realizzati tre elettroliti polimerici: uno gel a base di PVdF, uno a base di PAN/PDOL dove il PDOL è stato ottenuto in situ mediante polimerizzazione elettroiniziata, e uno a base di PEO-Jeffamina, con lo scopo di migliorare spessore, maneggiabilità e sostenibilità dei materiali.
UNIRM1 DICH BR – WP1	LA1.24: Nel semestre si è conclusa l'ottimizzazione della manifattura di elettrodi anodeless per celle al litio metallico che consenta la produzione di materiale L3ME basato sulla combinazione di tecnica LIPSS e coating chimici, validato sperimentalmente a TRL4 in test preliminari elettrochimici.
UNICAM SSTCH NB – WP1	LA1.25: Questa linea di attività riguarda lo studio di catodi a base di Analoghi di Blu di Prussia (PBA) per batterie Na-ione tramite ottimizzazione del processo di sintesi e della struttura cristallina. Nel semestre conclusivo, sono stati testati i due Bianchi di Prussia (PW) a base di Fe/Mn con struttura cristallina romboedrica e a basso contenuto

	<p>di acqua strutturale. L'effetto combinato di acido acetilsalicilico (complessante per Mn²⁺) e acido ascorbico (complessante per Fe²⁺ e antiossidante) è stato valutato al fine di ottenere un materiale ad alto contenuto di sodio ($x_{Na} > 1.4$) e ridotti difetti strutturali. Il contenuto di acqua totale del campione è al di sotto del 2%, favorendo una transizione dalla fase monoclinica a quella romboedrica, più reversibile. Il materiale mostra una capacità specifica di 120-130mAh/g a C/5 e una buona rate capability fino a 10C. Test con formulazioni elettrodotiche sostenibili a base di CMC mostrano alta compatibilità e prestazioni paragonabili a elettrodi a base di PVdF. Infine, test in cella completa con anodo carbonioso forniscono risultati promettenti, con una ritenzione prossima all'80% in 100 cicli in una finestra di voltaggio di 2.75V.</p>
POLITO DISAT FR – WP1	<p>LA 1.26: Preparazione di elettroliti gel polimerici da fonti biorinnovabili per batterie Li aria. Questa linea di ricerca riguarda lo sviluppo di organo-gel (OG) tramite fotopolimerizzazione UV a partire da sostanze bio e rinnovabili per applicazioni nelle celle litio aria. Nel semestre conclusivo sono state preparate membrane polimeriche (indicate rispettivamente CHMAMMW, CHMALMW) tramite metacrilazione del chitosano (CH), a medio e basso PM, per fotopolimerizzazione radicalica-UV. Tali membrane, sono servite per la protezione dell'anodo di litio nelle celle Li-O₂. Il chitosano è polimero biorinnovabile che possiede un'elevata attività di "scavenger" verso i radicali superossido e quindi, rallenta i processi di degradazione dell'elettrolita e del catodo. Tali caratteristiche hanno permesso di ottenere 40 cicli a 0.5 mAhcm⁻² con Efficienza Coulombica del 100%, valori che si attestano a più del doppio di quelli con un anodo non protetto. I lavori hanno portato al conseguimento di due pubblicazioni su riviste Q1.</p>
UNIRM1 HYECO NV – WP1	<p>LA1.27: Elettroliti innovativi a base di liquidi ionici green . Nel semestre si è conclusa l'attività che ha portato alla sintesi di due liquidi ionici, PIP_{1,2O₂}DFOB e PIP_{1,2O₂}BOB, utilizzando una sintesi <i>eco-friendly</i> che massimizza l'uso di acqua in sostituzione dei solventi organici. I liquidi ionici risultanti sono stati caratterizzati in termini di conducibilità ionica e tramite un approccio combinato di diverse tecniche chimico-fisiche: TGA, DSC, ATR-FTIR. I liquidi ionici sono poi stati utilizzati come additivi in elettroliti commerciali per realizzare miscele dedicate a prototipi di celle Li LNMO e Li LRLO. In entrambi i casi si è evidenziata un'ottima compatibilità tra queste miscele e i materiali catodici, portando a netti miglioramenti delle prestazioni di carica/scarica delle celle rispetto a quanto ottenuto con l'elettrolita commerciale. In particolare, si evidenziano miglioramenti in termini di stabilità per i sistemi Li LNMO ed incrementi di capacità specifica per i sistemi Li LRLO.</p>
UNIRM2 DIII ML – WP2	<p>LA2.15 Questa linea di attività prevede lo studio di sistemi stazionari ibridi per lo stoccaggio – elettrochimico e termico – per l'integrazione efficiente delle fonti rinnovabili. Negli ultimi sei mesi si è conclusa l'attività che ha portato a implementare un algoritmo di controllo predittivo (MPC) per massimizzare autoconsumo e durata delle batterie, evitando il prelievo di energia in fasce ad alta intensità di CO₂. Il caso studio considerato consiste in una microgrid residenziale considerando carichi elettrici, termici e mobilità elettrica. L'integrazione funzionale tra</p>

	batterie Li-ion e TES (acqua e PCM) ha mostrato benefici rilevanti in termini di efficienza, costi e parametri di sostenibilità. È stata inoltre condotta un'analisi LCA semplificata, evidenziando ‘l'esistenza di configurazioni ottimali caratterizzate da ridotto impatto ambientale. Gli obiettivi sono stati pienamente raggiunti
UNIBO DICH SV – WP3	<p>LA3.6: La linea di attività si concentra sul “design for recycling” e quindi sulla definizione di processi produttivi sostenibili di materiali elettrodici di LIB focalizzandosi sulla produzione di elettrodi recuperabili tramite riciclo diretto.</p> <p>Nel terzo e ultimo semestre è stata dimostrata la fattibilità della produzione di elettrodi a base di LNMO, utilizzando un legante composito a base di pullulano e del polimero conduttore PEDOT:PSS, necessario per diminuire e/o eliminare la frazione carboniosa difficilmente separabile nella black mass recuperata durante il processo di riciclo diretto. Per la valutazione degli stati di ossidazione dei metalli da frazioni di riciclo, è stato messo a punto il metodo di analisi di spettro XANES e spettri di microscopia XRF, su analoghi del Blu di Prussia come modelli.</p>
UNIPG WP4	<p>LA4.10: le attività svolte e dei risultati ottenuti possono essere riassunte in:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sviluppo di nuovi mix-design del calcestruzzo con materiali a basso costo o riciclati con proprietà migliorate per applicazioni TES, in ottica di Economia Circolare ed Eco Design; • sviluppo PCM micro-incapsulati con prodotti e processi economici ed ecosostenibili con scalabilità industriale; • PCM potenziati con nanotecnologie (NEPCM); • produzione di 5 kg di PCM micro-incapsulato (mEPCM) • Sviluppo di nuovi mix-design integrati con mEPCM per accumulo di energia termica a calore sensibile e latente (SH/LH TES); • studio e realizzazione di composti a matrice cementizia auto-riscaldanti innovativi per applicazioni in accumuli Termo-Elettrici (TEES); estensione dei risultati ai calcestruzzi. • ottimizzazione delle modalità di accoppiamento termico ed elettrico tra tubo di scambio termico e PCM e di conversione eletro-termica (effetto Joule) del tubo stesso. • analisi LCA per sistemi SHTES-Concrete e LHTES, a scopo di verifica della performance ambientale in base delle norme ISO 14040 e 14044. È stata modellata la produzione delle miscele attive di materiali utilizzati nei sistemi di accumulo a calore sensibile e latente. Nel primo caso si usano miscele idratate di Sali, incapsulati in un sistema poroso, mentre nel secondo caso di miscele secche. È stato modellato l'elemento completo per ognuna delle due tipologie, insieme ai relativi componenti di scambio termico e coibentazione. In fine, è stata modellata la Service Life di entrambi i tipi di modulo, dal trasporto alla sede finale, dove espletano la loro funzione di accumulo di energia termica, che consente un risparmio di energia da fonti non rinnovabili. <p>Sia per quanto l'impatto complessivo che per indicatori di impatto e categorie di danno è stato calcolato il pay-back time ambientale, ossia il</p>

	tempo necessario all'azzeramento del valore dei suddetti parametri.
UNIPD WP4	LA4.11: È stato scritto il deliverable conclusivo e messo a punto un codice di calcolo rapido e flessibile per l'analisi termica ed energetica di sistemi di accumulo in calcestruzzo, con o senza integrazione di PCM. Il software, applicabile anche in tempo reale, elabora vari dati di input come portata di massa e temperature, fornendo in pochi secondi informazioni cruciali sulle temperature dell'elemento e sulla sua capacità di accumulo/rilascio di energia termica. Il codice valuta anche l'efficienza complessiva del sistema, risultando uno strumento prezioso per l'ottimizzazione energetica in ambito industriale.
UniFG WP4	LA4.17: È stato scritto il deliverable e conclusa l'analisi del comportamento di sistemi di accumulo termico shell-and-tube verticali dotati di alette. Dopo un'analisi approfondita della letteratura, sono stati individuati i casi più promettenti da investigare tramite simulazioni numeriche CFD. È stato condotto un rigoroso processo di validazione dello strumento numerico per garantirne l'affidabilità e l'accuratezza dei risultati. Successivamente, è stata eseguita l'analisi dei sistemi selezionati. Per quanto riguarda i parametri relativi alle alette, si possono trarre le seguenti conclusioni: <ul style="list-style-type: none">• Le alette anulari offrono prestazioni superiori rispetto a quelle longitudinali in termini di efficienza termica.• L'aumento dell'altezza delle alette riduce i tempi di fusione e solidificazione, grazie all'incremento dell'area di scambio termico.• L'aumento del numero di alette è inversamente proporzionale al passo tra di esse: un numero maggiore di alette aumenta l'area di scambio termico, ma un passo ridotto può limitare i moti convettivi.• L'aumento dello spessore delle alette incrementa l'area di scambio termico, accelerando leggermente i processi di carica e scarica del sistema. Le simulazioni numeriche hanno confermato i risultati riportati in letteratura, consentendo uno studio dettagliato della distribuzione spaziale del PCM (Phase Change Material) all'interno del sistema.
UNIBA WP4	LA4.14: in questo periodo è stato analizzato un impianto agroalimentare in provincia di Bari (un caseificio a Gioia del Colle) caratterizzato da domanda di calore costante durante l'anno (vapore a 240°C e 10 bar, 10 GWht per anno). Lo studio ha quindi ricostruito il profilo orario di domanda di calore per la successiva analisi costi/benefici. Si è assunto che il ritiro di elettricità dalla rete per un sistema di power to heat, per accumulare calore sensibile ad alta temperatura e soddisfare la domanda termica dello stabilimento. L'analisi si è focalizzata sulla quantificazione dei benefici energetici, ambientali ed economici al variare della taglia dell'impianto fotovoltaico, del rapporto tra costo dell'elettricità e costo del gas naturale, e della taglia del sistema di accumulo termico.

UNIROMA1 WP4	<p>LA4.18: si è conclusa con successo l'attività prevista sulla caratterizzazione termo fisica di un mezzo di accumulo PCM. In particolare, si sono raggiunti i seguenti risultati:</p> <ul style="list-style-type: none"> (1) nuova analisi CFD per analizzare il dispositivo microfluidico che è stato realizzato in ENEA; (2) si è valutato l'effetto delle modifiche geometriche al progetto originale. (3) si è sviluppato un nuovo modello unidimensionale per ovviare alla non equa ripartizione della potenza erogata dal filo scaldante; (4) si è valutata la possibilità di inserire nuove sonde di temperatura; (5) è stata ottimizzata la posizione delle sonde di temperatura al fine di avere una stima accurata dei salti di temperatura che, inseriti nel nuovo modello unidimensionale, permettano di stimare, con sufficiente accuratezza, la conducibilità termica del fluido in analisi. <p>LA4.19: in questo periodo si è conclusa l'analisi tecnico-economica di un processo di stoccaggio basato sul sistema CaO/CaCO₃, consistente nella calcinazione del CaCO₃ utilizzando una corrente di CO₂ pura. Il gas uscente dal reattore di calcinazione, di CO₂ alimentata più quella prodotta dalla calcinazione, viene utilizzato per produrre elettricità durante il giorno. La reazione di carbonatazione avviene in un reattore a letto fluidizzato. Il processo proposto prevede una circolazione continua di CO₂ in un ciclo chiuso. Durante il giorno, la corrente calda di CO₂ prodotta dalla calcinazione può essere utilizzata in un ciclo a vapore Rankine (SR) per la generazione di energia, portando alla realizzazione di un ciclo Brayton chiuso.</p>
UNIROMA2 WP4	<p>LA4.20: In questo periodo è stato scritto il deliverable finale e sono terminate con successo tutte le attività previste per questa linea dedicata allo studio della stabilità chimica e morfologica dei sistemi termochimici ottimizzati per l'utilizzo in letti fluidizzati. In particolare, per questa linea di sattività sono stati eseguiti test di caratterizzazione pre-reazione dei sistemi pellettizzati selezionati, basati su prove termogravimetriche in TGA e analisi SEM-EDS, XRD e BET, verificandone le reali performance, la morfologia e la loro stabilità termica al ciclaggio e stabilendo criteri per la scelta del materiale con le migliori prestazioni.</p> <p>Successivamente, i campioni esausti dopo i test di carica e scarica nel reattore a letto fluidizzato condotti da ENEA, sono stati ulteriormente caratterizzati termicamente in termobilancia (TGA) per studiarne la stabilità ed analizzati via XRD, SEM-EDS e BET per verificarne le proprietà strutturali e morfologiche.</p>
UNIRM3 WP4	<p>LA4.9: Si è conclusa con successo la linea di attività che prevedeva lo studio del design preliminare delle turbomacchine di un ciclo di potenza integrato con un sistema di accumulo freddo. In particolare, si è proceduto ad effettuare dimensionamenti ottimizzati delle macchine rispondenti alle specifiche fornite. Data la pluralità di soluzioni ottenute, sono state effettuate puntuali verifiche prestazionali utilizzando metodi CFD-3D. Sulla base di tali verifiche e delle numerose interazioni intercorse con il gruppo di ricerca ENEA, coinvolti nella LA4.3 e responsabile della messa a punto dell'impianto di potenza, per ogni turbomacchina sono state selezionate le migliori configurazioni dal punto di vista prestazionale, ma soprattutto di flessibilità di impiego e</p>

	caratterizzate esplorando l'intero campo di funzionamento.
--	--