

Ricerca di Sistema elettrico



**Metodologia multi-modello per la valutazione del
potenziale tecnico-economico delle tecnologie di
accumulo nel sistema elettrico nazionale e primi
scenari dimostrativi**

Francesco Gracceva, Giuseppe Di Florio, Claudio Carbone,
Alessandro Agostini

METODOLOGIA MULTI-MODELLO PER LA VALUTAZIONE DEL POTENZIALE TECNICO-ECONOMICO
DELLE TECNOLOGIE DI ACCUMULO NEL SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE E PRIMI SCENARI
DIMOSTRATIVI

Francesco Gracceva, Giuseppe Di Florio, Claudio Carbone, Alessandro Agostini

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione*

Progetto: *tema di ricerca 1.2*

Linea di attività: *3.4*

Responsabile del Progetto: Margherita, Moreno, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Alessandro, Agostini, ENEA

Mese inizio previsto: 1.1.2022

Mese inizio effettivo: 1.1.2022

Mese fine previsto: 30.6.2023

Mese fine effettivo: 30.6.2023

Indice

1	RISULTATI ATTESI.....	3
2	RISULTATI OTTENUTI	4
3	PRODOTTI ATTESI	18
4	PRODOTTI SVILUPPATI	19
5	ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI	20
6	SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE	21
7	CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE	23
8	PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE	24
9	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	25

1 Risultati attesi

Il presente rapporto, dal titolo **“Metodologia multi-modello per la valutazione del potenziale tecnico-economico delle tecnologie di accumulo nel sistema elettrico nazionale e primi scenari dimostrativi”**, riguarda le attività svolte nei primi 18 mesi di progetto, dal 1.1.2022 al 30.6.2023. I risultati attesi riguardano l’acquisizione delle competenze e degli strumenti necessari per mettere a punto una metodologia di soft link per l’applicazione del software SAint (Scenario Analysis Interface for Energy Systems), una piattaforma software progettata per modellare reti e mercati energetici integrati (<https://www.enCOORD.com/solutions/saint>), e del modello dell’intero sistema energetico. Queste attività preliminari pongono le basi per la valutazione del ruolo dei sistemi di stoccaggio dell’energia all’interno del sistema elettrico nazionale.

Nello specifico, i risultati attesi si articolano su tre linee principali:

- Realizzazione del modello di dispacciamento nazionale basato su SAint, collegato con il modello del sistema energetico italiano TIMES-Italia;
- Elaborazione di alcuni scenari preliminari di decarbonizzazione del sistema energetico italiano e loro implementazione nel modello del dispacciamento per testare la metodologia di valutazione delle diverse tecnologie di accumulo;
- Caratterizzazione energetica delle principali tecnologie di accumulo, anche con metodologia LCA.

2 Risultati ottenuti

2.1 Realizzazione del modello di dispacciamento nazionale basato su Saint, collegato con il modello del sistema energetico italiano TIMES-Italia

Il primo modello sviluppato è un modello dell'intero sistema energetico italiano, TIMES-Italy, basato sulla metodologia TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System), uno strumento di modellazione del sistema energetico basato sulla programmazione lineare e sviluppato dall'ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Program), uno dei Technology Collaboration Programme dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA). TIMES è un generatore di modelli tecnico-economici di tipo bottom-up (vale a dire technology explicit) per la simulazione e ottimizzazione di sistemi energetici locali, nazionali o multi-regionali. Il modello descrive l'evoluzione ottimale del sistema energetico in esame, identificando, per ogni periodo dell'orizzonte temporale dell'analisi, la configurazione di minimo costo del sistema conseguente all'ampio insieme di ipotesi e vincoli alla base di ogni scenario. Ogni equilibrio prodotto dal modello TIMES rappresenta il mix ottimale di tutte le tecnologie, i combustibili, le infrastrutture e i flussi commerciali che compongono il sistema energetico sotto esame, sulla base delle loro (presenti e future) caratteristiche tecnico-economiche.

Per ogni periodo dell'orizzonte temporale analizzato i principali output del modello sono la capacità installata e il livello di utilizzo di tutte le tecnologie rappresentate nel modello, i flussi di energia in entrata e in uscita da ogni tecnologia, il prezzo ombra di tutte le commodity rappresentate nel modello, le emissioni di anidride carbonica e i costi marginali di riduzione delle emissioni. Per ogni periodo dell'orizzonte temporale il modello fornisce dunque una nuova configurazione del sistema energetico, cioè la combinazione ottimale di tecnologie e commodity in grado di soddisfare l'intera domanda rispettando i vincoli imposti.

Questo approccio modellistico è particolarmente utile per valutare i costi, i benefici e gli impatti di diverse politiche energetiche, tra cui in primis le strategie di riduzione dei gas serra, e la valutazione delle prospettive di penetrazione nel sistema delle tecnologie energetiche innovative. Il modello TIMES-Italia descrive l'intero sistema energetico italiano, con la descrizione esplicita di diverse centinaia di tecnologie energetiche flussi di energia ed emissioni, dall'estrazione e importazione delle fonti primarie alla loro conversione in vettori energetici e poi al trasporto e distribuzione di questi fino alle tecnologie di uso finale, che utilizzano vettori energetici per soddisfare la domanda di servizi energetici dei consumatori, suddivisi nei cinque principali settori di domanda:

- industria, che include la rappresentazione separata dei principali processi produttivi energy-intensive (acciaio, cemento, vetro, carta, chimica e petrolchimica, minerali non metalliferi);
- residenziale e terziario, suddivisi nei segmenti di domanda di condizionamento invernale ed estivo, acqua calda, usi cucina, illuminazione, lavaggio biancheria, altri apparecchi elettrici;
- trasporti, nei quali la domanda di mobilità è divisa tra passeggeri-km e ton-km e poi differenziata in diverse tipologie;
- agricoltura

Sono poi rappresentati in modo separato il settore della generazione elettrica, che include poco meno di un centinaio di tipologie di impianto, e quello della raffinazione (vedi Fig. 1).

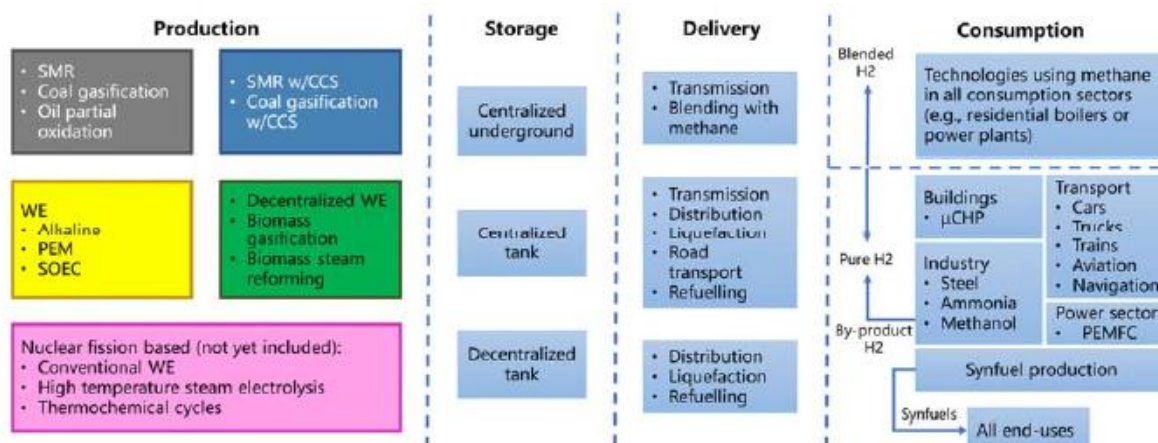


Figura 1 - Schema della rappresentazione del sistema energetico italiano nel modello TIMES-Italia

Scopo del lavoro è in primo luogo di aggiornare e raffinare la descrizione delle diverse tecnologie nel TIMES – Italia ed elaborare scenari mirati alla valutazione specifica del contributo potenziale delle tecnologie di accumulo alla decarbonizzazione, ma soprattutto verificare la fattibilità degli scenari elaborati.

Un limite del modello TIMES-Italia è rappresentato dalla limitata risoluzione temporale, insufficiente alla verifica della coincidenza oraria tra produzione e consumo di energia elettrica, che è invece fondamentale per capire a fondo l'operatività delle tecnologie di accumulo, tendenzialmente non programmabile. A questo scopo si è dunque creato un soft-link tra il modello TIMES-Italia e un modello del sistema elettrico italiano, basato sul software Saint, con l'obiettivo di valutare le implicazioni e la reale fattibilità degli scenari elaborati con il modello Times-Italia.

SAint è uno strumento di modellazione del dispacciamento di un sistema elettrico, in grado di tenere conto dell'ampio insieme di vincoli operativi che caratterizzano quest'ultimo, come le rampe, il livello di generazione minimo di ogni impianto, i tempi minimi di accensione e spegnimento. A tale scopo il modello viene risolto utilizzando la programmazione lineare o la programmazione lineare mista-intera (MILP), necessaria per modellare correttamente i parametri tecnici dei generatori, che introduce variabili di decisione intere. Inoltre, è possibile calcolare il dispacciamento ottimale con granularità oraria o infra-oraria, e rispettando la cronologia delle ore nel corso dell'anno. Nel modello TIMES-Italia, invece, la massima granularità temporale disponibile, sia dal lato della domanda sia dal lato della produzione, è attualmente di 12 blocchi, derivanti dalla combinazione delle quattro stagioni dell'anno con le ore diurne, notturne e di picco di domanda.

Un'appropriatezza modellazione del funzionamento del sistema elettrico per la valutazione delle potenzialità di sviluppo e applicazione delle diverse tecnologie di accumulo è strettamente legata alla disponibilità di elettricità a costo basso o nullo. È dunque necessario verificare in quante ore dell'anno, nel futuro sistema elettrico decarbonizzato, ciò possa realizzarsi.

D'altra parte, la variabilità e intermittenza della generazione di energia da solare ed eolico, che le rende fonti non dispacciabili, rende inoltre complessa la sfida del bilanciamento del sistema, imponendo la disponibilità di risorse flessibili, per cui è necessario verificare la reale fattibilità delle configurazioni del sistema elettrico descritte dagli scenari TIMES, nei quali, come detto, la rappresentazione di quest'ultimo trascura importanti elementi di dettaglio.

2.2 Scenari preliminari di decarbonizzazione del sistema energetico italiano e loro implementazione nel modello del dispacciamento

Come rappresentato in Fig. 2, nel soft-link TIMES-SAint il primo modello viene utilizzato per fornire un insieme di possibili scenari dell'intero sistema energetico, ovvero immagini internamente coerenti del sistema futuro, ciascuna delle quali implica diverse caratteristiche del settore elettrico, a partire dal grado in cui le richieste di servizi energetici vengono soddisfatte mediante l'elettricità in competizione con tutte le altre commodities energetiche, tenendo conto dell'interazione, dell'influenza reciproca e della dipendenza tra i mercati e le infrastrutture dell'elettricità e del gas.

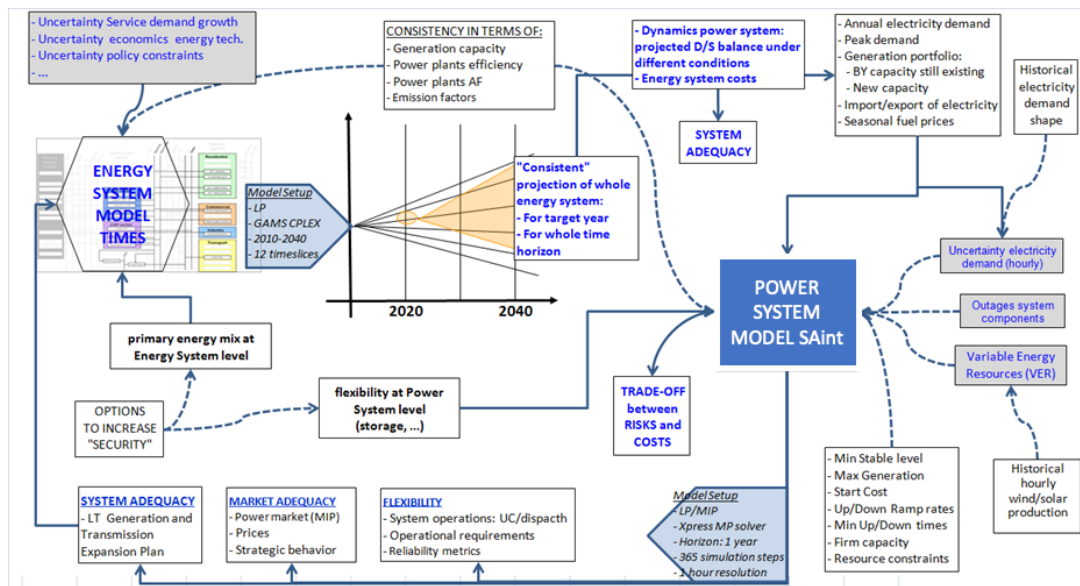


Figura 2 - Schema dell'approccio adottato di soft link TIMES Italia – SAint.

Per ogni scenario, la configurazione del sistema elettrico descritta da TIMES (portafoglio di generazione, domanda di energia elettrica, import/export di elettricità, prezzi dei vettori energetici) viene “passata” al modello SAint, che sviluppa un'analisi dettagliata delle implicazioni di ogni scenario in termini di dispacciamento delle unità di generazione, possibilità di energia non servita, ore di curtailment, prezzi di mercato. Ne deriva una valutazione del piano di espansione della capacità a lungo termine prodotto da TIMES.

Sono rappresentati qui di seguito alcuni primi risultati preliminari, utili ad esemplificare l'approccio metodologico che è stato sviluppato:

- 1) I risultati preliminari dell'analisi di scenario condotta per l'Italia mediante il modello TIMES-Italia mostrano che uno scenario che combina l'obiettivo 2030 fissato nel pacchetto UE Fit55 e l'obiettivo di emissioni nette zero nel 2050 è tecnicamente fattibile, anche in un contesto di crescita della domanda di servizi energetici corrispondente a quella ipotizzata negli scenari PRIMES 2021 (che implica una crescita del PIL di poco superiore all'1% m.a.). Rispetto al 2021, al 2050 i consumi di energia primaria si riducono di circa il 15% nello scenario Net Zero (rispetto allo scenario Base), nonostante il PIL ipotizzato per il 2050 sia superiore del 40% rispetto a quello del 2021. La quota di fonti fossili sull'energia *primaria* consumata dal sistema, pari nel 2021 al 79%, scende nel 2050 al poco più del 50% nello scenario Base, si riduce a 1/4 nello scenario Net zero (principalmente prodotti petroliferi nei trasporti e gas naturale le cui emissioni sono poi sequestrate). Nel caso dei consumi finali di energia il mix di fonti cambia rispetto a oggi in misura meno marcata nello scenario Base, sebbene la quota di prodotti petroliferi e gas naturale si riduca comunque di 10

punti percentuali, perché la decarbonizzazione osservata nell'energia primaria riflette soprattutto la decarbonizzazione della trasformazione dell'energia primaria in elettricità. Nello scenario Net Zero, nel quale la riduzione dei consumi *finali* rispetto al 2021 supera il 30%, risulta inoltre anche pressoché completamente decarbonizzato il mix delle fonti secondarie:

- l'elettricità (totalmente decarbonizzata) sfiora il 50% del totale
- idrogeno e biometano superano il 10%, mentre si azzerava il peso del gas naturale
- anche i synfuel arrivano al 10% del mix, mentre mantengono una quota superiore al 10% anche i prodotti petroliferi, utilizzati come feedstock nell'industria

In sostanza il sistema energetico descritto in questo scenario Net zero è costituito per il 60% circa da tecnologie esistenti e competitive già oggi (elettricità da fonti rinnovabili in primis), per il restante 40% circa da tecnologie oggi ancora in fase di sviluppo e/o non ancora competitive (biometano, generazione elettrica baseload low-carbon, idrogeno, combustibili sintetici). Il ruolo rilevante che hanno nel sistema Net Zero le tecnologie low-carbon non ancora competitive, tra cui in primis l'idrogeno, ha un'implicazione di notevole rilievo, che dimostra quanto in realtà sia stretto il sentiero che porta all'azzeramento delle emissioni nette: l'analisi di scenario sembra indicare che condizione necessaria per la fattibilità tecnica di uno scenario Net Zero 2050 è che per tutte le principali tecnologie low-carbon innovative si registri nei prossimi tre decenni un'evoluzione "ottimistica", tale da determinarne uno sviluppo imponente

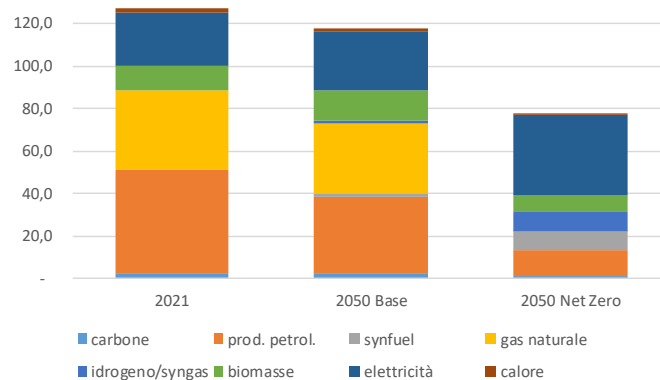


Figura 3 – Consumi energetici in Italia (TWh) per settore, dati storici e due scenari.

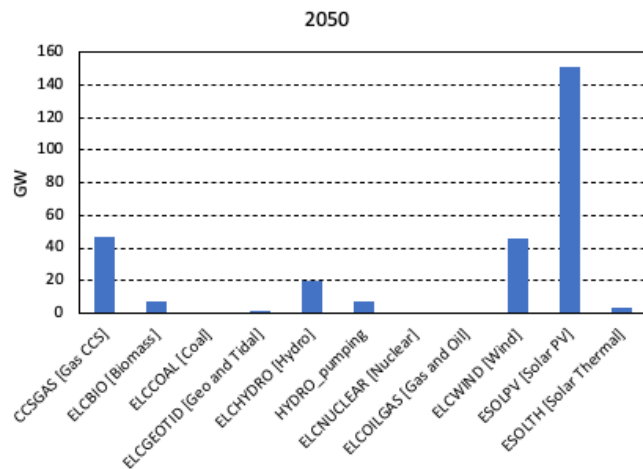


Figura 4 – Produzione di energia elettrica in Italia (TWh) suddivisa per tecnologia, scenario 2050.

- 2) La richiesta di elettricità sulla rete dello scenario Net-zero, stimata dal TIMES-Italia per le dodici time slice del modello, è stata trasformata in sette profili orari, a partire dai dati storici disponibili da Terna, che sono poi stati importati nella piattaforma SAint. La Figura 5 mostra i profili orari corrispondenti allo scenario Net-zero elaborato da TIMES, la Figura 6 mostra gli stessi profili importati in Saint.

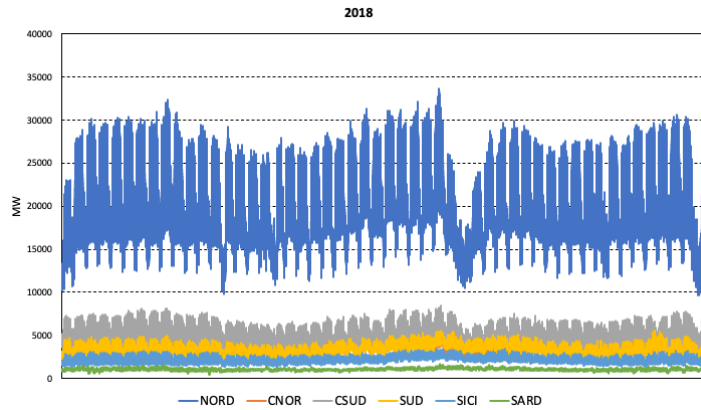


Figura 5 – Esempio di profili orari forniti da TERNA (TWh) di domanda relativi all'anno 2018.

- 3) Accanto ai profili di domanda sono stati importati in Saint anche i profili di produzione delle fonti rinnovabili, solare ed eolico in primis. Per la prima versione del modello, dimostrativa, si sono utilizzati i profili storici registrati nel 2018, disponibili da Terna.

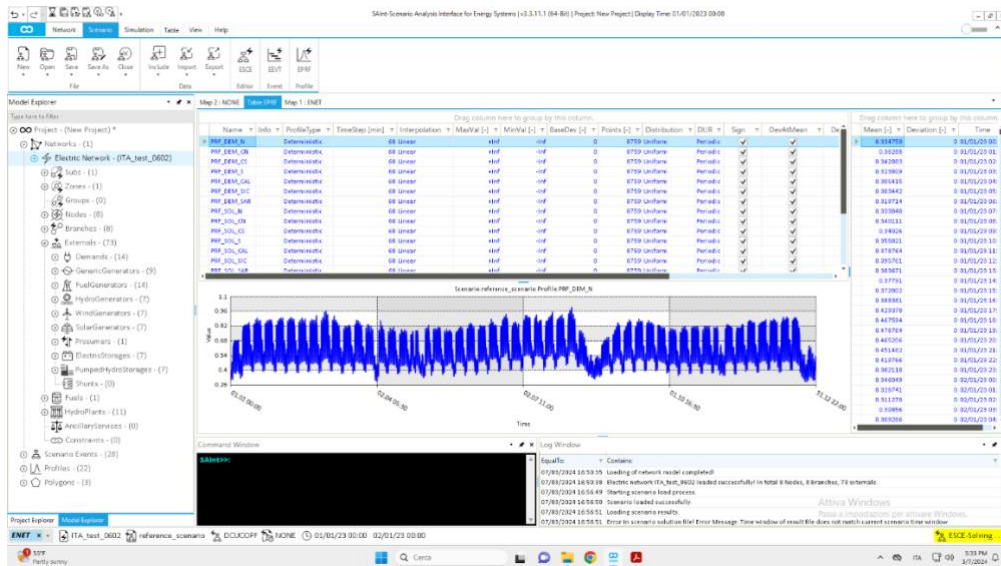


Figura 6 – Screenshot dell'interfaccia software SAint che esemplifica il caricamento degli scenari sviluppati con TIMES-Italia.

- 4) Si è poi aggiunta nel modello Saint una caratterizzazione del lato dell'offerta del sistema elettrico corrispondente con lo scenario Net-zero elaborato dal TIMES-Italia: sono stati inseriti tutti gli impianti di generazione, con la relativa potenza installata al 2050.

- 5) Oltre alle tecnologie scelte dal modello TIMES-Italia come soluzione ottimale per il 2050 sono state inserite in Saint le tecnologie che, per la natura del modello, non sono rappresentate nel modello TIMES. In Figura 7 è mostrato come in Saint è caratterizzato di un sistema di accumulo.

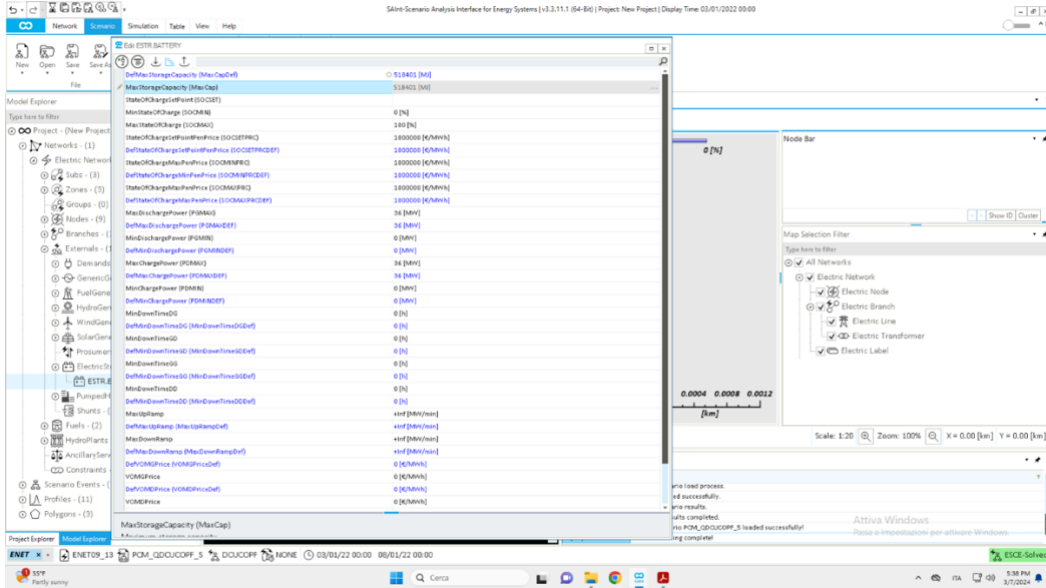


Figura 7 – Screenshot dell'interfaccia software Saint che esemplifica la modellazione di una batteria in una settimana generica.

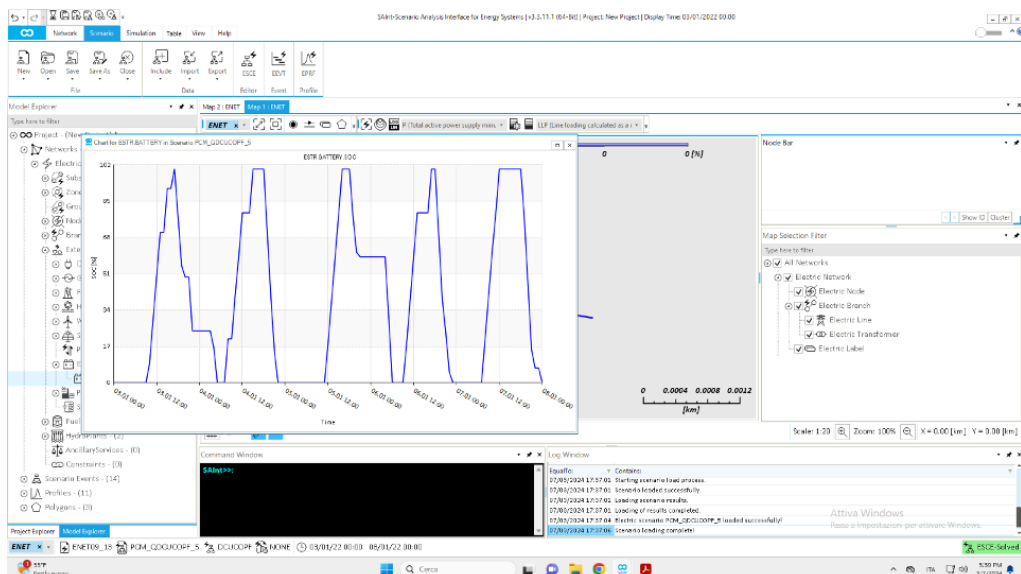


Figura 8 – Screenshot dell'interfaccia software Saint che esemplifica il processo di carica e scarica di una batteria

- 6) Un primo run del modello Saint, rappresentativo dello scenario Net-zero descritto dal TIMES-Italia, evidenzia un funzionamento degli accumuli, in termini carica e scarica, in linea con le aspettative (Figura 8).
- 7) Un secondo run del modello, relativo a una settimana nella quale la produzione eolica è relativamente costante su livelli elevati nei primi cinque giorni, ma scende poi a valori molto ridotti negli ultimi due giorni, evidenzia come la batteria intervenga a coprire la produzione eolica mancante, utilizzando l'energia elettrica preventivamente stoccata, insieme ad un impianto a ciclo

combinato con CCS, a indicare che evidentemente in questo scenario la capacità installata degli accumuli non è sufficiente .

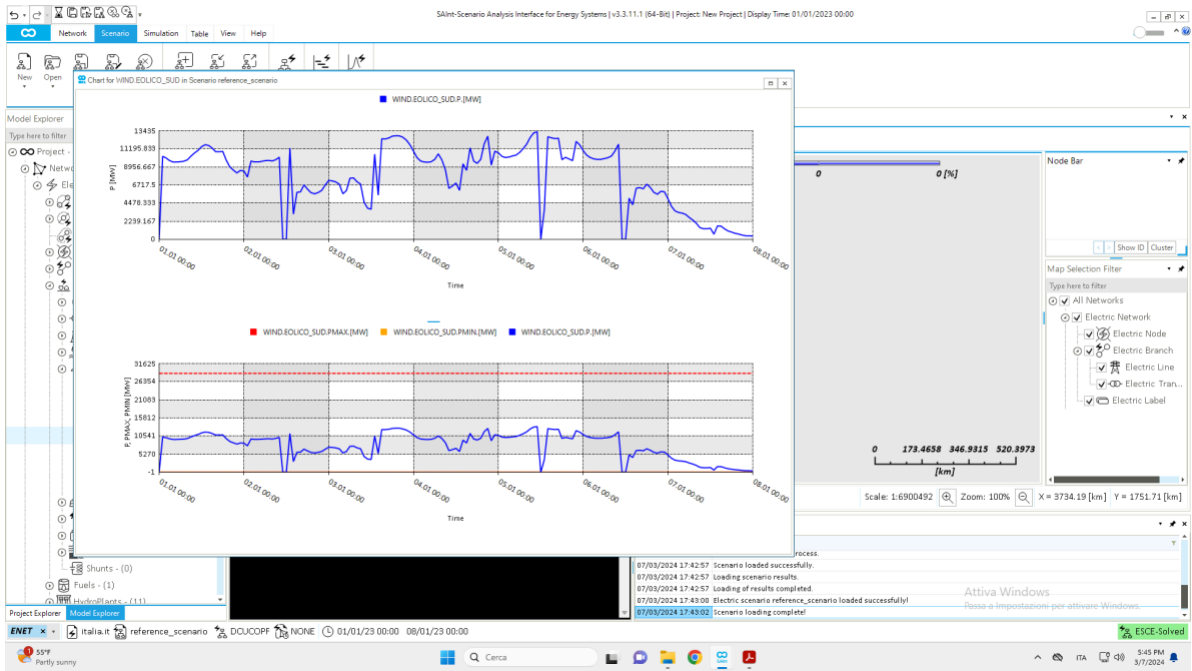


Figura 9 – Screenshot dell’interfaccia software Saint che esemplifica la produzione settimanale di energia eolica.

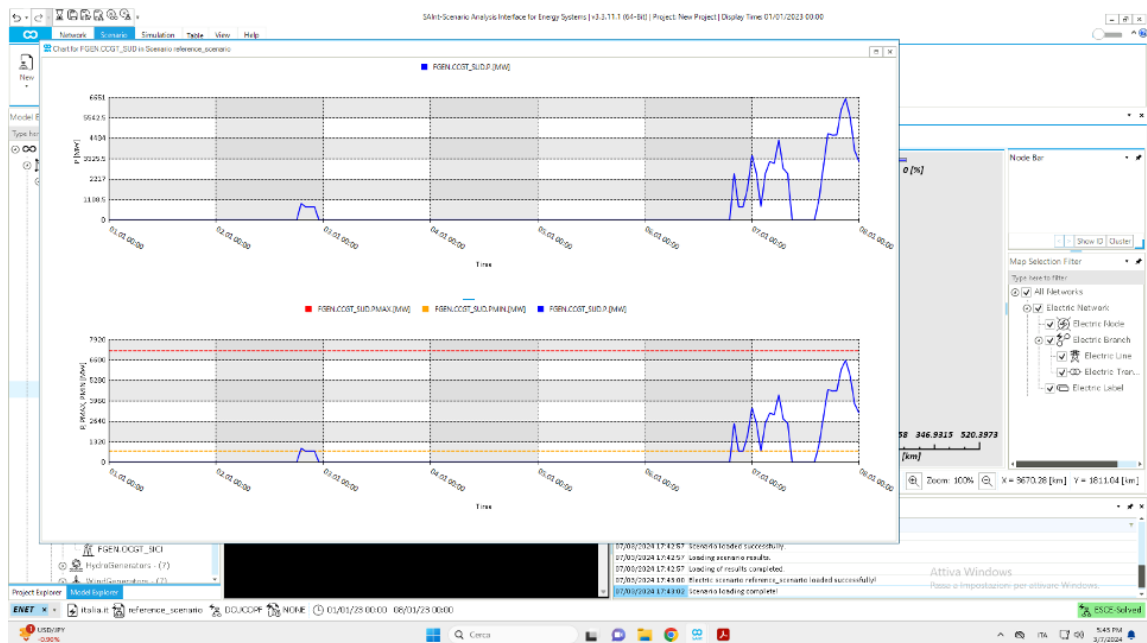


Figura 10 – Profilo di funzionamento della batteria come output di Saint.

2.3 Caratterizzazione delle principali tecnologie energetiche di accumulo

Le principali tecnologie energetiche che sono inserite negli scenari di penetrazione delle tecnologie di accumulo nel sistema elettrico nazionale sviluppati nella L3.5 (M18 – M36) saranno caratterizzati dal punto

di vista energetico ed anche in relazione alle emissioni di gas serra (carbon footprint) mediante l'analisi ambientale del ciclo di vita – Environmental Life Cycle Assessment (E-LCA). In questa prima fase di progetto, le principali tecnologie di accumulo sono state caratterizzate sulla base di dati di letteratura.

I sistemi di accumulo di energia offrono un approccio versatile per il miglioramento dell'affidabilità della rete elettrica nazionale. Se il sistema di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica può essere visto come l'infrastruttura responsabile dello spostamento dell'energia su lunghe distanze, la funzione principale dei sistemi di accumulo energetico (elettrico) è legata alla variabile tempo: un sistema di accumulo di energia elettrica è preposto a fornire all'utilizzatore l'energia quando necessaria. Le possibili declinazioni di tale generale funzione sono molteplici e vanno dal supporto alla produzione dell'energia rinnovabile – e dal deferimento del suo utilizzo – alla qualità ed affidabilità del sistema elettrico.

Le tecnologie di accumulo per applicazioni di larga scala possono essere classificate in quattro categorie: meccanica, elettrica, chimica ed elettrochimica (Dunn, Kamath and Tarascon Science, 2011). L'idroelettrico da pompaggio è a tutt'oggi ancora la tecnologia più utilizzata per l'accumulo di energia elettrica nella circostanza di eccedenze di produzione: nel 2011 a livello mondiale il 99% della capacità di accumulo, circa 127 GW di potenza, era appannaggio di tale tecnologia, mentre alla tecnologia CAES (compressed air energy storage), la seconda per capacità installata, competevano 0.44 GW. Ancora oggi la capacità installata di idroelettrico da pompaggio è preponderante rispetto ad altre tecnologie d'accumulo, sebbene negli anni abbia ceduto qualche punto percentuale. Infatti, al 2016 essa era diminuita al 96.2% (Gur, 2018), a dimostrazione della rapida crescita di tecnologie d'accumulo emergenti. Un limite dell'idroelettrico da pompaggio è la sua scarsa versatilità rispetto alle diverse funzioni necessarie alla rete elettrica. Le potenziali applicazioni dei sistemi di accumulo energetico spaziano dalla regolazione di frequenza ed inseguimento del carico, per le quali sono necessari tempi di risposta brevi, allo smorzamento dei picchi di domanda e differimento del carico, a cui corrispondono miglioramenti di stabilità ed affidabilità della rete. La Fig. 11 mostra come alle diverse tecnologie d'accumulo possano competere diverse funzioni ed applicazioni di rete. Ciò è il risultato delle caratteristiche intrinseche delle tecnologie d'accumulo, specialmente in termini di potenza e tempo di scarica. Inoltre, la Fig. 11 evidenzia come l'idroelettrico da pompaggio sia impiegabile essenzialmente per la gestione di potenza su larga scala, a cui competono lunghi tempi di scarica e non necessita di tempi rapidi di risposta.

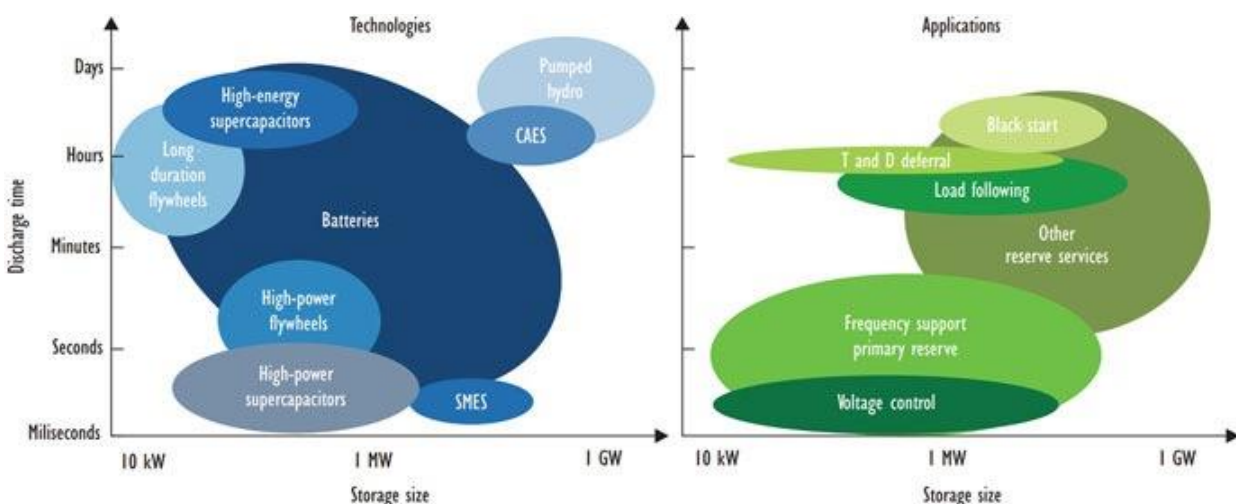


Figura 11 - Confronto tra diverse tecnologie d'accumulo in base alla potenza ed al tempo di scarica (sinistra). Potenziali applicazione nel sistema elettrico in base alla potenza ed al tempo di scarica (destra). (IEA (2022f) "Steering Electricity Markets Towards a Rapid Decarbonisation" OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/d2f0068c-en>)

In generale, l'accumulo d'energia per via elettrochimica possiede un numero elevato di caratteristiche che corrispondono alle esigenze di molteplici funzioni e servizi di rete (inseguimento del carico, riserva primaria, stabilità di rete, etc.). Tra tali caratteristiche vanno incluse un'elevata efficienza di *round-trip*, flessibilità di potenza ed energia, numero di cicli elevato, limitata manutenzione, etc. Inoltre, le batterie rappresentano un'eccellente tecnologia di accumulo energetico per l'integrazione alla rete ed il supporto per la produzione di energia da fonti rinnovabili. Esse occupano volumi limitati, il che le rende idonee ad un sistema distribuito di produzione di energia, come in parte sarà quello del fotovoltaico. In aggiunta possono provvedere al controllo della frequenza e ad alleviare le naturali variazioni di produzione in uscita dagli impianti di produzione sia di fotovoltaico che di eolico. In Fig. 2 è rappresentato il confronto per gli anni 2011 e 2014 della capacità globale installata per l'accumulo meccanico ed elettrochimico. Oltre ad evidenziare una crescita di quasi il 100% in tre anni, la Fig. 12 evidenzia anche la suddivisione della capacità installata rispetto alle varie tecnologie d'accumulo energetico.

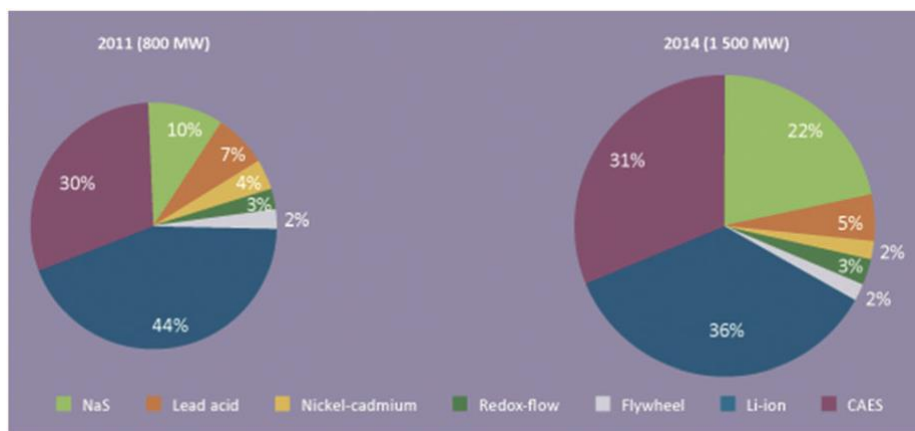


Figura 12 – Confronto tra la capacità installata di tecnologie di accumulo elettrochimico e meccanico (escluso idroelettrico da pompaggio) riferito alle annualità 2011 e 2014 (CAES: compressed air energy storage) Gur (2018).

I vari sistemi di accumulo di energia elettrico rappresentano la tecnologia abilitante di maggior rilievo per una diffusione vasta e capillare, entro la metà del secolo, delle fonti di energia rinnovabile, le quali per la loro natura di fonti intermittenti necessitano di tecnologie di supporto alla produzione. Ciò non solo consente di sopperire alla mancanza di produzione nei periodi di scarsità della fonte rinnovabile, ma permette anche di evitare il *curtailment* nei periodi di surplus di produzione. Infatti, Bloomberg Technology News riporta nel luglio del 2017 che, durante il 2015, la Germania ha buttato via il 4% della produzione di energia eolica e la Cina ha inutilizzato il 17% del complessivo di energia rinnovabile prodotta. In California, nella prima metà del 2017, 0.3 GWh di energia solare ed eolica sono stati scaricati per insufficiente capacità di accumulo energetico. La possibilità di dislocare accumulo di energia elettrica in maniera non centralizzata offre anche la possibilità di creare micro-reti locali, che aumentano la sicurezza energetica sulla rete elettrica. Le caratteristiche richieste ai sistemi di accumulo sono molteplici e dipendono fortemente dalla applicazione, ciò non consente ad una singola tecnologia di possedere le caratteristiche necessarie per ogni applicazione. Ogni tecnologia di accumulo offre, perciò, caratteristiche idonee ad alcune tra le varie funzioni di rete. In dipendenza dal volume della batteria, il sistema d'accumulo può fornire energia su scale temporali che vanno da pochi secondi a diversi giorni, in un ampio range di potenza.

Batterie dedicate a servizi di rete sono collegate direttamente al sistema di trasmissione o di distribuzione. In tal caso i sistemi d'accumulo possono fornire contemporaneamente servizi di bilanciamento tra domanda e fornitura di energia elettrica e servizi di flessibilità, quali il controllo della frequenza sulla rete elettrica. Altri servizi ausiliari forniti da batterie sono il supporto al ripristino della fornitura elettrica dopo un blackout e la distribuzione di riserve di carica lungo la linea di trasmissione e/o distribuzione, le quali possono ridurre

costosi investimenti di potenziamento della rete di trasmissione e/o distribuzione in punti della rete particolarmente congestionati. Tali caratteristiche derivano dalla modularità e scalabilità dei sistemi di accumulo elettrochimico e hanno rappresentato un fattore di crescita della capacità installata a livello globale. Rispetto alla Fig. 12, si fa notare che negli ultimi dieci anni la capacità totale per le batterie è aumentata di 27 volte, passando da circa 1 GW a 27 GW (in Fig. 12, nel 2014 il 67% circa di 1.5 GW è da attribuire all'accumulo elettrochimico). Si prevede che un ulteriore fattore di crescita nell'utilizzo di sistemi d'accumulo sarà l'elettificazione di altre utenze, quali il riscaldamento, i veicoli elettrici e vari processi industriali. Questi *end-user* incrementeranno non solo la domanda di energia elettrica, ma anche la sua variabilità temporale, tanto giornaliera quanto stagionale.

Come si evince dalla Figura 11, le diverse tecnologie di accumulo elettrochimico coprono diverse funzioni del settore elettrico, che rientrano tra le caratteristiche del *power system* simulate dagli scenari prodotti in Saint. Il loro utilizzo ha, quindi, un diretto impatto sulla flessibilità del sistema, adeguatezza ed espansione del mercato, etc. Tecnologie di accumulo meccanico, tipo CAES e pumped-hydro, ma anche elettrochimico, quali ad esempio le batterie a flusso, grazie al loro disaccoppiamento tra capacità e potenza, si pongono su periodi temporali di stagionalità e di lungo periodo. Ciò, unitamente all'espansione del mercato ed alla prevedibile crescita della capacità di accumulo installata negli anni, sono fattori che rientrano nei modelli simulati con TIMES ed all'interfaccia tra i due software di simulazione. I risultati dei modelli e degli scenari proposti danno evidenza del ruolo svolto dall'accumulo energetico in termini di sicurezza energetica, adeguatezza e robustezza del sistema energetico.

Un confronto tra l'adeguatezza delle tecnologie d'accumulo energetico e le diverse applicazioni di rete è presentato in Tabella 1.

Tabella 1 **Applicazione**

	Renewable Energy Integration		Bulk Energy		Ancillary Services			Energy Management	
	Time shifting	Firming capacity	Peak shaving	Arbitrage of energy	Voltage support	Load balancing	Frequency balancing	Power quality	Power reliability
<i>NaS</i>	Yellow	Red	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green
<i>NaNiCl₂</i>	Red	Red	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green
<i>Pb-acid</i>	Yellow	Yellow	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green
<i>Li-ion</i>	Green	Green	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Green	Green	Green
<i>NiCd</i>	Yellow	Yellow	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Yellow
<i>NiMH</i>	Yellow	Yellow	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Yellow
<i>VRFB</i>	Green	Green	Yellow	Red	Yellow	Green	Green	Yellow	Yellow
<i>Superc.</i>	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green	Yellow
<i>CAES</i>	Green	Green	Yellow	Yellow	Red	Yellow	Yellow	Red	Yellow
<i>Pumped Hydro</i>	Green	Green	Green	Green	Red	Yellow	Yellow	Red	Red

dove le caselle in verde indicano che la tecnologia è appropriata, le caselle in giallo che l'applicazione della tecnologia è possibile in qualche misura e le caselle rosse che la tecnologia è inappropriata alla funzione. Dalla Tabella 1 si osserva che l'accumulo elettrochimico è in generale poco appropriato o del tutto inadeguato per applicazioni di integrazione di energie rinnovabili e per servizi di bulk, mentre è adeguato a funzioni ausiliarie e di *energy management*. Vanno, però, notate due eccezioni: le batterie a flusso (VRFB) e quelle agli ioni di litio si prestano bene come supporto all'integrazione di fonti rinnovabili. Per quanto riguarda i supercapacitors, questi al momento sono atti alle sole funzioni di *energy management*. L'accumulo di tipo

meccanico (CAES e pumped hydro), invece, poco di presta a funzioni ausiliarie e di *energy management*, mentre è particolarmente idoneo per servizi di *renewable energy integration* e *bulk energy*.

Come è possibile notare dalla Fig. 12, nel 2014 il settore delle batterie era largamente basato sulle tecnologie agli ioni litio e ciò non è sostanzialmente cambiato negli ultimi dieci anni. L'accumulo elettrochimico agli ioni di litio si può suddividere in base alla composizione chimica del catodo. Alle diverse composizioni corrispondono caratteristiche energetiche diverse, che rendono la tecnologia più o meno adatta a svolgere alcune delle precedenti funzioni per la rete elettrica. Le tecnologie più comuni sono:

- Ossido di cobalto-litio: **LCO**
- Ossido di manganese-litio: **LMO**
- Litio-ferro-fosfato: **LFP**
- Ossido di nichel-cobalto-alluminio-litio: **NCA**
- Ossido di nichel-manganese-cobalto-litio: **NMC**

Le caratteristiche principali vengono riassunte nella Tabella 2.

Tabella 2: confronto chimiche del catodo di diverse tecnologie a ioni di litio

Chimica del catodo	Densità d'energia (Wh/Kg)	Vita utile (cicli)	Criticità materiali	Idoneità per applicazioni stazionarie
LCO	150-190	500-1000	Alta	Scarsa
LMO	100-140	1000-1500	Media	Scarsa/Moderata
LFP	90-140	>2000	Media	Adeguata
NCA	200-250	1000-1500	Alta	Moderata
NMC	140-200	1000-2000	Alta	Moderata/Adeguata

Attualmente la chimica più promettente per applicazioni di larga scala sembra essere la LFP. In ragione della loro maggiore sicurezza, economicità ed elevato numero di cicli, le batterie LFP sembrano attualmente destinate a dominare il mercato del *utility-scale storage*, quantomeno in una prima fase di espansione del mercato dell'accumulo elettrico stazionario. Il resto della domanda, specialmente per accumulo energetico domestico, sarà, con grossa probabilità, a beneficio di chimiche di tipo NMC 111 e NMC 532 che, a fronte di un costo più elevato, garantiscono una maggiore densità d'energia, quindi volumi ridotti. Sviluppi futuri porteranno a batterie agli ioni litio allo stato solido (generazione 4a) e a rimpiazzare l'anodo di grafite con un anodo di litio metallico (generazione 4b). In questo scenario, si prevede un miglioramento delle caratteristiche per diverse tipologie di batterie agli ioni di litio (Tian et al., *Chemical Reviews* **2021** 121 (3), 1623-1669):

Tabella 3: Confronto tra Li-ion battery attuali e Gen 4b

	Densità d'energia (Wh/Kg)	
	Li-ion con anodo grafite	Allo stato solido con anodo in Li metallo
NCA	260	410
NCM-622	245	370
NCM-333	215	313
LMO	162	212
LFP	174	246

Sebbene gli obiettivi di performance per le generazioni successive delle batterie agli ioni litio siano fissati principalmente per il settore della mobilità, anche per applicazioni stazionarie si prevede un incremento delle performance, i cui KPIs possono essere così riportati (Passerini et al., 2024): densità energetica superiore a

500 Wh/litro, vita utile maggiore di 6000 cicli (oltre 10000 per applicazioni *utility-scale*) e costo inferiore a 75 €/kWh. Importante è valutare e confrontare le caratteristiche di una più ampia gamma di tecnologie di accumulo elettrochimico. Tra i KPIs individuati si annoverano l'efficienza, la densità energetica e di potenza, il costo, la vita utile e l'autoscarica. Riadattando i dati pubblicati in Šimić Z et al. (2021) e Kebede AA et al., (2022) in Tabella 4 vengono presentati i risultati per le tecnologie d'accumulo elettrochimico, elettrico (supercapacitors) e meccanico (CAES e idroelettrico da pompaggio).

Tabella 4: confronto KPIs di tecnologie d'accumulo elettrochimico e meccanico

Sistema d'accumulo	Densità d'energia (Wh/Kg)	Densità di potenza (W/Kg)	Costo (€/kWh)	Vita utile (anni)	Efficienza (%)	Autoscarica (%)
Pb-acid	25-50	74-415	40-170	2-15	63-90	0.033-0.3
Li-ion	80-250	185-370	500-2100	5-15	75-97	0.036-0.33
NiCd	30-80	80-300	800-1500	10-20	60-90	0.067-0.6
NiMH	40-110	200-300	170-640	2-15	50-80	0-0.83
NaNiCl₂	100-120	150-200	100-345	10-14	85-90	15
NaS	150-240	90-230	250-420	10-15	75-90	0.05-20
VRFB	10-35	80-150	150-1000	5-15	70-85	<0.2
Supercapacitor	2.5-15	500-10000	300-2000	20	95-98	20-40
Pumped Hydro	0.5-2	0.5-1.5	5-217	50-150	75-85*	-
CAES	0.4-20	0.5-10	2-217	30-50	70-89*	-

* ottenuto da Das et al. (2018).

Per una corretta valutazione delle tecnologie analizzate, oltre alle caratteristiche tecnico-energetiche va inserito tra i KPIs un indicatore di tipo ambientale. A tal fine, sulla base di una revisione della letteratura scientifica, si è proceduto ad uno screening delle performance ambientali delle diverse tecnologie d'accumulo energetico, basata sull'analisi di ciclo di vita (Tabella 5). Inoltre, sono stati raccolti dati di carbon footprint da diversi studi. Va precisato che per un rigoroso confronto di tali risultati andrebbe effettuata un'armonizzazione dei dati, intesa ad uniformare i risultati in maniera indipendente dalle diverse scelte metodologiche e di modello. Tale step di armonizzazione non è stato effettuato e sarà oggetto di successive analisi.

Tabella 5: Impatti ambientali e Carbon Footprint delle tecnologie d'accumulo energetico

Tecnologie d'accumulo	Impatto ambientale	Carbon Footprint (CO ₂ eq/kWh _d)
NaS	Alto	0.65
NaNiCl₂	Medio/Basso	0.61
Pb-acid	Alto	0.8
Li-ion	Medio/Basso	0.6
VRFB	Medio/Basso	0.1
CAES	Medio/Basso	0.78
Pumped Hydro	Alto/Medio	0.65

Effettuando un focus sulle batterie agli ioni di litio, si riporta la Carbon Footprint per la sintesi delle diverse tipologie di chimiche del catodo (Passerini et al., 2024):

Tabella 6: Carbon Footprint produzione batterie a ioni litio per tipologia del catodo

<i>Chimica del catodo</i>	Carbon Footprint (CO ₂ eq/kWh)
LCO	72.2
NCA	27.4
NMC	32.2
LMO	5.0
LFP	5.1

Si vuole precisare che in Tabella 5 le emissioni di CO₂eq sono rapportate rispetto al kWh *delivered*, ovvero la carbon footprint dell'intero ciclo di vita è riportata rispetto al totale dell'energia gestita (accumulata e scaricata) dal sistema. Al contrario, in Tabella 6 le emissioni di CO₂eq sono riferite alla taglia del sistema d'accumulo, ovvero sono normalizzate rispetto alla capacità del sistema d'accumulo.

2.3.1 Metodologia per la caratterizzazione degli impatti ambientali con analisi del ciclo di vita

Inoltre, è stata definita la metodologia per la caratterizzazione più dettagliata mediante analisi E-LCA, che sarà finalizzata nella seconda metà del progetto (M36). L'approccio E-LCA si pone come obiettivo quello di analizzare, in modo quantitativo, gli impatti ambientali di prodotti, servizi e tecnologie, considerando tutte le fasi del ciclo di vita (estrazione delle materie prime, produzione, uso, distribuzione e fine vita). L'analisi della totalità delle fasi del ciclo di vita è uno dei principi fondanti di questa metodologia che mira ad evitare lo spostamento degli impatti ambientali da una fase all'altra, piuttosto che la loro riduzione, e viene ritenuto uno strumento chiave per perseguire una produzione sostenibile e modelli di consumo che sono sempre più integrati nel processo decisionale, o nelle fasi di progettazione delle strategie politiche e valutazione dei relativi impatti, oppure direttamente nei documenti legislativi.

E-LCA fornisce una metodologia standardizzata per valutare gli impatti ambientali di diversi prodotti o processi, consentendo confronti secondo criteri quantitativi. L'International Reference Life Cycle Data System (ILCD) è un'iniziativa sviluppata dal JRC e dalla DG ENV nel 2005, con l'obiettivo di fornire orientamenti e standard per una maggiore coerenza e garanzia di qualità nell'applicazione dell'E-LCA. In particolare, l'ILCD Handbook comprende un guida generale sull'E-LCA, un quadro di riferimento per i requisiti da rispettare e un'analisi di fondo dei sistemi di Impact Assessment, a cui bisogna attenersi per effettuare un'analisi esaustiva, affidabile e ripetibile. Le pubblicazioni ILCD sono state stabilite attraverso una serie di ampie consultazioni pubbliche e delle parti interessate. Tale manuale comprende una serie di pubblicazioni in linea con gli standard internazionali sull'E-LCA, che sono le norme ISO 14040/44. La serie ISO 14040 disciplina il quadro generale circa le pratiche, le applicazioni e le limitazioni dell'E-LCA e descrive attraverso una procedura step-by-step i requisiti e le linee guida per la preparazione, la gestione e la revisione critica di un'analisi E-LCA. Secondo questi standard, la metodologia E-LCA comprende quattro fasi principali: (1) definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dell'analisi, (2) analisi di inventario con la compilazione di un inventario degli input e degli output del/dei sistema in esame, (3) analisi degli impatti e infine (4) interpretazione dei risultati, come esemplificato in Figura 13.

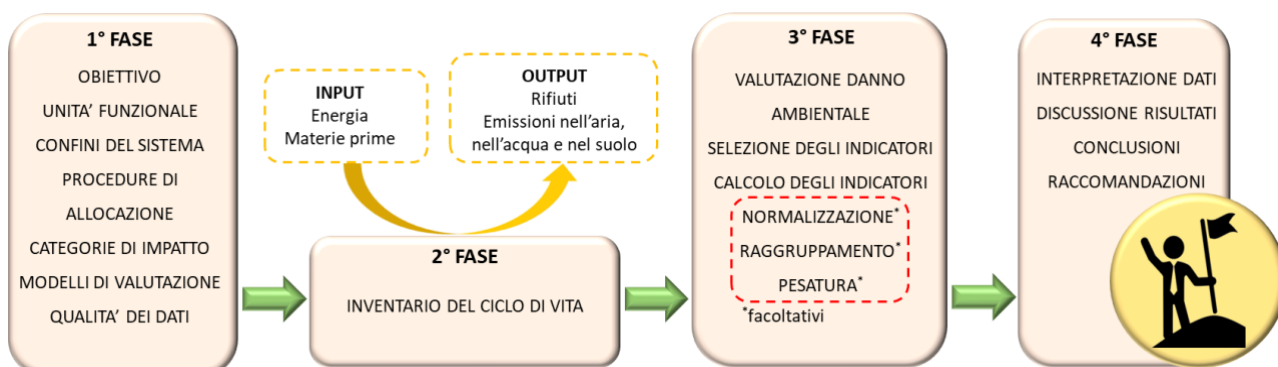


Figura 13 - Rappresentazione delle quattro fasi principali dell'E-LCA.

Nello specifico, la prima fase consiste nella definizione degli obiettivi e dell'oggetto dello studio, e dei confini del sistema. Affinché lo studio sia compatibile con l'obiettivo prefissato, la definizione del campo di applicazione che descrive il sistema deve essere fatta con estrema cura. Le principali scelte metodologiche vengono effettuate in questa fase: l'esatta definizione dell'unità funzionale, l'identificazione dei confini del sistema, l'identificazione delle procedure di allocazione, le categorie di impatto studiate, i modelli di valutazione dell'impatto del ciclo di vita (LCIA) utilizzati e l'identificazione dei requisiti di qualità dei dati.

La seconda fase, fulcro dell'analisi E-LCA, prevede la raccolta dei dati e la procedura di calcolo per quantificare gli input (consumo di energia e materie prime) e gli output (rifiuti, emissioni nell'aria, acqua o suolo) del sistema studiato. Un metodo di valutazione semplice consiste nell'effettuare un bilancio di massa e di energia per ogni processo, tenendo conto del fatto che l'ammontare degli input deve essere pari al rilascio degli output. Uno degli aspetti più critici di questa fase è la qualità dei dati di input, che devono essere verificati per garantire l'affidabilità e il corretto utilizzo. Inoltre, è necessario descriverli dettagliatamente per poter successivamente effettuare confronti fra studi su sistemi analoghi.

La raccolta di informazioni deve rispondere, quindi, a criteri di completezza, precisione, rappresentatività, coerenza e riproducibilità. Il procedimento per condurre un'analisi di E-LCA è iterativo: man mano che i dati vengono raccolti, i confini iniziali del sistema potrebbero essere revisionati in accordo con i criteri stabiliti nel campo di applicazione. Lo studio E-LCA è un processo iterativo che prevede una continua revisione della domanda a cui vogliamo rispondere e di come intendiamo rispondere a questa domanda, cosa che implica la raffinazione dell'inventario e l'identificazione di criticità (hot spot analysis) che possono richiedere un approfondimento di alcune fasi del processo.

Per completare l'inventario, si può decidere di adottare un approccio attributivo o un approccio consequenziale. Il primo permette di rispondere alla domanda "quali sono gli impatti ambientali associati all'insieme di attività che contribuiscono alle fasi di produzione, trasporto, consumo e smaltimento del prodotto/servizio/processo oggetto dello studio", mentre l'approccio consequenziale "quali sono gli impatti ambientali di tutte quelle attività che ci aspetta possano essere impattate dalle fasi di produzione, trasporto, consumo e smaltimento del prodotto/servizio/processo oggetto dello studio (per es. variazioni di domanda di beni o servizi in competizione che svolgono la stessa funzione), e si procede modellando le proiezioni di come il sistema e i sistemi associati si svilupperanno in modo consequenziale.

Il modello di ciclo di vita consequenziale non rappresenta la reale filiera produttiva, ma una sua proiezione futura sulla base dei meccanismi di mercato, e le interazioni politiche e cambiamenti di comportamento dei consumatori da cui potrebbe potenzialmente essere impattata. L'inventario del ciclo di vita è la fase più lunga e delicata dello studio E-LCA in quanto implica una ricostruzione dettagliata degli scambi di materia ed energia tra il sistema in primo piano (il sistema in analisi), la tecnosfera (il resto dell'economia, che fornisce input e smaltisce i residui) e l'ambiente. Nel contesto di questa attività applicheremo un approccio attributivo, di filiera.

Lo scopo della terza fase è quello di valutare i potenziali impatti ambientali del sistema ossia di associare quantitativamente tutti i consumi delle risorse e i rilasci ambientali a determinate categorie d'impatto (eutrofizzazione delle acque, formazione di smog fotochimico, impoverimento dell'ozono stratosferico, ecc.) che saranno successivamente stimate assegnando loro un peso fino a giungere alla determinazione

dell'indicatore ambientale finale, somma degli indicatori delle singole categorie d'impatto. La selezione delle categorie di impatto e dei relativi modelli di caratterizzazione (cioè, i modelli che devono raggruppare e pesare opportunamente i flussi elementari in un unico indicatore che misuri l'impatto ambientale su quella determinata categoria ambientale) è una fase importante dell'E-LCA. Nell'identificazione delle categorie d'impatto rilevanti, gli analisti devono considerare la coerenza con la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione. In questa analisi verranno presi in considerazione due categorie d'impatto:

- 1) Cambiamento climatico (categoria), kg CO₂eq (unità di misura), GWP100 (indicatore): Potenziale di surriscaldamento globale totale nell'orizzonte temporale di 100 anni. Metodo raccomandato da ILCD.
- 2) Uso delle risorse, vettori energetici (categoria), MJ (unità di misura): Impoverimento delle risorse abiotiche in termini di combustibili fossili.

3 Prodotti attesi

Lista dei prodotti hardware/software eventualmente attesi per la LA:

- Acquisizione del Software per la modellazione delle reti elettriche e dei mercati energetici ed elettrici integrati.
- Sviluppo della metodologia di soft link tra il modello di dispacciamento e il modello dell'intero sistema energetico nazionale, considerando anche interconnettività e scambi con altri stati confinanti.

4 Prodotti sviluppati

Lista dei prodotti hardware/software eventualmente sviluppati nella LA:

- Acquisizione della licenza Software SAint v3.2 (Scenario Analysis Interface for Energy Systems, <https://www.encoord.com/solutions/saint>) e partecipazione di un corso intensivo di formazione sulle funzionalità del software.
- Collegamento tra il modello del sistema energetico e il modello di dispacciamento.
- Rinnovo della licenza Software di LCA for Experts (ex GaBi) e acquisizione dei DB aggiornati Ecoinvent 9.1 ed extension DBs per la modellazione dettagliata dei bilanci di massa ed energia delle tecnologie energetiche di accumulo al fine di quantificare le emissioni di gas serra (carbon footprint) ad esse associate.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non sono evidenziati scostamenti tecnici/economici rispetto al preventivo e alle potenziali criticità sollevate nel piano di rischi presentato.

6 Sintesi delle attività svolte

Durante i primi 18 mesi del progetto (gennaio 2022- giugno 2023) sono stati raggiunti i risultati attesi della linea di attività 3.4, prevista per M18, che prevedeva la definizione dell'approccio metodologico multi-modello per la valutazione del potenziale tecnico-economico e degli impatti ambientali delle tecnologie di accumulo nel sistema elettrico nazionale con la presentazione dei primi scenari dimostrativi e dei risultati preliminari sugli output che si possono ottenere dal soft link TIMES Italia – SAint, focalizzandosi, in questa prima fase, su orizzonti temporali limitati per la validazione del modello (una settimana). La metodologia è stata esplicitata in questo deliverable ed è basata sull'integrazione fra modello del sistema energetico e modello di dispacciamento, mentre per quanto riguarda la valutazione degli impatti ambientali relativi alle principali tecnologie di accumulo inserite negli scenari, segue le recenti raccomandazioni delle istituzioni internazionali, principalmente ISO e ILCD/PEF per la valutazione LCA ambientale. Inoltre è stata fornita una prima caratterizzazione delle tecnologie di accumulo identificate quali più promettenti sulla base della maturazione tecnologica e vicinanza al mercato.

L'attività del primo anno ha anche visto la realizzazione della infrastruttura software (PC, licenze dei modelli utilizzati, competenze e databases) necessaria alle elaborazioni che avverranno negli anni successivi (LA 3.5 M18 – M36), seguendo l'approccio definito in questa linea di attività.

In particolare, si è concluso l'acquisto della licenza e la formazione specifica per l'approfondimento delle funzionalità del software SAint (Encoord), un modello di ottimizzazione del mercato elettrico, che permette elaborazioni customizzate dell'operazione della rete elettrica indispensabili per la comprensione della disponibilità di elettricità green e della potenziale operabilità delle tecnologie di accumulo.

Si è approfondita inoltre l'applicazione del software Gabi (ora denominato LCA for Experts). Gabi è un software commerciale utilizzato per l'analisi del ciclo di vita, che è stato completato con l'acquisto di ulteriori databases necessari specificatamente per le tecnologie di accumulo inseriti negli scenari del futuro sistema elettrico ed energetico nazionale.

Si è infine provveduto a definire le azioni necessarie all'elaborazione degli scenari energetici del modello TIMES e sono stati forniti alcuni prodotti preliminari costruiti con l'applicazione del software Saint.

6.1 Conclusioni

Scopo della LA 3.4 del Progetto Integrato Tecnologie di accumulo elettrochimico, che trova compimento nella LA 3.5 è quello di esplorare e valutare scenari aventi livelli crescenti di elettrificazione dei consumi finali e livelli crescenti di penetrazione delle fonti rinnovabili intermittenti nel sistema elettrico nazionale. Per ciascuno scenario sarà poi valutata la potenziale penetrazione di diverse tecnologie di accumulo nel sistema elettrico. Un aspetto fondamentale per la valutazione delle tecnologie di accumulo consiste nella comprensione del bilanciamento tra la domanda e l'offerta di elettricità nelle diverse zone del mercato elettrico nazionale e la loro interazione con l'intero sistema energetico, considerando anche interconnettività e scambi con altri stati confinanti. Infatti, la potenziale penetrazione delle tecnologie di accumulo è legata alle fonti energetiche che saranno in gioco, e agli usi finali.

A tal fine viene utilizzato un modello dell'intero sistema energetico italiano, TIMES-Italy. Il modello descrive l'evoluzione ottimale del sistema energetico, identificando, per ogni periodo dell'orizzonte temporale dell'analisi, la configurazione di minimo costo del sistema conseguente all'ampio insieme di ipotesi e vincoli alla base di ogni scenario. Ogni equilibrio prodotto dal modello TIMES rappresenta il mix ottimale di tutte le tecnologie, i combustibili, le infrastrutture e i flussi commerciali che compongono il sistema energetico sotto esame, sulla base delle loro (presenti e future) caratteristiche tecnico-economiche.

Scopo delle attività sarà raffinare la descrizione delle tecnologie di accumulo nel TIMES – Italy ed elaborare scenari aggiuntivi mirati alla valutazione specifica del contributo potenziale delle stesse alla decarbonizzazione, ma soprattutto verificare la fattibilità degli scenari elaborati in termini di coincidenza oraria tra generazione di energia elettrica rinnovabile e operazione delle tecnologie di accumulo.

Infine, partendo da quello qui rappresentato sulla base di dati di letteratura, verranno caratterizzate le tecnologie inserite negli scenari, in modo tale da consentire l'elaborazione di bilanci di massa ed energia per l'intera filiera. In questo report è riportata la descrizione dell'approccio metodologico al fine di identificare le soluzioni più sostenibili dal punto di vista ambientale e le migliori applicazioni delle tecnologie di accumulo proposte. La metodologia scelta è quella dell'analisi dell'intero ciclo di vita E-LCA, con l'obiettivo di evitare lo spostamento degli impatti ambientali da una categoria d'impatto ad un'altra, o tra fasi del ciclo di vita (migliorando ad esempio le emissioni durante la produzione di un apparato, ma peggiorando gli impatti a fine vita legati allo smaltimento).

Al fine di adottare un approccio di eco-design, che consiste nella valutazione delle opzioni disponibili al fine di identificare il design migliore di una tecnologia, verrà eseguita un'analisi di sensitività sui parametri che influenzano maggiormente i risultati, con un approccio di tipo attribuzionale (in cui si modella una unità funzionale, ad esempio un impianto di 1 MW, o un kWh di energia).

7 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Nessuna consulenza è stata utilizzata all'interno di questa LA.

8 Pubblicazioni scientifiche

Le attività qui descritte pongono le basi a quelle della LA 3.5, la quale prevede che dopo aver definito e implementato la metodologia di analisi (descritta in questa relazione come risultato della LA 3.4) basata sull'integrazione fra modello del sistema energetico e modello di dispacciamento, verranno elaborati diversi scenari di decarbonizzazione del sistema energetico italiano, caratterizzati da diversi livelli di sviluppo delle diverse opzioni tecnologiche e quindi diverse configurazioni del sistema elettrico futuro. Gli scenari verranno quindi implementati nel modello del dispacciamento per testare la metodologia di valutazione delle diverse tecnologie di accumulo. La descrizione delle tecnologie di accumulo prese in considerazione verrà ulteriormente perfezionata e verranno valutate le performance ambientali con approccio E-LCA come descritto nel capitolo 2.3. Si prevede che i risultati verranno inseriti in una pubblicazione ISI prevista a M36, sugli scenari di penetrazione delle tecnologie di accumulo nel sistema elettrico italiano e dei relativi impatti ambientali.

9 Riferimenti bibliografici

- Das CK, Bassa O, Kothapallia G, Mahmoudb TS, Habibi D, *Renew Sust Energ Rev*, **2018**, 91, 1205–1230
- da Silva Lima L, Quartier M, Buchmayr A, Sanjuan-Delmas D, Laget H, Corbisier D, Mertens J, Dewulf J, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **2021**, 46, 101286
- Dunn, Kamath and Tarascon *Science*, **2011**, 334, 928–935
- Gur *Energy Environ. Sci.*, **2018**, 11, 2696–2767
- IEA (2022f) “Steering Electricity Markets Towards a Rapid Decarbonisation” OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/d2f0068c-en>
- Oliveira L, Messagie M, Mertens J, Laget H, Coosemans T, Van Mierlo J, *Energy Conversion and Management*, **2015**, 101 326–335
- Passerini, Barelli, Baumann, Peters and Weil *eds*, **2024** “Emerging Battery Technologies to Boost the Clean Energy Transition” Springer International Publishing, ISBN 978-3-031-48358-5, <https://doi.org/10.1007/978-3-031-48359-2>
- Šimić Z, Topić D, Knežević G, Pelin D, *Int J Electr Comput Eng Syst*, **2021**, 12:53–65
- Kebede AA, Kalogiannis T, Van Mierlo J, Berecibar M, *Renew Sust Energ Rev*, **2022**, 159:112213
- Tian Y, Zeng G, Rutt A, Shi T, Kim H, Wang J, Koettgen J, Sun Y, Ouyang B, Chen T, Lun Z, Rong Z, Persson K, and Ceder G *Chemical Reviews* **2021** 121 (3), 1623-1669