



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale
A.A. 2024/2025
Sessione di Laurea aprile 2025

**Analisi della supply chain delle
batterie per auto elettriche:
valutazione dei rischi e strategie di
mitigazione**

Relatore:

Prof. Carlo Rafele

Correlatore:

Dott. Dario Alidoost

Candidato:

Antonino Allegro

Sommario

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abstract..... | 1 |
| Introduzione..... | 1 |
| 1. Tecnologie di batterie presenti in commercio | 7 |
| 1.1 Settori di utilizzo delle LIB | 9 |
| 1.2 Batteria agli ioni di litio per auto elettrica | 10 |
| 2. Analisi delle materie prime: processi di lavorazione, supply chain, mercato e produttori..... | 13 |
| 2.1 Rame..... | 14 |
| 2.2 Alluminio..... | 23 |
| 2.3 Grafite | 33 |
| 2.4 Nichel..... | 42 |
| 2.5 Cobalto | 50 |
| 2.6 Manganese | 57 |
| 2.7 Litio..... | 64 |
| 3. Componenti della cella elettrochimica | 72 |
| 3.1 Catodo | 72 |
| 3.2 Anodo | 76 |
| 3.3 Separatore | 77 |
| 3.4 Elettrolita | 77 |
| 3.5 Componenti aggiuntivi dell'elettrodo: legante ed additivo..... | 77 |
| 3.6 Collettore di corrente | 77 |
| 4. Produzione di celle, moduli e pacchi | 78 |
| 4.1 Mercato dei produttori dei pacchi batteria | 81 |
| 4.2 Sostenibilità ambientale | 86 |
| 5. Analisi del rischio della supply chain | 93 |
| 5.1 Identificazione del rischio | 94 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2 Valutazione del rischio..... | 98 |
| 5.2.1 Valutazione del SCR del Cobalto | 100 |
| 5.2.2 Valutazione del SCR del litio..... | 101 |
| 5.2.3 Valutazione del SCR del nichel..... | 102 |
| 5.2.4 Valutazione del SCR della grafite | 103 |
| 5.2.5 Valutazione del SCR del manganese..... | 104 |
| 5.2.6 Valutazione del SCR dell'alluminio..... | 105 |
| 5.2.7 Valutazione del SCR del rame | 106 |
| 5.3 Impatto del rischio della SC sulla batteria per EV | 107 |
| 5.4 Risposta al rischio | 110 |
| 5.4.1 Risposta al rischio della supply chain del nichel..... | 111 |
| 5.4.2 Risposta al rischio della supply chain della grafite | 118 |
| 5.4.3 Riepilogo delle misure adottate per rispondere al rischio del nichel..... | 124 |
| 5.4.4 Riepilogo delle misure adottate per rispondere al rischio della grafite..... | 126 |
| 5.4.5 Valutazioni di fattibilità delle misure di riduzione previste per il nichel..... | 128 |
| 5.4.6 Valutazioni di fattibilità delle misure di riduzione previste per la grafite | 131 |
| 5.4.7 Considerazioni..... | 134 |
| Conclusioni | 136 |
| Indice delle figure | 138 |
| Indice delle tabelle..... | 140 |
| Bibliografia | 141 |
| Ringraziamenti..... | 149 |

Abstract

L'elaborato si prefigge l'obiettivo di studiare le criticità della supply chain delle batterie agli ioni di litio (LIB) per auto elettriche. Infatti, come ben sappiamo, le batterie agli ioni di litio per EV sono le protagoniste della transizione green che sta abbracciando il nostro pianeta. Per questo motivo, è utile studiarne i potenziali rischi della supply chain al fine di provare a prevedere ed evitare interruzioni improvvise che possano causare problemi di approvvigionamento delle materie prime e dei componenti necessari lungo la filiera. Questi materiali sono destinati alle gigafactory che si occupano della fabbricazione delle batterie e, successivamente, ai costruttori di auto che le montano sui propri veicoli elettrici. Lo studio ha visto l'analisi della supply chain per le 7 materie prime principali costituenti le LIB, che sono: rame, alluminio, manganese, cobalto, grafite, litio e nichel, partendo dalla loro estrazione mineraria, per poi proseguire con le successive fasi di raffinazione e produzione dei semilavorati e dei componenti veri e propri della cella, così da arrivare alla costruzione delle celle, moduli e pacchi batteria. Grazie a questa analisi preliminare, è stato possibile individuare, per ognuna delle materie prime, i principali fattori di rischio che caratterizzano la loro catena di approvvigionamento, e provvedere tramite degli indicatori alla loro valutazione. Si è passati in un secondo momento allo studio del pacco batteria per determinare le quantità di ciascun materiale che lo compone. Successivamente si è analizzato come i rischi della supply chain di ogni materiale impattano il pacco batteria, così da individuare delle azioni da intraprendere al fine di mitigarli.

Introduzione

La necessità di salvaguardare l'ambiente e di garantire la sicurezza energetica ha fatto sì che l'attenzione si spostasse verso le innovazioni del trasporto sostenibile, incoraggiando il passaggio dai veicoli convenzionali con motore a combustione interna ai veicoli elettrici (EV).

Le aziende del settore hanno sostenuto ingenti spese per rendere possibile questo cambiamento, che ha cominciato ad avere un forte impulso a partire dal 2019. Tra il 2020 e la fine del 2023, la capitalizzazione di mercato complessiva dei produttori di veicoli elettrici è passata da 100 miliardi a 1 trilione di dollari, raggiungendo un picco di oltre 1,6 trilioni di dollari nel 2021, trainata soprattutto da Tesla.

L'impegno globale per ridurre le emissioni di carbonio nel settore dei trasporti ha sostenuto una crescita costante nei mercati degli EV e delle relative batterie, con produzione e vendite in continuo aumento. Nel 2023, le vendite globali di veicoli elettrici, inclusi i veicoli elettrici a batteria (BEV) e i veicoli elettrici ibridi plug-in (PHEV), hanno registrato una crescita significativa, come mostrato nella Figura 1. Durante l'anno, le consegne complessive di veicoli elettrici hanno raggiunto 14,2 milioni di unità, con un incremento di oltre il 35% rispetto al 2022. Tuttavia, rispetto al tasso di crescita del 54,2% registrato nel 2022, questa statistica indica una decelerazione. Dieci milioni dei 14,2 milioni di veicoli venduti nel 2023 erano BEV, mentre i restanti 4,2 milioni erano veicoli a celle a combustibile (FCV), PHEV e veicoli elettrici ad autonomia estesa (REEV).

La situazione è rimasta invariata nel 2024, sostenendo la tendenza al ribasso del tasso di crescita, che è stato inferiore del 25% rispetto all'anno precedente. (Koech, 2024)

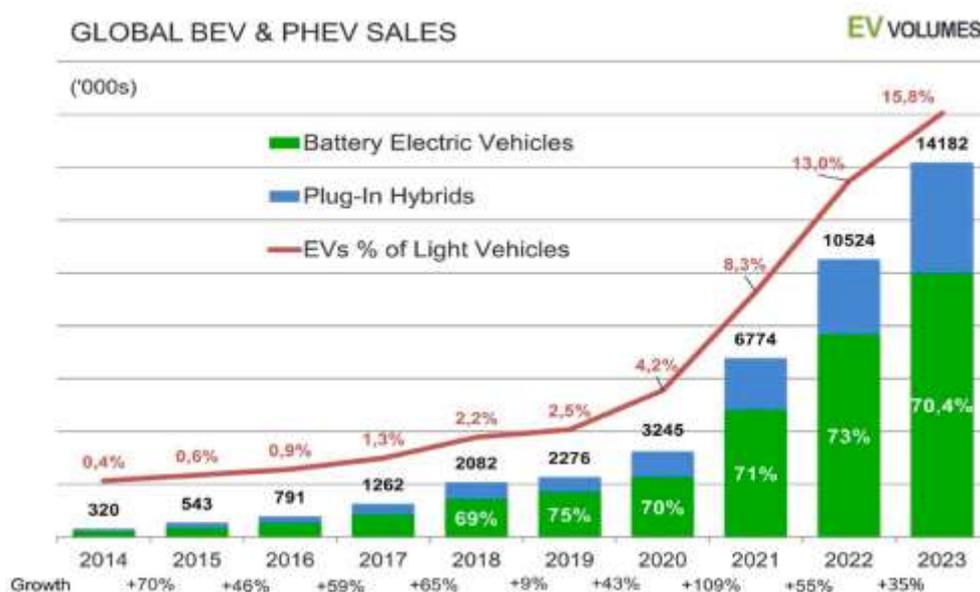


Figura 1: Andamento delle vendite delle auto elettriche dal 2014 al 2023.

La stragrande maggioranza delle vendite di auto elettriche nel 2023 si è concentrata in Cina (60%), Europa (25%) e Stati Uniti (10%). (International Energy Agency, 2024) La crescita nel vecchio continente è stata guidata dal Regno Unito, Germania, Francia, Italia, Spagna, Belgio, Portogallo, Croazia, con la produzione italiana nel 2023 che ammonta a circa 47.000 unità immatricolate totalmente elettriche. (ANSA, 2024)

Nell'attuale mercato automobilistico, la Cina è un attore di primo piano. Le case automobilistiche cinesi sono diventate il più grande produttore al mondo, concentrandosi sull'integrazione della catena di fornitura e sull'efficienza della produzione di veicoli elettrici, sulla base del modello di auto elettrica di Tesla. Inoltre, il fatto che i produttori europei, giapponesi e americani producessero automobili a combustione e avessero un vantaggio che la Cina non poteva riguadagnare, ha sostenuto questa strategia. Tuttavia, poiché la Cina disponeva di enormi risorse per la produzione di energia elettrica, il governo cinese ha avviato politiche favorevoli ai veicoli elettrici già a partire dal 2009. Ciò l'ha portata, muovendosi in largo anticipo rispetto agli altri paesi, ad assumere un vantaggio competitivo, beneficiando di un crescente impegno verso la riduzione delle emissioni di CO2 che sta interessando l'intero globo. L'unico problema di questa rivoluzione green riguarda il fatto che l'energia usata per la produzione degli EV viene prodotta dalle centrali a carbone. Per questo motivo, la Cina sta investendo sullo sviluppo di fonti di energia rinnovabili, come l'eolico e il solare, con l'obiettivo di ridurre del 60% l'intensità di carbonio della rete elettrica entro il 2040. (Ella Nilsen, 2025)

Entro il 2025 si prevede che nel paese le vendite di auto elettriche supereranno quelle dei veicoli a combustione, confermando l'impegno verso una leadership orientata alla sostenibilità green.

Nei prossimi anni è prevista un'ulteriore crescita della quota di mercato delle auto cinesi nel mondo, che secondo le previsioni raggiungerà dall'attuale 21% il 33% al di fuori del paese nel 2030. Inoltre, l'esportazione interesserà maggiormente le aree che sono in fase di sviluppo, come le regioni del Sud-Est asiatico, dell'Africa, Medio Oriente e centro e sud America.

I mercati statunitense ed Europeo stanno invece vivendo una fase di profonda incertezza per quanto riguarda la produzione degli EV.

Negli Stati Uniti, Trump ha chiarito che tutti potranno acquistare qualsiasi tipo di auto, eliminando la necessità di veicoli elettrici. Difatti, con l'eccezione di Tesla, il settore automobilistico nazionale dipende principalmente dalla produzione di veicoli convenzionali; pertanto, questa azione è volta a proteggerlo. A causa di questa politica, le previsioni future stimano un calo del 47% della domanda di batterie per auto elettriche entro il 2040. Anche le importazioni di veicoli elettrici dalla Cina sono state soggette a dazi a sostegno di questo programma. C'è da precisare che la strategia adottata differisce in modo significativo da quella della precedente amministrazione, che mirava a ridurre le emissioni di CO2 e a fissare l'obiettivo del 50% delle vendite di veicoli elettrici entro il 2035.

Al contrario, il Green New Deal della Commissione europea, presentato nel 2019, mira a ridurre le emissioni di gas serra e ad eliminare gradualmente la vendita di veicoli a benzina e diesel entro il 2035. Il piano prevede anche obiettivi intermedi di riduzione delle emissioni medie di anidride carbonica dei veicoli prodotti dalle case automobilistiche europee e sanzioni per quelle che non li rispettano.

In aggiunta a ciò, per proteggere le proprie case automobilistiche, cosicché possano incrementare la loro quota nel mercato delle auto elettriche, e contrastare la concorrenza cinese che vanta un vantaggio competitivo del 30% sui costi, anche l'Europa ha imposto dazi sulle auto provenienti dalla Cina.

Tuttavia, a causa di queste norme stringenti per la riduzione dei gas serra, i costruttori di auto europei stanno vivendo una crisi senza precedenti. Il motivo è evidente, infatti essi sono stati da sempre leader nel mercato delle auto a motore termico, e adesso si vedono spiazzate e costrette ad una rapida riconversione per rincorrere il nuovo trend di mercato, ottenendo gravi perdite economiche.

Esempio ne è Volkswagen, in difficoltà per l'inadeguatezza della sua gamma di veicoli elettrici rispetto alle richieste dell'UE, ha evitato la chiusura di tre fabbriche tedesche, ma ha annunciato oltre 35.000 tagli di posti di lavoro e una riduzione della capacità produttiva di 700.000 veicoli. Con un calo del 40% della capitalizzazione all'inizio del 2024, Porsche non è in condizioni migliori e Stellantis è in grave crisi a causa del precipitoso calo delle vendite.

Per queste ragioni, nel settembre 2024 le case automobilistiche hanno chiesto un rinvio di due anni dell'obiettivo di riduzione del 2025 per salvare un settore già in sofferenza, scatenando una lotta per allentare i limiti dell'UE sulle emissioni di CO₂. Infatti, secondo i piani industriali dei produttori, la quota di mercato delle auto elettriche nell'UE potrebbe raggiungere il 20-24% entro il 2025, ma attualmente siamo ancora ben al di sotto del 15%, alimentando preoccupazioni riguardo al raggiungimento degli obiettivi sulle emissioni; difatti, le emissioni del venduto rischiano di superare il limite imposto di 94 grammi di CO₂/km, indirizzando le case automobilistiche europee verso multe elevatissime, stimate nell'ordine di 15 miliardi di euro. (Corlin, 2024)

Guardando invece al di fuori dell'Europa, in particolare in Giappone, a seguito della perdita di quote nel mercato cinese, Honda e Nissan stanno valutando una fusione per adattarsi ai cambiamenti del mercato. (Bertelè, 2024)

Invece, facendo riferimento alle vendite di auto elettriche globali, le previsioni per il 2024 prevedevano una ulteriore crescita del settore fino al raggiungimento di 17 milioni di auto immatricolate; quest'ultime si sono avverate, ma come visto dal grafico in fig.1 non c'è dubbio che la domanda sia in calo.

Come dimostrano i cambiamenti nelle tattiche delle società minerarie, il settore sta effettivamente attraversando un momento difficile. Per adeguarsi alle mutate condizioni di mercato, colossi come Albemarle hanno annunciato licenziamenti e riduzioni di spesa per i progetti di estrazione nel 2024.

Altri avvenimenti che hanno influenzato il mercato sono stati interruzioni della supply chain, la volatilità del prezzo dei metalli critici per le batterie agli ioni di litio (LIB), conseguenza dell'invasione dell'Ucraina

da parte della Russia, e la crescente concorrenza tra gli OEM. La competizione ha determinato una riduzione dei prezzi dei veicoli, favorendo un processo di consolidamento del settore. La diminuzione dei margini di profitto ha escluso infatti i produttori meno efficienti, creando barriere all'ingresso basate sulle economie di scala, favorendo così i produttori più solidi.

In Cina, che è il mercato con più case automobilistiche produttrici di veicoli elettrici, i prezzi delle auto sono diminuiti fino al 10% tra il 2022 e il 2023, raggiungendo il prezzo medio di 139 \$/kWh. Le aziende che resistono in questo contesto competitivo stanno ampliando il loro raggio d'azione verso i mercati esteri, rafforzando la loro market share a discapito delle industrie locali.

Comunque, è vero che il tasso di crescita del settore sta rallentando, ma le vendite dei veicoli elettrici continuano a salire, con una crescita delle vendite del 25% nel 2024 rispetto a quelle del 2023. Tuttavia, questo incremento è stato principalmente trainato, come facilmente deducibile, dalla Cina, dove nel 2024 si è registrato un aumento delle vendite del 40% paragonato all'anno precedente, pari a 11 milioni di auto, che le hanno permesso di raggiungere una quota di mercato di oltre l'80%. (rho motion, 2023) Anche se c'è da fare una precisazione, in quanto la crescita è stata guidata con una quota di circa il 40% dalle auto ibride plug-in, che si dimostrano in crescita anche grazie alla forte domanda proveniente dai mercati occidentali, mentre le auto completamente elettriche crescono ma stanno subendo un rallentamento guardando i periodi precedenti.

Analizzando il mercato europeo, nella regione le vendite complessive hanno raggiunto 1,99 milioni di veicoli elettrici a batteria, registrando un calo dell'1,3% rispetto al 2023. Ciò a causa della carenza di berline e SUV a prezzi accessibili, del timore che i veicoli siano stati limitati in vista delle più severe normative UE sulle emissioni di CO2 previste per il 2025 e dell'influenza del mercato tedesco, che è il più grande mercato automobilistico europeo, e che a causa del ritiro dei sussidi da parte del governo, ha visto la riduzione del 30% delle vendite di EV.

In Italia, invece, le vendite si sono attestate a circa 65 mila unità, con una riduzione del 2% rispetto all'anno passato e una quota di mercato del 4,2%, facendola classificare come fanalino di coda in Europa. (Rinnovabili, 2025)

Gli unici 2 paesi che nel 2023 hanno contribuito ad una crescita evidente della vendita di EV nella regione europea sono stati la Gran Bretagna e la Norvegia. Nel 2023 la Gran Bretagna ha registrato un incremento del 21,4% nelle vendite di veicoli elettrici, diventando il principale mercato europeo con quasi 382.000 unità vendute, sostenute dagli obiettivi delle case automobilistiche. La Norvegia ha mantenuto la quota di mercato più alta, con quasi nove veicoli su dieci elettrici, in vista del divieto di vendite di veicoli ICE previsto per il 2025.

Le previsioni per il 2025 indicano però una ripresa in Europa, trainata principalmente dalla Germania. Si stima che le vendite di veicoli elettrici nell'Europa occidentale aumenteranno dagli 1,99 milioni registrati lo scorso anno a 2,7 milioni, raggiungendo una quota di mercato del 22,2% dopo la stagnazione del 2024. (Forbes, 2025)

Il motivo per cui la domanda di veicoli elettrici in questa regione fatica a decollare è legato principalmente al loro costo elevato, spesso non proporzionato agli stipendi medi europei. Questo rende necessari incentivi più consistenti per favorire la transizione verso la mobilità elettrica. A ciò si aggiungono diversi ostacoli che scoraggiano i consumatori dal passare dalle auto a combustione a quelle elettriche, tra cui la carenza di infrastrutture per la ricarica e la mancanza di un ambiente produttivo competitivo in grado di stimolare l'adozione su larga scala. (Forbes, 2024)

Per quanto riguarda gli Stati Uniti, le vendite continuano a essere inferiori rispetto a quelle di Cina ed Europa, ma nei primi nove mesi del 2024 si è osservato un modesto aumento di circa il 9% confrontato con lo stesso periodo dell'anno precedente. Ciò incoraggiato da incentivi da parte del governo per l'acquisto di auto elettriche, ai quali si sommano le opzioni di leasing e di finanziamento che stanno rendendo questa nuova tecnologia accessibile ad una platea maggiore. Inoltre, si è aggiunto anche il miglioramento dell'infrastruttura, con migliaia di nuove stazioni di ricarica costruite.

Tesla rimane il marchio dominante nel segmento dell'elettrico in USA, con 630.000 unità vendute, anche se segna un -6% rispetto al 2023, seguita da General Motors che registra un incremento del 60% su base annua. Tuttavia, con il cambio di presidenza, il futuro delle vendite di veicoli elettrici nel paese appare incerto. (Marcoli, 2024)

Per favorire una crescita significativa del mercato degli EV in Europa e USA, è necessario aumentare la fiducia degli utenti nella tecnologia, ormai consolidata e ricca di vantaggi. Allo stesso tempo, è cruciale accrescere la consapevolezza sui benefici di questi veicoli e garantire un maggiore impegno politico per sostenere la transizione tramite incentivi ad imprese e cittadini.

Per questo motivo, considerando sia la complessità che la rilevanza della catena di approvvigionamento nella produzione di veicoli elettrici, e dunque delle batterie che li compongono, il seguente studio si è concentrato proprio sull'analisi della supply chain delle batterie per auto elettriche, e in particolar modo sui rischi che la caratterizzano, che come visto comprendono sia rischi geopolitici, ma anche problemi che derivano dal fatto che un attore su tutti, la Cina, la domina, con le conseguenze catastrofiche per USA ed Europa che stentano a farsi spazio sul mercato.

Il lavoro di tesi ha analizzato la catena del valore a partire dalle 7 materie prime che compongono le LIB, cioè: litio, rame, nichel, cobalto, manganese, alluminio, e grafite. Per ciascuna di esse è stata approfondita la supply chain, studiando le diverse fasi, dall'estrazione mineraria alla lavorazione, fino alla produzione dei componenti finali utilizzati nelle LIB. Inoltre, abbiamo anche analizzato gli andamenti di mercato, con i vari fenomeni che caratterizzano ognuna di esse e che impattano ovviamente sul prezzo.

Il passo successivo ha visto lo studio dei componenti della cella, fabbricati a partire dalle materie prime descritte, e dei processi di come essi venissero costruiti e assemblati in celle, moduli e pacchi dalle gigafactory. Proprio per le gigafactory, attori a valle della catena della supply chain delle batterie, si sono studiati gli andamenti di mercato e i protagonisti.

Dopo che si è avuto un quadro completo della supply chain, siamo giunti all'estrapolazione e alla valutazione dei rischi per ogni materia prima. Siamo dunque passati al calcolo delle percentuali con cui partecipano alla composizione della batteria NMC 811, studiandone come il loro rischio la impatta, così da individuare il SCR della chimica in questione e cercare delle opportune strategie di mitigazione al fine di ridurlo.

1. Tecnologie di batterie presenti in commercio

In commercio esistono varie tipologie di batterie che sfruttano chimiche differenti e che vedono vari scopi di utilizzo.

Possiamo introdurre l'indice TRL, che misura il grado di sviluppo di una tecnologia, e fare una valutazione sulle chimiche che verranno descritte subito dopo. Si osserva che alcune tipologie di batterie, come quelle al Sodio-Zolfo, Nichel-Ferro e agli Ioni di Sodio, sono ancora in fase di sviluppo e non ampiamente diffuse sul mercato. In particolare, le batterie agli Ioni di Sodio si trovano ancora in una fase prototipale, pur essendo state testate in condizioni reali, ma risultano ancora scarsamente disponibili a livello commerciale. Le batterie al Nichel-Ferro e al Sodio-Zolfo, anche se rappresentano tecnologie più mature, sono poco diffuse nelle applicazioni di consumo a causa delle condizioni operative specifiche che ne limitano l'utilizzo. Le chimiche rimanenti, invece, sono ad un livello di sviluppo avanzato, ma comunque vedono applicazioni in settori specifici, e non godono di larghe scale di utilizzo.

La chimica agli ioni di litio, con un TRL pari a 9, rappresenta la tecnologia più matura e diffusa a livello globale. La sua elevata versatilità e le prestazioni superiori, in particolare per densità energetica e potenza, ne favoriscono l'adozione su larga scala in numerosi settori, tra cui spicca appunto quello delle auto elettriche.

Ecco un elenco delle principali chimiche:

- **Batterie agli ioni di sodio**

Le batterie al sodio presentano diversi vantaggi. Prima di tutto, il sodio è il sesto elemento più abbondante sulla crosta terrestre, rendendo queste batterie economicamente vantaggiose grazie alla disponibilità delle materie prime. Inoltre, offrono elevati standard di sicurezza, e anche un basso impatto ambientale. Tuttavia, le batterie al sodio presentano alcuni svantaggi. La loro densità energetica è più bassa rispetto alle batterie al litio, e la loro durata dei cicli di vita è limitata. (Flash Battery, 2023)

- **Batterie al nichel-metallo idruro**

Principalmente impiegate nelle auto ibride e meno comuni nei veicoli elettrici puri, sono robuste ma con una densità energetica inferiore rispetto alle batterie agli ioni di litio. Offrono tempi di ricarica rapidi, lunga durata e prestazioni affidabili, oltre a essere più ecologiche grazie all'assenza di cadmio. (GMCELL, 2024)

- **Batterie al piombo-acido**

Le batterie al piombo-acido sono una tecnologia consolidata ed economica, ampiamente utilizzata per l'avviamento dei veicoli e altre applicazioni stazionarie o mobili. Offrono alti livelli di corrente di picco e costi produttivi contenuti. Tuttavia, soffrono di bassa densità energetica, sensibilità alle scariche profonde, cicli di vita limitati e tempi di ricarica lunghi. (Electricity Magnetism, s.d.)

- **Batteria Nichel-Ferro**

Le batterie al nichel-ferro sono robuste e resistenti a sovraccarichi, scariche, alte temperature e vibrazioni. Trovano impiego in settori come segnalazione ferroviaria, carrelli elevatori e miniere. Tra gli svantaggi figurano prestazioni ridotte a basse temperature, bassa densità energetica, elevata autoscarica e costi elevati rispetto alle batterie al piombo e agli ioni di litio. (Liu, 2020)

- **Batteria Sodio-Zolfo**

Le batterie sodio-zolfo sono tra le opzioni più promettenti per l'accumulo di energia. Operano a temperature elevate, dove sodio, zolfo e polisolfuro sono liquidi, garantendo elevata reattività. Offrono notevoli vantaggi: potenza e densità energetica elevate (fino a 760 Wh/kg, tre volte le batterie al piombo), stabilità termica, basso costo e sicurezza. Trovano applicazione in bilanciamento del carico e alimentazione di backup, adatti a settori come fabbriche e magazzini. (Zhao, 2024)

- **Batteria Nichel-Idrogeno**

Le batterie al nichel-idrogeno sono accumulatori ricaricabili basati su nichel e idrogeno gassoso immagazzinato in celle pressurizzate. Nonostante una densità energetica inferiore rispetto alle batterie al litio, si distinguono per la straordinaria longevità, superando 20.000 cicli di carica. Grazie a queste caratteristiche, sono ampiamente utilizzate in satelliti e sonde spaziali come la ISS, Mars Odyssey e il telescopio Hubble. (Borthomieu, 2009)

- **Batteria agli ioni di litio**

Le batterie agli ioni di litio sono potenti accumulatori di energia, utilizzate in una vasta gamma di dispositivi, dai veicoli elettrici agli utensili cordless. Offrono vantaggi come lunga durata (fino a 3.000 cicli di ricarica), elevata densità energetica, bassa autoscarica, e nessun effetto memoria. Tuttavia, presentano alcuni svantaggi, tra cui il rischio di incendio, sensibilità alla temperatura e problematiche ambientali legate all'estrazione dei materiali e al riciclaggio. Nonostante questi svantaggi, le batterie al litio restano superiori grazie ai loro benefici, e gli sviluppi tecnologici stanno migliorando costantemente la loro performance.

1.1 Settori di utilizzo delle LIB

Tra i settori nei quali vengono utilizzate maggiormente le LIB, oltre a quello del trasporto su strada che tratteremo successivamente nel dettaglio nel paragrafo 1.1, possiamo individuare quello dell'elettronica portatile con i telefoni cellulari, tablet e laptop, che sono di gran lunga le principali applicazioni. Al terzo posto troviamo quello dei sistemi di alimentazione.

Settori di applicazione meno predominanti includono l'ambito aerospaziale, che comprende satelliti e aviazione, e il settore medico con dispositivi come apparecchi acustici, sistemi per il monitoraggio del glucosio, neurostimolatori e strumenti per la somministrazione di farmaci. Altri usi che integrano batterie agli ioni di litio di piccole dimensioni sono i sensori e i transistor in miniatura. Le celle agli ioni di litio trovano inoltre impiego in dispositivi tecnologici indossabili, torce elettriche, giocattoli radiocomandati, sistemi LED solari e aspirapolveri wireless.

Ritornando al settore dell'elettronica portatile, è fondamentale dire che è stato per lungo tempo quello nel quale trovavano maggiore applicazione le LIB. Ciò è reso possibile dalla loro capacità di soddisfare le esigenze dei consumatori, potendosi adattare a dispositivi sempre più compatti, garantendo tempi di ricarica più rapidi e una maggiore durata della batteria. Infatti, l'energia e la potenza specifiche sono criteri chiave nelle applicazioni elettroniche portatili, e per questo motivo la batteria agli ioni di litio ha un chiaro vantaggio rispetto ad altre chimiche.

Per quanto concerne i sistemi di alimentazione elettrica, si dividono in sistemi connessi alla rete e in sistemi fuori rete. In questo settore, le batterie agli ioni di litio svolgono un ruolo fondamentale nel bilanciamento energetico, grazie alla loro eccezionale energia specifica e potenza. Difatti, la rete elettrica è da sempre dipendente da sistemi di accumulo per adattare l'offerta alla domanda e garantire servizi ausiliari.

Anche l'alimentazione fuori rete, basata su fonti rinnovabili fluttuanti, come il fotovoltaico e l'energia eolica, rappresenta un ambito promettente per l'applicazione delle batterie agli ioni di litio. Tra le soluzioni più interessanti figurano gli SHS (Solar Home Systems), piccoli sistemi fotovoltaici fuori rete progettati per soddisfare il fabbisogno energetico di base di una famiglia, con una capacità tipicamente compresa tra poche centinaia di Wh e alcuni kWh al giorno. Le batterie agli ioni di litio offrono, come annunciato, elevata energia specifica e potenza, consentendo la realizzazione di pacchi batteria compatti e leggeri, facilmente installabili all'interno dell'abitazione. Questa configurazione assicura condizioni operative stabili e favorevoli, rendendo l'SHS particolarmente affidabile rispetto alle soluzioni basate su batterie al piombo. (Zubi, 2018)

1.2 Batteria agli ioni di litio per auto elettrica

La batteria agli ioni di litio rappresenta il cuore pulsante dei veicoli elettrici. Tra le caratteristiche principali spiccano l'elevata densità energetica e potenza energetica, basso peso, lunga durata del ciclo di vita e le ottime prestazioni a temperature elevate.

Uno dei maggiori vantaggi delle batterie agli ioni di litio è la possibilità di riciclare i vari componenti che le compongono. Tuttavia, la limitata disponibilità di materiali e il costo elevato per kWh restano sfide significative.

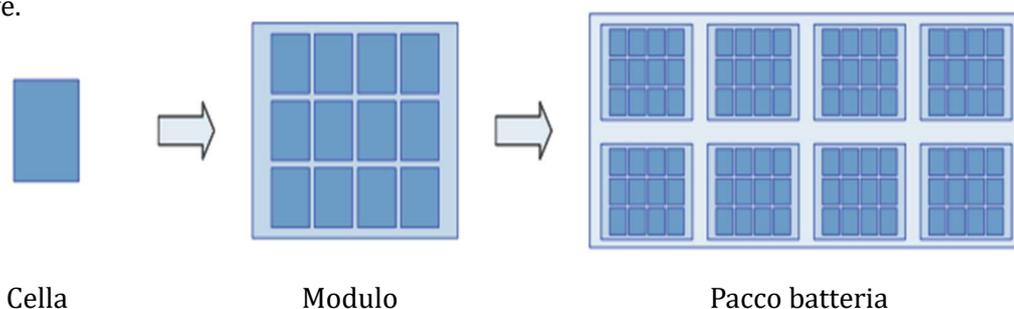


Figura 2: composizione del pacco batteria. (Mellert, 2018)

Il pacco batteria delle auto elettriche, come mostrato nella figura 2, è l'insieme di più moduli, che sono racchiusi da una custodia protettiva. I moduli sono composti da più celle, costituite da anodo, catodo, elettrolita, separatore e collettore di corrente. Le celle possono essere collegate tra loro in serie o in parallelo tramite barre collettrici e connettori.

Tra i componenti principali figurano anche il BMS (Battery Management System) e il TMS (Thermal Management System). Il primo ha il compito di tracciare e gestire gli aspetti chiave delle funzionalità e delle prestazioni, ad esempio tensione, corrente e stato di carica. Il secondo, invece, è in grado di regolare la temperatura della batteria in funzione delle condizioni di esercizio e delle condizioni atmosferiche. (Gha18)

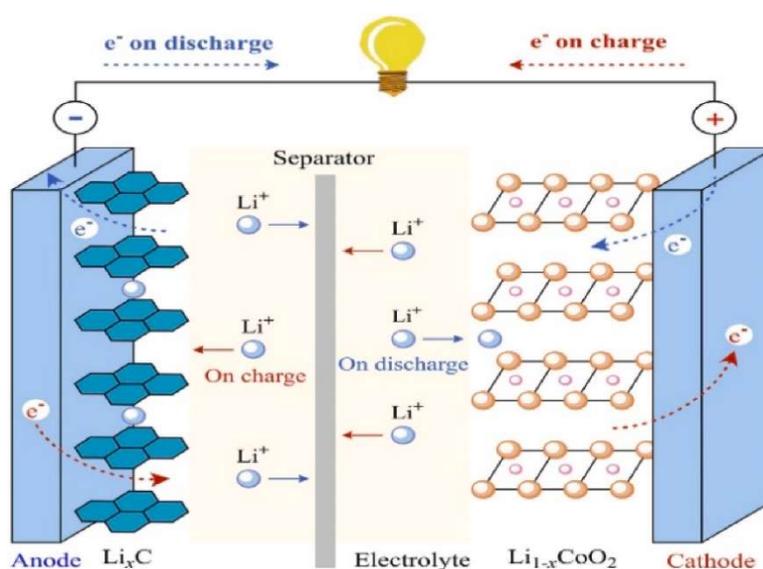


Figura 3: meccanismo di funzionamento della batteria agli ioni di litio. (Koech, 2024)

Il processo di produzione dell'energia nelle celle delle LIB illustrato nella fig. 3 si basa sul movimento ciclico degli ioni di litio tra due elettrodi, il catodo (positivo) e l'anodo (negativo) Figura 2. Durante la carica, gli ioni di litio si spostano dal catodo, attraversano l'elettrolita e vengono immagazzinati negli strati dell'anodo, solitamente in grafite. Durante la scarica, il processo si inverte: gli ioni vengono rilasciati dall'anodo, attraversano l'elettrolita e tornano al catodo. Questo movimento genera elettroni liberi che, passando attraverso un circuito esterno tramite il collettore di corrente, producono energia elettrica. Il separatore, un componente chiave, permette il passaggio degli ioni ma blocca gli elettroni, garantendo sicurezza e prestazioni efficienti. (Tecnobattery, 2024)

L'energia elettrica complessivamente generata servirà a mettere in moto le parti meccaniche dell'auto elettrica.

Le celle utilizzate per le batterie agli ioni di litio presenti sul mercato sono principalmente di 3 tipi: cilindriche, a pouch e prismatiche.

- ✓ Le celle cilindriche (Fig. A), da come dice il nome stesso, hanno la forma cilindrica e vengono usate in pacchi batteria di piccole dimensioni, per e-bike, scooter o monopattini elettrici, ad esempio.



A)

- ✓ Quelle a pouch (Fig. B), sono delle celle che hanno la forma a sacchetto, e di solito, dato che non sono tanto robuste, vengono messe dentro delle protezioni in alluminio. Vengono usati nell'industria automobilistica, ma anche in smartphone e laptop.



B)

- ✓ Le prismatiche (Fig. C), hanno un case robusto che le contiene, e le parti interne sono fatte da anodi e catodi disposti a strati, formando lo stack. Riescono a raggiungere capacità elevate e per questo motivo sono adatte per il settore dei veicoli elettrici e anche per l'accumulo di energia. (Battery, s.d.)



C)

Figura 4: A) cella cilindrica, B) cella a pouch, C) cella prismatica. (TRUMPF, s.d.)

2. Analisi delle materie prime: processi di lavorazione, supply chain, mercato e produttori

Le materie prime utilizzate per produrre i componenti delle LIB sono le seguenti: rame, alluminio, grafite, nichel, cobalto, litio e manganese.

Come si evince dalla figura 5, la domanda di questi materiali è in crescita, trainata dalle previsioni di aumento delle vendite di veicoli elettrici. Si nota che tra le diverse materie prime vi sono differenze significative nella quantità richiesta per ciascuna, con il rame e l'alluminio che dominano su tutte.

Questo è dovuto al fatto che esistono diverse chimiche alla base del funzionamento delle batterie, ognuna delle quali contiene determinate materie prime. Tuttavia, rame e alluminio risultano i più richiesti, poiché vengono usati oltre che per i componenti delle celle, anche per altre parti del pacco batteria che prescindono dalla chimica, come custodie, connettori e cablaggi.

Adesso passiamo all'analisi delle materie prime, che si è concentrata sullo studio della supply chain e dei fenomeni che caratterizzano il loro mercato.

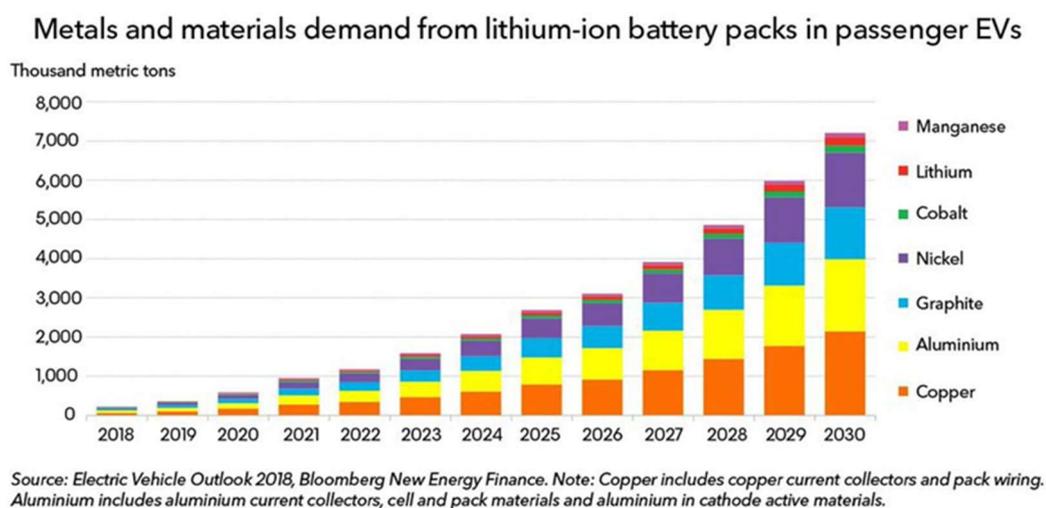


Figura 5: Previsione della domanda delle materie prime per le batterie agli ioni di litio

2.1 Rame

Il rame è la terza materia prima metallica maggiormente prodotta globalmente, dopo ferro e alluminio. Quello primario si ottiene dall'estrazione e lavorazione dei minerali, mentre il rame secondario proviene dal riciclaggio di rottami metallici. È presente nella crosta terrestre in diverse forme, come solfuri, carbonati e silicati, oltre che in forma pura. È ampiamente utilizzato nelle batterie per auto elettriche grazie alla sua elevata conduttività elettrica, durezza e affidabilità. Nelle celle agli ioni di litio, è impiegato come collettore di corrente per l'anodo e, a livello di pacco batteria, viene utilizzato nelle connessioni elettriche come barre collettrici, cavi e cablaggi. Solitamente si usa per l'anodo un foglio di rame che varia tipicamente tra i 6 e i 12 micron metri di spessore, per garantire una buona conduttività e integrità strutturale. (Cochrane, 2024)



Foglio di rame

❖ Processo di produzione

La produzione del rame comprende il seguente processo di lavorazione descritto nella figura 6.



Figura 6: processo di produzione dei fogli di rame.

1. Estrazione Mineraria e Frantumazione

Tutto comincia con l'estrazione mineraria, subito dopo le rocce estratte vengono sottoposte a frantumazione, un procedimento che le riduce in frammenti più piccoli per facilitarne la lavorazione nelle fasi successive.

2. Flottazione

Si passa così alla flottazione, che consente di separare il rame dal materiale di scarto. Attraverso l'aggiunta di reagenti chimici e la formazione di bolle d'aria, le particelle di rame si legano alle bolle e salgono in superficie, formando una schiuma. Le rocce di scarto, prive di rame, affondano e vengono rimosse, mentre il concentrato di rame viene raccolto per la successiva fase.

3. Fusione

Segue la fusione, durante la quale il minerale viene riscaldato ad alte temperature con fondenti come calcare o silice. Questi reagiscono con le impurità, formando una scoria liquida che galleggia sulla superficie del rame fuso e facilita la separazione delle sostanze indesiderate. In questo modo, si ottiene rame quasi puro, mentre la scoria viene separata per essere trattata o smaltita.

4. Raffinazione

La raffinazione comprende una serie di procedure volte a migliorare il grado di purezza del metallo. Questa fase include processi elettrolitici o chimici che rimuovono le impurità rimanenti. Al termine dei processi di raffinazione, il rame raggiunge generalmente una purezza del 99,9%, diventando adatto per applicazioni industriali.

5. Produzione dei Semi-lavorati

Si passa così alla produzione dei semi-lavorati costituita da 2 sottofasi:

- **Laminazione:** il rame passa attraverso dei rulli, così che si riduca il suo spessore fino al raggiungimento di quello desiderato.
- **Taglio:** Il materiale viene ridimensionato in base alle specifiche richieste.

6. Foglio di rame

Si ottengono così semilavorati come ad esempio fogli e barre. Si procede con un'ulteriore laminazione prima a caldo e poi a freddo per ottenere lo spessore di pochi micron (6-12) e con dei trattamenti chimici per rimuovere ossidazioni o impurità sulla superficie per poi arrivare al dimensionamento corretto del foglio per comporre il catodo. (Marta Wincewicz-Bosy, 2021)

❖ Supply chain

Quindi la catena di approvvigionamento per la produzione del rame è ampia. Il problema principale è la concentrazione degli attori che partecipano alle diverse fasi in alcuni paesi specifici.

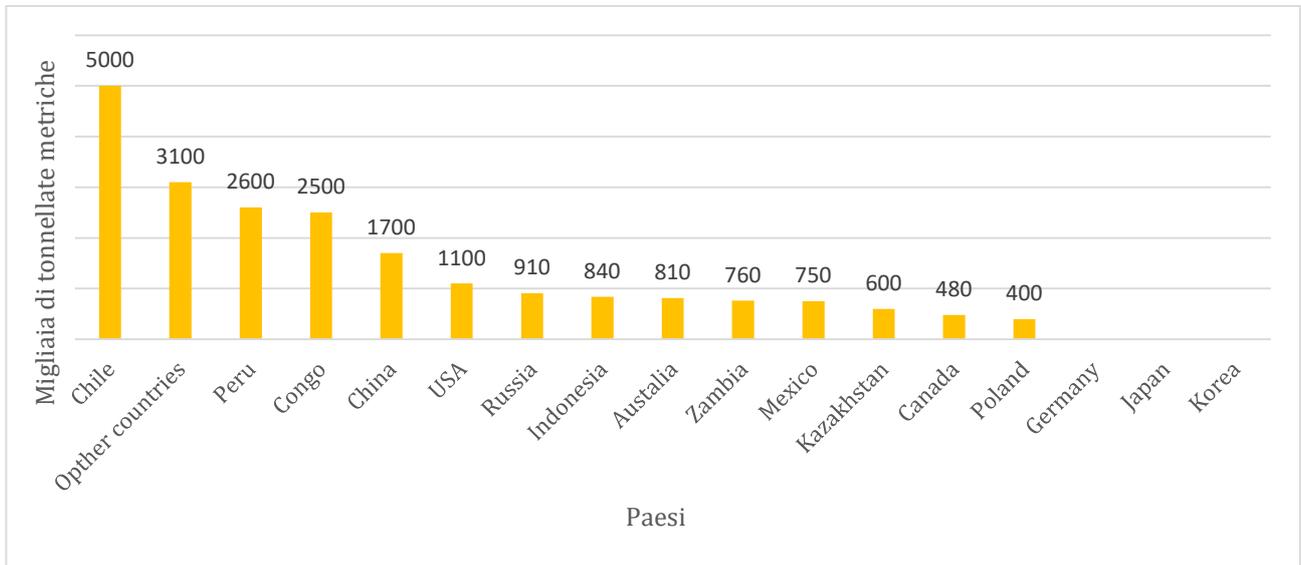


Figura 7: produzione mineraria di rame nel 2023. Fonte dati: (USGS, 2024)

Come mostrato in figura 7, la maggior parte dell'estrazione mineraria mondiale è concentrata in Cile, con una produzione di 5 milioni tonnellate nel 2023. Seguono Perù e Repubblica Democratica del Congo, rispettivamente con 2,6 e 2,5 milioni di tonnellate. Dunque, la situazione dal punto di vista della sicurezza della supply chain è critica, in quanto i primi 3 paesi produttori costituiscono circa il 50% dell'estrazione mondiale. Se questo è il quadro a monte della catena di fornitura, la situazione a valle, riguardante la raffinazione e le successive lavorazioni del metallo, non appare migliore.

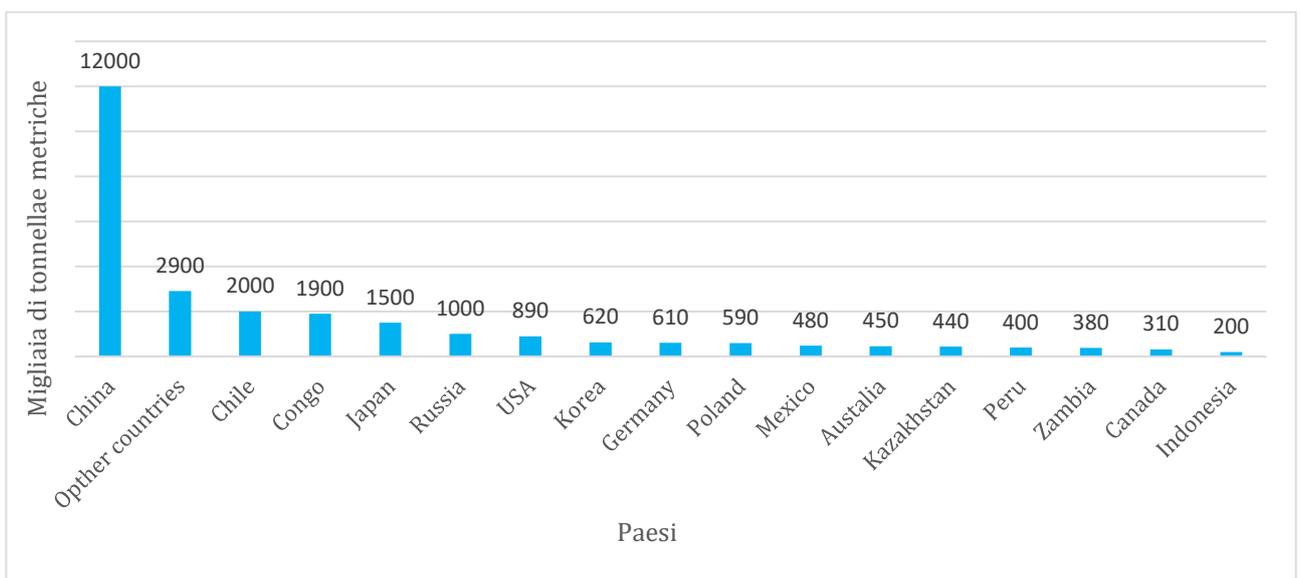


Figura 8: raffinazione del rame nel 2023. Fonte dati: (USGS, 2024)

Attualmente, l'Asia rappresenta oltre il 70% del consumo mondiale di rame raffinato, seguita dall'Europa (15%) e dal Nord America (10%). (Cochrane, 2024)

La fig. 8 mostra che la maggior parte del rame estratto viene lavorato in Cina, che nel 2023 ne ha prodotto 12 milioni di tonnellate e gode di un ampio distacco dagli altri paesi. Ciò è preoccupante, in quanto è in mano ad un solo paese circa il 45% dell'intero mercato dei prodotti in rame lavorati. Questo è principalmente spiegabile dal fatto che ci sono stati ingenti investimenti nella lavorazione a monte e nella semi-lavorazione e inoltre anche le tecniche di fusione sono state migliorate negli anni, acquisendo un vantaggio in termini di costo. Al contrario, in Europa, i fabbricanti di semi-lavorati hanno a che fare con problemi legati alla bassa scala di produzione e costi operativi più alti e, in aggiunta a ciò, le norme ambientali dell'Unione Europea per ridurre le emissioni di carbonio non giocano dalla loro parte. Si è pensato negli ultimi anni di diversificare la produzione di rame e porre fine alla dominanza cinese, ma ciò comporterebbe investimenti impraticabili. È anche vero che stanno nascendo nuovi impianti di lavorazione ad esempio in India, nella RDC e in Indonesia, ma è anche vero che la Cina è estremamente competitiva e difficile da contrastare. Per questo motivo, paesi come gli Stati Uniti hanno deciso di concentrarsi sul mercato secondario, puntando sul riciclo del rame, e sono prossimi all'apertura di un impianto dedicato a questo scopo in Georgia. (Chapman, 2024)

Successivamente i semilavorati devono essere lavorati per produrre i fogli di rame per i collettori di corrente, per le connessioni elettriche come barre collettrici, cavi e cablaggi delle LIB, ma la situazione rimane inalterata. La Cina, infatti, è nota per la sua notevole capacità produttiva e per le esportazioni di foglio di rame, rappresentando il 75% della capacità produttiva globale. (HDINresearch, 2021)

In generale l'Asia Pacifica detiene una posizione di leadership nella quota di mercato del prodotto finito, con Cina, Giappone, Corea del Sud e Taiwan che sono stati tradizionalmente i principali attori.

Molte aziende sul mercato stanno espandendo la loro capacità produttiva e la loro presenza geografica attraverso acquisizioni e partnership, adottando strategie di ottimizzazione dei costi per migliorare la loro redditività e competitività. Per farsi spazio sul mercato le aziende stanno puntando sulla differenziazione del foglio di rame, concentrandosi sul miglioramento delle caratteristiche; anche la sostenibilità è un elemento che svariate imprese stanno attenzionando per acquisire una maggiore quota di mercato, data l'importanza che ha assunto per i clienti. (futuremarketinsights, 2023)

La concentrazione delle società del segmento a valle a livello globale non è particolarmente elevata, ma, come accennato in precedenza, si può parlare più di una concentrazione geografica. Inoltre, le barriere all'ingresso, sebbene siano necessari ingenti investimenti per la lavorazione e produzione dei fogli di rame, non risultano particolarmente alte, dato il mercato in espansione, soprattutto in Europa e negli Stati Uniti, che favorisce l'ingresso di nuove imprese.

❖ Mercato

La crescente diffusione dei veicoli elettrici avrà un forte impatto sulla domanda di rame, che dovrebbe aumentare dalle 185.000 tonnellate del 2017 a 1,74 milioni di tonnellate entro il 2027. Sebbene l'aumento delle prestazioni delle celle agli ioni di litio, come ad esempio l'energia specifica, riduca l'intensità di utilizzo del rame per kilowattora (kgCu/kWh), questo non implica una riduzione della domanda complessiva. Il settore automobilistico, infatti, sta puntando su batterie con una maggiore capacità energetica, il che continuerà a far crescere la domanda. Si stima che in un veicolo elettrico si possa trovare un quantitativo di rame che varia dai 40 kg se ibrido, 60 kg per uno plug-in e 80 kg per uno totalmente elettrico. (IDTechEx, 2017)

Le proiezioni indicano un rischio limitato di esaurimento delle riserve nel breve termine. Le scorte attuali appaiono sufficienti a coprire la domanda prevista fino al 2030, mantenendo una stabilità relativa e riducendo il pericolo di carenze nel prossimo futuro. (Cochrane, 2024)

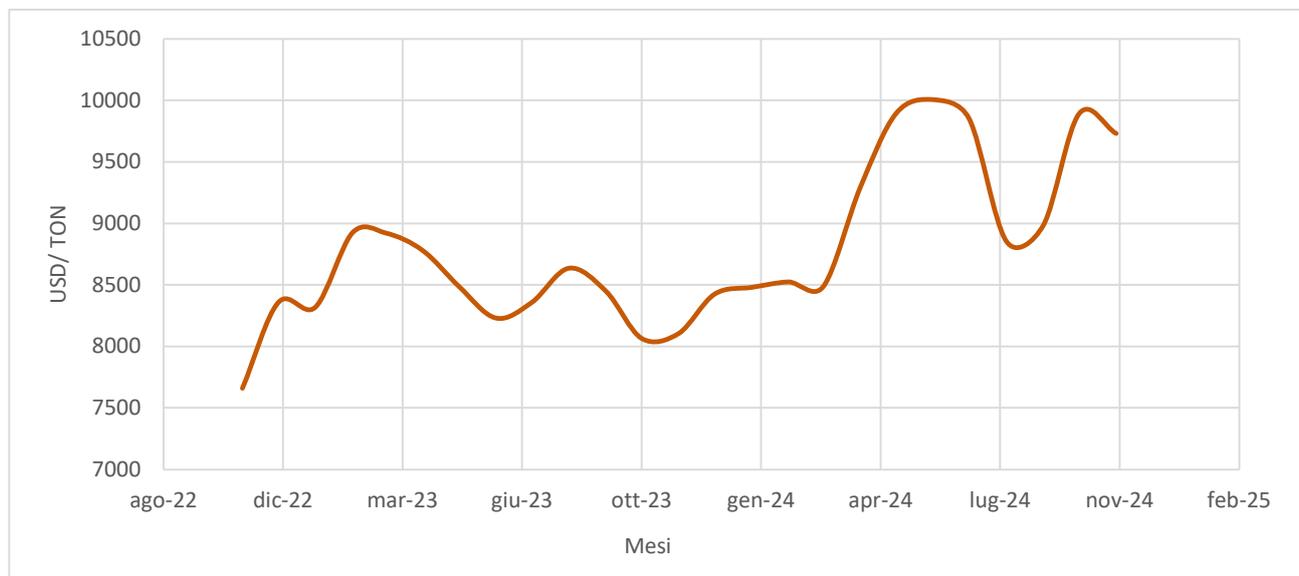


Figura 9: andamento del prezzo del rame. Fonte dati: (Il Sole 24 Ore, 2024)

Il prezzo del rame in 1 anno si è incrementato di circa il 13%, passando dagli 8000 \$/ton di ottobre 2023 ai 9700 \$/ton di ottobre 2024, come ben visibile in figura 9. (Il Sole 24 Ore, 2024). L'aumento è dovuto a problemi lato offerta, come la chiusura della miniera Cobre a Panama, da possibili limitazioni allo sviluppo di nuova capacità di raffinazione da parte del governo cinese, e da tagli volontari all'offerta di rame raffinato delle società di lavorazione che hanno evidenziato la possibilità della copertura di solamente l'80% della domanda di rame fino al 2030. Tutto questo connesso con l'incremento della domanda lato cinese, oltre a quella degli USA e dell'Europa, a causa delle politiche a favore della transizione energetica, contribuisce ovviamente all'impennata del prezzo. (La Stampa, 2024).

❖ Mercato dei produttori di barre di rame

Ecco un elenco dei maggiori produttori di semilavorati in rame, tra cui troviamo le barre, a partire dalle quali verranno prodotti i fogli di rame per gli anodi:

- **Jiangxi Copper**

Con sede a Nanchang, in Cina, Jiangxi Copper estrae e lavora svariati tipi di minerali polimetallici come rame, oro, argento, zinco e piombo. La società ha inoltre sviluppato basi minerarie in Cina, Perù, Albania e Afghanistan. I prodotti in rame vanno dai vari semilavorati come fili, tubi e in particolare per le LIB produce lamine di rame fino ad arrivare ai fogli di rame per l'anodo. Spicca inoltre l'interesse verso produzioni che abbiano un basso impatto ambientale.

- **Storm Power Components**

Azienda americana con sede a Decatur, Tennessee, che si distingue per la produzione, tra i tanti prodotti nel loro portafoglio, di barre collettrici in rame e alluminio destinate tra i vari usi anche alla lavorazione a valle da parte dei produttori di fogli di rame e alluminio per LIB.

- **Poongsan**

Ha sede in Corea e la sua divisione di metalli non ferrosi lavorati produce una gamma completa di prodotti, come fogli, nastri e barre e leghe di rame, distribuiti tramite le sue filiali in Corea, Stati Uniti, Cina, Sud-est asiatico e la regione del Pacifico. Proprio questa presenza massiccia in varie aree del globo permette di essere vicino ai bisogni dei clienti e poter contare su l'incremento della propria market share.

- **MKM**

Azienda che ha sede in Germania, che ha visto numerose acquisizioni e fusioni e adesso fa parte del gruppo KME che si occupa di produrre vari prodotti in rame, tra cui le barre. Ha sedi di produzione in Italia, Francia, Germania e Spagna e la rete commerciale fornisce una vasta clientela internazionale che si estende in paesi come il Regno Unito, USA, Polonia e Cina.

- **Mitsubishi Materials**

Compagnia aziendale giapponese che opera principalmente nel settore dei materiali, offrendo una vasta gamma di prodotti, tra cui metalli non ferrosi, materiali avanzati, prodotti chimici e componenti elettronici. È uno dei principali produttori di rame e leghe di rame, ma lavora anche altri metalli come alluminio, acciaio, titanio. La gamma dei prodotti comprende fili elettrici, sbarre e tubi di rame. Si rifornisce del minerale da miniere del Cile, Perù e Australia e ha clienti sparsi in Asia, Europa e Nord America.

- **Furukawa Electric**

Società giapponese che lavora in settori come quello elettronico, energetico e automobilistico. Tra i prodotti che fabbrica, per automobili elettriche produce barre e fogli di rame. Ha vari stabilimenti produttivi sparsi in Nord America, Europa, Asia così da poter essere vicino ai clienti finali. In particolare, i fogli di rame vengono prodotti negli stabilimenti di Nikko in Giappone e Furukawa a Taiwan che soddisfano la domanda Asiatica principalmente.

- **Xingye Copper**

Azienda cinese specializzata nella produzione di rame e leghe di rame. È rinomata per la fabbricazione di semilavorati come lamiere, tubi, fili e barre, utilizzati in vari settori industriali, tra cui elettronica, automotive, costruzioni ed energia. La compagnia possiede impianti di produzione principalmente in Cina, dove si occupa della lavorazione del rame, e dispone di una rete di distribuzione che le consente di raggiungere i mercati internazionali, con un focus particolare sui paesi asiatici.

- **CNMC**

China Nonferrous Mining Group Co., Ltd. (dopo chiamata China Nonferrous Metals Group) ha sede in Cina ed è coinvolta nell'estrazione di metalli come rame, zinco, piombo e nichel, gestendo miniere sia in Cina che all'estero. L'attività principale è quella della produzione di semilavorati in metallo e tra la vasta gamma di prodotti fabbrica semilavorati in rame come tubi, lamiere, barre e fili metallici.

- **Valjaonica Bakra Sevojno**

Valjaonica Bakra Sevojno è una delle principali fonderie di rame in Serbia, con l'87% della produzione destinata all'esportazione, principalmente in Europa occidentale. I suoi prodotti semilavorati, come lamiere, nastri, fogli, tubi e fili, sono utilizzati in settori come ingegneria meccanica, industria elettrica, automobilistica e navale.

- **NBM Metals**

NBM Metals ora Aviva Metals ha sede a Houston, Texas, e si specializza nella produzione e distribuzione di ottone, bronzo e leghe di rame speciali. I prodotti in rame costituiscono tubi, barre tonde, cavi e altri ancora personalizzati sulle base dei requisiti dei clienti. Aviva Metals è uno dei principali produttori e distributori negli Stati Uniti, e la sua fonderia ha sede a Lorain, Ohio. Inoltre, l'azienda ha esteso la sua portata internazionale aprendo un magazzino a Tolone, in Francia.

❖ Mercato dei produttori dei fogli di rame

Ecco alcuni dei maggiori produttori di fogli di rame:

- **Chang Chun Group**

È un gruppo cinese che opera in svariati settori come quello automobilistico, medico, e dell'energia. Dal 1987 ha sviluppato tecnologie avanzate per la produzione di fogli di rame, avviando la produzione su larga scala nel 1988. Con impianti a Miaoli, Taiwan, e a Changshu, Cina, offre una gamma completa di fogli di rame per le industrie high-tech. Chang Chun Group si impegna a mantenere una supply chain responsabile, evitando l'acquisto di minerali di conflitto e collaborando con i fornitori per minimizzare i rischi sociali, ambientali e di sicurezza lungo tutta la filiera. Per minerali di conflitto si intendono quei minerali estratti nella Repubblica Democratica del Congo o zone limitrofe, nelle quali ci sono gruppi armati che controllano le miniere e i lavoratori operano in condizioni di sfruttamento.

- **Nuode New Materials Co.**

Nuode New Materials Co., Ltd. è un'importante azienda cinese specializzata nello sviluppo e nella produzione di lamine di rame elettrolitiche e collettori di corrente compositi. È diventata un leader riconosciuto a livello internazionale nella fornitura di lamine di rame per batterie agli ioni di litio. A livello nazionale, Nuode ha stabilito partnership stabili e a lungo termine con i principali attori del settore delle batterie al litio, tra cui CATL, BYD e China New Aviation, assicurandosi una quota di mercato elevata in Cina. Sulla scena globale, l'azienda ha anche stretto alleanze strategiche con rinomate aziende internazionali come LG New Energy, ATL, SKI e Panasonic, aiutandola a conquistare una quota significativa del mercato globale.

- **Furukawa Electric**

Società giapponese che lavora in settori come quello elettronico, energetico e automobilistico. Tra i prodotti che fabbrica, per automobili elettriche produce i fogli di rame. Ha vari stabilimenti produttivi sparsi in Nord America, Europa, Asia così da poter essere vicino ai clienti finali. In particolare, i fogli di rame vengono prodotti negli stabilimenti di Nikko in Giappone e Furukawa a Taiwan che soddisfano la domanda Asiatica principalmente.

- **TongGuan Copper Foil**

Società cinese, sussidiaria di Tongling Nonferrous Metals Group Co., produttrice di fogli di rame per PCB e fogli di rame per batterie al litio. I suoi centri di produzione sono 2, situati entrambi in Cina. Tra i loro clienti figurano noti fornitori nazionali di batterie al litio come CATL, BYD e Guoxuan Hi-Tech.

- **SK Nexilis**

Con sede in Corea del Sud, è un'azienda specializzata nella produzione di batterie secondarie e materiali per display, inclusi laminati di rame e laminati rivestiti di rame flessibile. Ha impianti in Corea ed è in procinto di aprirne uno nuovo in Malesia, e i fogli di rame saranno destinati a batteri per veicoli elettrici in varie località, tra cui Corea del Sud, Malesia, Polonia e Nord America.

- **Jiujiang Defu Technology Co., Ltd.**

È un'impresa high-tech cinese. La sua attività principale è la ricerca e sviluppo, produzione e vendita di fogli di rame elettrolitico. Nel suo pacco prodotti troviamo lamine di rame per circuiti elettronici e per batterie al litio. L'azienda ha stabilito stretti rapporti di collaborazione con clienti come CATL, LG Chem, BYD, Guoxuan Hi-Tech e Shengyi Technology. Punta su una catena di fornitura integrata per garantirgli sicurezza di approvvigionamento, difatti ha un accordo con Baiyin Nonferrous Group per la fornitura di rame.

- **LONDIAN WASON**

È un importante gruppo cinese specializzato nella ricerca, sviluppo e produzione di materiali avanzati per il settore delle nuove energie. Produce fogli di rame per batterie agli ioni di litio, lamine di rame per circuiti stampati e lamine di rame flessibile. I prodotti hanno portato avanti una cooperazione approfondita con i principali produttori di batterie al litio di prima classe al mondo e con produttori di circuiti elettronici di fama internazionale. Tra i maggiori clienti troviamo BYD and China Innovation Aviation.

- **Jiayuan**

È una società con sede in Cina impegnata principalmente nella ricerca, produzione e vendita di fogli di rame super sottili per batterie agli ioni di litio, fogli di rame ultra sottili e fogli di rame elettrolitico per PCB. Il maggiore cliente è CATL con il quale ha stipulato un accordo per la fornitura di 20.000 t di foglio di rame.

- **Jiang Xi Tong bo**

Ha sede a Fuzhou, Cina. I suoi prodotti principali includono il foglio di rame per le batterie al litio e lamine di rame standard. Questi trovano varie applicazioni come nelle batterie di alimentazione dei veicoli a nuova energia, nelle apparecchiature di stoccaggio dell'energia, nei prodotti elettronici, nei laminati rivestiti in rame, nei circuiti stampati e in altri campi. e ha due principali basi di produzione di fogli di rame elettrolitici a Fuzhou: la fabbrica centrale di Tongbo Technology e la sua consociata interamente controllata Jiangxi Shengeng Copper Foil Technology Co., Ltd.

- **Iljin Materials**

Produttore di materiali per batterie sudcoreano, è il secondo produttore di fogli elettrici al mondo dopo il gruppo Chang Chun di Taiwan. è specializzata nello sviluppo di elettronica avanzata. Produce lamine elettriche utilizzate in circuiti stampati (PCB), telefoni cellulari, televisori e batterie al litio. Nell'ottobre 2022, Lotte Chemical ha acquisito una quota di maggioranza dell'azienda. E' stata artefice dell'invenzione di un foglio di rame per gli elettrodi negativo delle batterie, e prende il nome di Electrofoil, ed ha firmato un accordo per la sua fornitura a Samsung SDI. E' anche impegnata nello sviluppo e nell'estrazione di rame, cobalto, zinco e manganese attraverso il Progetto Boleo in Messico.

2.2 Alluminio

L'alluminio è il metallo più abbondante sul nostro pianeta e rappresenta il terzo elemento più comune dopo l'ossigeno e il silicio. La produzione avviene quasi interamente a partire dalla bauxite, un minerale molto diffuso, che si presenta come un'argilla granulosa o una roccia dai colori variabili, tra cui rosa, rosso, marrone e grigio. Attualmente, l'alluminio utilizzato nell'industria si distingue in due categorie principali: l'alluminio primario, prodotto dalla lavorazione della bauxite, e l'alluminio secondario, ottenuto attraverso il recupero e il riciclo dei rottami. È molto richiesto per le sue numerose qualità: l'elevata resistenza alla corrosione, l'ottima conducibilità elettrica, che lo rende ideale per i conduttori ad alto voltaggio, e soprattutto la leggerezza, la sua caratteristica più rilevante. Nell'industria automobilistica è ampiamente utilizzato per la costruzione di strutture e telai delle auto. Tuttavia, nel caso specifico dei veicoli elettrici, l'alluminio svolge un ruolo essenziale anche nelle batterie agli ioni di litio, dove viene utilizzato sotto forma di fogli per i collettori di corrente catodici, ma anche per costituire le custodie dei pacchi batteria. (Colletta, 2024)



Foglio di alluminio

❖ Processo di produzione

Il processo di lavorazione dell'alluminio descritto nella fig. 10 si articola nelle seguenti fasi:

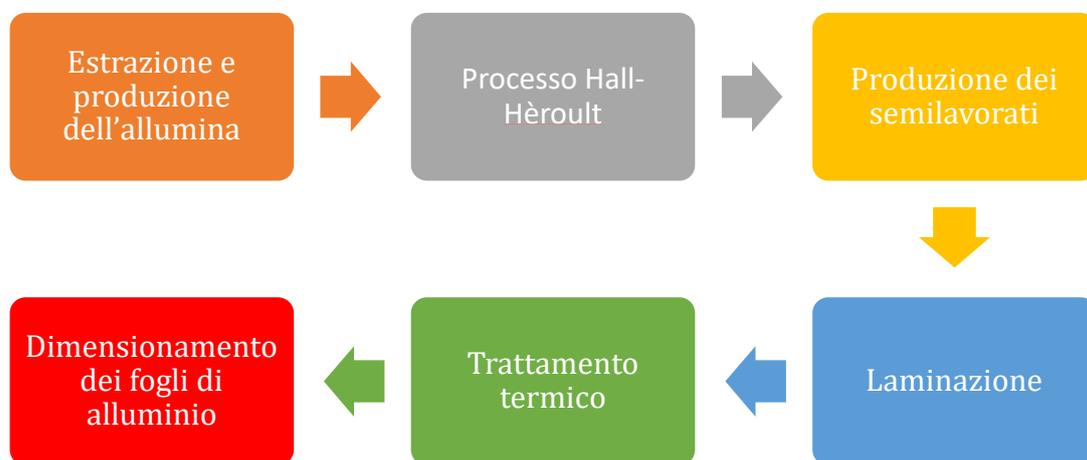


Figura 10: processo di produzione dei fogli di alluminio.

1. Estrazione e produzione dell'allumina

La produzione di alluminio primario inizia con l'estrazione della bauxite, dalla quale viene ricavata l'allumina (ossido di alluminio) tramite il processo Bayer. Questo processo avviene in raffineria e consente di separare l'allumina dalla bauxite, rendendola pronta per le fasi seguenti.

2. Processo Hall-Hèroult

Successivamente, l'allumina viene sottoposta al processo elettrolitico Hall-Hèroult in impianti di riduzione (smelters). In questo processo, l'atomo di alluminio nell'allumina, che è legato all'ossigeno, viene separato mediante elettrolisi. Ciò avviene in un bagno fluorinato a circa 950 °C, attraversato da una corrente elettrica ad alta intensità. L'alluminio fuso che si ottiene viene estratto e colato in stampi.

3. Produzione dei semilavorati

Una volta ottenuto l'alluminio primario, ha inizio la produzione dei semilavorati, che vengono realizzati tramite diverse tecniche, tra cui estrusione, trafilatura, forgiatura e laminazione. In particolare, la laminazione è la tecnica utilizzata per ottenere i fogli di alluminio destinati all'uso nelle batterie agli ioni di litio.

4. Laminazione

Per produrre i fogli di alluminio, si inizia con una prima laminazione a caldo. Durante questa fase, i lingotti ottenuti nella fase precedente vengono riscaldati e fatti passare attraverso rulli per ridurre lo spessore. In seguito, si procede con la laminazione a freddo, che consente di ottenere lo spessore finale desiderato, migliorando allo stesso tempo la resistenza meccanica e la qualità superficiale del materiale.

5. Trattamento termico

Per ottimizzare le caratteristiche del metallo, si eseguono trattamenti termici di ricottura e tempra. Questi trattamenti conferiscono all'alluminio le proprietà richieste, come una maggiore duttilità e resistenza, rendendolo adatto per applicazioni specifiche.

6. Dimensionamento dei fogli di alluminio

Infine, i fogli laminati vengono tagliati nelle dimensioni necessarie e rifiniti per eliminare eventuali impurità superficiali. Questo processo garantisce una conducibilità ottimale per l'uso nei catodi, rendendo l'alluminio pronto per le applicazioni industriali desiderate. (Temponi Trattamenti Termici, 2024)

❖ Supply chain

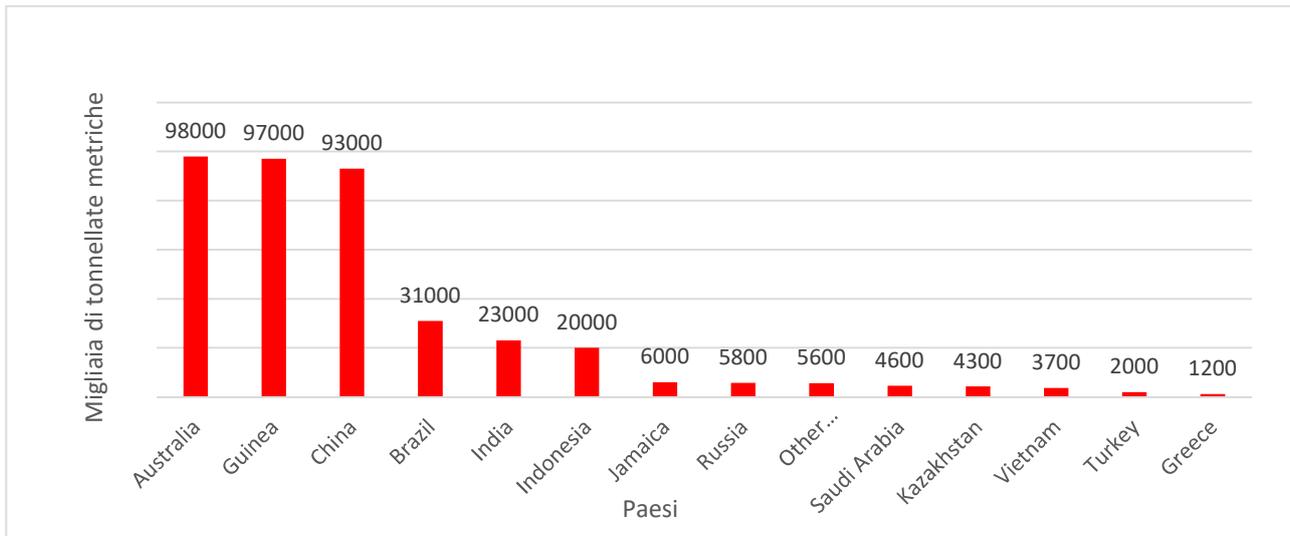


Figura 11: estrazione mineraria di bauxite nel 2023. Fonte dati: (USGS, 2024)

Come mostrato dal grafico della figura 11, a monte della filiera i paesi che primeggiano sono l'Australia, la Guinea e la Cina, con una quota del 72% dell'estrazione totale del 2023, relativamente con 98, 97 e 93 milioni di tonnellate estratte.

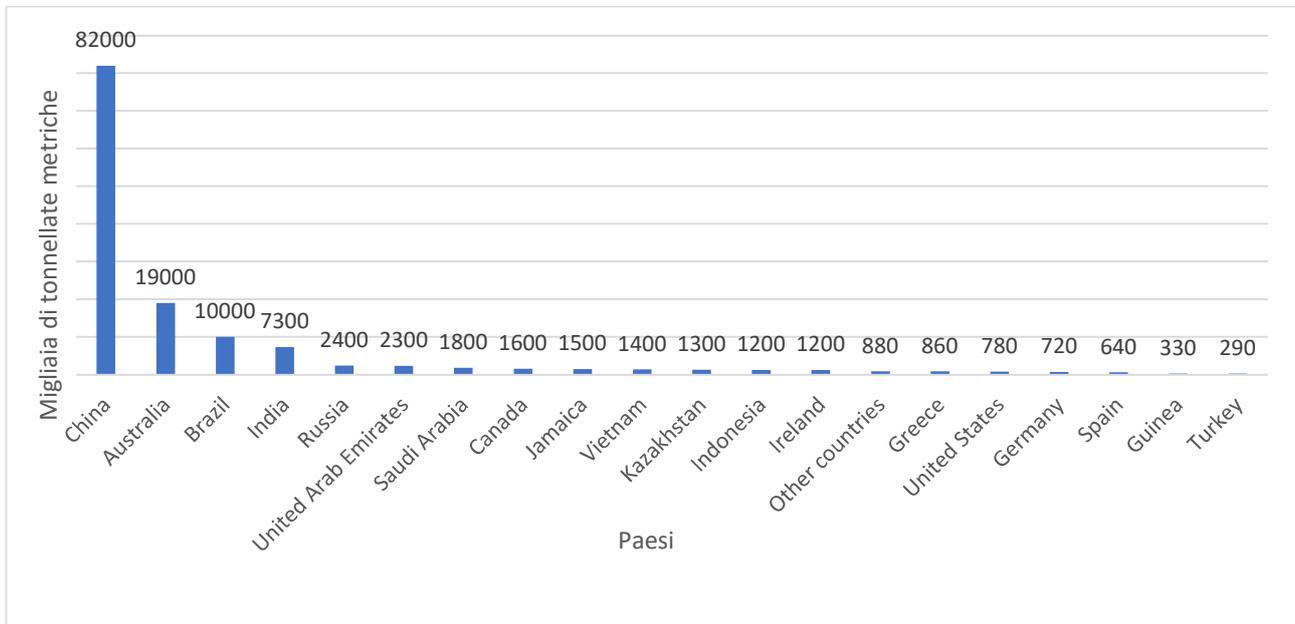


Figura 12: raffinazione di bauxite. Fonte dati: (USGS, 2024)

Scendendo verso valle la fig. 12 ci indica che la maggior parte della bauxite viene trasportata in Cina, che è responsabile della raffinazione del 60% a livello mondiale, con 82 milioni di allumina prodotta, facendo emergere delle criticità nella SC. Seguono altri paesi, tra cui l'Australia, seppur con un notevole distacco rispetto alla Cina.

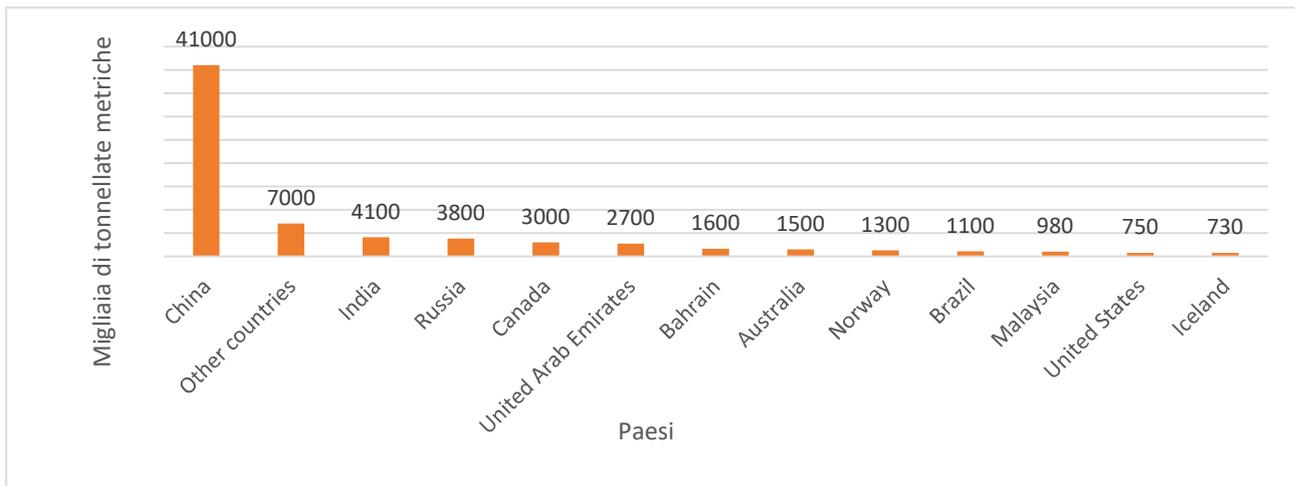


Figura 13: produzione di alluminio nel 2023. Fonte dati (USGS, 2024)

La situazione resta inalterata a valle della catena del valore (Fig.13), in quanto la Cina si occupa della produzione del 60% dell'alluminio, i cui semilavorati vengono destinati a numerose aziende impegnate nella realizzazione di prodotti finiti, tra cui spiccano, per l'appunto, quelle che producono fogli di alluminio usati come elemento catodico per le batterie agli ioni di litio.

Anche la supply chain dell'alluminio secondario ha una forte rilevanza, con l'Europa che detiene il primato nella produzione mondiale, seguita dagli Stati Uniti e dal Giappone. L'Italia è il primo produttore europeo di alluminio riciclato, sia per quantità prodotta sia per il volume di rottame impiegato. Nel 2021, la produzione nazionale di alluminio secondario ha raggiunto i massimi storici, toccando quota 954 mila tonnellate. (Ansa, 2023)

Analizzando l'ultima parte, e cioè quella della produzione dei fogli di alluminio, derivanti dalla lavorazione delle barre di alluminio, si evince che la regione Asia-Pacifico detiene la quota di mercato predominante. Ciò favorito ovviamente dalla domanda legata alla presenza di alcuni dei maggiori produttori di batterie del mondo, come quelli in Cina, Giappone e Corea del Sud. Nel frattempo, anche Nord America ed Europa stanno vivendo una crescita significativa in questo settore, grazie alla spinta verso la transizione energetica. Il mercato, comunque, nel suo complesso non risulta concentrato; infatti, la possibilità di competere diversificando i fogli per quanto riguarda caratteristiche come la lega dell'alluminio e lo spessore rende possibile la coesistenza di molte imprese.

Dunque, come visto, la supply chain dell'alluminio, a causa delle numerose fasi che ne costituiscono la produzione, risulta frammentata, con gli attori della filiera dislocati in diverse località geografiche. Inoltre, poiché i processi di produzione dell'alluminio incidono significativamente sulle emissioni globali di CO₂, la sua catena di approvvigionamento potrebbe subire un cambiamento degli attori, favorendo coloro che utilizzano energia a basse emissioni di carbonio, in conformità con le norme imposte per la tutela ambientale.

❖ Mercato

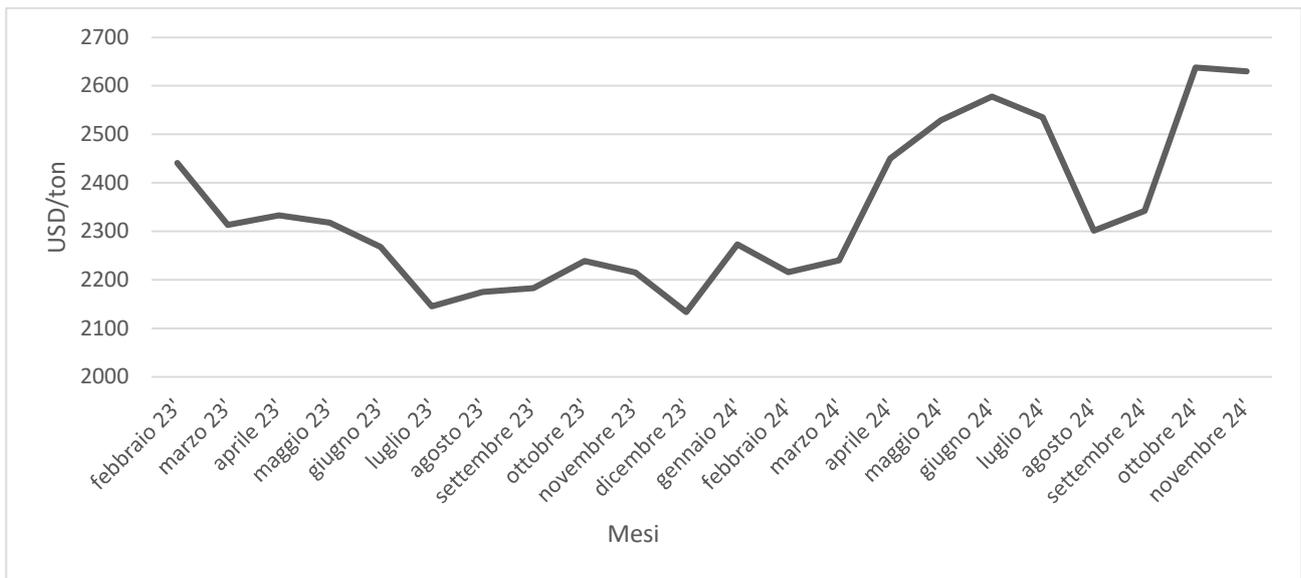


Figura 14: andamento del prezzo dell'alluminio. Fonte dati: (TRADING ECONOMICS, 2024)

La fi. 14 mostra che il mercato dell'alluminio rimane caratterizzato da una significativa volatilità, ma con prospettive di crescita positive, spinto dall'esigenza di soluzioni più sostenibili, in cui l'alluminio gioca un ruolo centrale. L'Asia-Pacifico domina questo settore, spinta da urbanizzazione, infrastrutture e produzione automobilistica, in particolare in Cina e India. Europa e Nord America seguono, con una domanda crescente legata alla transizione verso veicoli elettrici e alle esigenze dell'industria aerospaziale.

Gli eventi geopolitici stanno però influenzando i prezzi globali. Ad esempio, la prima fonte di incertezza è rappresentata proprio dalla Cina, la quale, dato il ruolo di primo piano che ha nella produzione di alluminio, influenza il prezzo in maniera considerevole. Il paese affronta la sfida dell'aumento dei costi produttivi legati alla riduzione delle emissioni di carbonio. Ciò sarà determinante per mantenere la leadership di mercato e garantire un equilibrio nell'offerta, evitando nuove impennate nei prezzi dovute a eventuali carenze. (De Pieri, 2024)

Inoltre, la Cina si approvvigiona di bauxite dalla Guinea, che è uno dei maggiori produttori come visto, e per questo motivo un'esplosione avvenuta a dicembre 2023 in un terminale petrolifero nella capitale del paese provocando interruzioni nell'alimentazione elettrica, ha generato timori di carenze di bauxite spingendo al rialzo i prezzi di alluminio, allumina e bauxite.

In aggiunta a ciò, a fine gennaio, il prezzo dell'alluminio è cresciuto a causa delle crescenti preoccupazioni per una possibile scarsità di offerta dovuta alle sanzioni dell'UE sull'alluminio russo, a cui si è aggiunto il divieto del 13 aprile anche da parte della Gran Bretagna. Questo ha inevitabilmente spinto il prezzo dell'alluminio al rialzo nel breve periodo, raggiungendo i 2.550 \$/ton nelle quotazioni del LME. Nonostante ciò, l'alluminio russo ha trovato sbocco nei mercati asiatici, in particolare in Cina, a prezzi scontati, garantendo un equilibrio globale nell'offerta.

In parallelo, la produzione di alluminio nell'UE continua a diminuire, rappresentando ormai solo l'11% della domanda complessiva, a causa degli alti costi energetici e di manodopera, contribuendo a una riduzione dell'offerta e a un conseguente aumento dei prezzi, anche se con l'offerta di alluminio secondario, in cui l'Europa primeggia, questo effetto risulta leggermente smorzato. (Redaktion, 2024)

A novembre il prezzo è salito a 2600 USD/ ton dopo la rielezione di Trump come presidente degli Stati Uniti, in quanto seguendo il modello di provvedimenti già adottati in passato, la politica economica, tradizionalmente orientata verso misure protezionistiche e a sostegno dell'industria nazionale, potrebbe portare all'introduzione di nuovi dazi sulle importazioni di alluminio. Questa strategia potrebbe influire sul prezzo dell'alluminio con un duplice effetto: da un lato, l'esclusione dei produttori internazionali dal mercato statunitense ridurrebbe l'offerta, mentre dall'altro, eventuali incentivi all'industria manifatturiera negli Stati Uniti potrebbero aumentare la domanda interna. Data l'importanza del mercato statunitense, tali dinamiche potrebbero avere ripercussioni globali, esercitando pressioni sui prezzi e creando possibili squilibri tra domanda e offerta.

Per di più, la nuova direzione politica potrebbe portare ad un innalzamento delle tensioni commerciali con il maggiore produttore mondiale di alluminio, cioè la Cina, che condurrebbe a effetti significativi sui prezzi, oltre che sulla catena di produzione e distribuzione dell'alluminio. (De Pieri, 2024)

❖ Produttori di barre di alluminio

Ecco un elenco dei maggiori produttori di barre di alluminio:

- **Hindalco Industries (Novelis)**

Hindalco, società indiana che fa parte del gruppo Aditya Birla Group, ha acquisito Novelis che si occupa della produzione dell'alluminio e che le ha permesso di espandere la propria presenza a valle nei mercati dell'Asia, Nord America e Europa. Hindalco è uno dei maggiori produttori integrati di alluminio nel continente asiatico, ha una presenza su scala nazionale in India, con operazioni che coprono l'intera filiera produttiva, dall'estrazione della bauxite, raffinazione dell'allumina, fusione dell'alluminio fino alla produzione di prodotti a valore aggiunto come laminati, estrusioni e materiali riciclati.

- **Alcoa Corporation**

Ha sede a Pittsburgh, Pennsylvania, USA ed è uno dei maggiori produttori di prodotti in alluminio presenti sul mercato. È integrata verticalmente, occupandosi dell'estrazione e vendita partendo dalla bauxite per poi passare all'allumina, e per finire, di prodotti come billette, barre e fogli d'alluminio, tutto mantenendo basse emissioni di carbonio. Estrae bauxite da miniere in Australia, Brasile e Guinea e impianti di raffinazione negli Stati Uniti, Brasile, Spagna e Australia.

- **UACJ**

Produttore giapponese di alluminio con sede a Tokyo. Per i componenti delle batterie agli ioni di litio produce piastre e lamiera. Oltre al settore automobilistico, essi sono destinati ai settori aerospaziale, elettronico ed edile. Le fabbriche sono dislocate in Giappone, ma anche in Thailandia, Cina e USA.

- **Norsk Hydro**

Azienda che ha sede ad Oslo, Norvegia. È integrata verticalmente, infatti gestisce tutte le fasi che vanno dall'estrazione della bauxite fino alla produzione dei prodotti in alluminio, ma anche del suo riciclo; infatti, è un'azienda che si interessa molto della riduzione delle emissioni di Co2, usando energia che deriva da fonti rinnovabili. Le miniere da cui estrae la bauxite sono in Brasile in cui possiede anche un impianto per la produzione dell'allumina. Gli stabilimenti per la produzione di semilavorati in alluminio sono situati in Europa, Stati Uniti e Asia.

- **RUSAL**

RUSAL, con sede a Mosca, è un'azienda leader nel settore dell'alluminio globale e il più grande produttore mondiale di alluminio a basse emissioni di carbonio. L'azienda ha una propria base di risorse e realizza l'intero ciclo produttivo, dall'estrazione della bauxite alla produzione di prodotti ad alto valore aggiunto. Oltre il 90% dell'alluminio dell'azienda è prodotto con energia da fonti rinnovabili. I prodotti principali riguardano la bauxite, allumina ma anche semilavorati in alluminio quali billette e lastre di alluminio.

- **Liaoning Zhongwang Group**

Gruppo cinese, che produce tra la vasta gamma di prodotti in alluminio semilavorati come piastre e fogli, destinati ai settori automobilistico, navale e aerospaziale. La sua clientela è distribuita in Europa, Nord America e Asia. Inoltre, pongono la sostenibilità ambientale come uno dei pilastri fondamentali dei loro processi produttivi.

- **Guangdong Xingfa Aluminium**

È un fornitore cinese con una vasta gamma di prodotti in alluminio destinati a diversi settori, tra cui l'edilizia, l'automotive, i trasporti ferroviari, l'aerospaziale e l'elettronica. Tra i numerosi prodotti che fabbrica figurano semilavorati quali profili estrusi, tubi e barre. Gli impianti di produzione sono situati in Cina e la clientela abbraccia il continente asiatico, europeo, nordamericano e africano.

- **China Hongqiao Group**

Gruppo con sede in Cina, gestisce tutte le fasi che vanno dall'estrazione della bauxite alla produzione dei semilavorati in alluminio. Si approvvigiona di bauxite principalmente dalla Guinea, mentre e gli impianti produttivi sono concentrati in Cina. La rete di distribuzione internazionale permette di raggiungere i mercati in Asia, Europa, Nord America e Africa.

- **Kaiser Aluminum**

Società americana, ha sede a Franklin, Tennessee. Gestisce 13 stabilimenti di produzione in tutto il Nord America. Questi stabilimenti producono un'ampia gamma di semilavorati, tra i quali troviamo piastre, fogli, barre, tubi, pezzi forgiati e fili. I suoi clienti variano dal settore dell'automotive, a quello dell'aerospazio, del packaging e industriale.

- **Constellium**

Ha sede a Parigi, Francia, e lavora alluminio destinato a settori come quelli dell'automotive, dell'edilizia e del packaging. Gli impianti produttivi sono localizzati in Europa in particolare in Francia, Germania, Svizzera e Paesi Bassi, ma anche in Nord America e recentemente ha stretto delle partnership con società Asiatiche per soddisfare la domanda che è in aumento. Per il settore dell'automotive produce lamiere e componenti strutturali per i telai delle auto.

- **CHALCO**

Società cinese, opera in un'ampia gamma di settori, tra cui estrazione mineraria, raffinazione, fusione e produzione di prodotti in alluminio. Tra la vasta gamma di semilavorati in alluminio possiamo trovare: fogli di alluminio, sbarre e piastre. Serve prodotti per svariate industrie, come quella aerospaziale, automobilistica, energetica e militare. Estrae bauxite da una grande miniera in Guinea, che verrà poi lavorata negli impianti di raffinazione situati in varie località in Cina.

❖ Produttori di fogli d'alluminio

Ecco alcuni dei maggiori produttori di fogli di alluminio per i componenti delle batterie agli ioni di litio:

- **Jiangsu Dingsheng New Materials Joint-Stock Co., Ltd.**

Azienda cinese, si trova nella città di Zhenjiang, provincia di Jiangsu. Si occupa della produzione e vendita di vari tipi di lastre, nastri, fogli e leghe di alluminio e dei loro prodotti derivati. Proprio i fogli di alluminio sono destinati alla composizione del catodo per le batterie agli ioni di litio, i quali la fanno posizionare come leader del settore. I clienti dei fogli per batterie coprono grandi produttori di batterie al litio nazionali ed esteri come CATL, ATL, BYD, Guoxuan Hi-Tech, SAMSUNG, LG e così via. I prodotti vengono esportati in oltre 60 paesi e regioni, tra cui Nord America, Europa, Sud-Est asiatico e Medio Oriente. In Italia possiede una controllata, EUROPEAN METALS SRL, che produce annualmente 30.000 tonnellate di fogli di alluminio, ampiamente impiegati nei settori dell'imballaggio e delle batterie al litio.

- **North China Aluminium**

North China Aluminium Co., Ltd. si trova a Zhuozhou, a 60 chilometri a sud di Pechino. È leader nella produzione e lavorazione di alluminio, con una particolare specializzazione in fogli e nastri di alluminio. I suoi prodotti trovano impiego in diversi settori, tra cui quello dell'imballaggio, delle batterie al litio ma anche per i settori dell'elettronica e dell'aerospazio. Fornisce produttori di batterie presenti in Cina ma anche in Giappone, Corea del Sud, Germania, Francia, Stati Uniti e Canada.

- **LOTTE Aluminium**

Con sede in Corea, produce una varietà di prodotti, tra cui fogli di alluminio per gli elettrodi negativi, materiali di imballaggio flessibili e lattine. La produzione avviene sia in Corea che all'estero, negli Stati Uniti, in Ungheria e in Indonesia.

- **Xiashun Holdings**

Xiamen Xia Shun Aluminium Foil Co., Ltd. è stata fondata nel 1988 e ha sede a Xiamen, una città portuale sulla costa sud-orientale della Cina. È uno dei principali produttori specializzati in fogli di alluminio ad alta precisione, con una capacità produttiva annuale di 120.000 tonnellate. Questi sono destinati ad applicazioni diverse quali gli elettrodi negativi per batterie per auto elettriche e stazioni 5G. Produce anche pellicole per imballaggio e fogli di alluminio grezzo.

- **Shandong Nanshan Aluminum Co., Ltd.**

Azienda cinese, con sede a Longkou, che è adiacente all'area portuale, il che facilita il trasporto dei materiali grezzi (come la bauxite e l'allumina importate) e dei prodotti finiti destinati all'esportazione. Opera in vari settori, come quello automobilistico, del trasporto ferroviario, navale ed energetico. Ha una catena di produzione integrata, che parte dalla lavorazione e raffinazione della bauxite, con la produzione a monte di lingotti di alluminio che poi verranno trasformate nelle successive fasi fino ad arrivare alla produzione dei prodotti finiti in alluminio, tra cui troviamo fogli per batterie elettriche, laminati, piastre in alluminio etc.

- **Yunnan Aluminium**

Azienda cinese che è entrata a far parte del Gruppo Chinalco nel 2019. È un'azienda produttrice di alluminio elettrolitico, lingotti di alluminio, allumina e altri materiali in alluminio. Si contraddistingue per l'interesse verso la sostenibilità, infatti i suoi impianti sono alimentati attraverso energia idroelettrica che permette ad un basso impatto ambientale anche bassi costi di produzione. È integrata verticalmente, infatti possiede miniere di bauxite nella regione dello Yunnan, che poi verrà lavorata nei vicini impianti fino alla produzione dei prodotti finiti.

- **Dongwon Systems**

Ha sede a Seul, Corea del Sud, opera in svariati settori come quello degli imballaggi, ma anche della produzione di lattine, film industriali e dell'alluminio. Proprio in quest'ultimo produce prodotti come lamine catodiche per batterie agli ioni di litio.

- **Symetal**

Produttore europeo con sede in Grecia. Offre una svariata gamma di prodotti in alluminio che variano dagli imballaggi farmaceutici, ai fogli di alluminio per sigarette fino ai fogli di alluminio per le custodie delle batterie per auto elettriche. Symetal possiede due stabilimenti di produzione all'avanguardia a Oinofyta, in Viotia e Mandra, in Attica, che si distinguono per la loro integrazione verticale e flessibilità. L'impianto di laminazione (Oinofyta) è quello che è specializzato nella produzione di fogli di alluminio per batterie ricaricabili per autoveicoli e varie applicazioni tecniche.

- **Zhejiang Yongjie Aluminium Co., Ltd**

È un'impresa high-tech cinese chiave, focalizzata su prodotti in lamiere e fogli in lega di alluminio ad alte prestazioni e alta precisione. I prodotti sono utilizzati principalmente nelle batterie al litio, nei veicoli leggeri, negli elettrodomestici e nei nuovi materiali da costruzione e in altri campi. Oltre a fornire produttori di batterie cinesi ha reti di fornitura che si espandono anche in Europa e Stati Uniti.

2.3 Grafite

La grafite è un minerale critico per la transizione energetica e svolge un ruolo chiave nello sviluppo di soluzioni tecnologiche sostenibili. È una forma naturale di carbonio utilizzata in numerose applicazioni industriali, tra cui la produzione di diamanti sintetici, batterie agli ioni di litio per veicoli elettrici, matite, lubrificanti e substrati per semiconduttori.



Grafite in polvere

Rientra nell'elenco delle materie prime critiche

inserite dall'Unione Europea, in quanto risulta essere un materiale indispensabile per svariati usi come visto, specialmente per le batterie nelle quali costituisce il 35% del peso dei materiali necessari. Dato che la produzione per adesso è in mano a pochi paesi, l'Europa vuole garantirsi un approvvigionamento sicuro per sostenere l'efficienza della supply chain. La grafite gode di stabilità, è un buon conduttore elettrico e può essere riciclato. Si divide in due tipologie principali: naturale e sintetica. La grafite naturale si ottiene dall'estrazione di giacimenti minerari e garantisce una maggiore capacità a costi ridotti, mentre quella sintetica è prodotta dal trattamento del coke di petrolio e offre un elevato numero di cicli vita e tempi di ricarica ridotti alle batterie.

❖ Processo di produzione

Come annunciato, esistono due tipi di grafite: quella naturale e quella artificiale.

Il processo di lavorazione della grafite naturale fino alla fabbricazione di quella grado batteria si può suddividere in 6 fasi principali visibili nella fig. 15 sottostante:

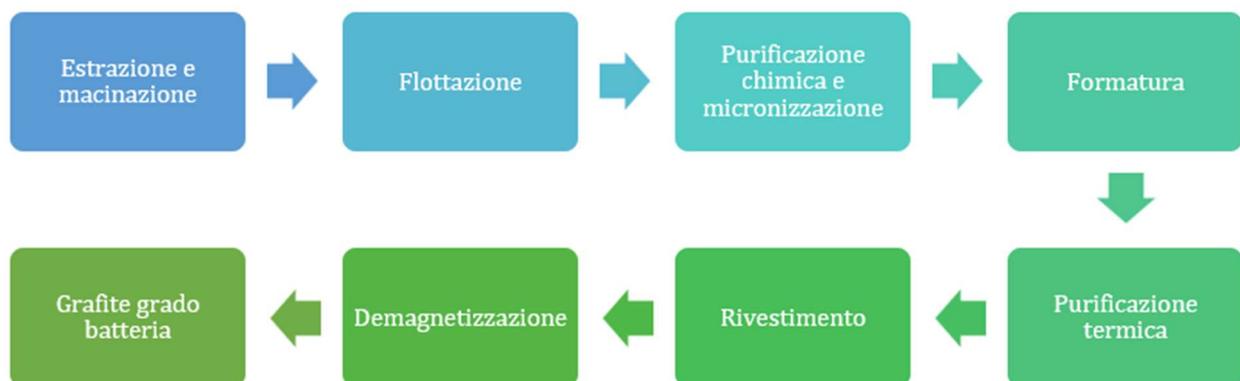


Figura 15: processo di produzione della grafite.

1) Estrazione e macinazione

La prima fase comprende l'estrazione mineraria e il processo di macinazione in cui la grafite estratta viene frantumata e ridotta in particelle più fini. La macinazione è fondamentale per liberare i cristalli di grafite dai minerali associati.

2) **Flottazione**

Dopo la macinazione, si procede con la flottazione, un processo chimico-fisico utilizzato per separare la grafite dagli altri minerali. La grafite, grazie alla sua naturale idrofobicità, si attacca alle bolle d'aria prodotte in una soluzione acquosa contenente reagenti chimici specifici. Durante questo processo, la grafite sale in superficie, formando una schiuma che viene raccolta, mentre i minerali indesiderati rimangono sul fondo.

3) **Purificazione chimica e micronizzazione**

La purificazione chimica e la micronizzazione sono processi essenziali per preparare la grafite alle applicazioni avanzate, come quelle nelle batterie.

Il concentrato di grafite viene prima sottoposto a trattamento chimico, cioè un trattamento con soluzioni alcaline e acide per rimuovere le impurità, raggiungendo un contenuto di carbonio pari a circa il 99%. Successivamente, la grafite purificata viene micronizzata, ovvero macinata in particelle fini, per ottenere le dimensioni specifiche richieste.

4) **Formatura**

Durante la formatura, le particelle di grafite vengono lavorate per assumere una forma sferica, un processo noto come sferonizzazione. Questo trattamento aumenta la densità di riempimento e migliora la conduttività elettrica, ottimizzando le prestazioni elettrochimiche del materiale. Il prodotto finale è la grafite sferica, utilizzata specificamente negli anodi delle LIB.

5) **Purificazione termica**

La grafite sferica viene messa in un forno ad alta temperatura, in cui tutte le impurità rimanenti vengono vaporizzate, raggiungendo un contenuto di carbonio maggiore del 99%.

6) **Rivestimento**

La sesta fase è il rivestimento della grafite del precedente passaggio con uno strato di carbonio per migliorarne proprietà quali la conducibilità e il numero di cicli di ricarica.

7) **Demagnetizzazione**

Si arriva dunque all'ultimo passaggio rappresentato dalla demagnetizzazione, in cui il materiale viene riportato al suo stato non magnetico.

La grafite artificiale, invece, viene prodotta dal trattamento ad alte temperature del coke di petrolio.
(Eppers, 2023)

❖ Supply chain

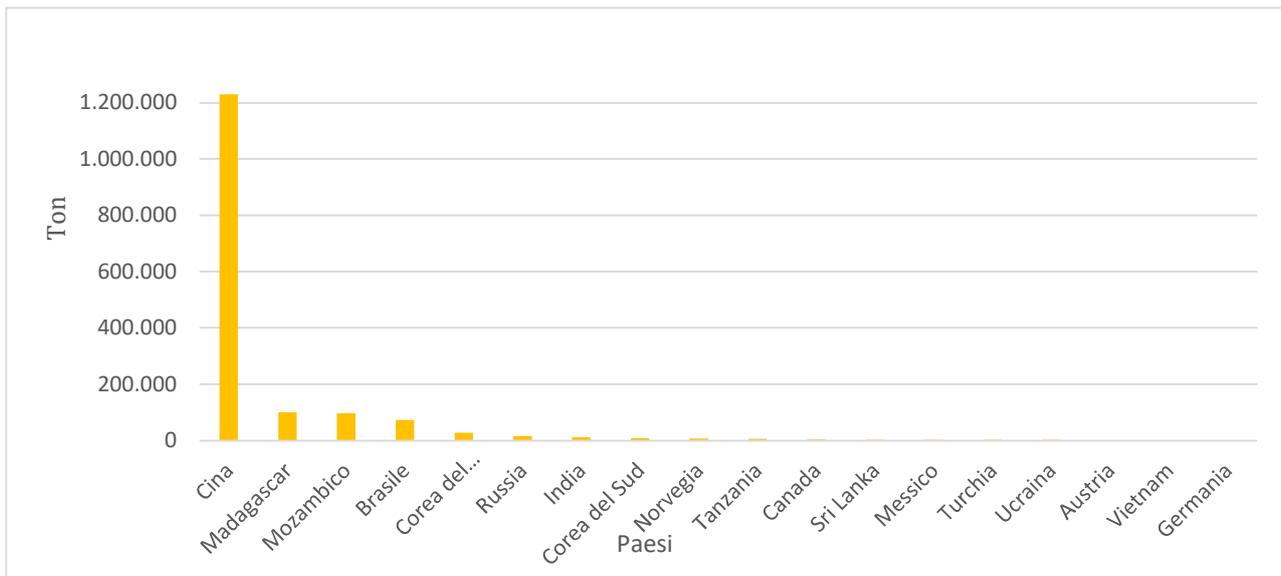


Figura 16: distribuzione della produzione mineraria di grafite naturale nel 2023. Fonte dati: (USGS, 2024)

Dalla fig. 16 si evince che la Cina esercita quasi un monopolio controllando il 78% della produzione globale di grafite e quasi il 99% della sua raffinazione. Inoltre, circa il 60% della produzione di anodi in grafite naturale e il 90% di quelli in grafite sintetica proviene da questo paese. (Amrish Ritoe, 2022)

Oltre alla Cina, tra i paesi che estraggono più grafite ci sono in ordine: il Madagascar, il Mozambico e il Brasile, e con un maggiore distacco la Russia, l'India e la Corea del Nord. (USGS, 2024)

L'Europa rappresenta solamente il 3% della produzione globale di grafite naturale. L'Ucraina è il principale produttore nel continente, contribuendo a circa la metà della produzione europea. A seguire, la Norvegia fornisce il 38%, mentre la Turchia contribuisce con l'8%. Germania e Austria, invece, producono poco meno che l'1% ciascuna. A causa di ciò, attualmente l'UE importa 100.000 tonnellate di grafite naturale all'anno, prevalentemente dalla Cina, dalla Tanzania e dal Mozambico. Tuttavia, con le leggi che saranno discusse nel paragrafo successivo, emanate a sostegno di un'autosufficienza maggiore, la situazione è destinata a migliorare con l'apertura di miniere in Repubblica Ceca, Finlandia oltre che con l'ampliamento di quelle esistenti nei paesi già citati. (ECGA, 2024) (SFA, 2024)

Anche in America la produzione di grafite è in evoluzione: nuovi progetti minerari stanno nascendo in Alaska e in Alabama. Inoltre, per quanto riguarda la produzione di anodi, la società Syrah Resources espanderà il suo impianto in Luisiana, alimentandolo con grafite proveniente dalla miniera di Balama, in Mozambico. Nel Nord America, il Canada si distingue per le sue riserve di grafite, che ammontano a circa 5,7 milioni di tonnellate, concentrate principalmente nella regione del Québec. Tra le miniere più significative si trova quella di Lac-des-Iles; il Paese ospita anche il più grande impianto di produzioni anodi del Nord America, situato a Baie-Comeau, Québec, che raffina la grafite estratta dalla miniera di Lac Guéret. (SFA, 2024) (Oguz, 2023)

❖ Mercato

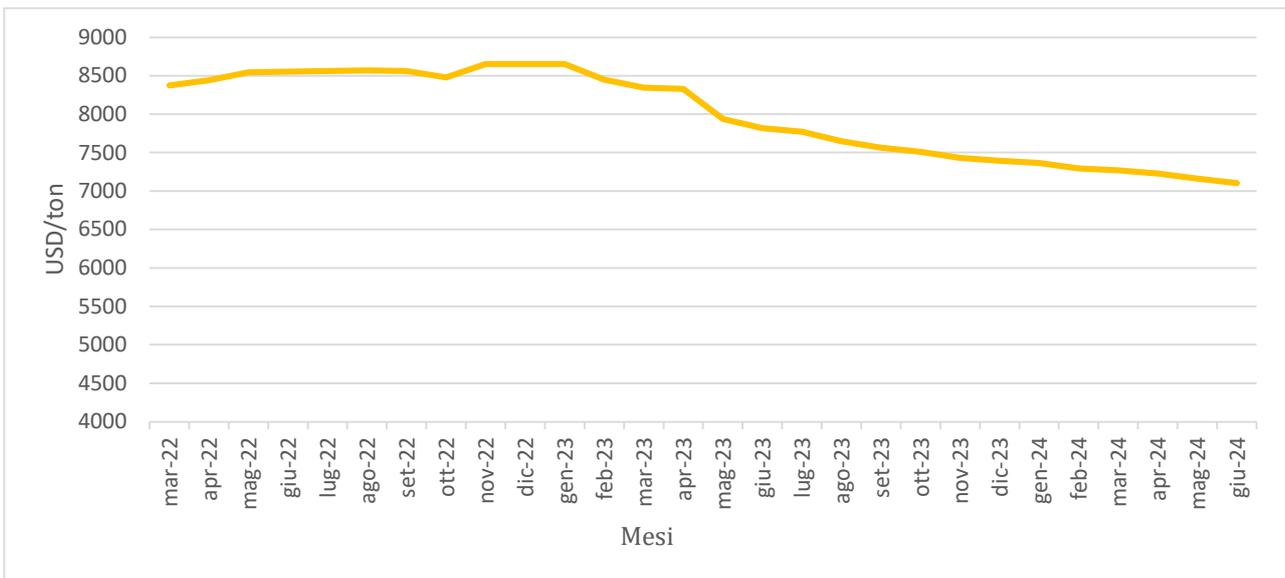


Figura 17: andamento del prezzo della grafite naturale. Fonte dati: (SFA, 2024)

Si prevede che la domanda globale di grafite possa aumentare fino al 500% entro il 2050 rispetto ai livelli del 2018. I settori nei quali la grafite è maggiormente impiegata sono quello delle batterie agli ioni di litio e quello della produzione di acciaio, nei quali funge da elettrodo per i forni ad arco elettrico. (Amrish Ritoe, 2022)

Il mercato di questo minerale è concentrato, caratterizzato, tra le poche grandi società, da una quota significativa di società produttrici cinesi, avvantaggiate dai numerosi giacimenti del territorio. Questo crea problemi di reperibilità, così come per altre materie prime critiche, e potrebbe far aumentare i costi in un contesto di crescente domanda. È comunque un mercato dinamico, soggetto a cambiamenti futuri; infatti, per ridurre la dipendenza dalla Cina nella fornitura di materiali critici tra cui la grafite, molti Paesi, sia in Asia che in Occidente, stanno adottando strategie diversificate e formando nuove partnership. La dominanza cinese, che interessa la grafite ma anche altri minerali critici, come preannunciato, rappresenta una sfida significativa, in particolare per economie come l'UE e gli Stati Uniti. Fare affidamento su un singolo paese per un materiale cruciale per le tecnologie energetiche pulite e altre industrie strategiche comporta rischi notevoli per la loro catena di approvvigionamento. Infatti, la Cina potrebbe restringere le esportazioni di grafite lavorata per motivi geopolitici o per soddisfare il proprio fabbisogno interno, escludendo così l'accesso agli altri paesi; a conferma di questa preoccupazione, nell'ottobre 2023, la Cina ha annunciato nuove restrizioni all'esportazione di alcuni beni, tra cui la grafite sferica, fondamentale sia per la produzione di grafite naturale che artificiale per le LIB. Queste limitazioni, in vigore dal 1° dicembre 2023, richiedono che gli acquirenti esteri di grafite siano muniti di licenze specifiche per poter importare il materiale. (USGS, 2024)

L'Europa nel 2023 ha emanato il "Critical Raw Materials Act" per salvaguardare il rifornimento di materie prime critiche. Per questo motivo, ad esempio in Germania si stanno facendo ricerche sia sull'utilizzo della grafite che per la sua estrazione, così da far nascere nuovi impianti estrattivi e

produttivi di batterie per i veicoli elettrici. Esempio ne è l'azienda con sede a Norimberga, Westwater, la quale ha avviato il primo impianto pilota in Germania, progettato per produrre oltre 10 tonnellate di grafite purificata utilizzando metodi ecologici. Questa grafite sarà destinata alle batterie per veicoli elettrici (EV), contribuendo a promuovere pratiche sostenibili nel settore della mobilità elettrica. Anche gli Stati Uniti muovono verso incentivi per accrescere la produzione di grafite, con l'emanazione dell'"Inflation Reduction Act" nel 2022, che si propone di sviluppare impianti per la lavorazione del minerale in Georgia, Tennessee e Alaska. Volgendo uno sguardo agli altri paesi, in Africa i maggiori produttori di grafite sono il Madagascar e il Mozambico, rispettivamente al secondo e terzo posto nel mondo, anche se si prevede che la Tanzania aumenterà la propria produzione nel prossimo quinquennio. In Asia, spiccano la Corea del Nord e la Corea del Sud dopo la Cina. Anche l'India sta acquisendo un ruolo sempre più rilevante, in particolar modo proprio nella produzione di elettrodi di grafite. (De Martini, 2023)

La Cina, grazie al vantaggio competitivo acquisito, avendo anticipato di almeno 20 anni gli altri paesi, è in grado di produrre a costi vantaggiosi sfruttando know-how ed economie di scala che si basano soprattutto sul soddisfacimento della domanda interna. Questo comporta a sua volta prezzi di mercato più competitivi rispetto a quelli che ad esempio il mercato nordamericano è capace di praticare dato che è in una fase di crescita e non è maturo come quello cinese. (Silva, 2023)

Si prevede che si potrà assistere ad un prezzo tra il 30% e il 50% superiore rispetto a quello cinese, inoltre, le norme in termini di impatto ambientale e le autorizzazioni che i paesi occidentali devono rispettare, al contrario delle società cinesi, incidono sul divario di prezzo.

In più, nel mercato cinese ultimamente il prezzo della grafite è sceso, ciò legato ai tagli del governo sulle sovvenzioni destinate ai veicoli elettrici, causandone la riduzione della domanda, spiegando l'andamento di prezzo della figura 17. Inoltre, gli Stati Uniti, per favorire la vendita di quella prodotta internamente, hanno imposto un incremento del 25% del prezzo su quella importata dalla Cina, per questo. (SFA, 2024)

L'industria cinese della grafite potrebbe incontrare ulteriori difficoltà, visto che i consumatori richiedono una catena di approvvigionamento delle batterie sempre più trasparente e sostenibile. Dunque, il prezzo più elevato pagato per acquistarla da industrie dell'Occidente, che rispettano l'ambiente e tutti gli altri protocolli sulla sicurezza, può essere giustificato da questi fattori positivi. Comunque, il costo di grafite sul pacco batteria incide di circa il 9% e quindi anche un prezzo maggiore rispetto a quello praticato dai cinesi comporterebbe un danno minore in termini economici. (Silva, 2023)

Palando del prezzo in termini concreti, si stima che il prezzo della grafite per batterie in Nord America si attesterà tra 8.707 e 10.874 dollari per tonnellata durante l'intero sviluppo del suo progetto integrato di grafite in Québec. (Silva, 2023). A dicembre 2024, invece, la grafite naturale di alto grado per le batterie nel mercato cinese viene venduta a circa 6.500 dollari per tonnellata, il 12% in meno rispetto allo stesso periodo dello scorso anno. (shanghai metals market, s.d.)

❖ Produttori di grafite grado batteria

- **Asbury Carbons**

Azienda Americana nata nel New Jersey e che si è espansa in varie parti dell'America, come in California e Pennsylvania fino a possedere centri produttivi in Canada, Messico e Paesi Bassi. Proprio questa sua dislocazione geografica gli permette di essere vicino, tra la svariata clientela, ai produttori di batterie elettriche come fornitore di anodi, potendo effettuare spedizioni da strutture situate in Nord America, Cina e Messico e da magazzini centralizzati in Europa e Asia; quindi, grazie a questa ampia rete di centri di spedizione è in grado di garantire bassi costi di trasporto per i suoi prodotti a base di grafite. Il carbone che raffina per produrre grafite in varie forme e concentrazioni da quella naturale a quella sintetica deriva da miniere che ha acquisito grazie a partnership o joint venture, come quella in Messico, Grafiteria de Sonora, oppure la Grafitos Mexicanos, la più grande miniera di grafite del paese, fino a quella del Quebec in Canada. Tra le aziende a cui fornisce anodi per batterie agli ioni di litio troviamo LG ES.

- **BTR New Energy Material Ltd**

BTR New Material Group Co. è una società che produce materiali anodici e che ha raggiunto nel 2023 una capacità produttiva di 477.500 t/anno con un incremento di circa il 46% rispetto al 2022. Ha numerosi impianti in Cina (tra i più importanti quello di Yunnan e Shanxi) che sono in continua espansione. Inoltre, sta sviluppando la sua produzione anche al di fuori dei confini nazionali, in particolare in Indonesia, e si sta anche muovendo verso l'apertura di un nuovo stabilimento in Marocco.

BRT è integrata verticalmente, infatti si occupa non solo della lavorazione e produzione di materiali anodici per la gran parte in grafite, ma anche della loro estrazione, così da avere sotto controllo l'intero processo e garantire qualità e affidabilità della produzione. Le miniere da cui estrae grafite sono alcune sotto il diretto controllo, altre nate da accordi commerciali e joint venture con altre società di estrazione. Per esempio, ha stabilito un accordo per la fornitura di grafite, per lo stabilimento indonesiano citato pocanzi, con la società Syrah Resources che la estrae dalla miniera di Balama in Mozambico, (Warner, 2024) ; ha invece acquisito una parte della società australiana uEvolution Energy Minerals per la fornitura di grafite naturale estratta da miniere in Tanzania.

In Cina le miniere da cui estrae la grafite, grazie al possesso diretto o accordi, sono quelle della provincia dello Guangxi e della contea del Luobei, grazie alla partnership con l'azienda mineraria Ruitong New Material Technology (Heilongjiang). Oltre a CATL, fornisce anodi per altri produttori di batterie agli ioni di litio, tra cui Panasonic, Samsung SDI, LG ES, SK On e BYD.

- **Flinders Resources Ltd**

È un'azienda mineraria che ha sede in Canada e la sua attività di estrazione di carbonio per poi fornire grafite di alta qualità per anodi per il settore delle auto elettriche si concentra su progetti Europei. Estrae grafite in miniere come quella del Woxna nella Svezia centrale, che comprende quattro concessioni (Kringelgruvan, Mattsmyra, Gropabo e Mansberg), sempre in Svezia ha dei permessi di estrazione nelle miniere di Norra Karr e di Bergby.

- **Focus Graphite**

Azienda Canadese attiva su vari progetti per l'estrazione di grafite ad alta purezza con un contenuto del 99,98 %. Una delle sedi minerarie da cui estrae grafite è quella di Lac Knife in Québec, Canada. L'interesse per questa localizzazione nasce soprattutto delle infrastrutture stradali che permettono la facilità di trasporto della grafite ma anche dall'uso dell'energia idroelettrica garantendone così anche un basso costo della materia prima. Lo sviluppo è anche dovuto ad una campagna di fondi stanziata dagli USA e dal Canada per lo sviluppo nel Nord America di una supply chain globale e affidabile per la grafite. Una recente scoperta è stata quella del Lac Tétépisca con cui la Focus Graphite prospetta di sopperire la domanda di grafite degli USA per i prossimi 50 anni.

- **GrafTech International Holdings Inc. (U.S.)**

GrafTech International Ltd. è un produttore americano leader della fornitura di elettrodi di grafite. L'azienda dispone di impianti di produzione in diverse località, tra cui Calais (Francia), Pamplona (Spagna), Monterrey (Messico) e St. Mary's (Pennsylvania, USA). La sede mineraria di maggiore spicco che gestisce è quella Brasiliana a Candeias, Bahia. GrafTech serve una clientela globale composta da produttori di acciaio e metalli in Europa, Medio Oriente e Africa (EMEA), oltre che nelle Americhe e nella regione Asia-Pacifico. I suoi prodotti sono utilizzati in vari settori, tra cui quello automobilistico, edilizio, degli elettrodomestici e dei trasporti.

- **Hitachi Chemical Co. Ltd**

Hitachi Chemical Co. Ltd ora fa parte del gruppo Resonac Corporation che è un leader mondiale nella produzione di elettrodi in grafite. Con sei stabilimenti di produzione strategicamente posizionati in tutto il mondo, in particolare Cina, Giappone, Malesia, USA, Austria e SPAGNA, Resonac garantisce consegne affidabili e rapide e una supply chain semplificata, consentendole di soddisfare le esigenze dei clienti in modo efficiente in tutte le regioni.

- **Imerys Graphite & Carbon**

È un'azienda Svizzera di estrazione e lavorazione della grafite che produce per l'appunto anodi ma anche carbon black e carburo di silicio. Ha numerosi stabilimenti per la lavorazione del carbonio sparsi per il mondo come quello in Svizzera, Canada, Belgio, Giappone. Ha di recente annunciato di voler ampliare la capacità di produzione della grafite sintetica dell'impianto a Bodio per rispondere alla domanda in forte crescita derivante dall'Asia, Nord America ed Europa. Le miniere da cui estrae carbone sono invece situate nel Lac-des-îles (QC), Canada, Toulouse, Francia oltre a quella di Bodio.

- **Jiangxi Zichen Technology**

Jiangxi Zichen Technology Co., Ltd. è tra i tre maggiori produttori cinesi di materiali per elettrodi negativi, in concorrenza con BTR New Energy Material Ltd e Shanshan Technology. I siti di lavorazione della grafite sono localizzati in Cina nel Fengxin Industrial Park per la grafite naturale e artificiale, Yichun per la grafite artificiale a Jiangsu e non possiede miniere proprie.

- **Lianyungang Jinli Carbon**

È un'azienda cinese che produce prodotti a base di carbonio nella fabbrica situata a Lianyungang, Jiangsu, Cina. Non possiede miniere proprie ma lavora carbone che arriva da produttori di carbone cinese sotto forma di coke di petrolio grafitizzato (GPC) e petrolio calcificato (CPC). I prodotti che ottiene a fine lavorazione variano dal coke di petrolio calcinato (viene utilizzato per fare gli anodi per le fonderie di alluminio, acciaio e titanio) alla pasta per elettrodi al carbonio fino ai blocchi in grafite. Molti dei clienti che fornisce sono aziende che producono acciaio come POSCO che ha sede in Corea oppure NIPPON STEEL che ha sede in Giappone.

- **Mason Graphite, Inc.**

Mason Graphite, Inc. ha sede a Laval (Canada), adesso presente sotto il nome di Mason Resources Inc, è un'azienda mineraria integrata verticalmente che si occupa della produzione di prodotti a base di grafite e grafene. Il suo obiettivo è quello di diventare un fornitore strategico per gli anodi delle batterie agli ioni di litio. È reduce da una joint venture con Nuveau Monde Graphite Inc. ed è maggiore azionista di Black Swan Graphene Inc., la quale produce prodotti in grafene per svariati settori industriali, tra i quali spicca quello delle batterie agli ioni di litio. La sua miniera di Lac Guéret in Québec, Canada, è uno tra i maggiori giacimenti di grafite al mondo; dopo l'estrazione quest'ultima verrà lavorata nello stabilimento di Baie-Comeau per la produzione oltre che della grafite per gli anodi anche di prodotti come batterie alcaline, vernici e matite.

- **MERSEN**

Società che opera nel settore dell'energia elettrica e dei materiali avanzati. Produce numerosi prodotti per aziende dei settori più svariati come quello dell'energia eolica e solare, dell'aeronautica, dei prodotti chimici e dei veicoli elettrici. Tra i settori in cui eccelle c'è quello della produzione della grafite presente anche in altre varianti come la grafite isostatica, grafite impermeabile, attrezzature anticorrosione e così via.

- **Mitsubishi Chemical Corporation**

Mitsubishi Chemical Corporation ha sede a Tokyo, Giappone e fa parte del gruppo Mitsubishi. Tra i vari settori in cui opera c'è quello della produzione di anodi in grafite sia artificiale che naturale. I primi, ovvero gli ICG sono caratterizzati da una maggiore capacità e una durata della batteria migliorata. Gli altri, gli MPG, sono noti per le loro eccellenti prestazioni durante i cicli di carica e scarica rapidi. Questa diversificazione consente a Mitsubishi di soddisfare diverse esigenze del mercato delle batterie. Ad oggi sta ampliando la sua capacità di produzione di materiali anodici a base di grafite naturale nelle sue strutture situate a Qingdao, in Cina. L'azienda si concentra sulla creazione di materiali che non solo offrano elevate prestazioni, ma che siano anche caratterizzati da basse emissioni di gas serra, in linea con le attuali iniziative di sostenibilità ambientale. Dal punto di vista minerario Mitsubishi Chemical Corporation (MCC) non dispone di miniere di grafite proprie; piuttosto, si avvale di collaborazioni con fornitori esterni per acquisire il materiale necessario. Attualmente, MCC ha instaurato un accordo con Mineral Commodities Ltd per la produzione di materiali anodici in Europa, sfruttando grafite naturale estratta dalla miniera di Skaland in Norvegia, rinomata per essere la miniera di grafite flake attualmente operativa con le migliori qualità al mondo.

- **NextSource Materials Inc.**

NextSource Materials Inc., con sede a Toronto, Canada, è un'azienda integrata che produce anodi per le batterie per auto elettriche. Ha stretto una partnership internazionale esclusiva per sviluppare impianti di lavorazione chiavi in mano, denominati Battery Anode Facilities (BAF). Ciascuno di essi è progettato con capacità di produzione modulari in grado di espandersi di pari passo con la domanda del settore automobilistico (OEM) dai mercati chiave in Asia, Nord America, Europa e Regno Unito. I BAF si riforniranno di grafite in scaglie dalla miniera di grafite di Molo e, se necessario e ove appropriato, da materie prime di grafite di produttori terzi. Proprio questa miniera, situata nella provincia di Toliara, nel Madagascar meridionale, è uno dei giacimenti di grafite più grandi e di migliore qualità al mondo, nonché l'unico con grafite SuperFlake, in cui il concentrato di grafite" può raggiungere il 98% di purezza del carbonio (C), e può essere facilmente aggiornato al 99,97% di purezza per batterie.

2.4 Nichel

Il nichel è un metallo bianco-argenteo, molto duttile, con un alto punto di fusione e una forte resistenza alla corrosione. È inoltre un ottimo conduttore elettrico, ampiamente impiegato in applicazioni elettriche ed elettroniche. Viene estratto principalmente da depositi di laterite e solfuro.

Il nichel si classifica in due categorie principali: Classe I e Classe II, in base al grado di purezza. I prodotti di Classe I contengono almeno il 99,8 % di nichel, mentre quelli di Classe II hanno una purezza inferiore a questa soglia.

Il nichel di Classe II, inadatto per la produzione di batterie, viene prevalentemente impiegato nell'industria dell'acciaio inossidabile. Il nichel di Classe I per essere utilizzato nelle batterie agli ioni di litio NMC o NCA deve essere convertito in solfato di nichel, che costituisce il materiale catodico e conferisce un'elevata energia specifica alla batteria. (Kalungi, 2024)



Solfato di nichel

❖ Processo di produzione

Il principale processo industriale per l'estrazione del nichel da minerali di solfuro di alta qualità è il metodo pirometallurgico.



Figura 18: processo di produzione del nichel.

In figura 18 sono mostrate le diverse fasi della lavorazione del nichel che tratteremo adesso.

1. Estrazione e macinazione

Il minerale dopo l'estrazione passa ad una fase di macinazione nella quale raggiunge una granulometria fine.

2. Flottazione

Tramite la flottazione, i solfuri di nichel, dopo essere stati sottoposti a dei trattamenti chimici, si legano alle bolle d'aria galleggiando sulla superficie, separandosi dalle impurità che rimangono sul fondo.

3. Fusione

I concentrati di solfuro, ottenuti per flottazione, vengono fusi a circa 1300 °C in forni elettrici o fino a 1600 °C nei forni a fusione flash. Durante la fusione, il nichel e altri solfuri formano una matte liquida, separabile dalle scorie solide contenenti impurità come ossidi e silicati.

4. Tostatura

La matte, con un contenuto di nichel che raggiunge il 50%, viene poi tostata in aria a 500-700 °C per convertire il solfuro di nichel in solfato di nichel.

5. Estrazione idrometallurgica

Il nichel, con eventuali tracce di rame e cobalto, è estratto idrometallurgicamente tramite lisciviazione. Ciò avviene trattando il solfato di nichel con soluzioni acide o alcaline che permettono di ottenere nichel ad alta purezza, cioè nichel di tipo 1 o metalli di nichel. (Kalungi, 2024)

❖ Supply chain

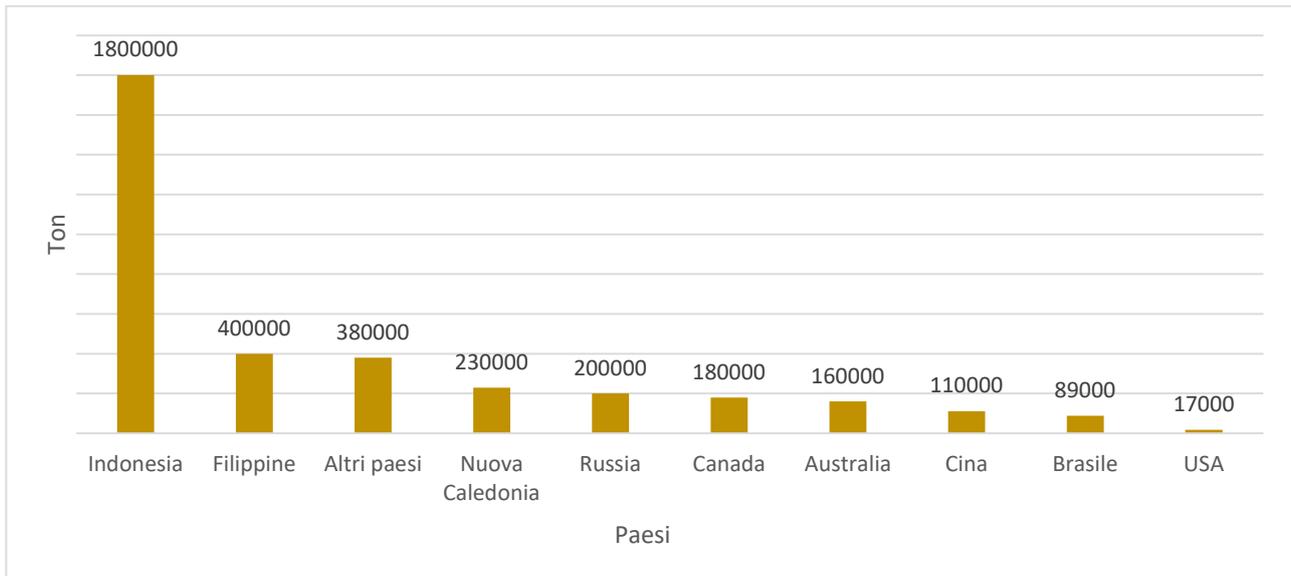


Figura 19: estrazione mineraria del nichel nel 2023. Fonte dati: (USGS, 2024)

La filiera del nichel per la produzione del solfato comprende l'estrazione dai giacimenti minerari e la raffinazione.

L'eccessiva dipendenza da alcuni paesi può comportare rischi sull'approvvigionamento del minerale. L'Indonesia, infatti, come facilmente deducibile dalla figura 19, è stata la principale produttrice di nichel nel 2023, con 1.800.000 tonnellate prodotte, rappresentando circa la metà della produzione globale, seguita, con un notevole distacco, dalle Filippine con 400.000 tonnellate, e dal territorio d'oltremare francese della Nuova Caledonia e dalla Russia.

In Indonesia, tuttavia, emergono due criticità legate ai notevoli impatti sociali e ambientali relativi alle aree di estrazione e lavorazione del nichel. Le emissioni sono connesse principalmente alle fasi di fusione e lisciviazione del nichel, processi altamente energivori, ma anche allo smaltimento dei prodotti di scarto. Gli impatti sociali comprendono spostamenti forzati delle comunità locali, conflitti legati all'accesso alla terra, condizioni di lavoro pericolose e bassi salari.

Per i motivi appena descritti, l'approvvigionamento di nichel potrebbe portare a volgere lo sguardo verso paesi che lo producono rispettando standard ambientali e sociali migliori, come l'Australia, così da contribuire ad una filiera di fornitura del nichel più stabile e sostenibile. Al fine di mantenere il proprio dominio, l'Indonesia deve quindi adottare norme più stringenti in materia di sicurezza sociale e ambientale. (Chandler, 2024)

Concentrandoci invece sulla fase a valle, ossia la raffinazione, oltre il 70% della produzione globale di solfato di nichel è localizzata in Cina. Le aziende cinesi hanno sfruttato le forniture di intermedi provenienti dall'Indonesia per incrementare la produzione di solfato di nichel: nel 2023, il 93% del matte e il 63% del MHP importati dalla Cina erano di origine indonesiana. Queste aziende operano attivamente anche in Indonesia nella produzione di nichel per batterie, dove nel 2023 hanno rappresentato l'84% della produzione locale. Grazie ai massicci investimenti, mantengono un ruolo di

primo piano nella filiera globale. Tuttavia, nei prossimi dieci anni, la loro quota è destinata a calare a favore di investimenti occidentali e indonesiani, pur restando superiore al 50%. (Karan Bhuwarka, 2024)

❖ Mercato

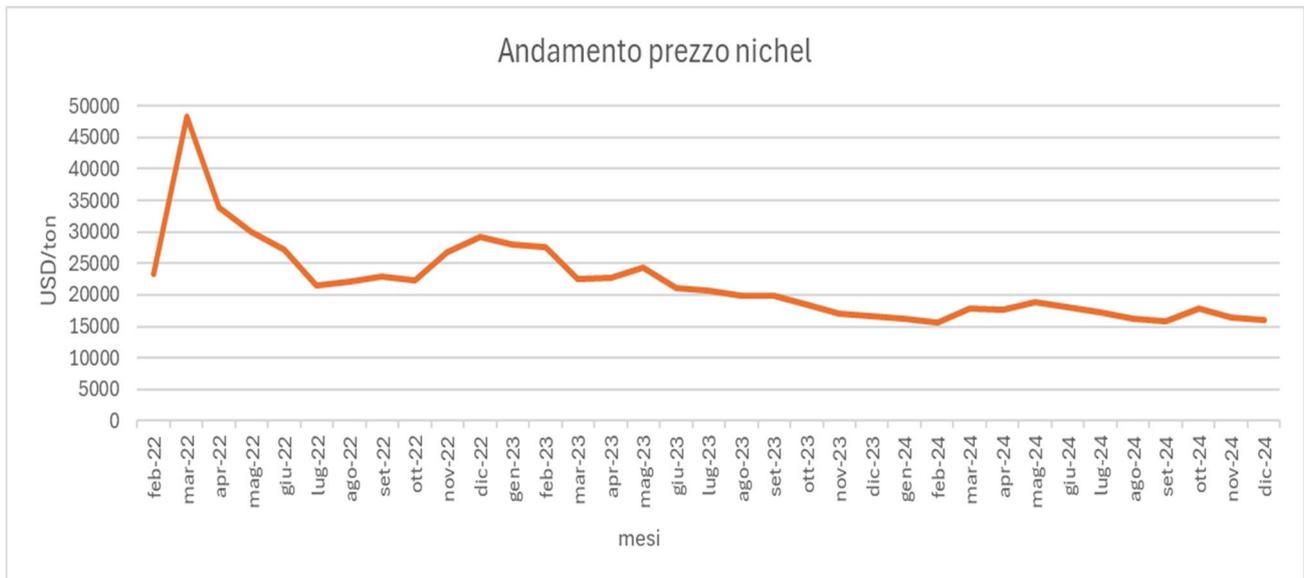


Figura 20: andamento del prezzo del nichel.

Il mercato del nichel ha visto vari fenomeni che ne hanno influenzato il prezzo.

Il conflitto russo-ucraino è uno di questi, in quanto la Russia è tra i maggiori produttori di nichel di tipo 1, ponendo un rischio sulla sua fornitura. Per questo motivo, nel febbraio 2022, il prezzo ha raggiunto i 48.226 USD/ton. Successivamente, i prezzi hanno registrato un trend negativo a causa della sovrapproduzione indonesiana. Nel 2023, il valore per tonnellata è sceso del 40%, segnando l'inizio di un lungo periodo di declino che è proseguito anche nel 2024, come facilmente visibile in figura 20. A fine ottobre 2024 il prezzo si è attestato a 15.800 USD/ton dopo aver raggiunto i 18.100 USD/ton ad inizio mese.

Questo calo è anche legato al comportamento della Cina, noto grande consumatore di metalli, tra cui il nichel, che gode quindi di un'influenza significativa sui prezzi. Infatti, alla fine di settembre 2024, la banca centrale cinese ha introdotto un pacchetto di stimoli per sostenere l'economia, ciò ha portato inizialmente ad una fiducia degli investitori facendo crescere il prezzo del nichel, ma successivamente con l'emergere dei dettagli del pacchetto, l'entusiasmo iniziale è cambiato, causando un calo dei prezzi. Un altro fattore che ha contribuito al decremento di prezzo è stato l'aumento delle scorte di nichel al London Market Exchange. Difatti, nonostante il divieto di consegna del nichel proveniente dalla Russia per le questioni geopolitiche, si è verificato un eccesso di offerta, generando un ulteriore ribasso. A inizio dicembre il prezzo del nichel si aggira intorno ai 16000 USD/ton.

Per migliorare la situazione venutasi a creare, l'Indonesia sta cercando di intervenire sulla regolazione dei prezzi. Il governo, con l'obiettivo di bilanciare domanda e offerta, intende controllare la produzione di nichel attraverso politiche di autorizzazione mineraria orientate alla tutela ambientale. (L, 2024)

- **Produttori di solfato di nichel**

Ecco le principali società che si occupano della produzione del solfato di nichel:

- **Norilsk Nickel**

Nornickel, leader russo nell'industria mineraria e metallurgica, è il più grande produttore mondiale di palladio e nichel di alta qualità, oltre a essere un importante produttore di platino, rame, cobalto, rodio e oro. La sua strategia si concentra sulla produzione di solfato di nichel per LIB, con un forte orientamento verso la riduzione delle emissioni di gas serra.

Negli ultimi anni, le sanzioni occidentali legate al conflitto in Ucraina hanno creato sfide indirette, tra cui difficoltà logistiche e nei pagamenti internazionali. Per superarle, Nornickel ha intensificato i rapporti con la Cina, suo principale acquirente, esplorando il trasferimento di alcune attività produttive nel Paese. L'azienda valuta anche joint venture con partner cinesi per soddisfare la crescente domanda di materiali a base di nichel destinati alle batterie per veicoli elettrici.

- **Jinchuan Group International Resources Co., Ltd.**

Jinchuan International, con sede in Cina, fa parte del Gruppo Jinchuan, si occupa di estrazione mineraria e gestione delle risorse minerarie a livello internazionale. L'azienda è attivamente coinvolta nel commercio di minerali e metalli, in particolare rame, cobalto e nichel. Il nichel che estrae proviene dalla Cina, nella miniera situata nella provincia di Gansu, ma anche in progetti che si sviluppano nella RDC e nello Zambia. L'estrazione del metallo è spesso associata all'estrazione di altri minerali come rame e cobalto. Il solfato di nichel che produce viene lavorato negli impianti di raffinazione situati in Cina.

- **Outotec**

Si tratta di un'azienda finlandese specializzata nel supporto alle imprese nell'estrazione e lavorazione del nichel. È attiva in progetti minerari in Indonesia, Russia, Filippine, Australia, Canada, Sud America, Repubblica Democratica del Congo e Madagascar. L'azienda fornisce soluzioni tecnologiche avanzate a numerose realtà globali impegnate nella produzione di solfato di nichel. Inoltre, riveste un ruolo centrale nel recupero del nichel attraverso il riciclo, offrendo tecnologie all'avanguardia per ottimizzare questo processo.

- **Mechema International Group**

Ha sede a Taiwan, opera in vari settori, tra cui quello della produzione di materiali catodici per le LIB, per le quali produce solfato di nichel e di cobalto. Altri settori sono quello dell'elettronica, delle leghe speciali e dell'energia. Ha un'importante presenza nei mercati asiatici, ma estende la sua attività anche in altre regioni, come l'Europa e l'America.

- **Zenith Chemicals Corporation**

Ha sede a Taichung, Taiwan. Raffina nichel producendo varie forme chimiche, tra cui il solfato di nichel. Lavora sotto la direzione di Vale Inco, azienda che estrae nichel dalle miniere Indonesiane. I prodotti di Zenith Chemical Corporation sono utilizzati in diversi settori industriali, come quello automobilistico, elettronico, chimico e metalmeccanico.

- **Guangxi Yinyi**

È un'azienda cinese che si occupa della produzione e lavorazione del nichel. È integrata verticalmente estraendo nichel da miniere in Cina ed importandolo dall'Indonesia e dalle Filippine per produrre solfato di nichel nell'impianto cinese di Beihai. Oltre ad operare nel settore automobilistico per la produzione dei componenti delle LIB, fornisce prodotti per il settore elettronico e metalmeccanico.

- **Shanghai Liangren Chemical Co. LTD.**

Azienda chimica cinese che si concentra sulla produzione di materiali specializzati, tra cui troviamo i metalli non ferrosi come il cobalto e il nichel. Produce solfato di nichel e cobalto grado batteria, oltre che altri svariati tipi di sale. Il suo impianto di raffinazione si trova a Shanghai ed esporta in molti paesi, tra cui Stati Uniti, Canada, Germania, Inghilterra, Australia, Giappone, Corea, Taiwan, Thailandia, India e Turchia.

- **Dhruv Chemicals**

Ha sede in India e vanta una vasta gamma di prodotti, tra cui solfato di nichel, cobalto e altri composti utilizzati in applicazioni industriali, rivestimenti, e trattamenti superficiali, operando oltre che nel settore automobilistico, anche nel settore chimico, elettronico e metalmeccanico.

- **CoreMax Corporation**

Azienda taiwanese che si occupa di numerosi composti chimici; per le batterie elettriche produce solfato di nichel ad alta purezza. Ha tre basi di produzione a Taiwan e altri 3 impianti nella Cina continentale, a Ningbo e Zhangzhou. Il mercato in cui opera si concentra principalmente nell'area vicino Taiwan, rifornendo i produttori di LIB del territorio, ma fornisce anche produttori dislocati in Nord America ed Europa.

- **Green Eco-Manufacturer**

Produttore cinese che fa del riciclo dei materiali da batterie di scarto, rifiuti elettronici, auto rottamate la sua attività principale. Gli impianti di riciclaggio si trovano sia in Cina ma anche in Sud Africa, Corea del Sud, Indonesia e altri luoghi. Ricicla oltre 30 tipi di risorse scarse come cobalto, nichel, litio, rame e per quanto riguarda il nichel ne ricicla una quantità che rappresenta oltre il 20% della produzione mineraria della Cina. Produce solfato di nichel, ma anche forme varie di cobalto.

❖ **Univertical**

Società statunitense, impegnata nella raffinazione e produzione di sali metallici, in particolare di solfato di nichel e altri prodotti a base di cobalto e rame. L'azienda fornisce questi composti a diverse industrie, inclusi i settori della galvanizzazione, delle batterie ricaricabili e della produzione di leghe. Si impegna anche a rispettare pratiche di produzione sostenibili, con il riciclo e riuso delle risorse.

❖ **Nicomet**

Produttore indiano, ora fa parte di Vedanta Limited. Produce solfato di nichel ma anche di cobalto per applicazioni catodiche. Altri usi a cui sono destinati i prodotti ottenuti dalla raffinazione dei due minerali sono quello galvanico e per catalizzatori e leghe speciali.

❖ **Huaze Cobalt & Nickel**

Ha sede in Cina, a Tongxiang ed è un'azienda integrata verticalmente, il portafoglio prodotti comprende solfato di nichel e cobalto. Questi vengono consegnati ai produttori di batterie per EV, quali CATL, LG Chem. Ha impianti estrattivi nella RDC e i suoi principali impianti di raffinazione sono in Cina.

❖ **Jinco Nonferrous**

Azienda cinese specializzata nella produzione di solfato di nichel ed è controllata da Jinchuan Group Co., Ltd. L'attenzione alla sostenibilità ambientale e sociale nei suoi impianti cinesi risulta elevata.

❖ **Seido chemical industry**

Ha sede in Giappone e suoi prodotti derivano dalla lavorazione dello zinco, cobalto e del nichel. Da quest'ultimo ricava solfato di alta qualità per batterie. Fornisce clienti sia giapponesi che internazionali, collaborando con alcune delle principali aziende nei settori delle batterie, catalizzatori, prodotti chimici, elettronica, e acciaio.

❖ **Uma Chemicals**

Azienda Indiana, che produce una vasta gamma di prodotti, tra cui solfato di nichel ed altri derivati dalla lavorazione dello zinco, del rame e così via. Raffina il nichel nel suo impianto ad Ahmedabad, Gujarat, India. Opera in vari settori, oltre a fornire materiale catodico per le LIB, tra cui il settore chimico e dei prodotti chimici per galvanica.

2.5 Cobalto

Il cobalto è un metallo grigio argento, duro e fragile, con un elevato punto di fusione e ottime proprietà magnetiche, oltre a una notevole resistenza alla corrosione. Trova applicazione in numerosi settori, uno su tutti è quello della produzione di batterie per i veicoli elettrici NCA, NMC e LCA, nelle quali costituisce il materiale attivo catodico, influenzandone positivamente la densità energetica, il numero dei cicli di vita e la stabilità termica. È ampiamente utilizzato nell'industria aerospaziale, come catalizzatore in processi chimici, nella fabbricazione di superleghe per motori a reazione, nelle leghe magnetiche e in ambito medico. Dal punto di vista geologico, il cobalto è presente in diversi tipi di depositi, come quelli idrotermali, sedimentari e di laterite. Spesso viene estratto come sottoprodotto dell'attività mineraria di nichel e rame, poiché è comunemente associato a questi metalli in giacimenti sfruttati principalmente per la loro produzione. (Mat, 2023)



solfo di cobalto

❖ Processo di produzione

Il processo di lavorazione del cobalto per l'impiego nelle LIB inizia con l'estrazione mineraria e termina con la produzione di solfato di cobalto.



Figura 21: processo di produzione del cobalto.

Segue una descrizione delle principali fasi mostrate nella figura 21:

1) Estrazione e frantumazione

I minerali di cobalto vengono solitamente estratti dai giacimenti mediante diversi metodi, come l'estrazione a cielo aperto, l'estrazione sotterranea o la lisciviazione su cumuli, a seconda del tipo e della posizione del giacimento. Una volta estratti, i minerali vengono frantumati per ridurre le dimensioni, facilitando così le fasi successive del processo.

2) **Flottazione**

Mediante la flottazione, attraverso la reazione con reagenti chimici, il cobalto viene separato dalle impurità, ottenendo così il concentrato di cobalto.

3) **Calcinazione**

Durante la calcinazione, il minerale viene riscaldato a temperature elevate (700-900 °C), causando la decomposizione termica dei composti minerali. Se presenti solfuri di cobalto, questi reagiscono con l'ossigeno nel forno, trasformandosi in ossido di cobalto e rilasciando anidride solforosa. Questo processo elimina parte dello zolfo sotto forma di gas, producendo ossido di cobalto.

4) **Lisciviazione**

In questa fase l'ossido di cobalto viene messo a reagire con un acido, facilitando così la separazione dagli altri materiali insolubili come ferro, rame e zinco.

5) **Precipitazione MHP**

Mettendo a reagire il prodotto del precedente passaggio con un agente precipitante, si ottengono idrossidi misti di nichel e cobalto.

6) **Cristallizzazione**

L'idrossido di cobalto viene disciolto di nuovo in un acido per formare solfato di cobalto. Successivamente il solfato di cobalto in soluzione verrà concentrato e raffreddato per formare i cristalli, che subiranno un'ulteriore fase di filtraggio per aumentare la purezza ed essere pronti per l'applicazione come materiale catodico. (Miller, 2021) (Mero, 2024)

❖ Supply chain

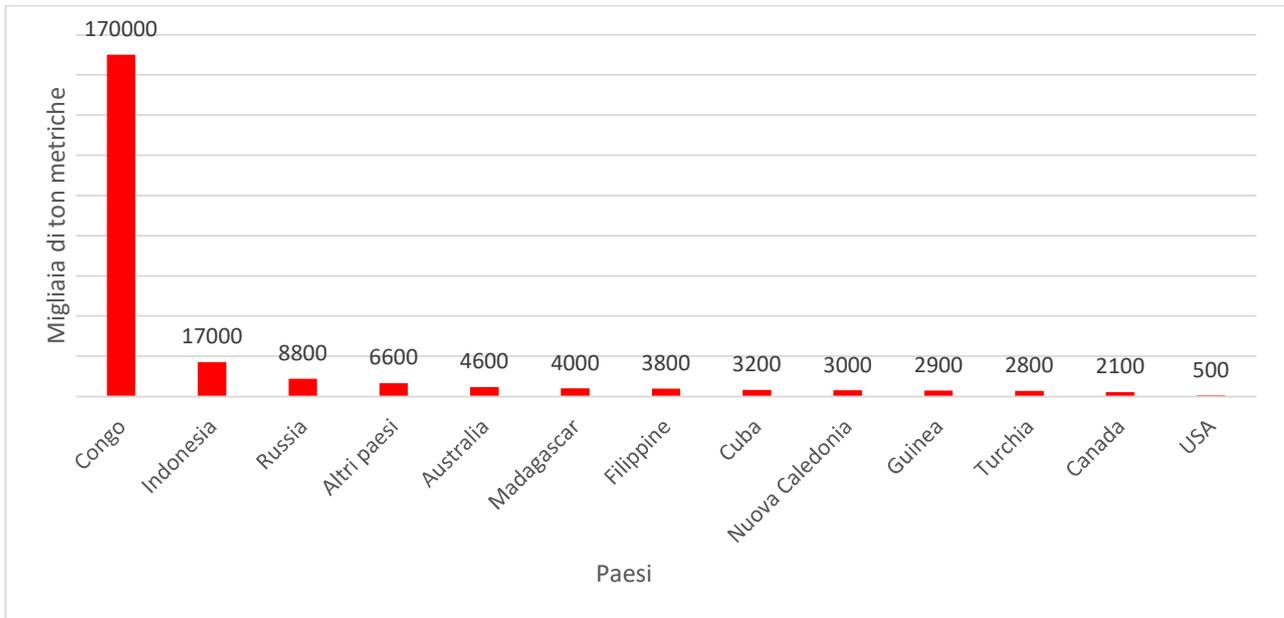


Figura 22: estrazione mineraria del cobalto nel 2023. Fonte dati: (USGS, 2024)

La catena di fornitura del cobalto risulta altamente rischiosa a causa della concentrazione di mercato, dei problemi ambientali e geopolitici che la caratterizzano. Per questo motivo sia gli Stati Uniti che l'Unione Europea lo hanno inserito nella lista dei minerali critici, al fine di garantire una strategia di approvvigionamento stabile.

La figura 22 ci illustra che la Repubblica Democratica del Congo (RDC) è il principale produttore di cobalto a livello globale, dominando la filiera a monte con 170 kilotoni estratti nel 2023, pari al 75% della produzione mondiale, seguita a grande distanza dall'Indonesia con 17 kilotoni. (USGS, 2024)

Tuttavia, l'attività estrattiva del paese è associata a gravi problemi ambientali, come deforestazione, degrado del suolo e inquinamento delle risorse idriche. A questi si aggiungono preoccupanti problematiche sociali, tra cui condizioni lavorative estremamente precarie, carenza di misure di sicurezza e lo sfruttamento del lavoro minorile. Quanto detto non solo solleva questioni etiche e ambientali, ma aumenta anche il rischio di interruzioni della fornitura. (Daphal, 2024)

Inoltre, rischi geopolitici derivanti da conflitti, squilibri di mercato associati a strutture oligopolistiche, inflazione elevata dei prezzi e interventi governativi, come gli embarghi sulle esportazioni, contribuiscono a peggiorare ulteriormente la situazione della supply chain del cobalto. (Jingluan Yang, 2023)

Scendendo giù lungo le fasi della catena di approvvigionamento, si arriva alla fase di raffinazione del cobalto, che include la produzione di solfato di cobalto. Questa parte della supply chain è dominata dalla Cina, che occupa difatti una posizione centrale nel commercio globale del metallo. Si conferma oltre che

il principale raffinatore, anche il paese che importa più cobalto, proveniente per la gran parte dalla Repubblica Democratica del Congo, con quasi l'87% del consumo destinato all'industria delle batterie al litio.

Ma i problemi legati al suo principale fornitore, uniti al fatto che le riserve cinesi di cobalto rappresentano solo circa il 2% delle riserve globali, hanno spinto la Cina a trovare fonti di approvvigionamento alternative. Tra queste, il recupero del cobalto secondario tramite il riciclo si sta rivelando una soluzione promettente.

L'instabilità degli stadi a monte della filiera ha fatto sì che gli USA, uno dei principali attori della filiera in merito alla domanda di cobalto, riducessero il rifornimento di cobalto raffinato proveniente dalla Cina, a favore di quello derivante dalla Norvegia, Canada e Regno Unito, così da garantire una diversificazione del rischio. (Jingluan Yang, 2023)

Per concludere, sebbene la filiera del cobalto comporti rischi evidenti, diversificando le fonti, investendo in alternative e promuovendo cambiamenti normativi, aziende e governi possono creare una filiera più resiliente e sostenibile, bilanciando crescita economica e responsabilità ambientale e sociale.

❖ Mercato

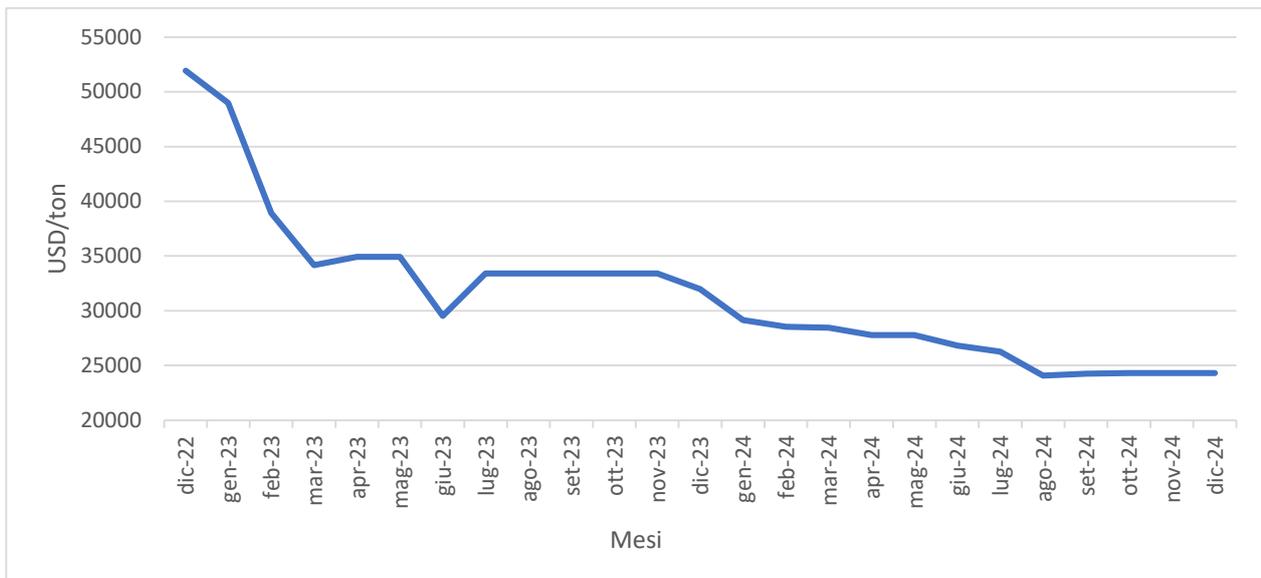


Figura 23: andamento del prezzo del cobalto. Fonte dati: (Trading Economics, n.d.)

Come mostrato in fig. 23 il prezzo del cobalto ha visto una riduzione del 17% rispetto ad inizio anno, e oggi al LME è quotato a 24.300 USD/ton.

È un mercato caratterizzato da un eccesso di offerta, che si confronta con una domanda di veicoli elettrici in fase di rallentamento. In secondo luogo, il calo di domanda è connesso all'aumento della preferenza per batterie agli ioni di litio prive di cobalto, come le LFP, che stanno acquisendo una quota di mercato sempre più ampia.

Il surplus di offerta è attribuibile anche alle aziende estrattive cinesi presenti in Congo, come CMOC, che hanno accelerato eccessivamente il ritmo produttivo. Questo ha penalizzato le aziende occidentali, come Glencore, costrette a chiudere alcune miniere e a ridurre la produzione a causa dei prezzi del cobalto troppo bassi.

Inoltre, nonostante il calo dei prezzi, i produttori sono stati riluttanti a ridurre la produzione di cobalto, essendo spesso un sottoprodotto dell'estrazione di nichel e rame, contribuendo così ad ampliare l'eccedenza di offerta. (Dempsey, 2024)

❖ Produttori di solfato di cobalto

Ecco un elenco dei principali attori che producono solfato di cobalto:

- **Freeport Cobalt Oy**

Azienda finlandese che è stata denominata Jervois Finland dopo essere entrata a far parte del gruppo cinese Jervois. Si occupa della produzione di prodotti a base di cobalto che trovano applicazione in industrie come quella chimica, dei pigmenti, metallurgica e delle batterie con il solfato di alta qualità. I principali mercati sono quello asiatico, concentrato in Cina, quello Europeo e del Nord America con Stati Uniti e Canada. Inoltre, bisogna sottolineare il forte orientamento verso la sostenibilità ambientale dei suoi impianti di produzione.

- **Ganzhou Tengyuan Cobalt Industrial Co., Ltd**

L'azienda ha sede in Cina e si occupa principalmente di ricerca e sviluppo, produzione e commercializzazione di nuovi materiali per batterie energetiche. Il portafoglio prodotti comprende il solfato di cobalto, il cloruro di cobalto, il cobalto elettro depositato, il rame elettro depositato e altri materiali correlati. È integrata verticalmente, estraendo cobalto dalla RDC e lavorandolo in Cina.

- **Nantong Xinwei**

Azienda cinese la cui gamma di prodotti comprende quelli a base di cobalto, come carbonato di cobalto, solfato di cobalto per l'uso nelle batterie, prodotti in rame e solfato di nichel e si concentra anche sul riciclo di questi metalli. È integrata verticalmente, infatti si occupa dell'estrazione del cobalto nella RDC e della sua raffinazione in Cina.

- **Jilin Jien Nickel Industry Co., Ltd.**

Ha sede in Cina, specializzata nell'estrazione, produzione e lavorazione di nichel e cobalto e altri metalli non ferrosi. Offre una vasta gamma di prodotti, tra cui nichel di alta qualità, solfato di nichel, cobalto e altri materiali utilizzati principalmente nelle industrie delle batterie, della galvanizzazione e delle leghe metalliche.

- **Jinchuan Group Co., Ltd.**

Jinchuan International, con sede in Cina, fa parte del Gruppo Jinchuan, si occupa di estrazione mineraria e gestione delle risorse minerarie a livello internazionale. L'azienda è attivamente coinvolta nel commercio di minerali e metalli, in particolare rame, cobalto e nichel. Il nichel che estrae proviene dalla Cina, nella miniera situata nella provincia di Gansu, ma anche in progetti che si sviluppano nella RDC e nello Zambia. Il solfato di nichel viene lavorato negli impianti di raffinazione situati in Cina.

- **Nicomet Industries Limited**

Produttore indiano, ora fa parte di Vedanta Limited. Produce solfato di nichel ma anche di cobalto per applicazioni catodiche. Altri usi a cui sono destinati altri prodotti ottenuti dalla raffinazione dei due minerali sono quello galvanico e per catalizzatori e leghe speciali.

- **MMC Norilsk Nickel**

Nornickel, leader russo nell'industria mineraria e metallurgica, è il più grande produttore mondiale di palladio e nichel di alta qualità, oltre a essere un importante produttore di platino, rame e altri metalli come cobalto, rodio e oro. La sua strategia si concentra sulla produzione di solfato di nichel e cobalto con una forte attenzione sulla riduzione delle emissioni di gas serra. Negli ultimi anni, le sanzioni occidentali legate al conflitto in Ucraina hanno creato sfide indirette, tra cui difficoltà logistiche e nei pagamenti internazionali. Per superarle, Nornickel ha intensificato i rapporti con la Cina, suo principale acquirente, esplorando il trasferimento di alcune attività produttive nel Paese.

- **Umicore**

Si tratta di una multinazionale con sede in Belgio che opera nel settore del riciclaggio, della raffinazione, della trasformazione e della commercializzazione di prodotti chimici specializzati a base di metalli, con un focus principale su cobalto e nichel. Gestisce ogni fase della catena del valore, dall'approvvigionamento alla distribuzione. Per le batterie agli ioni di litio produce solfato di nichel e cobalto di alta qualità in impianti situati in Europa, occupandosi anche del loro riciclo.

- **Zhangjiagang Huayi Chemical Co. Ltd.**

Azienda cinese produttrice di varie forme chimiche di nichel, cobalto e rame, tra cui solfato di nichel e di cobalto. I prodotti vengono esportati in Europa, America, Giappone, Corea del Sud, Sud-Est asiatico e in altri luoghi.

- **Dalian Ruiyuan**

Con sede nella provincia di Liaoning, Cina è impegnata principalmente nel riciclaggio e nel riutilizzo di materiali anodici per batterie agli ioni di litio per veicoli elettrici. Il portafoglio prodotti dell'azienda è vasto e comprende ad esempio idrossido di nichel-cobalto-manganese, manganato di nichel-cobalto e solfato di manganese per batterie, solfato di nichel, solfato di cobalto, sali di cobalto. Quello che produce viene esportato in Giappone, Asia sud-orientale, Australia, Europa e altre parti del mondo.

- **Hebei Kingway**

Produttrice cinese di prodotti chimici come il sale di cobalto, il sale di nichel, il sale di litio, per le batterie agli ioni di litio produce il solfato di cobalto. I prodotti sono ampiamente utilizzati nell'industria chimica, petrolifera, metallurgica, aerospaziale, automotive e in altre industrie.

- **Jiayuan Cobalt Holdings**

È una società multinazionale cinese, nata dalla joint venture tra Macrolink Group e Hongkong Goldwei Group. L'azienda si specializza nell'estrazione e lavorazione di metalli, con particolare focus sul cobalto, estratto nella Repubblica Democratica del Congo e successivamente lavorato in Cina per produrre solfato di cobalto di grado batteria. Inoltre, si occupa anche di altri metalli, tra cui rame, niobio, stagno e altri materiali.

2.6 Manganese

Il manganese, un metallo dal caratteristico colore argenteo, è il dodicesimo elemento più abbondante sulla Terra. È caratterizzato da un'elevata durezza, è fragile, poco duttile e malleabile. È presente in numerosi minerali, come la Pirolusite, e rocce, come la Rhodochrosite. La maggior parte della produzione mondiale proviene da depositi sedimentari e rocce metamorfiche.



solfato di manganese

Possiede molteplici applicazioni: svolge un ruolo essenziale nella produzione dell'acciaio e rappresenta un componente chiave nelle batterie, dove viene impiegato come materiale attivo catodico nelle chimiche NMC e LMO, principalmente sotto forma di solfato di manganese.

Nelle LIB il manganese contribuisce ad aumentare la stabilità e la capacità di immagazzinare energia, migliorando le prestazioni delle batterie. (Geologyscience, 2023)

❖ Processo di produzione

Il processo di produzione del solfato di manganese di grado batteria può essere sintetizzato in queste fasi principali:



Figura 24: processo di produzione del manganese.

Ecco una descrizione del processo illustrato nella figura 24:

1. Estrazione e frantumazione

Si parte con l'estrazione del minerale di manganese, che viene successivamente frantumato fino ad ottenere una granulometria inferiore a 2 mm.

2. Lisciviazione

La fase successiva comprende la lisciviazione, in cui il minerale frantumato viene trattato con acido solforico e acqua deionizzata. Il reattore viene riscaldato ad una temperatura predeterminata di 343 K e agitato a 300 giri/min. Si monitora il pH e la concentrazione di ioni durante la reazione.

3. Rimozione delle impurità

Dopo si aggiungono additivi come carbonato di calcio, solfuro di bario e ossido di calcio per rimuovere metalli pesanti, sodio, potassio, ferro e altri ioni di impurità; si rimuovono calcio e magnesio attraverso la fluorurazione.

4. Cristallizzazione e produzione del solfato di manganese

La soluzione di solfato di manganese purificata viene concentrata mediante cristallizzazione tramite evaporazione a 125°C, con la produzione di MnSO_4 monoidrato. Questo passaggio è cruciale per ottenere solfato di manganese di alta qualità. Infatti, la purezza richiesta per l'uso nelle batterie agli ioni di litio è superiore al 99,9%, il che implica processi di cristallizzazione e purificazione altamente controllati. (Yang, 2024)

❖ Supply chain

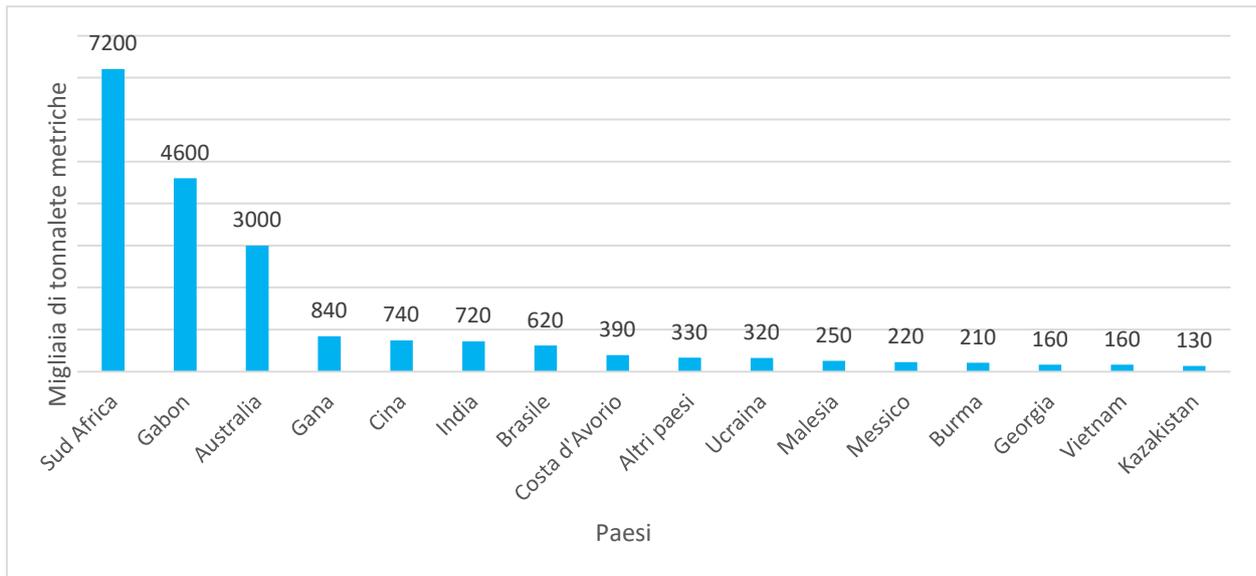


Figura 25: estrazione mineraria di manganese nel 2023. Fonte dati: (USGS, 2024)

Il manganese è abbondante sulla crosta terrestre ed è distribuito globalmente, anche se non equamente. La figura 25 indica che nel 2023 il Sudafrica è stato il principale produttore di manganese, con 7,2 milioni di tonnellate, corrispondenti al 36% del totale. A seguire troviamo il Gabon e l'Australia, con 4,6 e 3 milioni di tonnellate prodotte nello stesso anno. Quindi la parte di filiera a monte non risulta troppo concentrata come nel caso del cobalto, garantendo una possibilità di approvvigionamento variegata.

Il problema, però, emerge scendendo valle, in quanto, ponendo l'attenzione sull'uso del manganese come elemento catodico, ci si accorge che il 97% della sua raffinazione per la produzione del solfato è in mano cinese. Ciò ricopre un enorme rischio per le case automobilistiche produttrici di veicoli elettrici al di fuori della Cina; infatti, la paura di un'interruzione dell'approvvigionamento è elevata. Il rischio cresce alla luce dei recenti studi che ipotizzano il manganese come base per nuove chimiche catodiche, prevedendo un futuro aumento della domanda. Se la produzione rimanesse concentrata in un unico paese incapace di soddisfarla adeguatamente, la catena di fornitura globale rischierebbe di subire gravi disagi.

Per questo motivo, l'Europa e gli Stati Uniti hanno inserito il manganese nella lista delle materie prime critiche e si stanno muovendo per diversificare la dipendenza dall'approvvigionamento cinese, oltre che ad aprire impianti di lavorazione locali. (Silva, 2024)

L'Europa, ad esempio, sta portando avanti il progetto Chvaletice nella Repubblica Ceca, sviluppato dalla società Euro Manganese Inc., che prevede il ritrattamento di un importante giacimento di manganese contenuto nei rifiuti di una miniera dismessa.

Allo stesso tempo, gli USA hanno approvato il progetto Hermosa, che prevede l'estrazione e la produzione di solfato di manganese. Un ulteriore progetto nasce dall'accordo tra General Motors e l'azienda mineraria Element 25, che fornirà alla casa automobilistica solfato di manganese ad alta purezza, destinato alla produzione di batterie per veicoli elettrici. Il materiale sarà estratto in Australia e lavorato negli Stati Uniti. (ESG, 2023)

❖ Mercato

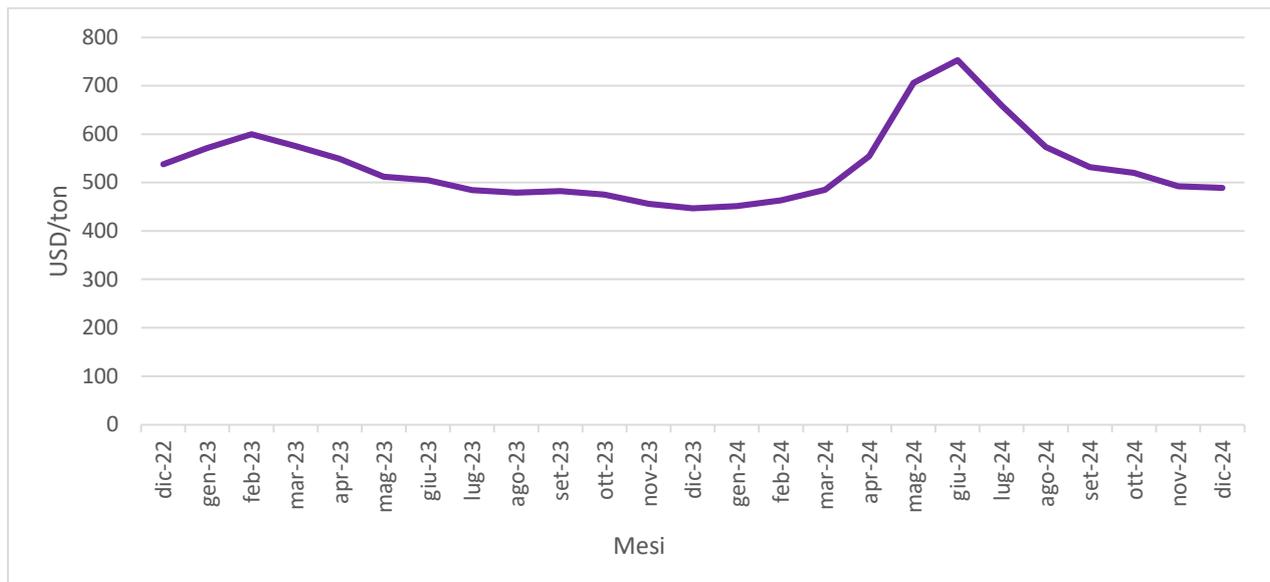


Figura 26: andamento prezzo del manganese. Fonte dati: (Business Analytiq, s.d.)

I prezzi del manganese hanno registrato nell'ultimo periodo una forte instabilità. Bisogna considerare che gran parte del manganese prodotto trova impiego nella produzione dell'acciaio; di conseguenza, gli eventi di questo settore influenzano notevolmente l'andamento del prezzo del minerale, mentre ciò che accade sul mercato dei veicoli elettrici ha un impatto di minor peso, che si riflette più sul prezzo del solfato di manganese.

L'evento che ha avuto il maggiore impatto sul mercato è stato la chiusura, a marzo, dell'impianto di estrazione australiano della Groote Eylandt Mining Co (GEMCO) di South32, a causa di un ciclone. Questo ha portato inizialmente ad una corsa ad accaparrarsi il manganese di alta qualità, con un conseguente aumento dei prezzi, che hanno raggiunto a giugno 2024 gli 800 USD/ton sul mercato cinese, come mostrato in figura 26. Ma la riduzione, rispetto alle previsioni, della domanda di acciaio cinese ha portato ad un eccesso di offerta, con il prezzo che è arrivato, ad ottobre, a circa 500 USD/ton. La situazione nel breve periodo sembra rimanere tale, con la domanda interna di acciaio che stenta a crescere e con tonnellate di manganese, acquistate durante l'iniziale innalzamento del prezzo, ferme nei porti cinesi. Anche il solfato di manganese conferma questo trend negativo, con un'offerta stabile ma una domanda ridotta a causa del rallentamento delle vendite di veicoli elettrici in occidente, facendo attestare il prezzo a 730 USD/ton. (Tong, 2024)

❖ Produttori di solfato di manganese

- **Guizhou Redstar Developing**

È una società con sede in Cina impegnata nella produzione di numerosi composti chimici che contengono bario, stronzio ad esempio. Per il settore delle batterie agli ioni di litio produce il solfato di manganese ad alta purezza e il carbonato di litio grado batteria. Il solfato di manganese viene prodotto in Cina grazie al minerale di manganese estratto in Sud Africa, Australia e Gabon.

- **Guizhou Manganese Mineral Group**

Ha sede in Cina e si contraddistingue per la produzione di solfato di manganese ad alta purezza ed elettrolitico per batterie. Inoltre, ha sviluppato un progetto che integra la tecnologia di cogenerazione di calore ed energia con la produzione e la ricerca di diversi prodotti a base di manganese al fine di rendere sostenibili i processi industriali. È integrata verticalmente, infatti lavora il manganese che estrae dalla miniera a Tongren.

- **South Manganese Group**

È una società cinese, il cui portafoglio prodotti include ad esempio EMD, solfato di manganese ad alta purezza, e materiale catodico ternario nichel-cobalto-manganese. È integrata verticalmente, estraendo manganese nella provincia del Guandong, e raffinandolo nei vicini impianti.

- **Prince (ERACHEM Comilog)**

Con sede negli Stati Uniti, offre un'ampia gamma di prodotti che comprende manganese ad alta purezza e materie prime di manganese ad alto volume. Serve clienti a livello regionale o mondiale attraverso le proprie strutture in Cina, Stati Uniti, Messico e Belgio. Opera in settori quali l'accumulo di energia, la produzione di componenti elettronici e il trattamento dei metalli.

- **ISKY Chemicals**

Società cinese specializzata nella produzione e vendita di prodotti chimici. I suoi prodotti comprendono solfato di rame, di manganese, e molti altri composti chimici. Gli stabilimenti sono situati nella provincia di Guangxi, Cina. Tra i suoi clienti figurano importanti aziende leader nel riciclaggio e nella produzione di batterie, tra cui Brunp Recycling, una sussidiaria di CATL.

- **Guizhou Dalong Huicheng New Material**

Guizhou Dalong Huicheng New Material Co., è una holding cinese di Hunan Huitong Energy Storage Material Group. È un'impresa nazionale ad alta tecnologia, specializzata nella produzione ecologica di materiali energetici innovativi. Il suo portafoglio prodotti comprende composti chimici a base di litio, manganese, cobalto e nichel. Proprio il manganese ad alta purezza ricopre un'importanza strategica per l'azienda, rendendola leader del settore.

- **Guizhou Union Manganese Corporation**

È un'azienda cinese, integrata verticalmente che si occupa dell'estrazione del manganese da tre miniere in suo possesso sul territorio cinese, che poi verrà lavorato negli impianti adiacenti per produrre solfato di manganese usato per varie industrie, tra le quali quella delle batterie.

- **Xiangtan Electrochemical Scientific**

Ha sede in Cina e si occupa della produzione e vendita di EMD e materie prime per batterie a energia nuova ecc. Il suo portafoglio prodotti comprende manganato di litio, tetrossido di manganese e solfato di manganese di alta purezza, i quali vengono esportati in molte aree del globo, come America, Giappone, Unione Europea e Sud-Est asiatico. Le sue principali strutture produttive si trovano a Xiangtan, nella provincia di Hunan, e a Jingxi, nella regione di Guangxi.

- **Changsha Rongqing Chemical**

Rech Chemical Co., Ltd., ha sede a Changsha, nella provincia di Hunan, Cina. È un'azienda integrata che si occupa di ricerca e sviluppo, produzione, commercio e investimenti. La sua gamma di prodotti comprende solfato di zinco, solfato ferroso, solfato di manganese e solfato di magnesio. Esporta in Europa, America, Australia e Singapore.

- **Guangxi Detian Chemical Cycle**

Azienda cinese, che si occupa della produzione di biossido di titanio, solfato di manganese monoidrato e solfato ferroso fornendo settori come quello dell'agricoltura e dei fertilizzanti, chimico e delle batterie. I suoi impianti di produzione sono localizzati a a Leiping Town, nella provincia di Guangxi. Esporta in paesi come Italia, Russia, Brasile, Thailandia, Venezuela e Cile.

- **Manmohan Minerals (MMCPL)**

Con sede a Nagpur, India, Manmohan Minerals & Chemicals Pvt. Ltd. (MMCPL) è leader nella produzione di composti di manganese. La società produce ossido di manganese di grado alimentare e chimico, biossido di manganese e soluzione di solfato di manganese. I suoi stabilimenti di produzione sono distribuiti negli stati del Maharashtra e del Gujarat. Le esportazioni si estendono in Asia, Europa, Medio Oriente, Australia e Stati Uniti d'America.

- **Guangxi Menghua Technology**

Si trova nella provincia di Guangxi, Cina ed è un'impresa high-tech focalizzata sulla ricerca, sviluppo e produzione di nuovi materiali energetici a base di manganese. Il pacco prodotti comprende manganese per l'acciaio, per l'alluminio e solfato di manganese per batterie. È integrata verticalmente gestendo risorse minerarie in paesi come Malesia e Sudafrica per fornire ai clienti per garantire la sicurezza nella supply chain e lavora il manganese in impianti locati in Cina.

- **Guizhou Jinrui New Materials**

Guizhou Jinrui New Materials Co., Ltd. è un'azienda con sede nella provincia di Guizhou, Cina, specializzata nella produzione di materiali avanzati. Ha sede in Cina, produce prodotti a base di manganese destinati ai settori delle batterie per veicoli elettrici e per i sistemi di accumulo, dell'elettronica e della produzione dell'acciaio.

2.7 Litio

Il litio, indicato con il simbolo chimico Li, non si trova in natura in forma pura, ma si presenta sotto forma di composti, principalmente in depositi minerali e salini, come le acque minerali intrappolate in bacini chiusi e l'acqua di mare. È il metallo più leggero e si distingue per la sua elevata reattività.

Il litio e i suoi composti trovano ampio impiego in vari settori, tra cui vetro, ceramica, lubrificanti, additivi metallurgici e batterie agli ioni di litio, con oltre il 75% della produzione globale destinato a quest'ultimi. Essenziale per la composizione del catodo nelle batterie agli ioni di litio, il litio ne migliora la densità energetica, la durata e la leggerezza. Viene comunemente utilizzato per questo scopo sotto forma di carbonato o idrossido di litio.



Depositi salini di litio

❖ Processo di produzione

In figura 27 viene descritto il processo di produzione del carbonato di litio a partire dai minerali di spodumene.

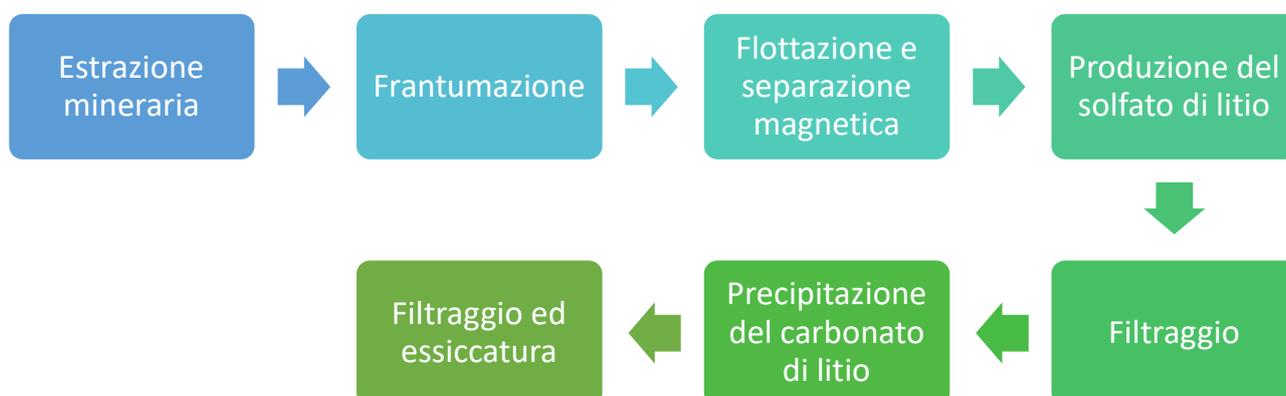


Figura 27: processo di produzione del litio.

1. Estrazione mineraria

Il litio è estratto da minerali presenti in rocce ignee, come lo spodumene, o attraverso la salamoia, un'acqua con alta concentrazione di carbonato di litio. Fino ai primi anni '80, la sua fornitura globale era principalmente basata su fonti minerali. Tuttavia, in quel periodo, sono state avviate operazioni su larga scala per l'estrazione della salamoia di litio in Sud America. Nel processo di estrazione mineraria, il litio viene ricavato tramite perforazione e brillamento. Successivamente, il minerale viene scavato e trasportato su camion a un impianto di lavorazione centrale.

2. Frantumazione

La frantumazione ha lo scopo di ridurre le dimensioni delle particelle a meno di 6 mm.

3. Flottazione e separazione magnetica

Si passa poi alla flottazione e alla separazione magnetica che permettono di separare i minerali di spodumene, sfruttando le proprietà chimiche e magnetiche, dalle altre impurità.

4. Produzione del solfato di litio

Il concentrato ottenuto viene miscelato con acido solforico e riscaldato, ottenendo così il solfato di litio.

5. Filtraggio

In questa fase, dopo che il solfato di litio è stato disciolto in acqua, le impurità insolubili vengono filtrate e rimosse.

6. Precipitazione del carbonato di litio

Il solfato di litio viene trattato con carbonato di sodio formando il carbonato di litio, precipitando come solido.

7. Filtraggio ed essiccazione

Si arriva all'ultima fase in cui il carbonato di litio viene filtrato per rimuovere le impurità rimanenti e poi essiccato per eliminare tracce di liquidi.

- Invece, l'estrazione del litio tramite salamoia prevede che questa venga concentrata attraverso l'evaporazione solare dei sali solubili. Sebbene l'investimento iniziale di capitale per la produzione di litio dalle salamoie sia elevato, i costi operativi successivi risultano relativamente contenuti. Tuttavia, il processo di estrazione richiede un tempo significativo, dai 12 ai 18 mesi, per raggiungere i livelli di produzione desiderati, ma anche notevoli quantità d'acqua, causando un impatto ambientale significativo. I prodotti derivati dalle operazioni di salamoia possono essere impiegati direttamente nei mercati finali.

❖ Supply chain

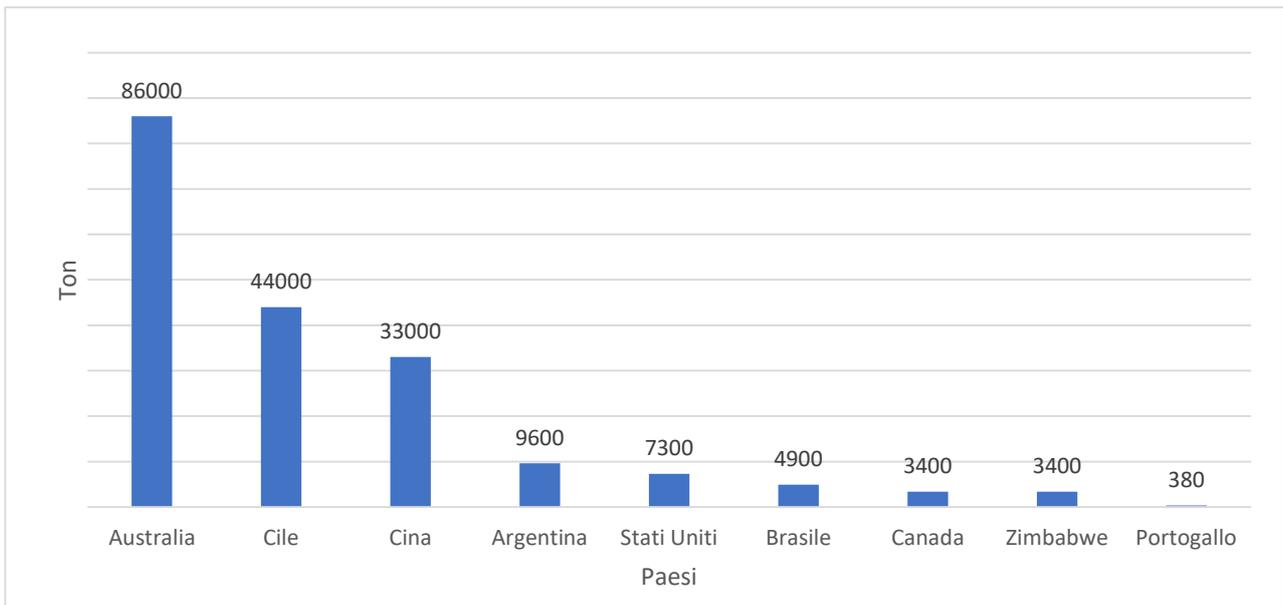


Figura 28: Estrazione mineraria del litio nel 2023. Fonte dati: (USGS, 2024)

Dal grafico sopra si evince che attualmente, oltre il 50% dei giacimenti di litio si trova nel "triangolo del litio", che comprende Bolivia, Argentina e Cile, con contributi minori dagli Stati Uniti e dall'Australia. Nel 2023, i maggiori produttori di litio sono stati l'Australia, con 86.000 tonnellate (circa il 48% della produzione globale), e il Cile, con 44.000 tonnellate (24% della produzione globale), e la Cina con 33.000 tonnellate (17% del totale).

Con riserve di litio limitate, Cina e Stati Uniti hanno puntato sui paesi con grandi giacimenti, stringendo accordi per l'estrazione. L'Australia, ad esempio, ha attratto investimenti significativi da Tianqi (Cina) e Albemarle (Stati Uniti), due dei maggiori produttori mondiali di litio.

La sicurezza dell'approvvigionamento di litio è diventata una priorità per le aziende tecnologiche in Asia, Europa e Nord America. Per rispondere a questa necessità, sono nate alleanze strategiche e joint venture tra aziende tecnologiche e società minerarie, con l'obiettivo di garantire una fornitura stabile e diversificata per la produzione di batterie e veicoli elettrici.

Come detto, l'Australia è stata la prima per estrazione di litio nel 2023. La gran parte del litio australiano però è esportato all'estero, in particolare in Cina, sotto forma di concentrato in grandi quantità per un'ulteriore lavorazione; per questo motivo, in Australia, al fine di integrare le fasi a monte della filiera (estrazione e raffinazione del litio), il governo di Canberra ha stanziato 7 miliardi di dollari australiani di incentivi fiscali nel budget 2024-2025 per investimenti nella raffinazione e nella lavorazione di 31 minerali critici tra cui il litio (ISPI, 2024).

La Cina attualmente domina la lavorazione del litio, raffinando più del 70% di quello prodotto a livello mondiale. Le raffinerie cinesi producono carbonato di litio, idrossido di litio e cloruro di litio, i precursori dei materiali catodici delle batterie agli ioni di litio. Sono chimicamente stabili (per lo stoccaggio e il trasporto), contengono un'elevata percentuale di litio e possono essere facilmente trasformati in un composto di litio per la costruzione del catodo.

Negli Stati Uniti il litio è importato principalmente dall'Argentina (51%) e dal Cile (43%). Nel 2022, il Dipartimento dell'Energia ha selezionato 12 progetti legati al litio, finanziati con 1,6 miliardi di dollari dalla legge bipartisan sulle infrastrutture, per sviluppare impianti nazionali per l'estrazione, la lavorazione e il suo riciclo. Inoltre, l'*Inflation Reduction Act* ha introdotto incentivi fiscali per rafforzare l'approvvigionamento di materiali per batterie e la produzione di veicoli elettrici in Nord America e nei paesi partner degli Stati Uniti. (Londono, 2024)

L'UE invece estrae litio soltanto nel nord del Portogallo, ma sono piccole quantità utilizzate per la produzione di ceramica. Il Portogallo vorrebbe estendere le estrazioni, ma sono diversi i comitati "No Litio", presenti anche in altri Paesi del Continente come la Serbia, quindi l'Ue è costretta all'importazione. La Commissione europea evidenzia come i Paesi del continente lo comprino per il 78% dal Cile, per l'8% dagli Usa e per il 14% da altri Paesi.

Con il *critical material act*, del quale abbiamo discusso nel paragrafo 2.3, la commissione europea prevede di estrarre almeno il 10% dei minerali critici, tra cui il litio, all'interno dei confini Ue e di raffinarne in Europa almeno il 40%. Per raggiungere l'obiettivo, si punta ai paesi sudamericani, e in particolare quelli del triangolo del litio enunciati prima. (Palleschi, 2023)

❖ Mercato

Nel 2023, la produzione globale di litio ha registrato un incremento del 23%, raggiungendo circa 180.000 tonnellate, rispetto alle 146.000 tonnellate del 2022. Questo aumento è stato trainato per la gran parte dal settore dei veicoli elettrici.

Tuttavia, si sono manifestate preoccupazioni riguardo ad un potenziale eccesso di offerta di litio a breve termine, insieme alla scadenza del programma decennale di sussidi del governo cinese per l'acquisto di veicoli elettrici e alle vendite di EV più deboli del previsto a livello globale. Questi fattori hanno portato a una significativa diminuzione del prezzo del litio nel 2023. (Londono, 2024)

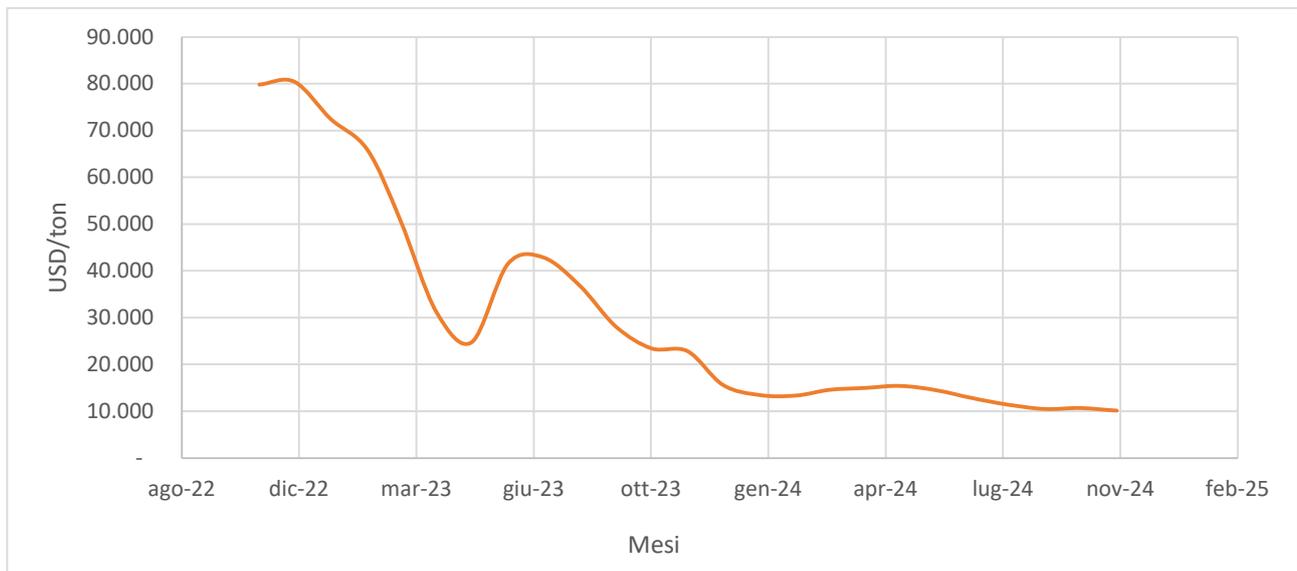


Figura 29: andamento del prezzo del litio. Fonte dati: (TRADING ECONOMICS, 2024)

La figura 29 mostra che ad inizio ottobre 2024, il prezzo spot del carbonato di litio in Cina ha raggiunto i 10.600 \$ per tonnellata, dopo aver toccato il minimo triennale di 10.039 \$ per tonnellata nel settembre 2024. Questo aumento è stato temporaneamente sostenuto dallo stimolo economico del governo cinese, che ha contribuito a mitigare le preoccupazioni relative a un eccesso di offerta nel mercato.

L'aumento dell'offerta, combinato con una diminuzione della domanda di nuovi veicoli elettrici, ha però successivamente portato a una riduzione dei prezzi del carbonato del 21% nel 2024, a seguito di un crollo dell'80% nel 2023.

Nonostante le difficoltà, gli analisti prevedono un incremento dell'offerta globale di quasi il 50% quest'anno, con il Cile che ha annunciato piani per raddoppiare la produzione nel prossimo decennio. Inoltre, la Cina sta espandendo i suoi progetti estrattivi in Africa per garantire forniture di metalli necessari per le batterie. (TRADING ECONOMICS, 2024)

Il prezzo dell'idrossido di litio, influenzato dagli stessi fattori che incidono sul carbonato di litio, si attesta intorno ai 9.530 \$ per tonnellata ad ottobre 2024, registrando una diminuzione del 2,2% rispetto a

settembre. Questo dato conferma il trend di calo continuo dei prezzi del litio. (Shanghai Metals Market, 2024)

In sintesi, l'eccesso di offerta di veicoli elettrici in Cina, l'aumento della produzione di litio in Cile, e la futura espansione della produzione cinese grazie al finanziamento di nuovi progetti estrattivi in Africa (che incrementerà ulteriormente l'offerta di questo metallo), unite alle politiche restrittive di Stati Uniti e Unione Europea nei confronti delle auto cinesi e alla fine degli incentivi in questi mercati, fanno prevedere una significativa riduzione, nel prossimo futuro, del prezzo dei derivati del litio utilizzati negli EV.

❖ Produttori di carbonato e idrossido di litio

- **SQM**

È una multinazionale che ha sede in Cile, e il suo portafoglio prodotti comprende potassio, prodotti chimici industriali, fertilizzanti e varie forme di iodio e di litio. In particolare, il litio che produce viene usato per vari scopi, tra i quali spicca quello per le batterie agli ioni di litio. SQM si occupa sia dell'estrazione in Cile, che della lavorazione per la produzione di idrossido e carbonato di litio che avviene negli impianti di Salar del Carmen, sempre in Cile.

- **Albemarle**

È una multinazionale con sede in Carolina del Nord, Stati Uniti, opera in svariate industrie, tra cui figurano quella dell'agricoltura, dell'edilizia e costruzioni, farmaceutica, dell'energia, dei veicoli elettrici e molti altre. Proprio per l'industria degli EV si occupa del litio per le LIB. Infatti, è leader nel settore dell'estrazione e lavorazione del litio, lo estrae da miniere in Cile, Australia, e in Nevada e Carolina del Nord negli USA. Gli stabilimenti in cui lo lavora per la produzione di carbonato o anche di idrossido di litio si trovano in Carolina del Nord, Cile, Australia e Germania. I clienti che fornisce sono distribuiti in tutto il mondo, superando la presenza in più di 100 Paesi.

- **Livent corporation**

Ha sede a Philadelphia, Pennsylvania, Stati Uniti e si occupa della produzione di carbonato di litio e idrossido di litio per il settore degli EV. È integrata verticalmente, estrae difatti litio da basi minerarie distribuite in Argentina e lavora il minerale estratto o in impianti in loco oppure in altri dislocati in Cina, Stati Uniti, ma anche in Spagna.

- **Orocobre Limited**

Società australiana, che adesso figura sotto il nome di Alkem Limited, si occupa dell'estrazione e lavorazione del litio per le LIB. Ha miniere in Argentina, a Salar de Olaroz, dove ha un grosso impianto di produzione di carbonato di litio, e anche nel Sal de Vida per produrre sia carbonato che idrossido di litio. Altri progetti sono attivi in Canada e in Giappone dove ha solo l'impianto di raffinazione.

- **Nordic Mining**

Con sede in Norvegia, svolge attività integrate di esplorazione, estrazione e produzione di minerali e metalli di alto livello. È impegnata in vari progetti, tra cui quello nella regione nordica Nordic Mining dove detiene quote di Keliber Oy, che sviluppa un progetto di litio in Finlandia per diventare produttore di idrossido di litio di qualità per batterie.

- **Tibet Mineral Development**

Ha sede in Cina, si occupa dell'estrazione di minerali come cromo, rame, boro e litio, servendo i settori energetico, aerospaziale e metallurgico. Il litio lo estrae dal lago Zabuye, per poi lavorarlo e produrre carbonato di litio destinato all'industria delle batterie per EV.

- **Ganfeng Lithium**

Società cinese, ha una catena di fornitura integrata, infatti si occupa dallo sviluppo di risorse di litio a monte, alla raffinazione di litio e fusione di metalli di litio a metà percorso, fino alla produzione e al riciclaggio di batterie al litio a valle. Il litio che produce viene usato per le industrie dei veicoli elettrici, chimiche e farmaceutiche. Ha progetti sparsi in tutto il mondo, i principali si trovano in Argentina, Cile, Australia e Cina.

- **Ruifu Lithium**

Ha sede in Cina e si occupa principalmente della produzione di carbonato di litio grado batteria a partire dalla sua estrazione. Poi produce altri composti chimici come solfato di sodio, polvere di silicio di alluminio ed altri. Estrae litio dal giacimento di litio di Aktas, nella regione dello Xinjiang, attraverso la sua controllata Xinjiang Dongli Mining Investment Co.

- **Weihua**

Adesso denominata Chengxin Lithium, è una società cinese e il suo portafoglio prodotti comprende composti a base di litio come carbonato di litio, l'idrossido di litio, il cloruro di litio. È presente in tutto il mondo con diversi progetti di estrazione e produzione, ad esempio nella RDC, in Argentina, Indonesia e Zimbabwe.

- **QingHai Salt Lake Industry**

Con sede in Cina, si occupa di tutte le fasi della catena per la produzione di carbonato e idrossido di litio per l'industria degli EV. Estrae litio principalmente in Cina, dal lago salato di Qarhan, e lo lavora negli impianti adiacenti. Si occupa anche della ricerca di nuove tecniche più efficienti per l'estrazione del litio al fine di renderlo sostenibile. Rifornisce produttori di batterie sparsi per tutto il mondo.

- **Sichuan Yahua Industrial Group**

Azienda cinese che si concentra sulla produzione composti di litio ad alta purezza per batterie agli ioni di litio, come idrossido di litio e carbonato di litio. Ha un importante posizionamento nella supply chain del litio, fornendo ad esempio idrossido di litio a Tesla. C'è da specificare che non possiede miniere di proprietà, ma ha stipulato dei contratti con società minerarie di litio al fine di garantirsi la l'approvvigionamento sicuro, per poi trasformarlo nelle sue fabbriche in Cina.

- **Tianqi Lithium**

Tianqi Lithium, con sede in Cina, è un'azienda completamente integrata verticalmente, impegnata nell'estrazione di concentrato di litio e nella produzione di composti di litio specializzati, come carbonato e idrossido di litio, destinati ai settori dei veicoli elettrici e dell'accumulo di energia. L'azienda pone una particolare enfasi sulla sostenibilità dei propri processi. Le sue risorse e strutture produttive sono situate nelle principali regioni produttive di litio, tra cui Australia, Cile e Cina.

3. Componenti della cella elettrochimica

La cella delle LIB, mostrata in figura 30, è composta da un anodo e un catodo, collegati rispettivamente a collettori di corrente, separati da un sottile strato permeabile (separator) impregnato di un elettrolita liquido. Gli elettrodi contengono materiali chimicamente attivi coinvolti nelle reazioni elettrochimiche, leganti che garantiscono coesione strutturale e particelle di carbonio conduttive per migliorare la conduttività del materiale poroso.

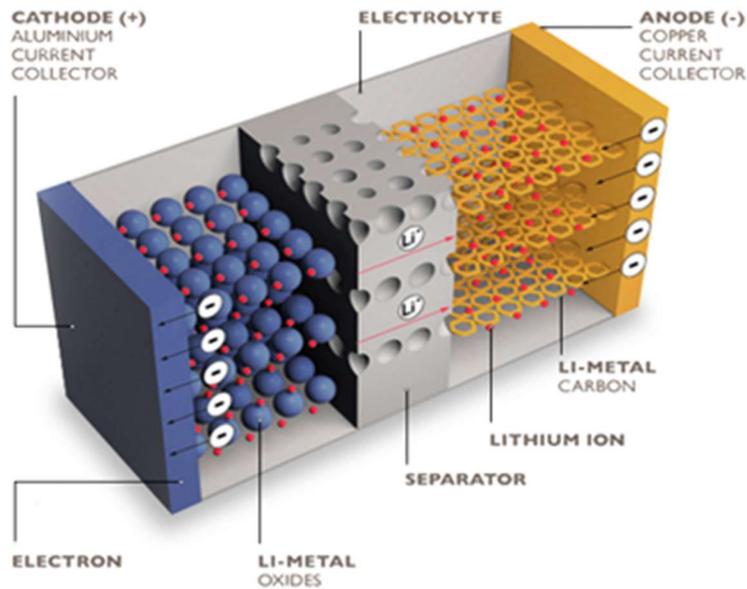


Figura 30: componenti della cella. (KVI battery, s.d.)

3.1 Catodo

Il catodo, elettrodo positivo della cella, riveste un ruolo fondamentale, poiché determina la chimica della batteria e ne influenza quindi le principali caratteristiche operative. Le qualità che il catodo conferisce alla cella includono:

- Capacità di accumulo di energia (espressa in kWh), ossia la quantità totale di energia che la batteria può immagazzinare.
- Densità energetica (kWh/kg), che indica quanta energia può essere immagazzinata per unità di peso della batteria.
- Densità di potenza, cioè la potenza che la batteria può erogare in un determinato intervallo di tempo per unità di peso o volume.
- Costo, che dipende dai materiali utilizzati per il catodo.
- Sicurezza, relativa all'affidabilità e stabilità del catodo.
- Durata del ciclo di vita, misurata in base al numero di cicli completi di carica e scarica che la batteria può sostenere nel tempo.

Tra i vari tipi di catodi focalizziamo la nostra attenzione sui seguenti: NMC, LFP, NCA, LMR-NMC, LCO, LMO.

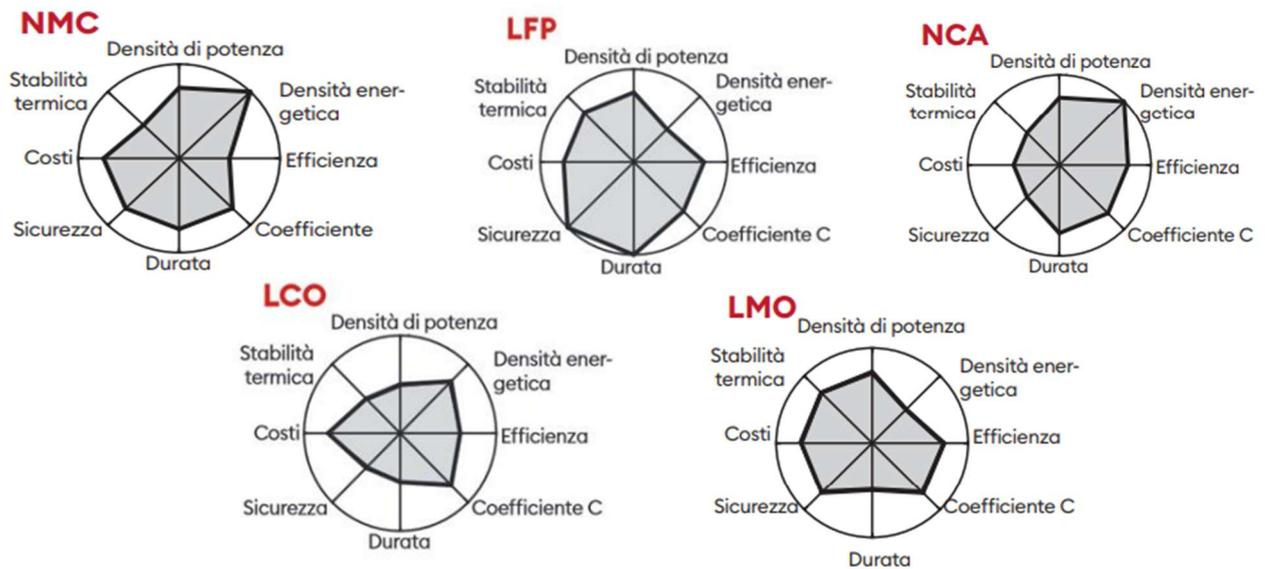


Figura 31: tipologie di catodi. (uwa, n.d.)

Passiamo alla descrizione dei vari catodi e al confronto delle loro caratteristiche visibili in figura 31.

- **NMC (Ossido di litio-nichel-manganese-cobalto)**

È un catodo che viene prodotto con processi chimici ad alte temperature di solfato di nichel, solfato di manganese e solfato di cobalto e che quindi portano al fabbisogno di una grande quantità di energia. Questo tipo di elettrodo è ampiamente utilizzato nei mercati delle auto elettriche in Europa e negli Stati Uniti; tuttavia, la Cina rimane il principale produttore di NMC, detenendo oltre tre quarti della capacità installata per la sua fabbricazione. (International Energy Agency, 2024)

Un problema legato all'uso del catodo NMC è la dipendenza dal cobalto e dal nichel, che come visto nei capitoli 2.4 e 2.5 sono caratterizzati da problematiche ambientali e sociali e dai prezzi elevati, incentivando la crescita della produzione di catodi alternativi come l'LFP.

I vantaggi tecnici dell'uso del NMC derivano dall'eccellente densità di energia e potenza, nonché dalla stabilità in situazioni di emergenza. Però, presenta anche alcuni svantaggi, come una durata della vita notevolmente inferiore rispetto all'LFP e un costo mediamente elevato. (International Energy Agency, 2022)

○ **LFP (Fosfato di ferro)**

L'LFP è nato negli Stati Uniti nel 1997 e perfezionato in Canada nei primi anni 2000. Tuttavia, a causa di un favorevole accordo di proprietà intellettuale, la Cina è diventata l'unico Paese a produrre in serie batterie LFP a partire dagli anni 2010. Con la scadenza dei principali brevetti nel 2022, l'interesse per la produzione di LFP al di fuori della Cina è aumentato, portando a significativi investimenti in Marocco. Questo Paese, che possiede le maggiori riserve di fosfati al mondo e vantaggi derivanti da accordi di libero scambio con Stati Uniti ed Europa, ha registrato investimenti annunciati nel 2022 quasi pari a quelli degli ultimi cinque anni, raggiungendo i 15,3 miliardi di dollari.

Negli ultimi cinque anni, l'LFP è passata da una presenza marginale a un ruolo di primo piano nell'industria delle batterie, soddisfacendo oltre il 40% della domanda globale di veicoli elettrici per capacità nel 2023, più del doppio rispetto alla quota registrata nel 2020. La produzione e l'adozione dell'LFP sono prevalentemente concentrate in Cina, dove nel 2023 due terzi delle vendite di veicoli elettrici utilizzavano questa chimica. Al contrario, la quota di batterie LFP nelle vendite di veicoli elettrici in Europa e negli Stati Uniti rimane inferiore al 10%, con le chimiche ad alto contenuto di nichel che dominano in questi mercati. (International Energy Agency, 2024)

La market share dell'LFP prevista per il 2025 è di circa il 25%. Questa quota secondo le previsioni è destinata ad aumentare raggiungendo il 30% del mercato nel 2030. (Wood Mackenzie, 2020)

LFP offre numerosi vantaggi rispetto a NMC, tra cui una durata di vita significativamente più lunga, con 3000/5000 cicli contro i 1000 di NMC. Inoltre, è considerata la batteria al litio più sicura e può erogare alte correnti, rendendola ideale per applicazioni che richiedono elevata densità di potenza. Un ulteriore vantaggio delle batterie LFP è il loro costo di produzione inferiore, grazie ai prezzi più contenuti delle materie prime. Con l'aumento dei costi del nichel, le celle LFP risultano circa il 30% più economiche rispetto alle celle NCA e NMC. Tuttavia, un limite significativo dell'LFP è la sua bassa densità energetica, notevolmente inferiore a quella di NMC. (International Energy Agency, 2022)

Guardando al futuro, il confronto tra le quote di mercato di NMC e LFP evidenzia una tendenza chiara: si prevede che l'LFP aumenterà la propria quota entro il 2030, mentre la market share di NMC è destinata a ridursi, raggiungendo circa il 48% nel 2025 e il 34% nel 2030.

Questa evoluzione è attribuibile principalmente ai costi più elevati e alle criticità legate all'uso di cobalto e nichel nelle batterie NMC. Di conseguenza, cresce l'interesse per i catodi LFP, specialmente in Cina, dove la capacità produttiva è stata ampliata per soddisfare una forte domanda interna. Questo sviluppo potrebbe dare alla Cina un vantaggio competitivo nel mercato globale: le auto elettriche cinesi, equipaggiate con batterie LFP, potrebbero risultare più economiche rispetto ai veicoli con batterie NMC, che predominano nei mercati occidentali. (International Energy Agency, 2022)

- **NCA (Li-nichel-cobalto-alluminio-ossido)**

L'NCA è stato sviluppato per massimizzare la densità di energia ed è stato originariamente concepito da Panasonic e Saft. Attualmente, è utilizzato nei veicoli elettrici Tesla. La sua quota di mercato, simile a quella dell'NMC, è stata influenzata negativamente dalla crescente popolarità delle batterie LFP, con una previsione che la colloca intorno al 10% entro il 2025.

Tra le caratteristiche chimiche del catodo NCA, spiccano l'alta densità energetica e la notevole densità di potenza, oltre a costi relativamente contenuti, sebbene l'aumento del prezzo del nichel abbia inciso su questi ultimi. Inoltre, l'NCA vanta una lunga vita utile.

Tuttavia, uno dei principali svantaggi di questo catodo è la sua reattività, che solleva preoccupazioni per la sicurezza quando è utilizzato in sistemi di batterie di grandi dimensioni. Per affrontare questa sfida, Tesla opta per l'utilizzo di molte piccole celle di batteria di formato standard, che consentono di implementare soluzioni di design protettive più efficaci, migliorando così la sicurezza complessiva del sistema. (International Energy Agency , 2022)

Altri catodi che presentano invece una market share minore sono i seguenti:

- **LCO (ossido di litio-cobalto)**

Offre una densità di energia elevata e un processo di produzione relativamente semplice. Tuttavia, il biossido di cobalto presenta una scarsa sicurezza intrinseca, e le fluttuazioni nel prezzo del cobalto contribuiscono ad aumentare i costi complessivi. È principalmente utilizzato per le batterie di laptop e smartphone. (Jennifer B. Dunn, 2015)

- **LMO (ossido di litio-manganese)**

Questa tecnologia è emersa poco dopo l'LCO e offre una soluzione alla speculazione sul cobalto, utilizzando un materiale altamente disponibile e a basso costo: il manganese. Sebbene la densità di energia sia leggermente inferiore rispetto all'LCO, rimane comunque competitiva. Inoltre, la sicurezza intrinseca del materiale attivo LMO è significativamente migliore rispetto a quella dell'LCO. La densità di potenza è paragonabile a quella degli altri tipi di catodi, mentre il principale svantaggio è rappresentato dai cicli di vita relativamente brevi. (Jennifer B. Dunn, 2015)

- **LMR-NMC (Catodo di litio avanzato)**

Il materiale catodico in questione è relativamente nuovo e attualmente non è prodotto su larga scala. Tra i vantaggi spiccano una maggiore capacità e un minor fabbisogno di materiali, il che contribuisce a ridurre il peso complessivo della batteria. Di conseguenza, offre un'elevata densità energetica e un costo contenuto.

Tuttavia, uno dei principali svantaggi è la sua rapida degradazione. Inoltre, le tecniche di produzione sono ancora in fase di sviluppo e non sono ancora disponibili a livello commerciale, il che limita ulteriormente la sua applicazione. (Jennifer B. Dunn, 2015)

3.2 Anodo

L'anodo, elettrodo negativo, deve essere capace di accumulare e rilasciare ioni di litio senza alterare significativamente la propria struttura molecolare; processo noto come intercalazione. Il materiale ideale per l'anodo deve poter contenere una grande quantità di ioni di litio, mantenendo al contempo una bassa dilatazione volumetrica. Inoltre, l'intercalazione e il suo processo inverso devono garantire stabilità chimica e termica per consentire un elevato numero di cicli.

- La **grafite** è il materiale anodico più diffuso nelle batterie agli ioni di litio, grazie alla sua eccellente conduttività elettrica, leggerezza, resistenza alle alte temperature (fino a 3600°C) e stabilità chimica. Queste proprietà la rendono ideale per le batterie dei veicoli elettrici, dove la leggerezza e l'affidabilità sono cruciali. La sua stabilità chimica permette di resistere a forti sollecitazioni e aiuta a prevenire ossidazione e corrosione, prolungando la vita utile della batteria.

La grafite per diventare anodo deve subire altre lavorazioni dopo quelle nel secondo paragrafo del capitolo 2.3. Infatti, troviamo la miscelazione della grafite rivestita di carbonio con un additivo conduttivo, un legante e un solvente, da cui si ottiene una pasta densa. Successivamente, questa pasta viene applicata su un foglio di rame. L'elettrodo negativo ottenuto viene poi sottoposto al processo di calandratura per raggiungere lo spessore desiderato e viene infine tagliato alle dimensioni corrette per formare l'elettrodo negativo della batteria. (P. P. Prosini, 2014)

Altri materiali utilizzati in percentuale minore come materiali anodici sono il Silicio, Titanato di Litio (LTO).

- **Silicio**

Rispetto alla grafite, dove sei atomi di carbonio possono ospitare un solo ione di litio, il silicio offre il vantaggio di immagazzinare quattro ioni di litio per ogni atomo. Esso ha quindi un'elevata densità energetica ed è anche disponibile in grandi quantità sulla Terra e quindi economico. Tuttavia, a causa della forte dilatazione cubica quando si immagazzinano gli ioni di litio, è caratterizzato da un limitato numero di cicli di carica e scarica. Spesso si usano forme ibride come silicio e grafite, come per le batterie con catodo LMR-NMC per migliorarne le caratteristiche di funzionamento. (Jennifer B. Dunn, 2015)

- **Titanato di litio**

Il titanato di litio presenta alcune limitazioni, come una capacità inferiore rispetto ad altri materiali. Ciò nonostante, è particolarmente adatto quando non è necessaria un'elevata densità energetica, ma si desidera una ricarica rapida e frequente. Questo è vantaggioso, ad esempio, per gli autobus di linea, che non utilizzano batterie di grandi dimensioni ma vengono ricaricati più volte al giorno presso stazioni di ricarica rapida, cosa non possibile con batterie NMC o LFP. Inoltre, il titanato di litio offre un ulteriore vantaggio in termini di sicurezza in caso di incidenti. (International Energy Agency, 2024)

3.3 Separatore

Il separatore delle batterie agli ioni di litio è una membrana polimerica porosa, generalmente in polietilene (PE) o polipropilene (PP), che impedisce il contatto diretto tra anodo e catodo, prevenendo cortocircuiti, e consente il passaggio degli ioni di litio tra i due elettrodi.

Per garantire prestazioni ottimali, il separatore deve essere robusto, chimicamente stabile e sufficientemente poroso. La dimensione dei pori è cruciale: devono essere piccoli per bloccare la crescita dei dendriti, ma abbastanza grandi da facilitare il trasporto ionico. È fondamentale evitare pori eccessivi o fori che possano causare cortocircuiti.

La resistenza meccanica è un altro aspetto chiave. È importante misurare la pre-tensione necessaria per prevenire danni durante l'assemblaggio e deformazioni post-assemblaggio, assicurando così affidabilità e sicurezza della batteria. (Cardone, 2023)

3.4 Elettrolita

L'elettrolita è il mezzo conduttivo all'interno delle batterie agli ioni di litio, facilita il movimento degli ioni di litio tra gli elettrodi positivo e negativo durante i cicli di carica e scarica. Esso è generalmente composto da un solvente, che funge da mezzo di trasporto per gli ioni, e da un sale di litio, che aumenta la conduttività ionica. La composizione e la qualità dell'elettrolita sono fondamentali per le prestazioni, la sicurezza e la durata delle batterie al litio.

La scelta dei solventi per l'elettrolita è cruciale per garantire la conduttività e la stabilità della batteria. Tra i solventi comunemente utilizzati ci sono l'etilene carbonato (EC), il dimetil carbonato (DMC) e il dietil carbonato (DEC). (CT, 2024)

3.5 Componenti aggiuntivi dell'elettrodo: legante ed additivo

Il legante e l'additivo conduttivo presenti negli elettrodi positivo e negativo comportano un costo aggiuntivo, sebbene modesto, per la batteria. L'additivo conduttivo utilizzato è il carbon black, che migliora la conduttività degli elettrodi. Il legante, realizzato in PVDF, offre una buona resistenza all'ossidazione e stabilità chimica, rendendolo meno suscettibile a degradazione. Inoltre, il PVDF possiede eccellenti proprietà di rigonfiamento, che favoriscono una migliore bagnabilità dei fogli degli elettrodi con l'elettrolita. Il solvente impiegato per questo legante è l'NMP. (Lecron share, 2024)

3.6 Collettore di corrente

Il collettore di corrente consente il flusso di elettroni tra l'anodo e il catodo, così come nel circuito esterno. Questi collettori sono realizzati con fogli metallici sottili: il collettore dell'anodo è generalmente in rame, poiché garantisce un'eccellente conducibilità elettrica, mentre quello del catodo è in alluminio, che non solo assicura una buona conducibilità, ma offre anche una notevole resistenza alla corrosione, dovuta ai potenziali elettrochimici più elevati presenti nel lato catodico della batteria.

-Affronteremo il processo di assemblaggio dei componenti appena descritti nel capitolo successivo.

4 Produzione di celle, moduli e pacchi

Ora ci concentreremo sulla parte a valle della supply chain per la produzione delle batterie agli ioni di litio. In questa fase i componenti descritti nel Capitolo 3 vengono assemblati in celle, moduli ed infine pacchi batteria. Tutto avviene nelle gigafactory, che sono ampi stabilimenti dedicati proprio alla produzione delle LIB.

Segue la descrizione dettagliata del processo dei materiali all'interno delle gigafactory.

❖ Processo di fabbricazione dei pacchi batteria

1. Ricezione dei componenti

Tutto ha inizio con la ricezione dei componenti, i quali arrivano nella gigafactory e vengono disposti in apposite aree per essere inizialmente immagazzinati. I materiali degli elettrodi, ad esempio, verranno disposti in una stanza con atmosfera asciutta per non degradarsi.

2. Costruzione della cella

2.1 Produzione degli elettrodi positivi e negativi

La produzione dell'elettrodo include processi di miscelazione, rivestimento, essiccazione, calandratura e taglio, essiccazione finale e controllo.

1) Miscelazione

Consiste nell'andare a mescolare l'additivo e il materiale attivo, per poi aggiungere il legante e il solvente e preparare la sospensione. Questa fase differisce per l'anodo e per il catodo, infatti, per preparare la sospensione di quest'ultimo, il materiale attivo e l'additivo vengono miscelati a secco nel miscelatore, poi si accende l'acqua circolante e si versa il solvente, per poi attivare la modalità a vuoto e poter versare il legante.

2) Rivestimento

Il foglio di alluminio per catodo, e di rame per l'anodo, vengono rivestiti con uno strato della sospensione prodotta precedentemente, mediante un rivestimento a umido.

3) Essiccazione

Consiste nel mettere in un forno i fogli rivestiti e cuocere a 95–120 °C l'anodo e a 80–105 °C il catodo.

4) Calandratura e taglio

Il quarto passaggio prevede la calandratura dell'elettrodo rivestito per ottimizzare proprietà come conduttività e densità. Inoltre, la calandratura aumenta anche l'adesione dei materiali al collettore di corrente. Esistono due approcci principali: pressatura a caldo e pressatura a freddo, più semplice e intuitiva da implementare.

Dopo si passa al taglio, cioè, tagliare l'intero foglio dell'elettrodo per adattarlo al design specifico della cella in base alle esigenze effettive.

5) **Essiccazione finale**

La fase seguente è l'essiccazione degli elettrodi sottovuoto prima dell'assemblaggio delle celle. Questa avviene in una stanza asciutta, ed ha come fine quello di eliminare l'acqua in eccesso, prevenendo reazioni collaterali e corrosione. Successivamente, gli elettrodi essiccati vengono saldati per evitare cortocircuiti e prepararli per il successivo passaggio.

6) **Controllo**

Il laboratorio di controllo ha il compito di verificare che le materie prime e gli elettrodi in produzione rispettino le specifiche richieste.

2.2 **Assemblaggio della cella**

Le celle vengono assemblate in quattro fasi, che vengono eseguite in una stanza asciutta.

1) **Avvolgimento degli elettrodi**

Nel passaggio seguente, gli elettrodi e il separatore vengono avvolti in un singolo nucleo.

2) **Saldatura degli elettrodi**

Le linguette del collettore di corrente degli elettrodi negativi e positivi vengono unite ai rispettivi terminali, assicurando bassa resistenza e prevenendo il surriscaldamento.

3) **Chiusura della cella nel case**

La cella viene sottoposta a un test ad alta tensione per rilevare eventuali cortocircuiti. Dopo il test, la cella viene messa sottovuoto e inserita nel case in alluminio. Il nucleo della cella viene fissato alla custodia per evitare vibrazioni; successivamente, la cella viene asciugata per eliminare l'umidità residua, le sbavature e la polvere generate durante la produzione.

4) **Riempimento dell'elettrolita e sigillatura delle celle**

Infine, una quantità precisa di elettrolita viene iniettata nella cella asciutta. Tutto termina con la saldatura finale.

2.3 **Formazione**

La formazione è un processo elettrochimico che, attraverso la corrente, attiva il materiale dell'elettrodo, rendendo la cella funzionale per la scarica. Le operazioni includono carica, scarica completa per misurare capacità e impedenza, e ricarica totale delle celle. I test si svolgono in unità di ciclaggio a temperatura controllata che analizzano più celle contemporaneamente, monitorandole e identificando automaticamente quelle difettose. Fattori come corrente, tempo e temperatura influenzano il processo e devono essere bilanciati in base alle specifiche della cella.

Ci sono poi le fasi di lavaggio, asciugatura, oliatura e restringimento termico. La superficie della cella viene prima lavata per rimuovere residui di elettrolita e impurità, poi asciugata. Successivamente, si applica uno strato di olio per prevenire la ruggine, seguito dal restringimento termico per evitare cortocircuiti esterni e proteggere la scocca. (Qi, 2023)

3. Assemblaggio delle celle in moduli



Figura 32: modulo batterie prismatiche. (LYTH, 2021)

La figura 32 ci mostra come le celle vengono assemblate in moduli.

Le celle possono essere collegate in serie o in parallelo per dare vita ai moduli. La scelta del layout dipende dalle prestazioni che si vogliono raggiungere.

Se collegate in serie, permettono al pacco di aumentare la tensione complessiva raggiungibile, mentre se in parallelo consentono di aumentare la capacità del pacco batteria.

Se prendiamo in considerazione l'assemblaggio delle celle prismatiche, esse vengono unite tra loro mediante una pellicola adesiva che funge da isolante elettrico e termico in caso di incidente.

Poi si passa al cablaggio delle celle, mediante connessione elettrica dei terminali tramite saldatura, e al successivo controllo delle giunzioni per la conduttività, effettuato attraverso misurazioni di resistenza.

Sono aggiunti circuiti elettronici, mentre un conduttore termico in alluminio viene installato attorno a ciascuna cella. Le celle vengono infine sistemate all'interno di un contenitore rigido, generalmente in alluminio o acciaio, e avvitate/incollate ad esso, così da proteggerle da eventuali urti e favorire la dissipazione del calore. (Heimes, 2019)

4. Costruzione dei pacchi batteria

I moduli finiti vengono assemblati in pacchi batteria e verranno aggiunti BMS, il TMS, e ulteriori componenti che dipendono dalle personalizzazioni scelte dalle singole case automobilistiche.

4.1 Mercato dei produttori dei pacchi batteria

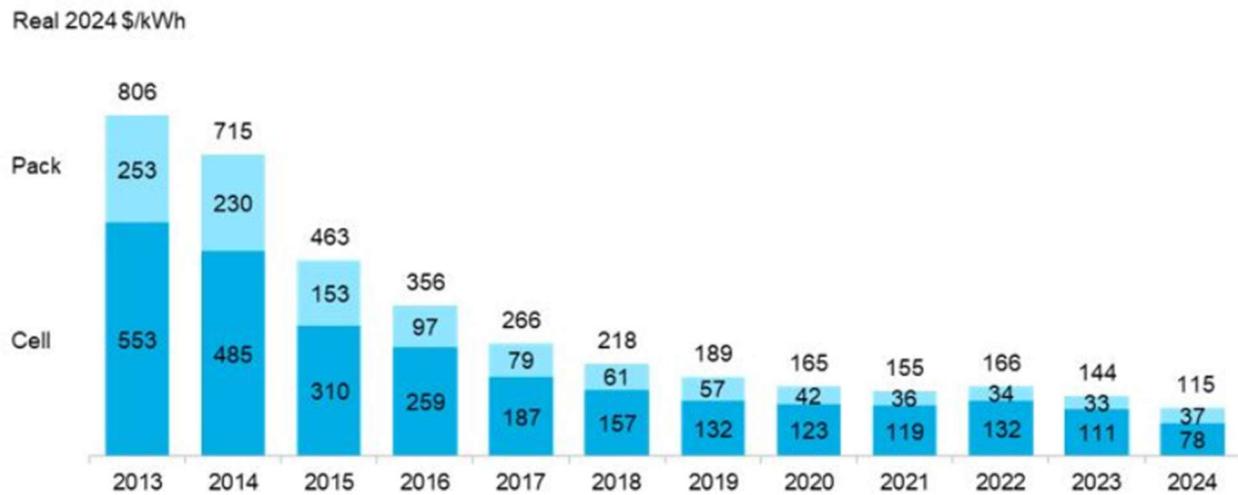


Figura 33: andamento del prezzo delle batterie agli ioni di litio dal 2013 al 2024. Fonte: (BloombergNEF, 2024).

Il mercato delle batterie agli ioni di litio per i veicoli elettrici sta attraversando una fase di profonda trasformazione. Diversi fattori hanno influenzato il settore, tra cui, in particolare, il rallentamento della domanda di batterie, strettamente legato alla flessione del mercato dei veicoli elettrici registrata quest'anno. A causa di quanto detto e dei continui investimenti per l'aumento della capacità produttiva degli operatori del mercato, si è generata nel 2024 una sovracapacità superiore a due volte e mezzo la domanda di LIB. Questi fattori, combinati con le economie di scala, know-how acquisito, bassi costi dei metalli e dei componenti, e l'aumento nell'adozione delle batterie LFP, più convenienti rispetto a quelle alle NMC, hanno portato al raggiungimento di un prezzo medio globale, individuabile nella figura 33, di 115 \$/kWh, confermando un calo del 20% rispetto a quello del 2023..

A livello regionale, il prezzo varia significativamente. In Cina, grazie alla forte concorrenza tra i produttori di batterie per veicoli elettrici, alle economie di scala consolidate, all'accesso a materie prime a basso costo e a catene di fornitura integrate verticalmente, il prezzo medio si attesta a 94 \$/kWh. Negli Stati Uniti e in Europa, invece, i prezzi dei pacchi batteria risultano rispettivamente superiori del 31% e del 48% rispetto a quelli cinesi. Questo divario è dovuto ai costi più elevati sostenuti dai produttori di queste regioni, legati anche alla maggiore diffusione delle chimiche NMC, rispetto alle più economiche LFP, delle quali la Cina detiene circa il 100% della capacità produttiva. Questo calo dei prezzi comunque non giova ai piccoli produttori, che non godendo dei vantaggi di costo dei grandi, trovandosi sotto pressione, devono trovare un trade-off tra rimanere redditizi e competere sui prezzi per acquisire quota di mercato. (BloombergNEF, 2024)

Parlando degli attori del mercato, come era facilmente deducibile, la Cina domina la produzione di batterie agli ioni di litio, riuscendo a soddisfare l'intera domanda interna e ad esportarne circa il 12%.

L'Europa e gli Stati Uniti, invece, non riescono a soddisfare l'intera domanda interna e sono costretti a rispondere ad essa rispettivamente con circa il 20% e il 30% delle importazioni.

Nonostante nel 2023 i mercati europeo e statunitense abbiano registrato la crescita maggiore tra i principali mercati di LIB in termini di GWh prodotti, comunque si classificano al secondo e terzo posto, dietro alla Cina. In particolare, il mercato europeo vede come principali attori la Polonia, seguita dall'Ungheria, che insieme hanno rappresentato il 90% della produzione di batterie agli ioni di litio dell'Europa.

Concentrandoci sulle aziende operanti nel mercato, emerge una forte concentrazione, con 10 grandi imprese che detengono oltre il 90% della quota di mercato. Non sorprende che la maggioranza di queste società sia cinese e che tutte abbiano sede in Asia, includendo anche società sudcoreane e giapponesi. Questo predominio regionale, rispetto ad Europa e Stati Uniti, sta spingendo tali aziende ad espandere e finanziare direttamente l'incremento della capacità produttiva nei mercati statunitense ed europeo. (International Energy Agency, 2024)

❖ Produttori di batterie agli ioni di litio per veicoli elettrici

Analizziamo adesso i principali players del mercato delle batterie agli ioni di litio che sono presenti nella figura 34 con la relativa quota di mercato.

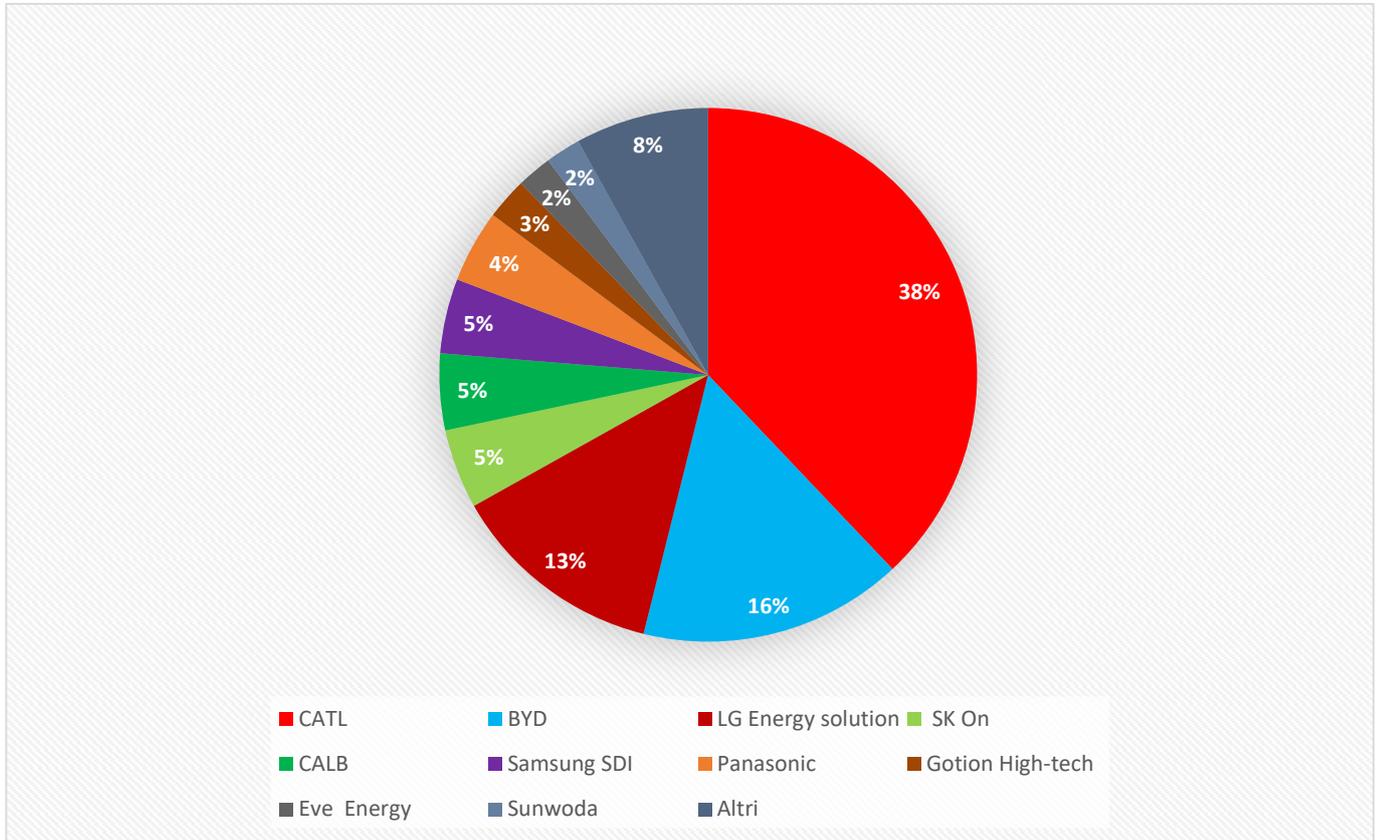


Figura 34: market share produttori batterie agli ioni di litio.

- **CATL (Contemporary Amperex Technology Co., Ltd)**

Con sede a Ningde, nella provincia cinese del Fujian, è una multinazionale leader mondiale nella produzione di batterie, fondata nel 2011, specializzata nello sviluppo e nella produzione di batterie agli ioni di litio per veicoli elettrici e sistemi di accumulo energetico. L'azienda è all'avanguardia nello sviluppo di tecnologie innovative, focalizzandosi su batterie con maggiore densità energetica, maggiore sicurezza, una vita utile più lunga e capacità di ricarica ultraveloce. CATL è inoltre attiva nella produzione di catodi e altri materiali per batterie e, tramite la sua sussidiaria Brunp, collabora con i clienti per garantire un ciclo di vita completo e sostenibile delle batterie, dalla produzione e utilizzo fino al riciclaggio. Produce batterie in 13 impianti di produzione, la maggior parte dei quali localizzati in Cina, con ulteriori stabilimenti in Ungheria e in Germania. Fornisce batterie a case automobilistiche come Tesla, BMW, Honda, Volkswagen, Mercedes-Benz, Toyota e molti altri.

- **BYD**

Multinazionale high-tech cinese, opera nei settori che variano da quello dell'elettronica fino a quello dell'automobile, del trasporto ferroviario e delle energie rinnovabili. Possiede 30 impianti di produzione sparsi in tutti i continenti e ha un'attenzione particolare sulla ricerca di soluzioni tecnologiche a basso impatto ambientale. Nel settore delle automobili elettriche produce sia veicoli elettrici che plug-in, ma si occupa anche della produzione di batterie LFP, in particolare ha sviluppato la Blade Battery, che monta sulle proprie auto e che vende a case automobilistiche sparse in tutto il mondo, come ad esempio a Tesla, Stellantis, e a Toyota.

- **LG Energy Solution**

LG Energy Solution Ltd è un'azienda nata dallo spin-off di LG Chem, con sede in Corea. La sua gamma di prodotti comprende batterie per veicoli elettrici, batterie per piccole applicazioni e per sistemi di accumulo di energia. Ha impianti di produzione in Polonia, Corea del Sud, Cina e Stati Uniti, che gli permettono di essere vicino ai clienti sparsi per il globo. Le batterie che produce si basano principalmente sulla chimica NMC, ma si sta adattando ai trend di mercato attuali cominciando a produrre anche le batterie LFP. Fornisce batterie a numerosi produttori automobilistici di rilievo, tra cui Tesla, General Motors, Hyundai, Kia e Renault e Volkswagen.

- **SK On**

SK On, con sede in Sud Corea, sviluppa tecnologie innovative per batterie in risposta alla crescita del mercato dei veicoli elettrici e all'evoluzione delle tendenze tecnologiche. Leader nella tecnologia ad alto contenuto di nichel, l'azienda ha realizzato batterie ad alta densità energetica che sfruttano la chimica NMC. Ha un'ottica che mira al rispetto dell'ambiente producendo batterie agli ioni di litio ad alta efficienza e capacità, contribuendo alla riduzione delle emissioni di CO2 fornite a produttori globali di veicoli elettrici. Con il lancio di SK On Trading International, l'azienda mira a entrare nel commercio di materie prime per batterie, potenziando la propria competitività grazie a una piattaforma commerciale avanzata e a esperti qualificati. Questo approccio rafforza la catena di fornitura, garantendo valore sostenibile. Per stare vicino ai produttori di EV, possiede impianti situati in USA, Polonia e Corea del Sud. Ha come clienti Ford, Volkswagen, Hyundai e Ferrari.

- **CALB**

È una compagnia cinese che si occupa dello sviluppo, produzione e vendita di batterie agli ioni di litio e sistemi di accumulo di energia. L'azienda offre soluzioni complete e una gestione avanzata del ciclo di vita delle LIB, occupandosi anche del loro riciclo. CALB sta consolidando la sua presenza in siti strategici, tra cui Cina, Portogallo, Thailandia, costruendo rapidamente impianti industriali sostenibili e intelligenti di riferimento.

- **Samsung SDI**

Samsung SDI Co Ltd è un'azienda sudcoreana specializzata nella produzione di batterie ricaricabili agli ioni di litio e di materiali elettronici. La sua attività si concentra principalmente su due aree. Da un lato, produrre batterie agli ioni di litio utilizzate per varie applicazioni che vanno dalle piccole batterie per dispositivi mobili, alle batterie di medie dimensioni per veicoli elettrici, fino a quelle di grandi dimensioni impiegate nei sistemi di accumulo energetico. Dall'altro lato, è attiva nella produzione di materiali per semiconduttori e display. Gli stabilimenti produttivi sono localizzati in Indonesia, Ungheria, Corea del Sud, Cina e Malesia. Fornisce tante case automobilistiche come Ford, Stellantis, Volvo, Volkswagen, BMW, Rivian. Hyundai, Lucid e General Motors.

- **Panasonic**

Azienda giapponese, che è attiva in vari settori, tra i quali quello delle batterie, producendo batterie per veicoli elettrici, sistemi di gestione delle batterie, componenti per veicoli elettrici e stazioni di ricarica per EV. Le chimiche sulle quali si concentra per applicazioni negli EV sono quella NCA e NMC. Possiede 20 siti di produzione globale, molti dei quali localizzati in Giappone, e poi in altri paesi come Stati Uniti, Cina; sono in programma nuovi stabilimenti in Europa per rispondere alla domanda locale. Collabora con Tesla, il quale è il suo principale cliente, ma anche con Toyota, Honda, Mazda, Ford, GM, Lucid e Rivian.

- **Gotion High-tech**

Ha sede in Cina, ed è integrata verticalmente, occupandosi dell'estrazione di Litio, Nichel e Cobalto, della produzione dei materiali catodici, anodici, separatore ed elettrolita, della produzione dei diversi tipi di celle, fino alla costruzione del pacco batteria, ma anche del recupero dei materiali dal suo riciclo non appena raggiungerà il fine vita. Le applicazioni delle sue batterie sono nei veicoli elettrici e nei sistemi di accumulo di energia. Le fabbriche sono situate in Cina, Germania e nel Nord America. Il portafoglio clienti è costituito da Volkswagen Geely NIO Honda e altri più piccoli.

- **Eve Energy**

EVE Energy Co., Ltd., ha sede in Cina, offre tecnologie e soluzioni avanzate per batterie destinate a dispositivi di consumo, veicoli elettrici e sistemi di accumulo energetico. La fabbricazione delle LIB per auto elettriche è concentrata in Cina, ma sono in fase di costruzione dei centri produttivi in Europa e nella zona sud asiatica. La rete commerciale dell'azienda è ampia, raggiungendo numerosi paesi come ad esempio Francia, Germania, Regno Unito, Polonia, Turchia, Giappone, Corea del Sud e molti altri.

- **Sunwoda**

È un'azienda cinese che si concentra su soluzioni energetiche ecologiche operando in cinque settori principali: batterie 3C, batterie per veicoli elettrici, sistemi di accumulo energetico, hardware intelligence e innovazione ecologica. Ha stabilito numerosi impianti di produzione in Cina e all'estero, in paesi come India, Vietnam, Ungheria. Le case automobilistiche che montano sui propri veicoli elettrici le sue batterie sono BYD, NIO, Honda, Volkswagen, Geely e Great Wall Motors.

4.2 Sostenibilità ambientale

Dopo aver studiato i processi che vanno dall'estrazione delle materie prime fino alla costruzione delle batterie, adesso possiamo occuparci di come vengono riciclate.

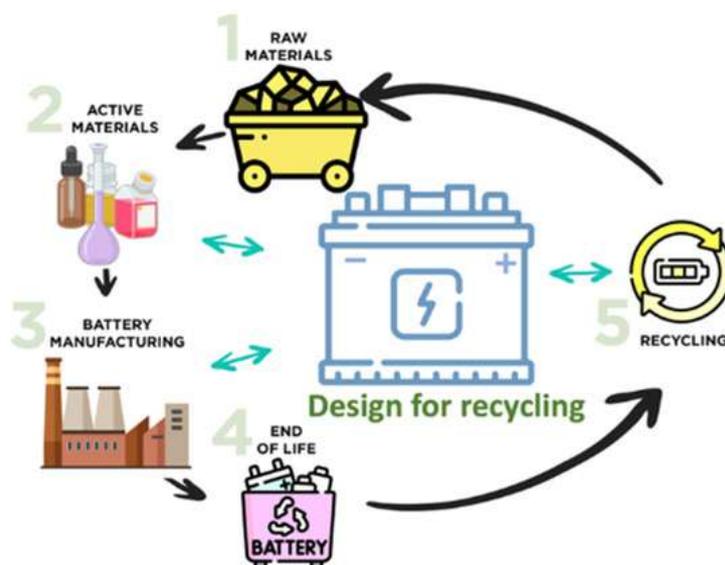


Figure 35: ciclo di vita delle batterie per auto elettriche. (Zanoletti, 2024)

La sostenibilità ambientale è un argomento che ricopre un ruolo di primo piano oggi giorno. Infatti, per combattere l'inquinamento ambientale, tema di grande interesse oggi giorno, ci si sta interrogando su come si possa agire. Come annunciato nei paragrafi precedenti, i governi di tutto il mondo stanno cercando di emanare direttive per limitare questo fenomeno e, ovviamente, l'uso di mezzi "green", alimentati da batterie elettriche, è al vertice di questa transizione energetica. Anche le auto elettriche, comunque, hanno impatti negativi sull'ambiente, poiché la produzione delle batterie include le fasi di estrazione delle materie prime, raffinazione, trasporto e dismissione, che comportano emissioni di CO₂. Per limitare questi impatti, il settore automobilistico è quindi chiamato a rispondere all'urgente problema della gestione delle batterie esauste puntando su un'economia di tipo circolare. Si prevede che, a seguito dell'aumento della domanda di veicoli elettrici, ci sarà un conseguente aumento della domanda di pacchi batteria e, di conseguenza, di quelli che raggiungeranno il fine vita, stimati in 464.000 tonnellate nel 2025 e destinati a raggiungere 1,2 milioni di tonnellate entro il 2030 come mostrato in fig. 36. (Schlögl, 2024)

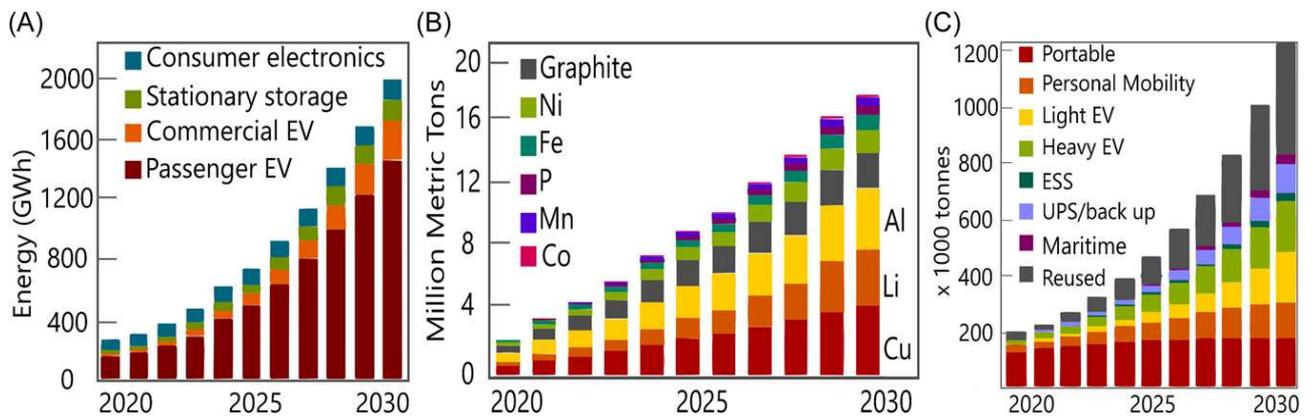


Figura 36: A) Domanda annuale di batterie agli ioni di litio (LIB) in vari settori e (B) domanda di metallo per batterie al litio per i prossimi 6 anni. (C) LIB disponibili per il riciclaggio da varie fonti. (Roy, 2024)

Per studiare l’impatto ambientale dei pacchi batteria agli ioni di litio, si è adottata la tecnica delle 3 R (ridurre, riutilizzare e riciclare).

- **Ridurre:** il primo passo per diminuire l’impronta ambientale è quello di ridurre alla fonte la generazione di rifiuti, adottando strategie che limitino il consumo di materiali e prevengano la produzione di scarti.
- **Riutilizzare:** consiste nel riutilizzare gli oggetti o dar loro una nuova vita, anziché buttarli via.
- **Riciclare:** questo passaggio si concentra sulla raccolta e lavorazione dei materiali di scarto per convertirli in nuovi prodotti.

Analizziamo ora i tre aspetti:

1) **Ridurre**

Possiamo considerare più aspetti su cui intervenire:

- **Minerali critici:** si può ridurre l’uso di materiali critici come litio, cobalto, nichel, grafite e manganese, adottando chimiche basate su elementi più abbondanti nella crosta terrestre o che utilizzino tali minerali in percentuali minori.
- **Materie prime con basso impatto ambientale:** selezionare materie prime a basso impatto ambientale, sia per l’uso nei pacchi batteria sia per il successivo riciclo.
- **Durata delle batterie:** fabbricare batterie con un numero elevato di cicli di vita per ridurre la necessità di produzione di nuove unità.
- **Riduzione del consumo idrico:** limitare il più possibile il consumo di risorse idriche implementando processi di lavorazione alternativi.
- **Riduzione del consumo energetico:** utilizzare durante le fasi dell’intera catena del valore energia proveniente da fonti rinnovabili e mezzi elettrici durante le fasi di movimentazione dei materiali.

2) Riutilizzare

Le batterie dei veicoli elettrici terminano la loro vita utile quando la capacità scende al 70-80%. Una possibile soluzione è il riutilizzo per applicazioni di seconda vita, previa verifica della sicurezza e delle prestazioni; in caso contrario, si procede al riciclo delle materie prime. L'efficacia del riutilizzo dipende dall'assemblaggio delle celle in moduli e di queste nel pacco batteria, poiché il malfunzionamento di una cella specifica potrebbe essere risolto mediante riparazione o necessitare lo smontaggio e la riclassificazione delle celle per adattarle a nuove specifiche. Le applicazioni di seconda vita includono l'uso residenziale (supporto energetico nelle abitazioni) e scopi commerciali, come stazioni di ricarica per veicoli elettrici o integrazione in siti industriali per facilitare la generazione e distribuzione di energia. Altre applicazioni comprendono il livellamento del carico elettrico e, con requisiti ridotti, l'impiego in veicoli per brevi distanze (ad esempio, carrelli elevatori) e nella micro-mobilità (e-bike ed e-scooter). Infine, i moduli o le singole celle possono essere riutilizzati nell'elettronica di consumo, ad esempio per alimentare utensili da lavoro. (Schlögl, 2024)

3) Riciclare

Il riciclo rappresenta l'ultima tappa nel ciclo di vita delle batterie agli ioni di litio. Il recupero delle materie prime delle batterie esauste contribuisce a ridurre i rifiuti pericolosi, che altrimenti potrebbero inquinare il suolo e i corsi d'acqua. Inoltre, il recupero dei metalli critici da batterie esauste rappresenta una risorsa di grande valore per contrastare i problemi legati alla loro reperibilità; non a caso, molti paesi privi del controllo diretto sulle risorse stanno investendo sui processi di riciclaggio.

Tra le tecniche chimiche di riciclaggio conosciamo la pirometallurgia, l'idrometallurgia e la bio-metallurgia:

- **Pirometallurgia:** un processo ad alta temperatura che estrae metalli preziosi dalle batterie riciclate formando leghe. Sebbene efficace, presenta svantaggi ambientali, come elevato consumo energetico, emissioni nocive e perdita di litio a causa delle alte temperature.
- **Idrometallurgia:** una tecnica più sostenibile, con minori consumi energetici ed emissioni, anche se comporta processi complessi e produzione di rifiuti acidi e gas pericolosi, con relativi costi di smaltimento.
- **Bio-idrometallurgia:** una variante dell'idrometallurgia che utilizza microrganismi per estrarre metalli da rifiuti elettronici, riducendo la produzione di rifiuti acidi e gas tossici. Pur offrendo vantaggi in termini di sostenibilità, ha limitazioni come tempi di lavorazione lunghi e scarsa adattabilità alle applicazioni industriali.

Un'alternativa interessante è il **riciclaggio diretto**, che riduce le fasi necessarie per produrre nuove celle, abbassa il consumo di energia e produce meno gas serra. Questo processo economico ed ecologico consente di recuperare e riutilizzare i componenti delle batterie esauste senza alterarne

significativamente la struttura o morfologia, preservando la qualità del materiale del catodo. È composto da due fasi principali: la separazione dei singoli componenti e la rigenerazione e l'upcycling dei materiali degli elettrodi (catodo e anodo), ripristinandone le prestazioni elettrochimiche. Anche altri componenti della batteria, gli elettroliti, i collettori di corrente e i solventi elettrolitici, possono essere recuperati. La facilità di scalabilità del riciclaggio diretto porta ad un aumento dei ricavi, grazie a un migliore recupero dei materiali e alla riduzione dei passaggi di lavorazione. Questo processo chiuso rappresenta un passo avanti per il riciclaggio delle batterie, ma la varietà di composizioni chimiche dei materiali del catodo tra i diversi produttori complica la selezione ottimale dei rifiuti per un riciclo efficiente. (Roy, 2024)

In termini di impatto ambientale, il riciclo dei materiali ha ridotto le emissioni di CO₂ dei veicoli elettrici di quasi l'8%, con cali significativi del 22% nella tossicità per l'uomo e del 25% nella scarsità di risorse materiali (MRS). (Koroma, 2024)

❖ Riciclo dei materiali presenti nelle LIB

○ **Rame**

Il rame è un metallo che può essere riciclato al 100% attraverso la pirometallurgia. Questo fa sì che la produzione di rame secondario nel futuro possa attenuare quella primaria e magari far nascere nuovi paesi protagonisti. La Cina si sta muovendo per assicurarsi una posizione di dominio anche in questo settore. Si prevede che entro il 2040 la produzione secondaria raddoppierà fino a raggiungere circa 15 Mt nel 2040. Ciò supportato dal fatto che l'offerta del rame primario negli ultimi 30 anni sia cresciuta di molto e di conseguenza anche la quantità di rame che raggiunge il suo fine vita. Si stima inoltre, in base alle previsioni di domanda future, che circa il 30% della domanda di rame tra il 2021 e il 2050 sarà soddisfatta grazie a quello secondario. (Born, 2024)

○ **Alluminio**

Il processo di produzione dell'alluminio secondario è piuttosto semplice. I rottami vengono sottoposti a un separatore, che rimuove eventuali materiali estranei, inclusi i metalli magnetici, poiché l'alluminio non è magnetico. Successivamente, i materiali compressi in balle vengono trasportati in fonderia, dove, vengono pretrattati a circa 500 °C per eliminare ulteriori impurità. La fusione avviene poi in forno alla temperatura di 800 °C, fino ad ottenere alluminio liquido che viene trasformato in lingotti pronti per un nuovo utilizzo.

Il riciclo dell'alluminio risulta particolarmente interessante, poiché l'alluminio conserva ben il 95% dell'energia impiegata nella produzione primaria. Di conseguenza, produrre alluminio da materiali riciclati richiede solo il 5% dell'energia necessaria rispetto al processo di elettrolisi. Questo rende l'industria del riciclo fondamentale, tanto che il 75% di tutto l'alluminio mai prodotto è ancora in uso. La possibilità di riutilizzarlo all'infinito senza perdere le sue proprietà ne rafforza ulteriormente l'importanza. (Colletta, 2024)

○ **Grafite**

La grafite viene recuperata dalle batterie usate tramite froth flotation, una tecnica che la separa sfruttandone le proprietà idrorepellenti. Test condotti dagli Istituti Helmholtz dimostrano che la grafite riciclata ha prestazioni elettrochimiche simili a quella nuova, con una capacità di oltre 350 mAh/g e una stabilità dell'80% dopo 1000 cicli. Il riciclo della grafite è ancora basso e la sua crescita è sostenuta dal regolamento europeo sulle batterie e il Green New Deal, ovviamente al fine di ridurre la dipendenza da materie prime importate da altri paesi, ma anche l'impatto ambientale. (Electrosuisse, 2024)

- **Litio**

Il riciclo del litio rimane oggi un processo costoso e ad alto consumo energetico, spesso non economicamente vantaggioso. I ricercatori hanno impiegato l'alluminio come agente riducente in una reazione mecanochimica; poiché l'alluminio è già presente nel catodo della batteria, non sono necessari reagenti aggiuntivi. La batteria esausta viene triturata, e il materiale ottenuto reagisce con l'alluminio formando composti metallici idrosolubili. Il litio viene quindi recuperato sciogliendo questi composti in acqua, la quale viene poi riscaldata per far evaporare il solvente. (Dolotko, 2023)

- **nicel**

Il riciclo del nichel rappresenta un processo essenziale ed ecologicamente vantaggioso, riducendo la dipendenza dall'estrazione primaria e i relativi impatti ambientali, come i danni ecosistemici e le emissioni di gas serra. Circa il 68% del nichel proveniente da prodotti di consumo viene riciclato e riutilizzato, avviando un nuovo ciclo di vita. Attualmente, il nichel recuperato da batterie esauste è destinato principalmente alla produzione di acciaio inossidabile. Con l'aumento della domanda di auto elettriche, l'offerta di nichel riciclato è destinata a crescere nel lungo periodo. Il recupero del nichel dalle batterie avviene tramite il processo pirometallurgico, che permette di separare il nichel dagli altri materiali presenti nel pacco batteria come rame e cobalto. (Sun, 2024)

- ❖ **Cobalto**

Con l'aumento della domanda di cobalto, il riciclo potrebbe diventare fondamentale per soddisfare le esigenze future e mitigare gli impatti ambientali legati alla sua estrazione e lavorazione. Per ottenere cobalto metallico di alta purezza, pronto per la vendita, dal riciclo delle LIB, è necessario adottare un processo idrometallurgico, raffinare la soluzione di lisciviazione attraverso l'estrazione con solvente e, successivamente, depositare i metalli tramite elettrolisi. Inoltre, per la produzione di sali di cobalto di qualità adatta alle batterie, come il solfato di cobalto, è indispensabile integrare una fase di cristallizzazione dopo l'estrazione con solvente. (Takano, 2022)

- ❖ **Manganese**

Il processo di recupero del manganese dalle batterie agli ioni di litio, nel nostro caso da una NMC, utilizza una lisciviazione in due fasi con una soluzione di Mn in mezzo solfato come agente riducente. Durante la lisciviazione, Ni e Co vengono ridotti e dissolti, il Mn precipita come diossido di manganese. Il residuo, contenente ~40% di Mn, viene calcinato a 650 °C, convertendo il diossido di manganese in triossido di dimanganese e tetrossido di trimanganese e aumentando la purezza del manganese al 70%. Questo metodo consente il recupero quasi totale di Li, Ni e Co e il recupero selettivo del manganese senza ossidanti o riducenti aggiuntivi, migliorando sostenibilità ed efficienza. (Kim, 2022)

- **Recupero di elettroliti, leganti e separatori**

Spesso ci si concentra solo sul riciclo dei metalli preziosi del pacco batteria non tenendo conto di questi 3 componenti, ma anche loro assumono un valore economico ma soprattutto ambientale se si riutilizzano.

Ecco come vengono riciclati:

- ❖ **Elettrolita**

I metodi di recupero dell'elettrolita comunemente utilizzati sono: il metodo di distillazione sottovuoto, il metodo di assorbimento della liscivia, il metodo fisico e il metodo di estrazione. Il più semplice è quello di distillazione sottovuoto che sfrutta le proprietà del solvente organico presente nell'elettrolita, caratterizzato da una facile evaporazione in condizioni di vuoto, per separare il sale di litio dal solvente organico, consentendo così il recupero finale dell'elettrolita.

- ❖ **Legante**

Nelle LIB esaurite è presente una notevole quantità di leganti che generalmente vengono recuperati tramite processi a base di solventi. Esperimenti hanno dimostrato che leganti ad alta purezza possono essere recuperati utilizzando una miscela di tetraidrofurano e N-metilpirrolidone.

- ❖ **Separatore**

Può essere recuperato e riutilizzato sia per le LIB che per altri scopi. Si è sviluppata una tecnica di carbonizzazione a passaggio unico, seguita da una pulizia con acqua deionizzata, che ha permesso, attraverso test di resistenza alla trazione e conduttività ionica, di appurare che il separatore recuperato mantiene eccellenti proprietà meccaniche, chimiche e di stabilità. (Qi, 2023)

5. Analisi del rischio della supply chain

Dopo aver descritto le varie fasi della supply chain (SC) delle materie prime per le batterie agli ioni di litio destinate ai veicoli elettrici, dal processo estrattivo nelle miniere fino all'assemblaggio dei pacchi batteria, ci concentreremo adesso sull'analisi dei rischi della SC per ognuna delle materie prime studiate, che ricapitolando sono: rame, alluminio, grafite, nichel, cobalto, manganese e litio.

Successivamente si farà una valutazione di come il rischio della SC di ognuna impatta la batteria agli ioni di litio per auto elettriche NMC 811, così da individuare, in un secondo momento, come agire al fine di mitigarne la rischiosità.

Il concetto di rischio può essere definito come “L'eventualità di subire un danno connessa a circostanze più o meno prevedibili” (fonte: Dizionario Lingua Italiana, G. Treccani)

Infatti, il rischio non è certo che accada, ma potrebbe accadere con una certa probabilità.

Quando si parla di rischio, dobbiamo guardare due aspetti. Il primo concetto è quello negativo di minaccia, ma da una situazione incerta nasce anche la possibilità di migliorarla. La finalità è appunto ottenere un vantaggio dallo studio di esso.

La connotazione di rischio è legata anche al grado di conoscenza. Più ho conoscenza e più valuto il rischio in modo preciso; viceversa, vado verso l'imprevedibilità. Se non so prevedere, avrò una probabilità dello 0%. Questi rischi sono chiamati “Cigni neri” e sono i peggiori, perché, appunto, non ho valutato la possibilità che possano accadere, e se accadessero avrebbero gravi ripercussioni.

Lo studio del rischio applicato all'ambito della supply chain ricopre una grande rilevanza, in quanto nel mondo globalizzato odierno, è importante che il flusso del materiale proceda senza interruzioni, per scongiurare problemi di approvvigionamento che possono interessare i vari attori della filiera, e l'unico modo per farlo è quello, appunto, di studiare i potenziali rischi che si potrebbero verificare, valutarli e provare a prendere opportune soluzioni di mitigazione. I rischi della filiera delle materie prime per batterie per auto elettriche a cui si può andare incontro sono molteplici e riguardano ad esempio la possibile riduzione delle risorse minerarie, oppure tensioni geopolitiche, monopoli e cartelli, problemi ambientali e sociali. Tutti questi possono dare vita a ritardi o interruzioni nella catena di fornitura delle LIB, che si ripercuotono a valle su chi costruisce pacchi batteria, e subito dopo sui costruttori di EV.

L'approccio che è stato adottato ha a che fare con il risk management, utilizzato ad esempio nella gestione dei progetti per condurre un'analisi dettagliata dei potenziali rischi che potrebbero influenzare il raggiungimento degli obiettivi stabiliti per il loro completamento.

L'analisi ha previsto 4 fasi principali:

1. Identificazione del rischio
2. Valutazione del rischio
3. Impatto del rischio della SC sulla batteria per EV
4. Risposta al rischio

5.1 Identificazione del rischio

Grazie all'analisi della supply chain, fatta nei capitoli iniziali della tesi, è stato possibile individuare i fattori che possono influenzare il normale flusso dei materiali lungo la catena. Alcuni di questi sono stati identificati grazie all'analisi dell'articolo scientifico (Babu, 2023), e poi riadattati al contesto in questione. In questo modo sono emerse 9 categorie di rischio che incidono sul rischio complessivo della supply chain di ogni materia prima. A sua volta, ognuna delle 9 categorie è definita da delle fonti di rischio che permettono di ottenere il relativo risk exposure.

Sia le categorie che le fonti sono state rappresentate nella seguente RBS.

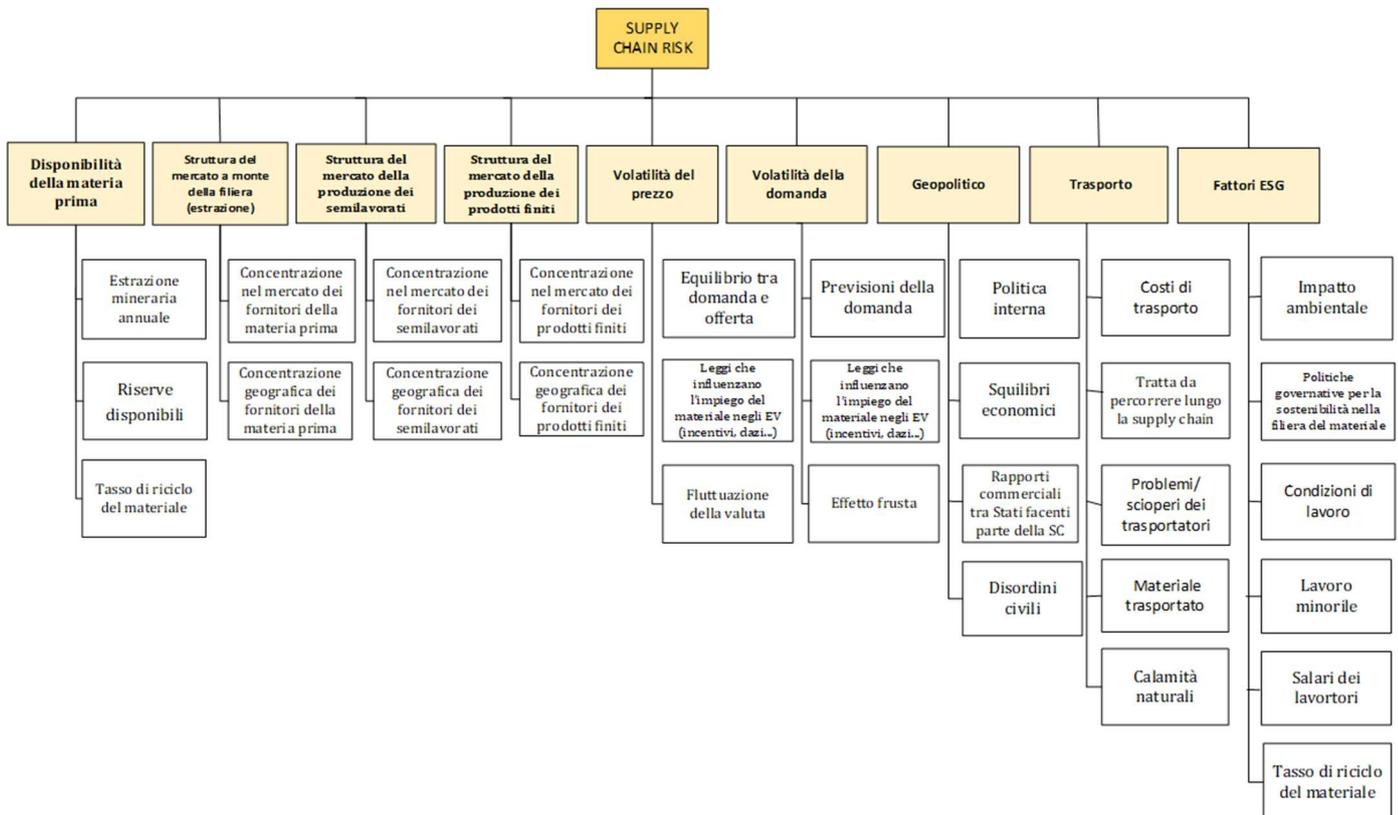


Figura 37: risk breakdown structure.

Ecco una descrizione delle categorie di rischio e delle fonti che le definiscono mostrate in fig. 37:

1. Disponibilità della materia prima

Rischio che ci sia carenza di materia prima sul mercato.

1.1 Estrazione mineraria annuale

Rischio che la quantità annuale estratta destinata ai vari campi di applicazione sia insufficiente.

1.2 Riserve disponibili

Rischio relativo al fatto che ci siano riserve minerarie della materia prima presenti in natura limitate, influenzandone la sua disponibilità futura.

1.3 Tasso di riciclo del materiale

Rischio che la quantità della materia prima rimessa in circolo tramite il riciclo per soddisfare la domanda sia limitata.

2. Struttura del mercato a monte della filiera (estrazione)

Rischio che ci sia una possibilità ridotta di diversificare le fonti di approvvigionamento del minerale nel segmento a monte della supply chain.

2.1 Concentrazione nel mercato dei fornitori della materia prima

Rischio che ci siano poche grandi aziende che controllino l'estrazione della materia prima.

2.2 Concentrazione geografica dei fornitori della materia prima

Rischio che l'estrazione sia concentrata in pochi Paesi, rendendo la SC vulnerabile ad eventuali problemi che potrebbero colpire quel paese e quindi le relative aziende che ci operano. (differisce dalla concentrazione di mercato espressa nel punto 2.2 in quanto ci potrebbero essere, ad esempio, tante società di estrazione ma comunque localizzate nello stesso paese, incrementando il rischio derivante dalla concentrazione di mercato, lo stesso vale per i punti 3.2 per i semilavorati e 4.2 per i prodotti finiti)

3. Struttura del mercato della produzione dei semilavorati

Rischio che ci sia una limitata possibilità di diversificazione dei fornitori nel mercato dei semilavorati.

3.1 Concentrazione nel mercato dei fornitori di semilavorati.

Rischio che pone l'attenzione sul fatto che ci siano pochi grandi produttori di semilavorati della materia prima.

3.2 Concentrazione geografica dei fornitori di semilavorati.

Rischio che i produttori di semilavorati della materia prima siano concentrati in pochi paesi, rendendone particolarmente difficile la diversificazione in caso di problemi che potrebbero caratterizzare quelle particolari aree geografiche.

4. Struttura del mercato della produzione dei prodotti finiti

Rischio che ci sia bassa possibilità di diversificare i fornitori dei prodotti finiti.

4.1 Concentrazione nel mercato dei fornitori dei prodotti finiti.

Rischio che pone l'attenzione proprio sul fatto che ci siano pochi grandi produttori di prodotti finiti di quella materia prima destinati in particolar modo al settore delle batterie agli ioni di litio per veicoli elettrici.

4.2 Concentrazione geografica dei fornitori dei prodotti finiti.

Rischio che i produttori di prodotti finiti di quella materia prima destinati al settore delle LIB per EV siano concentrati in specifici paesi, rendendone difficile la diversificazione in caso di problemi che potrebbero caratterizzare quelle particolari aree geografiche.

5. Volatilità del prezzo

Rischio che ci siano variazioni di prezzo frequenti per la materia prima in questione.

5.1 Equilibrio tra domanda e offerta

Rischio che la quantità prodotta possa non soddisfare la domanda, o viceversa, creando un'impennata di prezzo della materia prima.

5.2 Leggi che influenzano l'impiego del materiale negli EV (incentivi, dazi...)

Rischio che ci siano delle leggi che si rivolgono in particolar modo all'adozione dei veicoli elettrici, che possano influire sulla domanda o sull'offerta del materiale, e di conseguenza sul prezzo.

5.3 Fluttuazione della valuta

Rischio che la fluttuazione della valuta delle materie prime rispetto a quella di riferimento (USD) possa causare l'incremento di domanda o dell'offerta.

6. Volatilità della domanda

Rischio che la domanda cambi rapidamente.

6.1 Previsione della domanda

Rischio che a causa degli andamenti incerti del mercato degli EV la domanda sia difficile da prevedere e possa portare a degli squilibri.

6.2 Effetto frusta

Rischio che nasce dalla reazione eccessiva di ogni anello della catena a variazioni della domanda, basandosi su dati incompleti o distorti.

6.3 Leggi che influenzano l'impiego del materiale negli EV (incentivi, dazi...)

Rischio che ci siano delle leggi che rivolgono l'attenzione alla sostenibilità ambientale che possano influenzare positivamente o negativamente la domanda del materiale.

7. Geopolitico

Rischio che deriva da eventi politici, conflitti, tensioni internazionali o cambiamenti nelle politiche governative nei Paesi protagonisti della SC, che possono influenzare economie, mercati e aziende.

7.1 Politica interna

Rischio che i Paesi coinvolti nella supply chain della materia prima possano essere caratterizzati da instabilità politica con effetti sul regolare flusso del materiale lungo la catena.

7.2 Disordini civili

Rischio che i Paesi coinvolti nella supply chain della materia prima possano essere interessati da disordini civili che blocchino il flusso del materiale lungo la SC.

7.3 Squilibri economici

Rischi che ci possano essere degli squilibri economici nei paesi coinvolti nella supply chain delle materie prime che ne possano influenzare il flusso lungo la sua filiera.

7.4 Rapporti commerciali tra Stati facenti parte della SC

Rischi che ci possano essere tensioni commerciali, politiche tra gli Stati facenti parte della supply chain, i quali possono portare a blocchi o limitazioni al normale flusso della materia prima.

8. Trasporto

Rischi legati al trasporto delle merci che transitano lungo la catena di approvvigionamento.

8.1 Costi di trasporto

Rischio legato alla localizzazione geografica degli Stati appartenenti alla supply chain del materiale e ai mezzi usati per movimentare le merci durante il trasporto.

8.2 Problemi/scioperi dei trasportatori

Rischio legato ai problemi che si possono manifestare lungo la supply chain (blocchi, ingorghi, scioperi...) a cui possono andare incontro i trasportatori.

8.3 Tratta da percorrere lungo la supply chain

Rischio legato all'ampiezza della tratta lungo la quale il materiale viaggia, che va dalle miniere fino alla consegna alle gigafactory.

8.4 Materiale trasportato

Rischi che possono emergere a causa di particolari condizioni di trasporto del materiale che non vengono rispettate.

8.5 Calamità naturali

Rischi legati alle calamità naturali che possono colpire i paesi appartenenti alla SC.

9. Fattori ESG

Rischi che riguardano l'impatto ambientale, sociale e di governance.

9.1 Impatto ambientale

Rischio relativo al fatto che l'estrazione mineraria e le successive fasi di lavorazione della materia prima possono avere impatti negativi sull'ambiente, come l'erosione del suolo, consumo d'acqua e contaminazione, consumo di energia ed emissioni di CO₂, comportando dei possibili blocchi della filiera.

9.2 Lavoro minorile

Rischio che in alcune parti della SC si possa sfruttare la manodopera minorile.

9.3 Salari dei lavoratori

Rischio che si possa impiegare nelle varie fasi della SC manodopera sottopagata.

9.4 Politiche governative per la sostenibilità nella filiera del materiale

Rischio che i Paesi che hanno il controllo su determinate fasi della SC non adottino leggi adeguate alla sostenibilità ambientale e sociale.

9.5 Condizioni di lavoro

Rischio che, specialmente nelle fasi iniziali della SC, come nell'estrazione mineraria e raffinazione, i lavoratori non siano messi nelle condizioni di operare in condizioni di sicurezza adeguate.

9.6 Tasso di riciclo del materiale

Rischio che la quantità di materia prima rimessa in circolo tramite il riciclo, così da impattare meno sull'ambiente, sia limitata.

5.2 Valutazione del rischio

L'obiettivo è valutare per ogni MP i fattori di rischio precedentemente identificati, al fine di calcolarne il relativo supply chain risk.

❖ Calcolo del risk exposure

$$(1) \quad RE_i = \frac{\sum_{j=2}^{j_{max}} I_{ij} * P_{ij}}{5 * j_{max}} \quad \forall i = 1, 2 \dots 9 \quad \text{con } 1 < RE_i < 5$$

Dove:

- RE_i è il risk exposure relativo all'i-esima categoria
- i è l'indice della categoria di rischio
- j è l'indice della fonte di rischio che definisce l'i-esima categoria di rischio a cui appartiene
- I_{ij} è l'impatto sul rischio della supply chain della j-esima fonte di rischio appartenente alla categoria i-esima
- P_{ij} probabilità di accadimento della j-esima fonte di rischio appartenente alla categoria i-esima
- j_{max} è il numero di fonti di rischio che definiscono la corrispondente categoria di rischio i-esima, con $j_{max} = 2, 3 \dots 6$

Per la valutazione del rischio si è utilizzato un approccio semi-quantitativo, con impatto e probabilità che potevano assumere i seguenti valori: 1=molto basso, 2=basso, 3=medio, 4=alto, 5=molto alto. Il rischio per la j-esima variabile è stato calcolato tramite il prodotto tra l'impatto (I_{ij}), e la sua probabilità di accadimento (P_{ij}). L'impatto indica il danno che, il verificarsi dell'evento rischioso può causare alla supply chain, e assumerà valori diversi in base alla magnitudo del suo accadimento.

(Es. il rischio "Disponibilità della materia prima" se si verifica impatterà in modo molto forte la supply chain, ed è stato dato valore 5, mentre l'impatto del rischio del "Tasso di riciclo del materiale", la impatterà, ma in modo minore, infatti è stato valutato con 3.

Per quanto riguarda la probabilità, essendo a conoscenza dei problemi che affliggono la SC di ogni materiale, si è stimata per ogni rischio la probabilità che ha un certo evento di accadere. (Es. per il rame il rischio "Tasso di riciclo del materiale" ha assunto una probabilità pari a 2, infatti dato che il tasso di riciclo si aggira intorno al 50% a livello globale, è poco probabile che si verifichi.

Si è arrivati poi al calcolo del **Risk Exposure** per ogni categoria di rischio i-esima, come la sommatoria dei rischi appartenenti ad essa, tutto fratto un fattore di normalizzazione al denominatore ($5 * j_{max}$), per fare sì, dato che ogni rischio j può assumere al massimo un valore pari a 25, che il risk exposure fosse definito nella stessa scala di valutazione usata per probabilità ed impatto (da 1 a 5).

❖ Calcolo del supply chain risk

Si passati poi al calcolo del valore del **supply chain risk (SCR)** della K-esima materia prima, il quale definisce la rischiosità della SC.

L'indicatore di rischio della supply chain è stato ottenuto nel seguente modo:

$$(2) \quad SCR_k = \sum_{i=1}^9 \frac{RE_i * W_i}{25 * 9} \quad \text{con } 0 < SCR < 1$$

- W_i è il peso con cui ogni categoria di rischio i influisce sul supply chain risk

Il SCR è stato ottenuto sommando il risk exposure di ogni categoria di rischio i -esima moltiplicata per il peso con cui incide sul valore del rischio finale. Per valutare il peso W_i è stata utilizzata la stessa scala semi-quantitativa di prima. Tutto è stato normalizzato dividendo per un fattore di normalizzazione al denominatore, (25, perché il prodotto tra il RE di ogni categoria per il peso può essere al massimo $5 * 5$, e poi moltiplicato per 9, pari al numero di categorie considerate) in modo tale che il rischio complessivo potesse assumere valori compresi tra 0 e 1.

Il peso è stato associato considerando che non tutte le categorie di rischio influiscono sul supply chain risk nello stesso modo. C'è da dire che comunque impattano tutte in modo rilevante, in quanto i pesi hanno assunto valori di 4 e il 5. È stato attribuito un peso pari a 5 alle seguenti categorie: "Disponibilità della materia prima", "Struttura del mercato a monte della filiera (estrazione)", "Volatilità del prezzo", "Volatilità della domanda", "Geopolitico", "Fattori ESG", in quanto sono state considerate come quelle il cui impatto dipende da fattori spesso esterni, poco controllabili; mentre ad "Struttura del mercato della produzione semilavorati", "Struttura del mercato dei prodotti finiti", "Trasporto", è stato associato un peso pari a 4, leggermente inferiore rispetto al precedente, poiché, "io" attore della catena di fornitura, posso rispondere in modo più diretto nel caso in cui il rischio si concretizzi.

Ad esempio, se si manifestasse il rischio di bassa disponibilità della materia prima che magari dipende da scarse risorse della materia prima presenti in natura, il produttore di batterie non potrebbe farci nulla. Ma se ad esempio il mercato dei produttori dei prodotti finiti è concentrato e ci sono dei problemi come l'imposizione di dazi che riguardano dei determinati produttori di semilavorati posizionati in un paese, si possono comunque cercare dei fornitori alternativi localizzati in altre zone, oppure internalizzare, se è possibile farlo, la produzione nel mio paese.

Alla fine, dopo il calcolo del SCR, si sono associate le 7 MP a 3 classi distinte, in base alla rischiosità della loro supply chain: cobalto e litio "Molto rischiosi", nichel, grafite, manganese "Rischiosi", alluminio e rame "Mediamente rischiosi".

Segue una descrizione di come sono stati calcolati i vari supply chain risk. I valori utilizzati per il calcolo dei SCR sono mostrati nel file Excel allegato, denominato "SCR materie prime".

5.2.1 Valutazione del SCR del Cobalto

Il cobalto è la materia prima che ha un SCR più alto, paria a 0,69.

La produzione mineraria risulta in larga parte concentrata nella RDC, che partecipa al 75% della produzione mineraria globale di nichel, con poche grandi società minerarie localizzate per l'appunto nel territorio, date le ampie riserve di cobalto di cui gode. Per questo motivo il rischio della concentrazione nel mercato a monte è pari a 4.

L'elevata concentrazione geografica in questo paese risulta ancora più grave se legata alle problematiche sociali e ambientali che lo affliggono. Infatti, l'attenzione all'ambiente durante i processi estrattivi è veramente marginale, mentre le condizioni dei lavoratori nelle miniere, caratterizzate da salari estremamente bassi e dalla presenza di lavoro minorile, sono precarie. Tuttavia, il governo sta cercando di porre rimedio alla situazione emanando dei regolamenti stringenti sulla tutela ambientale e sociale al fine di chiudere le miniere che non li rispettano, ma comunque il risk exposure associato ai fattori ESG risulta elevato.

Si aggiungono poi conflitti interni e instabilità politica che riguardano, sia la RDC, che gli altri paesi produttori di cobalto, come l'Indonesia, il Madagascar e le Filippine, che fanno aumentare il rischio geopolitico che potrebbe causare future interruzioni della SC.

La Cina controlla prevalentemente le fasi di raffinazione e produzione dei prodotti finiti, con circa l'87% di quelli destinati alle batterie agli ioni di litio, infatti il RE relativo ai due mercati è 5. L'elevata concentrazione in un unico paese è spiegata dal fatto che i produttori locali possono contare sulle economie di scala, data la forte domanda interna per i veicoli elettrici, che gli permettono di avere dei vantaggi di costo rispetto ad altre aziende che operano in altre regioni. Oltre alla forte concentrazione degli operatori di mercato, il paese è al centro della guerra commerciale in corso principalmente con Stati Uniti ed Europa, che hanno introdotto dazi sulle importazioni di auto cinesi, contribuendo ad aumentare il rischio geopolitico che influisce sulla supply chain, il quale è stato valutato con 4.

Il prezzo del cobalto ultimamente è in calo a causa di un eccesso di offerta, dovuto soprattutto all'interesse verso altre chimiche prive di esso, svantaggiato dall'elevato costo raggiunto, ma anche dai problemi che lo affliggono, dei quali abbiamo parlato inizialmente; dunque, il rischio della categoria relativa alla volatilità del prezzo assume un valore pari a 3. Anche la domanda risulta volatile, motivata dall'alta imprevedibilità, dall'effetto frusta e dalle leggi che la influenzano, che sono rischi molto elevati. La disponibilità della materia prima per il settore degli EV non è a rischio, (RE pari a 2); infatti, l'estrazione mineraria annuale risulta elevata, e il tasso di riciclo è in crescita, potendo anche contare sulle riserve abbondanti presenti in natura che limitano il rischio di esaurimento futuro.

Il RE del trasporto è medio, ed è influenzato principalmente dalla precarietà delle infrastrutture stradali presenti nei paesi che lo estraggono, le quali possono comportare problemi e ritardi durante il trasporto, ma ulteriori fattori di rischio sono le lunghe tratte percorse nella SC e i costi elevati connessi.

5.2.2 Valutazione del SCR del litio

Subito dopo troviamo il litio, con un SCR di 0,66.

Circa l'80% della sua quantità estratta annualmente è indirizzata al settore delle LIB per EV, evidenziando quanto siano rischiose eventuali interruzioni della catena di approvvigionamento. L'estrazione mineraria annuale si mantiene elevata, riducendo il rischio relativo alla sua disponibilità; però, il riciclo delle batterie esauste ancora poco diffuso, tendendo conto dell'utilizzo in forte crescita per il settore delle batterie, fa temere possibili problemi di esaurimento delle riserve, portando il RE della disponibilità a 3.

La concentrazione del mercato è elevata lungo la rete di fornitura, con poche grandi imprese presenti, localizzate per le fasi a monte in paesi come Cile e Australia, e in parte minore in Argentina e Bolivia (RE pari a 4). La fase della raffinazione per produrre poi idrossido di litio per le batterie, invece, risulta più critica (RE pari a 5), perché la Cina ne lavora più del 70%, facendo aumentare il rischio di subire disagi nella supply chain. Quanto detto è aggravato dai rischi geopolitici che caratterizzano il paese, in seguito all'imposizione di dazi da parte dei paesi occidentali, che connessi ai possibili disordini civili e all'instabilità politica che hanno una probabilità elevata di accadere in Cile, Bolivia e Argentina, fanno assumere al RE della categoria a cui appartengono un valore di 4.

La volatilità del prezzo e della domanda presentano un rischio medio. Il mercato è caratterizzato da un eccesso di offerta, il quale ha favorito il decremento del prezzo. Inoltre, i sussidi negli USA che hanno permesso la costruzione di nuovi impianti stanno incrementando il surplus creatosi.

Focalizzandoci invece sulla volatilità della domanda, essa è strettamente connessa al rischio che deriva dalle previsioni future sulla vendita delle batterie agli ioni di litio per i veicoli elettrici, che potrebbero vedere ridotta la loro quota di mercato a favore di chimiche alternative, con il conseguente calo della domanda di litio. In aggiunta a ciò, anche l'emanazione di leggi volte a favorire o ostacolare l'adozione dei veicoli elettrici potrebbe essere un rischio abbastanza concreto che influirebbe sulla volatilità.

Il risk exposure della supply chain per il trasporto è pari a 2. I principali rischi derivano dalla notevole lunghezza del tragitto necessario per spostare il materiale lungo i vari anelli della supply chain, dovuta alla loro dislocazione geografica. Inoltre, l'aumento dei costi del carburante potrebbe generare spese elevate, con il rischio di compromettere o bloccare il trasporto. Aggravano la situazione l'alta probabilità di scioperi o calamità naturali connessi principalmente ai paesi quali Cile, Argentina e Bolivia, che potrebbero compromettere la stabilità della SC.

I rischi ambientali e sociali si mantengono medi. L'impatto ambientale è la fonte di rischio più elevata, specialmente per le fasi di estrazione e raffinazione che prevedono il consumo di quantità elevate d'acqua. Tuttavia, l'attenzione a questo tema, così come alla tutela dei lavoratori da parte degli Stati coinvolti nella SC, è in aumento, lasciando intravedere prospettive positive per il futuro.

5.2.3 Valutazione del SCR del nichel

Il nichel presenta un SCR di 0,60. I principali rischi sono rappresentati dalla concentrazione del mercato, e dai problemi geopolitici.

La disponibilità di nichel non è a rischio, grazie all'elevato volume di estrazione annuale e all'alto tasso di riciclo. Le riserve naturali sono numerose così da non mettere a rischio la futura fornitura connessa all'incremento dell'utilizzo delle LIB per EV, anche se c'è da dire che la maggior parte del nichel è destinato principalmente alla produzione di acciaio e ad altre applicazioni industriali.

L'Indonesia domina la fase di estrazione, con il controllo del 50% estratto rispetto al totale; altri produttori sono Filippine, Nuova Caledonia, Russia, Australia e Canada.

Il rischio per la SC dovuto, per l'appunto, all'elevata concentrazione in Indonesia è grave perché il paese comporta anche rischi legati ai processi di estrazione e lisciviazione, che implicano un alto consumo energetico e problematiche come la gestione dei rifiuti generati, con evidenti impatti sull'ambiente.

Sono presenti nel paese anche fattori sociali critici riguardanti le condizioni di lavoro e i bassi salari, che fanno incrementare il rischio della supply chain, con il RE dei fattori ESG che si attesta a 3.

Le fasi a valle della filiera sono in mano alla Cina, che raffina circa il 70% del nichel e produce la maggior parte dei precursori per produrre il solfato di nichel.

Come ben sappiamo, proprio la Cina fa emergere rischi geopolitici evidenti. Inoltre, gran parte del nichel di tipo 1, preferito per la produzione di solfato di nichel per le LIB, proviene dalla Russia; dunque, le sanzioni imposte da UE e USA a quest'ultimo paese, dopo lo scoppio della guerra in Ucraina, aumentano significativamente il rischio geopolitico, portandolo a 5.

La volatilità del prezzo del metallo è media. Eventi come la guerra Russa-Ucraina ovviamente ne hanno influenzato l'incremento, ma la recente sovrapproduzione indonesiana ha causato un eccesso di offerta che lo ha fatto calare. In aggiunta a quanto detto, un pacchetto di incentivi per sostenere l'economia ha portato ad una crescita di prezzo a causa dell'aumento della fiducia degli investitori, ma dopo che sono emersi i dettagli l'entusiasmo finale è sceso, con un conseguente abbassamento del prezzo.

La volatilità della domanda ha un risk exposure di 3. L'effetto frusta correlato all'elevata frammentazione delle fasi della supply chain è una fonte di rischio elevata, ma anche l'imprevedibilità della domanda che proviene dal settore degli EV, e le limitazioni al commercio dovute alle tensioni geopolitiche, ne influenzano il valore finale.

Il rischio relativo al trasporto è medio, principalmente dovuto alle lunghe rotte intercontinentali che vanno dall'Indonesia, o Canada, fino alla Cina, raggiungendo poi l'Europa, facendo emergere un'alta probabilità di ritardi di consegna delle merci, ma anche elevati costi legati ai mezzi di trasporto utilizzati. Possono verificarsi scioperi soprattutto nei paesi lungo la filiera caratterizzati da instabilità economica e politica (Filippine e Nuova Caledonia), ma anche calamità naturali come tsunami, come quello che ha colpito l'Indonesia nel 2018, i quali possono portare a gravi interruzioni della filiera produttiva.

5.2.4 Valutazione del SCR della grafite

La grafite presenta un SCR pari a 0,59. La rischiosità della sua supply chain è prevalentemente dovuta alla concentrazione del mercato lungo le fasi della filiera.

Il RE per la “Disponibilità della materia prima” è 3, poiché l'estrazione mineraria annua potrebbe non soddisfare la crescente domanda, trainata soprattutto dall'uso nelle LIB per veicoli elettrici. Inoltre, il tasso di riciclo resta basso, infatti spesso il materiale viene bruciato per produrre energia.

Per quanto riguarda la rischiosità del mercato a monte della filiera, la Cina esercita quasi un monopolio controllando il 78% della produzione globale della grafite, mentre altri paesi in cui viene estratta gran parte della restante percentuale sono Madagascar, Mozambico e Brasile.

La situazione è ancora più grave scendendo a valle, con quasi il 99% della raffinazione in mano alla Cina e circa il 60% della produzione di anodi in grafite naturale e il 90% di quelli in grafite sintetica. Peraltro, il paese essendo al centro delle attuali tensioni geopolitiche, contribuisce a determinare un livello di rischio geopolitico per la supply chain pari a 3.

Il prezzo, invece, risente dei rischi come gli squilibri tra domanda e offerta; infatti, per adesso è in fase discendente per un eccesso di offerta verificatosi a seguito dei tagli del governo cinese alle sovvenzioni destinate ai veicoli elettrici che hanno fatto contrarre la domanda. Peraltro, i problemi geopolitici che coinvolgono la Cina, aggravano la situazione, e per i motivi espressi il RE della volatilità del prezzo è 3.

La volatilità della domanda presenta anch'essa un rischio medio. L'eccesso di offerta del quale precedentemente abbiamo parlato fa capire la bassa prevedibilità dell'andamento del mercato, mentre l'effetto frusta risulta contenuto in quanto la supply chain è gestita per la gran parte dalla Cina.

Il trasporto non desta molta preoccupazione, assumendo un valore pari a 2; infatti, i rischi connessi ai costi di trasporto, ma anche quelli che possono emergere a seguito delle lunghe tratte percorse, potendo causare ritardi nella catena, sono smorzati dalla concentrazione delle principali fasi nello stesso paese. Gli scioperi, data la forma di governo in Cina, non si verificano quasi mai, mentre le calamità naturali, come i terremoti, si verificano ma con una frequenza limitata, a differenza degli altri paesi che partecipano alla SC, come India, Mozambico e Madagascar, flagellati da inondazioni e cicloni frequenti, ma a causa del flusso limitato di materiale che li interessa, non influiscono più di tanto sulla criticità della fonte di rischio delle calamità.

Invece, per quanto riguarda la sostenibilità ambientale, l'impatto è sempre connesso maggiormente alle fasi di estrazione con deforestazione ed erosione del suolo, e di lavorazione, specialmente per la produzione di quella sintetica che richiede grandi quantità di energia derivante spesso da combustibili fossili; incide negativamente anche il recupero tramite il riciclo degli anodi, il quale risulta molto basso. Le condizioni di lavoro nella filiera sono mediamente critiche, dato che le polveri derivanti dalla lavorazione della grafite, se inalate in grandi quantità, possono comportare problemi respiratori. In generale il RE dei fattori ESG per la supply chain della grafite si attesta a 3.

5.2.5 Valutazione del SCR del manganese

Il manganese presenta un SCR di 0,58.

La disponibilità del manganese non è a rischio per quanto riguarda il settore delle LIB per EV; infatti, il relativo risk exposure è 2, dato che è un elemento molto abbondante, la cui estrazione annuale riesce a soddisfare la domanda, con l'unico problema connesso al tasso di riciclo che risulta essere molto basso. Sud Africa, Gabon e Australia sono i maggiori produttori, ma comunque ne sono presenti altri di minore spessore che fanno sì che l'estrazione non sia concentrata in specifiche aree geografiche. Però, come per la maggior parte delle materie prime per le LIB per auto elettriche, le fasi di raffinazione e produzione dei prodotti finiti sono nelle mani della Cina, che ne lavora circa il 97%, infatti il rischio associato a questi mercati è 4. Questo come annunciato è un problema, perché un punto critico della catena di approvvigionamento dipende da un solo paese; per il seguente motivo l'UE e gli USA si stanno muovendo per diversificare la dipendenza dall'approvvigionamento cinese, oltre che ad aprire impianti di lavorazione locali.

I rischi geopolitici assumono un valore di RE pari a 4, appunto a causa delle tensioni commerciali tra Cina e occidente, ma anche della possibilità che ci possano essere problemi a monte della filiera legati all'instabilità politica ed economica, che potrebbero colpire stati come Sud Africa, Gabon, Gana e Brasile. Per quanto riguarda l'andamento del prezzo, nonostante la volatilità molto alta dell'ultimo periodo, il RE è 3. Difatti, c'è stata la riduzione, rispetto alle previsioni, della domanda di acciaio cinese che ha portato ad un eccesso di offerta; infatti, visto che il manganese trova applicazione maggiormente nella produzione di acciaio, il suo prezzo è principalmente influenzato dall'andamento di quest'industria. Pertanto, si è deciso di valutare l'impatto del rischio "Leggi che influenzano l'impiego del materiale negli EV (incentivi, dazi...)" con 3, in quanto non lo influenzano più di tanto; ciò combinato con la bassa volatilità della valuta, dovuta alla stabilità del tasso di cambio tra USD ed Euro, ha fatto ridurre il RE.

Il rischio della volatilità della domanda assume valore di 3. La fonte di rischio dell'imprevedibilità della domanda, è alta, perché si stanno studiando nuove chimiche che potrebbero fare aumentare la domanda di manganese; l'effetto frusta è medio, derivante principalmente dal disaccoppiamento delle fasi di estrazione con quelle di lavorazione nei paesi menzionati. Inoltre, si è assistito alla chiusura dell'impianto di estrazione australiano della (GEMCO) di South32, a causa di un ciclone, e per questo motivo il fattore di rischio relativo alle calamità naturali che influenza il rischio del trasporto ha assunto un valore alto, data l'elevata probabilità di eventi estremi che possano interrompere il flusso del manganese lungo SC. A questo si aggiungono problemi di possibili scioperi, ma anche infrastrutture per il trasporto inadeguate nei paesi che si occupano dell'estrazione, portando il rischio del trasporto a 4.

Per quanto concerne il rischio dei fattori ESG, questo è connesso allo sfruttamento della manodopera, specialmente nei paesi dove si estrae il manganese come Sud Africa e Gabon e Gana, con le politiche del territorio, anche in materia di tutela ambientale, che potrebbero non essere sufficientemente adeguate.

5.2.6 Valutazione del SCR dell'alluminio

L'alluminio è tra le materie prime con una supply chain meno rischiosa, con un SCR di 0,54.

È disponibile in grandi quantità sul mercato, essendo uno degli elementi più diffusi in natura, potendo puntare anche su un elevato tasso di riciclo; per questi motivi il RE della disponibilità è pari a 1.

Il mercato che riguarda l'estrazione non è troppo concentrato, con Australia, Guinea e Cina che primeggiano, ma con ulteriori altri paesi distribuiti in tutto il globo che partecipano alla sua produzione; il problema è che comunque ci sono poche grandi aziende che ne controllano questa fase, ma comunque il RE del mercato a monte è pari a 3.

La situazione è più rischiosa per le fasi di produzione dei semilavorati e dei prodotti finiti, localizzate prevalentemente in Cina, con la produzione del 60% dell'alluminio, con il Giappone e la Corea del Sud che partecipano con una quota inferiore; infatti, il RE relativo a questi mercati ha assunto il valore di 4.

Il prezzo risulta volatile con un rischio pari a 3, influenzato proprio dalla Cina, principale produttore, la quale affronta costi crescenti per la riduzione delle emissioni di carbonio, incidendo sull'offerta. Inoltre, le sanzioni dell'UE, degli USA, e il divieto del Regno Unito sull'alluminio russo hanno ulteriormente fatto aumentare il prezzo. Tuttavia, anche il Canada e l'Europa sono al centro delle tensioni commerciali sull'alluminio, proprio con gli USA, che hanno imposto dei dazi all'importazione. Quanto appena detto con l'esclusione dei produttori internazionali dal mercato statunitense ridurrebbe l'offerta nel paese, mentre eventuali incentivi alla manifattura aumenterebbero la domanda interna. Ciò potrebbe avere impatti globali, influenzando i prezzi e creando squilibri tra domanda e offerta.

Sono dunque evidenti problemi geopolitici che fanno assumere alla categoria un RE di 4. Altre fonti di rischio che influiscono su questo valore sono i disordini civili, ma anche dell'instabilità politica elevata, che potrebbero affliggere la Guinea, Russia e Indonesia, paesi centrali per l'estrazione della bauxite, portando possibili disagi lungo la supply chain.

Il rischio della SC è influenzato mediamente dalla volatilità della domanda, a seguito dell'imprevedibilità del mercato legata alle sanzioni, e agli incentivi dei quali abbiamo discusso pocanzi, ma anche alle distorsioni dovute all'effetto frusta, che risentono della complessità della filiera.

Il trasporto è mediamente rischioso dato che la bauxite, l'alluminio e i componenti vengono spostati su lunghe distanze tra diversi continenti, aumentando costi, tempi e vulnerabilità ai disservizi.

La categoria di rischio dei fattori ESG assume un RE di 2, anche se la produzione di alluminio è ad alta intensità energetica ma comunque il tasso elevato di riciclo smorza il rischio ambientale; inoltre, sul piano sociale potrebbero esserci condizioni di lavoro inadeguate in paesi come Guinea, Brasile e Indonesia. Comunque, l'attenzione dei governi sia verso le tematiche ambientali, attraverso l'uso di fonti rinnovabili per le fasi di produzione, che per quelle sociali, cresce, riducendo il rischio della supply chain dell'alluminio.

5.2.7 Valutazione del SCR del rame

Il rame è la materia prima con l'indice di rischio della supply chain più basso, pari a 0,50.

La disponibilità del metallo per il settore delle LIB per auto elettriche presenta un rischio limitato, grazie all'elevata quantità estratta annualmente, all'alto tasso di riciclo e alle abbondanti riserve, che riducono la probabilità di future interruzioni nella fornitura.

Circa il 50% dell'estrazione avviene in Cile, Perù e Congo. Nelle fasi di produzione di semilavorati e prodotti finiti, la Cina domina il settore, mentre altri attori con quote minori includono Cile, Congo e Giappone. La Cina è anche nota per la sua notevole capacità produttiva e per le esportazioni di foglio di rame, rappresentando il 75 % della capacità produttiva globale. In generale l'Asia Pacifica detiene una posizione di leadership nella quota di mercato del prodotto finito.

Il rischio della volatilità del prezzo del rame è risultato pari a 3. Ha subito un aumento nell'ultimo anno del 13%, per i problemi di offerta e della crescente domanda. Fattori chiave includono la chiusura della miniera Cobre a Panama, possibili restrizioni cinesi sulla raffinazione, e tagli volontari alla produzione di rame raffinato. L'incremento della domanda dalla Cina, USA ed Europa, spinto dalla transizione energetica, ha amplificato la volatilità del prezzo. Quanto detto si riflette anche sulla domanda, che presenta un rischio della volatilità medio. L'aumento delle prestazioni delle celle agli ioni di litio riduce l'uso di rame per kWh, ma la crescente capacità delle batterie nel settore automobilistico mantiene alta la domanda complessiva, con nuovi possibili scenari che potrebbero crearsi a causa dell'espansione del settore e degli incentivi che ne potrebbero favorire la crescita.

I rischi geopolitici (RE pari a 3) sono correlati, oltre al rapporto tra Cina ed occidente, anche ai disordini civili in Cile, che possono scoppiare, come già successo in passato, ad esempio contro le disuguaglianze sociali. Inoltre, l'instabilità politica in Perù che ha visto il susseguirsi di vari governi nel corso degli anni, rappresenta un evidente rischio nel paese.

Il rischio del trasporto assume un valore medio, a causa delle lunghe tratte da percorrere tra i vari paesi protagonisti della supply chain, e delle infrastrutture poco adeguate nei paesi che estraggono il minerale, ma anche agli scioperi in Cile, i quali potrebbero portare al blocco del trasporto. Contribuiscono anche rischi di disagi al normale flusso del rame lungo la SC causati dalle calamità naturali, che hanno un rischio medio-alto dato che ci potrebbero essere pericoli di terremoti in Cile, che si trova lungo la cintura di fuoco del Pacifico, o frane ed inondazioni in Perù, i quali potrebbero bloccare l'estrazione del metallo. I fattori ESG hanno un RE medio. Il consumo d'acqua durante le fasi di estrazione e lavorazione, ma anche dell'erosione del suolo, incidono sull'impatto ambientale; anche le condizioni di lavoro non sono ottimali nei paesi quali Cile, Perù e RDC, ma l'attenzione verso questi temi è sempre più forte.

5.3 Impatto del rischio della SC sulla batteria per EV

La fase successiva ha trattato il calcolo del peso di ogni materia prima presente nel pacco batteria, questo ci servirà per capire come il rischio della supply chain di ognuna influenzi quello della batteria NMC 811. È stata scelta questa particolare chimica dato che è quella che oggi è ampiamente utilizzata nelle auto elettriche, poiché offre vantaggi in termini di costo, grazie alla bassa percentuale di cobalto, e vanta un'ottima densità energetica.

Il calcolo si è basato sull'analisi di un modello proposto dall'Argonne, (P.A. Nelson, 2012) , dal nome "BatPaC 5.0". Questo consiste in un foglio di calcolo elettronico che permette di ottenere per varie chimiche di batterie per auto elettriche risultati come i costi dei pacchi batteria, oppure i costi di lavorazione dei singoli componenti, ma anche dati sui materiali riciclati per una particolare chimica.

Per il nostro studio ci è stato utile perché ha permesso di estrapolare un elenco dettagliato dei componenti del pacco batteria con le loro caratteristiche chimiche e dimensionali. Sfruttando questi dati, siamo potuti giungere al calcolo con cui ogni materia prima influisce sul peso totale del pacco. Inizialmente abbiamo calcolato i pesi dei materiali che costituivano i componenti della cella. Poi a questi abbiamo aggiunto quelli che componevano il pacco, come i terminali, le barre collettrici, cavi e custodie. I pesi sono stati calcolati, dapprima per una cella da 8,3 kWh, e poi tutto è stato dimensionato per un pacco batteria da 10 kWh contenente 10 moduli ognuno costituito da 12 celle.

Infine, si è ottenuta una batteria (con esclusione di BMS e TMS e altre componenti che dipendono dalla personalizzazione che decide di implementare la singola gigafactory) dal peso totale di 31 Kg.

Il passo successivo è stato il calcolo delle percentuali delle MP nel pacco batteria.

$$(3) \quad \% \text{ in peso nel pacco} = \frac{P_k}{P_{tot}} \text{ con } K = 1,2 \dots 7$$

Dove:

- P_k è il peso della materia prima k-esima
- P_{tot} è la somma di tutti i materiali che costituiscono il pacco batteria

I valori sono riportati nella tab. 1 che segue:

| Materie prime | Nichel | Manganese | Cobalto | Litio | Rame | Alluminio | Grafite |
|----------------------|--------|-----------|---------|-------|------|-----------|---------|
| Peso in Kg nel pacco | 5,63 | 0,71 | 0,66 | 0,83 | 3,88 | 2,40 | 8,64 |
| % in peso nel pacco | 18% | 2% | 2% | 3% | 13% | 8% | 28% |

Tabella 1: peso percentuale delle materie prime nel pacco batteria.

Come si può notare dalla tab 1, la grafite, il nichel, il rame e l'alluminio influiscono maggiormente sul peso totale della batteria, rispettivamente con il 28%, 18%, 13% e 8%.

Tuttavia, lo scopo è quello di individuare quanto ogni materiale effettivamente impatta sul rischio della supply chain della batteria NMC 811.

Questo è stato possibile ottenerlo applicando un metodo di aggregazione "Mass-share", nel quale i supply chain risk degli elementi sono ponderati in base alla loro quota di massa nella batteria.

(I) Infatti, grazie alla valutazione dei rischi della supply chain eseguita in precedenza per ciascuna MP nella sezione 5.2, conosciamo il relativo SCR, ed è stato possibile quindi combinarlo con la relativa percentuale in peso ottenuta nella tab. 1 al fine di ottenere la quota (I_k) con cui impatta sul rischio totale della batteria.

(II) Infine, sommando le singole quote, si è ottenuto un SCR per questa particolare chimica batterica di 0,42, dunque abbastanza elevato.

Quanto detto è esplicitato nelle formule sottostanti.

$$I. \quad I_k = \%P_k * SCR_k \quad (4)$$

$$II. \quad SCR_{NMC\ 811} = \sum_{k=1}^7 I_k \quad (5)$$

I risultati che derivano dall'applicazione di queste 2 formule sono riportati nella tab. 2

| Materie prime | Nichel | Manganese | Cobalto | Litio | Rame | Alluminio | Grafite |
|-------------------------------------------------|--------|-----------|---------|-------|------|-----------|---------|
| Peso in Kg nel pacco | 5,63 | 0,71 | 0,66 | 0,83 | 3,88 | 2,40 | 8,64 |
| % in peso nel pacco | 18% | 2% | 2% | 3% | 13% | 8% | 28% |
| SCR materie prime | 0,60 | 0,58 | 0,69 | 0,66 | 0,50 | 0,54 | 0,59 |
| Quota di impatto sul SCR della batteria NMC 811 | 0,11 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,06 | 0,04 | 0,16 |
| SCR NMC 811 | 0,42 | | | | | | |

Tabella 2: calcolo SCR della batteria NMC 811.

Dopo aver ottenuto questo risultato, si è calcolato quanto effettivamente in termini percentuali ogni materia prima influisce sul SCR della batteria NMC 811 nel seguente modo:

$$\%QI_k = \frac{QI_k}{SCR_{NMC\ 811}} \quad \forall K = 1,2 \dots 7 \quad (6)$$

Dove:

- $\%QI_k$ è la percentuale con cui ogni materia prima influisce sul SCR della batteria NMC 811.
- QI_k è la quota di impatto sul SCR della batteria NMC 811

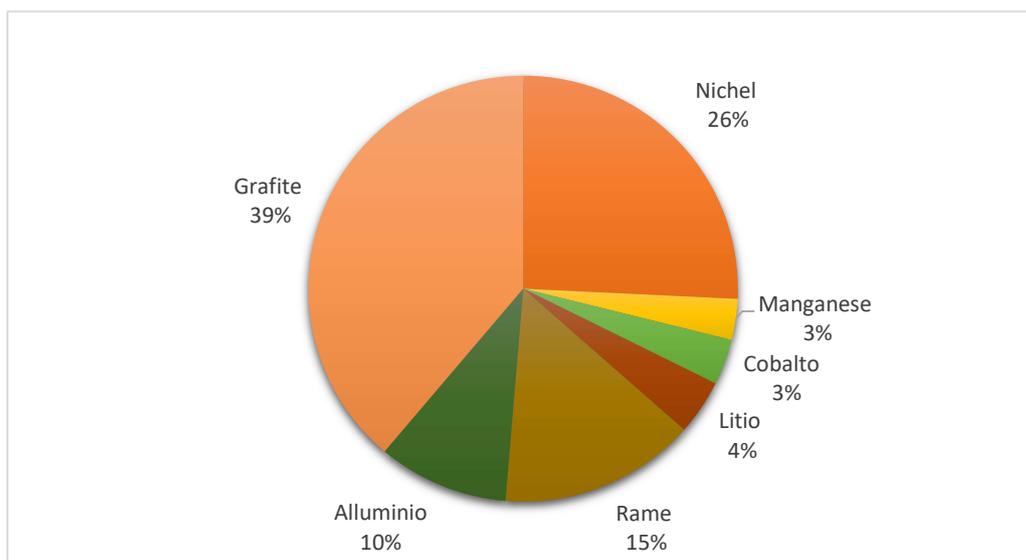


Figura 38: Percentuale di impatto di ogni materia prima sul rischio della supply chain della batteria NMC 811.

Dal calcolo delle percentuali, mostrate nella figura 38, si evince che il supply chain risk pari a 0,42 è dovuto principalmente all'influenza di due materie prime, che sono la grafite e il nichel, le quali partecipano rispettivamente al rischio totale con il 39% e il 26%.

Questo, appunto, è spiegato dal fatto che la loro è una catena di fornitura particolarmente critica a causa dei diversi fenomeni che la caratterizzano, ma anche perché hanno un peso significativo nella composizione del pacco batteria.

Quindi, al fine di ridurre il rischio della supply chain per la chimica in questione, ci siamo concentrati su queste due MP, così da poter fare delle ulteriori valutazioni sui rischi che le caratterizzano e provare a mitigarli.

5.4 Risposta al rischio

La risposta al rischio prevede di identificare delle possibili azioni da attuare per mitigare le fonti di rischio che caratterizzano le materie prime più critiche della batteria, in modo tale da renderli accettabili e ridurre il rischio della supply chain per la batteria NMC 811.

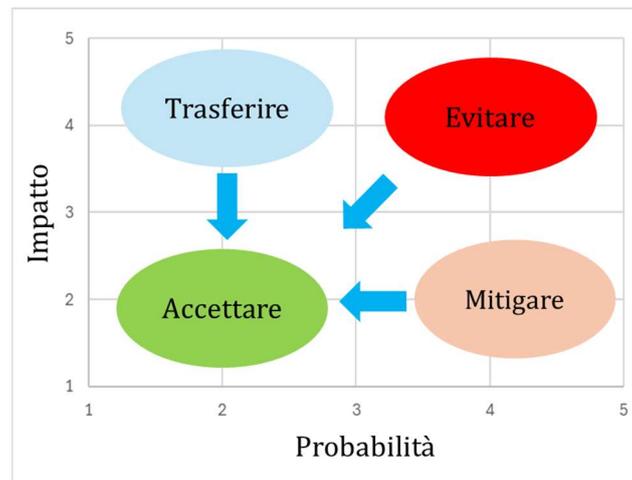


Figura 39: matrice probabilità-impatto.

Si è utilizzata la matrice probabilità-impatto, la quale permette di classificare i rischi.

La matrice in figura 39 vede sull'asse X le probabilità del rischio e sull'asse Y gli impatti. Entrambi gli assi possono assumere valori che vanno da 1 a 5, gli stessi usati per valutare i rischi, e in base al posizionamento del punto nella matrice, individuato dall'impatto e dalla probabilità che caratterizzano quel rischio che stiamo considerando (valori individuati nella valutazione del rischio fatta nella sezione 5.2), si può stabilire in che modo rispondere ad esso.

- Rischi che hanno probabilità di accadimento e impatti alti o molto alti (valori di 4 o 5), si trovano nell'area in alto a destra nella matrice, e sono i rischi che devono essere assolutamente evitati; infatti, potrebbero accadere spesso con impatti elevati.
- Rischi che hanno probabilità elevate (valori pari a 4 o 5) e impatti medio-bassi (valori pari a 1,2 o 3) sono rischi da mitigare, andando a studiare strategie per ridurre l'impatto o la probabilità.
- Rischi che hanno impatti elevati (valori pari a 4 o 5) e probabilità medio-basse (valori pari 1,2 o 3) sono rischi che non accadono molto spesso, ma se lo fanno hanno un impatto elevato sul rischio della supply chain, e dunque devono essere trasferiti a chi ha le capacità di gestirli meglio.
- Rischi che hanno impatti e probabilità che assumono valori bassi (pari a 1,2 o 3), possono essere accettati dato che accadono raramente in modo contenuto.

Per il nichel e la grafite sono state considerate le categorie di rischio con un RE pari o superiore a 3 da sottoporre ad analisi. I rischi che le caratterizzano sono stati rappresentati nella matrice probabilità-impatto, in modo tale da stabilire come trattarli al fine di ridurli. Quanto detto è trattato subito dopo.

5.4.1 Risposta al rischio della supply chain del nichel

1)

| Struttura del mercato a monte della filiera (estrazione) | Concentrazione nel mercato dei fornitori della materia prima | Concentrazione geografica dei fornitori della materia prima |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Probabilità | 4 | 4 |
| Impatto | 5 | 4 |

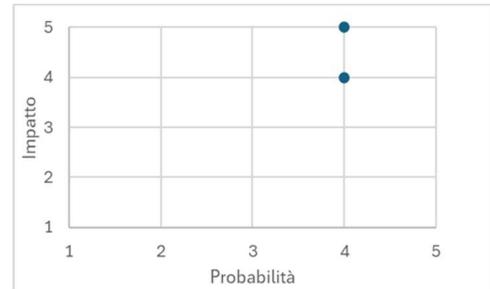


Tabella 3: Categoria del rischio "Struttura del mercato a monte della filiera (estrazione)" del nichel.

La tab.1 con la corrispondente matrice di probabilità-impatto mostra che le 2 fonti di rischio "Concentrazione nel mercato dei fornitori della materia prima" e "Concentrazione geografica dei fornitori della materia prima" sono entrambe da evitare.

Per farlo, dato che sono presenti poche grandi imprese minerarie e per lo più concentrate in Indonesia, che, come detto, presenta numerose problematiche sociali ed ambientali, le società che si occupano della raffinazione del nichel e della produzione del solfato di nichel o gigafactory stesse, che quindi sarebbero direttamente colpite da eventuali problemi a monte, potrebbero finanziare progetti di estrazione in paesi che possiedono giacimenti minerari di nichel ma che attualmente rappresentano solo una piccola quota rispetto al totale estratto ogni anno. Ciò garantirebbe per l'appunto lo sviluppo di nuovi mercati e allo stesso tempo l'entrata di nuove società, le quali ridurrebbero il rischio derivante dalla concentrazione di mercato attuale. Gli investimenti potrebbero essere fatti, ad esempio, in Russia, che ricopre forte interesse grazie alle riserve di nichel ad alta purezza (anche se i problemi geopolitici rendono il paese insicuro), oppure nelle Filippine, Nuova Caledonia o, meglio ancora, in Canada e Australia, che sono paesi stabili, con norme sulla sostenibilità sociale ed ambientale rigide.

2)

| | | |
|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Struttura del mercato della produzione dei semilavorati | Concentrazione nel mercato dei fornitori di semilavorati | Concentrazione geografica dei fornitori di semilavorati |
| Probabilità | 4 | 5 |
| Impatto | 5 | 4 |

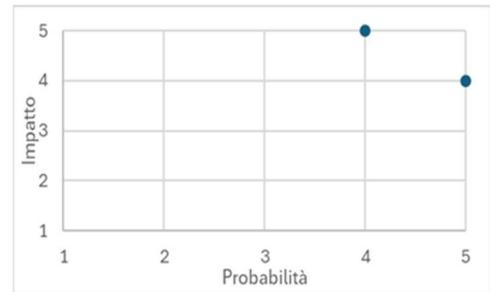


Tabella 4: Categoria di rischio "Struttura del mercato della produzione dei semilavorati" del nichel.

| | | |
|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Struttura del mercato della produzione dei prodotti finiti | Concentrazione nel mercato dei fornitori dei prodotti finiti | Concentrazione geografica dei fornitori dei prodotti finiti |
| Probabilità | 4 | 5 |
| Impatto | 5 | 4 |

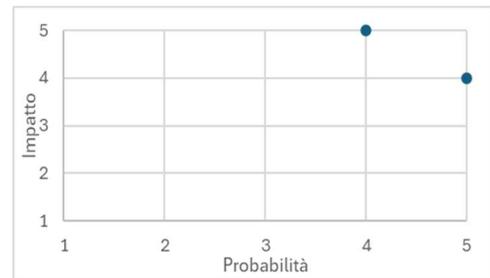


Tabella 5: Categoria di rischio "Struttura del mercato della produzione dei prodotti finiti" del nichel.

Le due categorie di rischio descritte nelle tab.4 e tab.5 sono state inserite insieme nel punto 2 perché sono gli stessi attori lungo la filiera a raffinare il nichel e ad occuparsi della trasformazione in prodotto finito, cioè il solfato di nichel per l'utilizzo nelle batterie, per questo motivo i rischi hanno assunto gli stessi valori.

Anche per il mercato dei semilavorati e dei prodotti finiti la concentrazione è elevata, con gli attori principali localizzati in Cina. Per questo motivo, riprendendo quanto detto nella risposta al rischio del punto 1, se si favorisse la nascita o l'espansione di progetti minerari in paesi alternativi all'Indonesia, proprio negli stessi si potrebbero sviluppare impianti di raffinazione adiacenti alle stesse miniere per produrre il solfato, così da garantire la nascita di una filiera integrata. Questo può essere ottenuto tramite, ad esempio, joint-venture tra aziende operanti a monte e quelle a valle che hanno finanziato la nascita di nuovi progetti minerari nelle aree in questione, così da limitare il predominio della Cina, diversificando le fonti di approvvigionamento e riducendo il rischio di possibili interruzioni della filiera.

3)

| | | | |
|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| Volatilità del prezzo | Equilibrio tra domanda e offerta | Leggi che influenzano l'impiego del materiale negli EV (incentivi, dazi...) | Fluttuazione della valuta |
| Probabilità | 5 | 4 | 2 |
| Impatto | 5 | 3 | 3 |

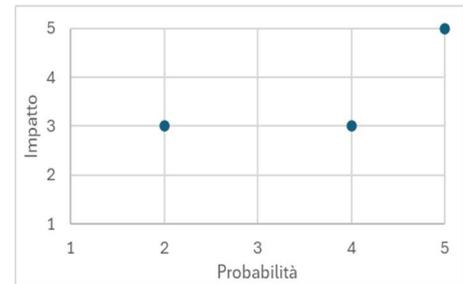


Tabella 6: Categoria di rischio "Volatilità del prezzo" del nichel.

La volatilità del prezzo vede le fonti di rischio "Equilibrio tra domanda e offerta" da evitare, "Leggi che influenzano l'impiego del materiale negli EV (dazi, incentivi...)" che sono da mitigare, mentre il rischio "fluttuazione della valuta" è accettabile.

Per quanto riguarda il primo rischio, l'impatto che potrebbe avere sulla SC, ma anche la probabilità dato che ultimamente si sono verificati degli eccessi di offerta, come ben visibili dalla tab. 6, sono elevati. Per evitarlo chi sta a valle della catena, e dunque le gigafactory, che hanno più prontezza della domanda di mercato e che guidano quella dei livelli superiori della filiera, possono incrementare l'adozione di software previsionali basati su dati storici di mercato che sfruttano tecnologie innovative; oppure si potrebbe valutare l'implementazione di una supply chain, tramite la collaborazione degli attori principali della filiera, le cui fasi dall'estrazione fino alla produzione dei prodotti finiti siano concentrate in aree geografiche limitrofe, così da permettere l'attuazione di metodi di gestione delle scorte più efficienti.

Invece, per mitigare la volatilità del prezzo legata ai dazi o agli incentivi che riguardano il settore degli EV, e che dunque influenzerebbero il prezzo della materia prima, chi sta più in basso nella SC può praticare contratti di fornitura a lungo termine con i produttori di nichel, in modo tale da garantire la stabilità dei prezzi. Un'altra opzione, in particolare per rispondere al rischio dell'imposizione dei dazi, sarebbe quella di cercare, mercato permettendo, il rifornimento da fornitori distribuiti in paesi meno esposti a questo rischio.

4)

| Volatilità della domanda | Previsione della domanda | Effetto frusta | Leggi che influenzano l'impiego del materiale negli EV (incentivi, dazi...) |
|--------------------------|--------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Probabilità | 3 | 4 | 4 |
| Impatto | 5 | 4 | 3 |

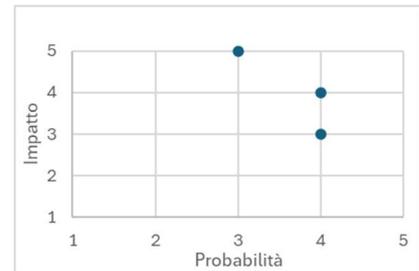


Tabella 7: Categoria di rischio "Volatilità della domanda" del nichel.

La volatilità della domanda, come si evince dalla tab. 7, è causata dalle fonti di rischio "Previsione della domanda" che è un rischio da trasferire, mentre "Leggi che influenzano l'impiego del materiale negli EV (dazi, incentivi...)" da mitigare, quello legato all'"Effetto frusta" invece da evitare.

L'imprevedibilità della domanda del solfato di nichel che può portare al deficit di offerta e bloccare dunque la catena di fornitura del nichel è difficile da gestire, dati i diversi fenomeni che stanno interessando il mercato degli EV. Questo rischio potrebbe essere gestito evitandolo e non trasferendolo con la stessa strategia espressa al punto 3 che garantiva l'equilibrio tra domanda ed offerta con l'adozione di software previsionali all'avanguardia da parte dei principali attori della filiera, oppure agendo sull'impatto del rischio della supply chain, aumentando gli stock lungo le fasi della filiera; però, anche se ciò permettesse di rispondere ad eventuali variazioni improvvise della domanda, potrebbe comunque generare elevati livelli di scorte a causa dell'effetto bullwip del quale parleremo adesso.

Infatti, al fine di evitare la distorsione delle informazioni dovuta all'effetto frusta, i principali protagonisti nelle varie fasi della filiera potrebbero agevolare il flusso delle informazioni tra i vari anelli utilizzando sistemi informatici che facilitino la loro condivisione, come ERP o altri sistemi gestionali, cercando di garantire metodi di gestione delle scorte il più flessibili possibili, oppure avvicinando geograficamente le fasi della supply chain, così da evitare eccessive scorte.

Il terzo rischio è identico a quello del quale abbiamo parlato nel punto precedente e le soluzioni coincidono.

5)

| Geopolitico | Politica interna | Disordini civili | Squilibri economici | Rapporti commerciali tra Stati facenti parte della SC |
|-------------|------------------|------------------|---------------------|-------------------------------------------------------|
| Probabilità | 4 | 4 | 3 | 5 |
| Impatto | 5 | 4 | 4 | 5 |

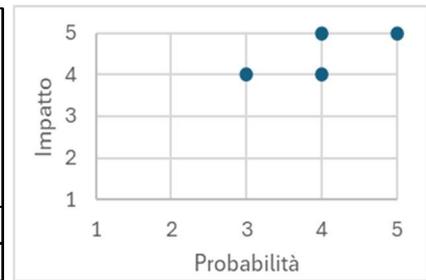


Tabella 8: Categoria di rischio "Geopolitico" del nichel.

La categoria del rischio geopolitico vede tutte le fonti di rischio che la definiscono descritte nella tab. 8 da evitare, ad eccezione degli squilibri economici che sono da trasferire.

L'instabilità politica assume un rischio elevato, principalmente connesso all'Indonesia, ma anche alla Russia, in quanto per il primo paese è presente una democrazia ma che effettivamente si è rivelata essere più un'oligarchia, mentre in Russia, come ben sappiamo, a causa della guerra russo-ucraina, con le sanzioni che le sono state inflitte con conseguenti danni economici, potrebbe esserci un elevato pericolo di instabilità politica con impatti elevati sulla SC. Questi problemi sono strettamente legati anche al rischio di disordini civili, più probabili in Indonesia, che, per il motivo espresso precedentemente, ha visto crescere il malcontento sociale manifestatosi con proteste in piazza. In Russia invece questo rischio è limitato a causa delle pene severe per chi protesta. Dunque, per evitare questi rischi e provvedere alla creazione di una supply chain resiliente, le gigafactory e le società di raffinazione dovrebbero puntare a favorire lo sviluppo delle fasi della supply chain in paesi come Australia e Canada, che hanno delle riserve di nichel e che godono di una stabilità interna migliore.

Il rischio più elevato riguarda però le tensioni commerciali tra stati, come quello tra Cina e USA, ma anche tra Cina ed Europa, caratterizzate dall'imposizione di dazi sulle importazioni di auto cinesi. Anche la Russia è al centro delle tensioni geopolitiche dovute alla guerra in Ucraina, subendo restrizioni commerciali da parte di molti paesi. Dunque, per evitare questi rischi, le fasi della SC concentrate in queste zone, specialmente per quanto riguarda la raffinazione che è controllata per la gran parte della Cina, devono essere sviluppate in paesi geopoliticamente meno esposti, come l'Australia.

Gli squilibri economici sono rischi da trasferire, ad esempio tramite delle clausole contrattuali di rinegoziazione, le quali mi permetterebbero di apportare modifiche al contratto con il fornitore che sta nell'anello della SC precedente al mio. Difatti, se i prezzi delle materie prime, influenzati dagli squilibri economici che colpiscono un paese in cui si svolge una determinata fase della supply chain del nichel, subissero delle variazioni, potrei rinegoziare i termini contrattuali, adattandoli al nuovo contesto.

6)

| Trasporto | Costi di trasporto | Problemi/scioperi dei trasportatori | Tratta da percorrere lungo la supply chain | Materiale trasportato | Calamità naturali |
|-------------|--------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------|-------------------|
| Probabilità | 4 | 3 | 4 | 2 | 3 |
| Impatto | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 |

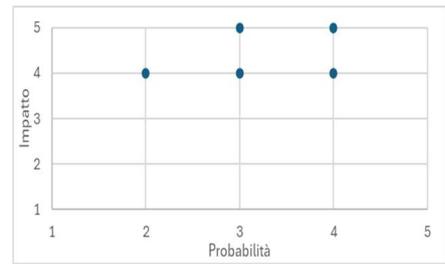


Tabella 9. Categoria di rischio del "Trasporto" del nichel.

Dalla tabella 9 si evince che i "costi di trasporto" e "le tratte da percorrere lungo la supply chain" sono delle fonti di rischio da evitare. Per il seguente motivo, se ci si mette nell'ottica di una gigafactory posizionata in Europa, per limitare la lunghezza delle tratte percorse dai materiali che aumentano il rischio di ritardi lungo la supply chain, ma anche i costi strettamente connessi, i quali potrebbero comportare degli stop se troppo elevati, potrebbe essere vantaggioso trasferire le fasi iniziali della produzione in paesi vicini al mercato finale praticando il cosiddetto nearshoring; ciò può essere attuato potendo contare sull'impegno degli Stati europei, dato il ruolo sempre più centrale della produzione di veicoli elettrici nell'economia attuale che possono impegnarsi tramite incentivi a fare sviluppare nuovi mercati vicini a quello finale. Un paese in cui attuare ciò potrebbe essere il Canada (dato che possiede riserve minerarie), trovando così un trade-off tra vicinanza al continente europeo e stabilità del paese, pensando di adottare il trasporto via nave combinato con l'uso di camion o treni, ad esempio, cercando in questo modo di ridurre i costi, ma ovviamente dovendo accettare dei tempi di consegna dilatati.

Gli altri 3 rischi della tab. 9, invece, sono da trasferire.

Il fatto che si possano verificare dei problemi oppure degli scioperi che riguardano i trasportatori si può benissimo gestire trasferendo il rischio sui fornitori stessi del prodotto, attraverso dei contratti Cost Insurance and Freight (CIF) e Carriage and Insurance Paid to (CIP), nei quali il fornitore copre tutti i rischi e i costi (via terra o via nave) fino al paese finale di destinazione del cliente.

Per il rischio dovuto a possibili disagi alla SC derivanti dalla pericolosità del solfato di nichel durante il trasporto, oppure a interruzioni del trasporto legate al manifestarsi di calamità naturali, le gigafactory o comunque i clienti che sono in procinto di ricevere la fornitura da parte dei fornitori ad un livello superiore della catena possono usufruire di un'assicurazione che si faccia carico della copertura di eventuali problemi alla merce o ritardi che si potrebbero verificare a causa di questi imprevisti.

7)

| Fattori ESG | Impatto ambientale | Lavoro minorile | Salari dei lavoratori | Politiche governative per la sostenibilità nella filiera del materiale | Condizioni di lavoro | Tasso di riciclo del materiale |
|-------------|--------------------|-----------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| Probabilità | 5 | 4 | 5 | 3 | 5 | 2 |
| Impatto | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 |

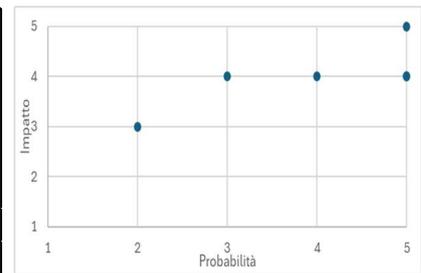


Tabella 10: Categoria di rischio "Fattori ESG" del nichel.

Le fonti di rischio presenti nella tab. 10 derivanti dall'impatto ambientale, dal lavoro minorile, dai salari dei lavoratori e dalle condizioni di lavoro sono da evitare.

Il primo può essere evitato attraverso la collaborazione tra i governi e le aziende locali che acquistano nichel da paesi non conformi alle normative ambientali, puntando sulla localizzazione delle fasi dell'estrazione e della lavorazione in paesi che pongono un'elevata attenzione alla sostenibilità ambientale, come Canada e Australia, i quali attuano leggi ferree in materia di tutela ambientale, che garantiscono l'uso di energia rinnovabile per le operazioni che caratterizzano le fasi precedentemente citate, ma anche uno smaltimento adeguato dei rifiuti di scarto.

Gli altri tre rischi da evitare vedono sempre l'Indonesia come protagonista. I paesi o le società che si riforniscono del nichel proveniente dall'Indonesia devono sollecitare le società minerarie ad applicare leggi che tutelino maggiormente i lavoratori, aggiungendo anche delle penali dirette verso quelle che adottano queste forme di sfruttamento, oppure si potrebbe intervenire direttamente, orientando la produzione verso paesi che applicano rigorose normative a tutela dei lavoratori raggiungibili con le modalità espresse nel paragrafo di prima.

Il rischio relativo alle "Politiche governative..." è da trasferire, quello del "Tasso di riciclo" si può invece accettare.

Il rischio che i governi non si occupino di tutelare la sostenibilità lungo la filiera può essere trasferito dagli attori della filiera situati prevalentemente in occidente e dunque che si trovano a valle della SC, come le gigafactory, i quali rivolgono maggiore attenzione a queste tematiche, ad organismi di controllo esterni come l'ISO, che ha il compito di certificare che gli attori della filiera rispettino degli specifici standard sulla sostenibilità, come l'ISO 20400:2017, pena l'esclusione dalla stessa.

5.4.2 Risposta al rischio della supply chain della grafite

1)

| Disponibilità della materia prima | Estrazione mineraria annuale | Riserve disponibili | Tasso di riciclo del materiale |
|-----------------------------------|------------------------------|---------------------|--------------------------------|
| Probabilità | 3 | 2 | 5 |
| Impatto | 5 | 4 | 3 |

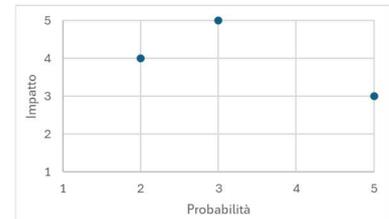


Tabella 11: Categoria di rischio "Disponibilità della materia prima" della grafite.

Dalla tab. 11 si evince che l'"Estrazione mineraria annuale" e quello delle "Riserve disponibili" sono da trasferire, mentre la fonte di rischio "Tasso di riciclo del materiale" è da mitigare.

Il rischio che l'estrazione mineraria annuale non sia in grado di soddisfare la crescente domanda proveniente dal settore dei veicoli elettrici è probabile; dunque, questo rischio deve essere trasferito alle società minerarie. Un modo per farlo è quello di stipulare dei contratti di fornitura con chi può effettivamente decidere se fare o meno investimenti per incrementare la produzione mineraria, inserendo delle clausole che comprendono il fatto che, se a me cliente a valle non arrivasse la merce a causa del rallentamento della produzione della grafite a monte, scatterebbero delle penali per ogni giorno di ritardo.

Invece, il fatto che le riserve non riescano a soddisfare la crescente domanda, è sempre un rischio da trasferire alle stesse società minerarie, oppure si potrebbe pensare alla condivisione del rischio mediante contratti che facilitino investimenti comuni tra chi opera a valle e a monte, finanziando progetti di esplorazione mineraria, così da garantire l'approvvigionamento costante futuro.

Il rischio relativo alla quantità reimmessa nel mercato tramite riciclo lo posso mitigare riducendo la probabilità che esso accada. Le gigafactory stesse potrebbero impegnarsi nella ricerca e nell'implementazione di nuovi processi che rendano il riciclo più economico, sfruttando tecnologie avanzate e beneficiando delle economie di scala. Attualmente, infatti, il principale ostacolo è rappresentato dagli elevati costi del processo di recupero.

2)

| Struttura del mercato a monte della filiera (estrazione) | Concentrazione nel mercato dei fornitori della materia prima | Concentrazione geografica dei fornitori della materia prima |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Probabilità | 4 | 4 |
| Impatto | 5 | 4 |

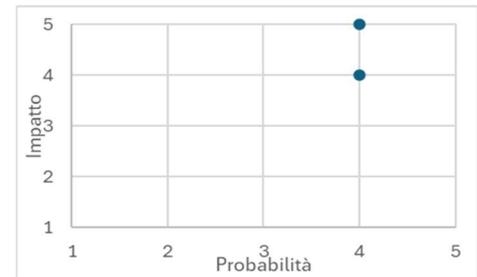


Tabella 12: Categoria di rischio "Struttura del mercato a monte della filiera (estrazione)" della grafite.

La concentrazione nel mercato dei fornitori della materia prima, ma anche quella geografica con i relativi valori di impatto e probabilità che si trovano nella tab. 12, sono delle fonti di rischio da evitare.

L'elevata concentrazione, con pochi attori che estraggono grafite e la loro elevata concentrazione geografica in Cina, che è responsabile della produzione del 78% della grafite totale, è un rischio a cui si può rispondere tramite il finanziamento, da parte degli attori che operano a valle che potrebbero risentire direttamente di eventuali problemi che si verificherebbero a monte, di progetti di estrazione in altri paesi ricchi di giacimenti, che per adesso ne producono una percentuale ridotta, per esempio in Canada, Madagascar, Mozambico, Brasile; ciò volto ad incentivare la nascita di nuove società grazie all'espansione del mercato che permetterebbe di abbassare le barriere all'ingresso. Un ulteriore paese su cui focalizzare l'attenzione potrebbe essere l'Ucraina, vicina all'Europa, che è un territorio ricco di giacimenti di carbone, ma a causa della guerra con la Russia non si candida per adesso tra i favoriti. Comunque, stati come gli USA, ma anche quelli appartenenti all'UE, stanno già finanziando l'apertura di nuove miniere per l'estrazione del minerale per ridurre il rischio della concentrazione, ad esempio in Alaska e Alabama, e in Finlandia e Repubblica Ceca con l'ampliamento di quelli esistenti.

3)

| Struttura del mercato della produzione dei semilavorati | Concentrazione nel mercato dei fornitori di semilavorati | Concentrazione geografica dei fornitori di semilavorati |
|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Probabilità | 4 | 5 |
| Impatto | 5 | 4 |

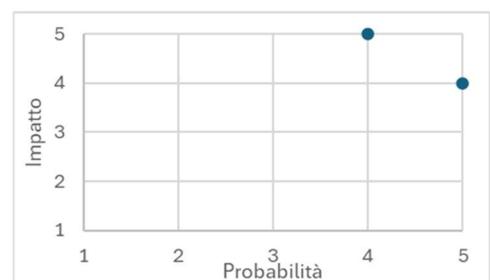


Tabella 13: Categoria di rischio "Struttura del mercato della produzione dei semilavorati" della grafite.

Come si nota dalla tab.13 la concentrazione del mercato dei semilavorati, specialmente quella geografica, risulta essere ancora più critica, in quanto la Cina controlla il 99% della raffinazione della grafite. Per questo è utile favorire lo sviluppo di nuovi mercati in altri paesi che potrebbero facilitare l'insediamento e lo sviluppo di nuove aziende sul territorio. Riprendendo il discorso al punto 2, se le fasi di estrazione si sviluppavano in quelle regioni menzionate sarebbe opportuno creare una filiera integrata, con possibili joint-venture tra chi opera a monte e a valle, che comprenda anche della fase di raffinazione della grafite.

4)

| | | |
|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Struttura del mercato della produzione dei prodotti finiti | Concentrazione nel mercato dei fornitori dei prodotti finiti | Concentrazione geografica dei fornitori dei prodotti finiti |
| Probabilità | 4 | 5 |
| Impatto | 5 | 4 |

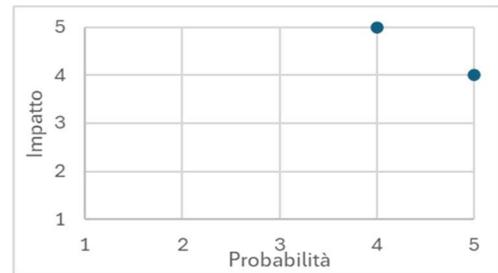


Tabella 14: Categoria di rischio "Struttura del mercato della produzione dei prodotti finiti" della grafite.

Lo stesso discorso vale per il mercato dei prodotti finiti descritto nella tab.14. Circa il 60% della produzione di anodi in grafite naturale e il 90% di quelli in grafite sintetica proviene difatti dalla Cina. Dunque, creare una filiera integrata in paesi che per adesso svolgono un ruolo marginale nella produzione della grafite e degli anodi è una possibilità che permetterebbe di eliminare il rischio di possibili blocchi della supply chain che derivano dall'aver un mercato controllato da pochi attori situati in un unico paese.

5)

| | | | |
|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| Volatilità del prezzo | Equilibrio tra domanda e offerta | Leggi che influenzano l'impiego del materiale negli EV (incentivi, dazi...) | Fluttuazione della valuta |
| Probabilità | 4 | 3 | 2 |
| Impatto | 5 | 4 | 3 |

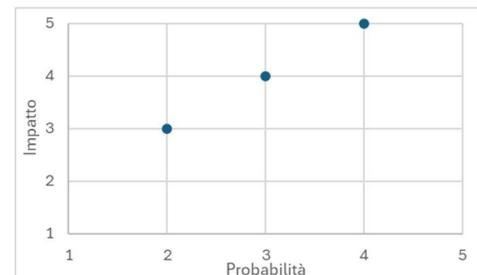


Tabella 15: Categoria di rischio "Volatilità del prezzo" della grafite.

È facilmente deducibile dai valori riportati nella tabella qui sopra che la volatilità del prezzo è legata alle fonti di rischio "Equilibrio tra domanda e offerta" che è da evitare, "Leggi che influenzano..." da trasferire e "Fluttuazione della valuta" che è da accettare.

Per evitare che si manifestino squilibri tra domanda e offerta che abbiano impatto sul prezzo della grafite, bisognerebbe che gli attori della SC e in primis le gigafactory, le quali si rivolgono direttamente al mercato finale degli EV e che guidano la domanda lungo la filiera, adottino software all'avanguardia per prevedere la domanda futura, adattando conseguentemente la produzione. I vari attori degli anelli della SC potrebbero inoltre cercare dei metodi di gestione delle scorte, come il safety stock, che riescano ad assorbire eventuali picchi di domanda, o ancora, come espresso per il nichel, cercare di stipulare contratti di fornitura a lungo termine e garantire in questo modo la stabilità nel mercato.

Quello relativo ai dazi o agli incentivi che riguardano le materie prime destinate al settore dei veicoli elettrici si potrebbe trasferire ai fornitori localizzati in un certo paese comprando una polizza assicurativa contro il rischio politico ed economico, che protegge le aziende da cambiamenti delle condizioni di acquisto dovuti a dazi, incentivi o altre decisioni commerciali da parte dei governi.

6)

| Volatilità della domanda | Previsione della domanda | Effetto frusta | Leggi che influenzano l'impiego del materiale negli EV (incentivi, dazi...) |
|--------------------------|--------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Probabilità | 4 | 3 | 3 |
| Impatto | 5 | 4 | 4 |

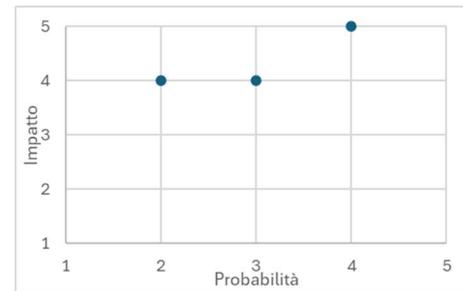


Tabella 16: Categoria di rischio "Volatilità della domanda" della grafite.

La categoria della volatilità della domanda vede le fonti di rischio "Effetto frusta" e quello delle "Leggi che influenzano l'impiego..." da trasferire, mentre il rischio connesso alle "previsioni della domanda" da evitare.

L'effetto frusta è comunque un rischio che io potrei benissimo ridurre evitando di trasferirlo, poiché non c'è un vero e proprio livello della catena che sia maggiormente in grado di gestirlo; dunque, si potrebbero implementare strumenti di condivisione delle informazioni lungo la SC come ERP, oppure usare dati in tempo reale, o se è possibile cercare di trovare metodi di gestione delle scorte che non prevedano stock elevati così da limitare la sovrapproduzione; inoltre, anche la sottoscrizione di contratti di fornitura flessibili che evitino eccessivi ordini anticipati è un'ottima opzione.

Quello relativo ai dazi o agli incentivi per gli EV è un rischio che può essere trasferito nello stesso modo discusso al punto 5.

Il rischio che riguarda le difficoltà nel prevedere la domanda si può evitare adottando strumenti statistici di previsione della domanda, specialmente da parte di chi opera a valle, che si basano su dati storici, oppure cercando di creare una domanda stabile tramite l'incentivo degli acquirenti di EV a fare ordini anticipati, o tramite la stipulazione con i fornitori di ogni anello della catena di contratti flessibili che mi permettano di modificare gli ordini senza incorrere in penali.

7)

| Geopolitico | Politica interna | Disordini civili | Squilibri economici | Rapporti commerciali tra Stati facenti parte della SC |
|-------------|------------------|------------------|---------------------|-------------------------------------------------------|
| Probabilità | 2 | 2 | 2 | 5 |
| Impatto | 5 | 4 | 4 | 5 |

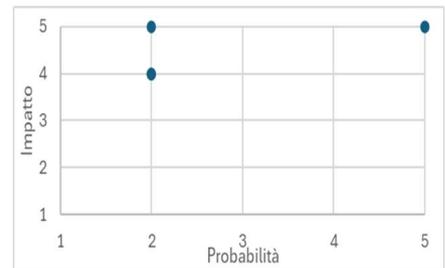


Tabella 17. Categoria di rischio "Geopolitico" della grafite.

I rischi individuabili relativi alla "Politica interna", ai "Disordini civili" e agli "Squilibri economici" sono da trasferire, quelli che possono nascere dai "Rapporti commerciali..." sono invece da evitare.

I primi 3 della tab. 17 sono rischi che potrebbero colpire nello specifico paesi che si occupano dell'estrazione mineraria, come Madagascar, Brasile, Mozambico, e quindi per limitare la rischiosità della supply chain, chi si occupa di produrre semilavorati o prodotti finiti potrebbe fare ricorso nuovamente all'assicurazione sul rischio politico che si impegna a risarcire danni subiti dalla merce, oppure inadempienze contrattuali dei fornitori che operano in quei luoghi a causa di questi eventi; inoltre, ci potrebbero essere proprio delle clausole contrattuali per rimborsi dovuti alle interruzioni della supply chain.

Il rischio derivante da possibili tensioni tra stati può essere evitato con il cosiddetto friendshoring, che consiste nel localizzare le attività della supply chain in paesi considerati amici, che sono stabili e non al centro di tensioni geopolitiche. Quindi, essendo a conoscenza che è la Cina a comportare il rischio geopolitico maggiore nella catena della grafite, in quanto controlla praticamente le fasi principali, e in seguito alle tensioni commerciali con USA in primis, ma anche con l'Europa, le gigafactory europee con il sostegno statale dovrebbero favorire l'approvvigionamento da produttori posizionati in paesi quali ad esempio il Canada, che già estrae grafite e non è troppo distante dall'Europa e che peraltro gode di una stabilità geopolitica (anche se ultimamente è messa a dura prova dall'imposizione di dazi da parte degli USA, che sta scatenando una guerra commerciale tra i due paesi).

8)



Tabella 18: Categoria di rischio "Fattori ESG" della grafite.

Le fonti di rischio per la categoria indicata nella tabella 18 che devono essere evitate sono quella dell'“Impatto ambientale”, delle “Condizioni di lavoro”, e delle “Politiche governative...”, invece sono da trasferire quella del “Lavoro minorile” e dei “salari dei lavoratori”, mentre quella del “Tasso di riciclo” è da mitigare.

Il rischio dell'impatto ambientale è da evitare, in particolar modo nella parte a monte della SC, rifornendosi da paesi che adottano leggi ferree in materia. Si potrebbe valutare l'introduzione di penali nei contratti di fornitura verso i fornitori a diversi livelli della catena produttiva che dimostrano scarso interesse per questo tema.

Per quanto riguarda il rischio connesso allo scarso interesse dei governi sui temi della sostenibilità del materiale lungo la filiera, le società come quelle occidentali che rivolgono maggiore interesse verso la sostenibilità possono rivolgersi a organismi che si occupano di stabilire standard di sostenibilità lungo la catena, come l'ISO, escludendo dalla filiera le società che non li rispettano.

Il rischio delle condizioni di lavoro che possono essere pessime, insieme al lavoro minorile e al rischio della manodopera sottopagata, devono essere trasferiti a chi è in grado di controllarli meglio, come le stesse società minerarie, maggiormente responsabili di questi fenomeni, e dunque potrebbero essere stipulati dei contratti tra fornitori e clienti, che producono semilavorati e prodotti finiti a partire dalla grafite, integrando dei KPI di sostenibilità, i quali obbligano queste aziende a rispettare gli standard sui fattori misurati, pena l'applicazione di sanzioni o il blocco della fornitura.

Per mitigare il rischio connesso al tasso di riciclo, le stesse strategie adottate nel punto 1 sono adatte per la sua mitigazione.

5.4.3 Riepilogo delle misure adottate per rispondere al rischio del nichel

| Categoria di rischio | Fonti di rischio | Risposta al rischio |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Struttura del mercato a monte della filiera (estrazione) | Concentrazione geografica dei fornitori della materia prima | Finanziamento di nuovi progetti minerari in Australia, Canada da parte delle società che operano nelle fasi successive della SC |
| | Concentrazione nel mercato dei fornitori della materia prima | Ampliamento del mercato a seguito delle misure adottate nei paesi sopra citati così da favorire l'entrata di nuove imprese |
| Struttura del mercato della produzione dei semilavorati e dei prodotti finiti | Concentrazione geografica nel mercato dei semilavorati e dei prodotti finiti | Successivamente allo sviluppo di nuovi progetti minerari in altre regioni si può pensare alla localizzazione di queste due fasi in zone adiacenti a quelle dove avviene l'estrazione |
| | Concentrazione nel mercato dei fornitori di semilavorati e prodotti finiti | Creazione di collaborazioni tra chi opera a monte e a valle nelle nuove aree di sviluppo al fine di far nascere una filiera integrata con nuove imprese e ridurre l'attuale concentrazione di mercato |
| Volatilità del prezzo | Equilibrio tra domanda e offerta | <ul style="list-style-type: none"> • Adozione di software previsionali avanzati da parte degli attori della SC • Creazione di filiere con attori principali concentrati in aree geografiche limitrofe, per ottimizzare la gestione delle scorte e adottare metodi di gestione adeguati |
| | Leggi che influenzano l'impiego del materiale negli EV (dazi, incentivi...) | <ul style="list-style-type: none"> • Stabilire contratti di fornitura a lungo termine con i produttori di nichel per garantire la stabilità dei prezzi • Cercare fornitori in paesi meno esposti a rischi legati ai dazi, riducendo così l'impatto di tali politiche sui costi delle materie prime |
| Volatilità della domanda | Previsione della domanda | <ul style="list-style-type: none"> • Adozione di software previsionali avanzati da parte degli attori della SC, soprattutto per gli attori a valle • Aumentare le scorte nelle diverse fasi della supply chain per affrontare le variazioni improvvise della domanda, sebbene ciò possa comportare il rischio di accumulare scorte elevate a causa dell'effetto frusta |
| | Leggi che influenzano l'impiego del materiale negli EV (dazi, incentivi...) | <ul style="list-style-type: none"> • Stabilire contratti di fornitura a lungo termine con i produttori di nichel per garantire la stabilità dei prezzi • Cercare fornitori in paesi meno esposti a rischi legati ai dazi, riducendo così l'impatto di tali politiche sui costi delle materie prime |
| | Effetto frusta | <ul style="list-style-type: none"> • Utilizzare sistemi informatici come ERP o altri software gestionali per facilitare la condivisione delle informazioni tra i vari attori della filiera. • Implementare metodi di gestione delle scorte più flessibili per rispondere rapidamente ai cambiamenti nella domanda • Concentrare le fasi produttive in aree limitrofe per evitare accumuli eccessivi di scorte e ridurre l'impatto dell'effetto frusta |

| | | |
|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Geopolitico | Politica interna | Le società minerarie maggiormente soggette a questo rischio devono puntare allo sviluppo di fasi di estrazione in paesi politicamente più stabili della Russia o dell'Indonesia, come l'Australia e il Canada |
| | Disordini civili | Anche per questo rischio tramite collaborazioni tra società operanti a monte e a valle si dovrebbe cercare di favorire la localizzazione delle fasi della supply chain in paesi meno soggetti al rischio in questione, quali Australia e Canada |
| | Squilibri economici | Trasferire il rischio utilizzando clausole contrattuali di rinegoziazione, che permettono di modificare i termini dell'accordo con il fornitore in caso di variazioni nei prezzi delle materie prime |
| | Rapporti commerciali tra stati facenti parte della SC | <ul style="list-style-type: none"> • Diversificazione geografica della supply chain, spostando alcune fasi strategiche fuori da aree a rischio, come Cina e Russia • Sviluppo della raffinazione del nichel in paesi geopoliticamente stabili, come l'Australia • Riduzione della dipendenza dalla Cina, soprattutto per le attività di raffinazione, per evitare l'impatto di dazi e restrizioni • Individuazione di partner commerciali in paesi alleati e con rapporti diplomatici solidi, come Canada e Australia |
| Trasporto | Problemi/scioperi dei trasportatori | Trasferire il rischio ai fornitori dei prodotti attraverso dei contratti Cost Insurance and Freight (CIF) e Carriage and Insurance Paid to (CIP) |
| | Costi di trasporto | Adottare il trasporto via nave combinato con l'uso di camion o treni, ad esempio, cercando in questo modo di ridurre i costi, ma ovviamente dovendo accettare dei tempi di consegna dilatati |
| | Tratta da percorrere lungo la supply chain | Attuare il nearsoring tramite l'aiuto statale, localizzando le fasi iniziali della catena vicino ai mercati finali, come in Canada se ci si mette in un'ottica europea |
| | Materiale trasportato | Usufruire di un'assicurazione che si possa fare carico della copertura di eventuali problemi alla merce o ritardi che si potrebbero verificare a causa di danneggiamenti del materiale trasportato oppure al verificarsi di calamità naturali |
| | Calamità naturali | |
| Fattori ESG | Impatto ambientale | Modifica delle fasi a monte della filiera in paesi come Australia e Canada con norme ambientali più stringenti |
| | Lavoro minorile | <ul style="list-style-type: none"> • Penali da parte delle società clienti verso società fornitrici che non rispettano norme sociali • Modifica della localizzazione delle fasi della SC che si trovano in paesi che non tutelano i lavoratori |
| | Salari dei lavoratori | |
| | Condizioni di lavoro | |
| Politiche governative per la sostenibilità nella filiera del materiale | Trasferimento ad organismi di controllo esterni come l'ISO, che ha il compito di certificare che gli attori della filiera rispettino degli specifici standard sulla sostenibilità, come l'ISO 20400:2017, pena l'esclusione dalla stessa | |

Tabella 19: riepilogo delle misure di risposta al rischio adottate per il nichel

5.4.4 Riepilogo delle misure adottate per rispondere al rischio della grafite

| Categoria di rischio | Fonti di rischio | Risposta al rischio |
|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Disponibilità della materia prima | Estrazione mineraria annuale | Stipula delle società che lavorano la grafite di contratti di fornitura con le società minerarie inserendo comprendenti clausole che prevedono penali in caso di non soddisfacimento della domanda |
| | Riserve disponibili | Sottoscrivere contratti che prevedono investimenti comuni per finanziare nuove esplorazioni minerarie tra chi estrae la grafite e chi si rifornisce del minerale nelle fasi successive |
| | Tasso di riciclo del materiale | Le gigafactory devono cercare di implementare processi di riciclo nei loro stabilimenti |
| Struttura del mercato a monte della filiera (estrazione) | Concentrazione geografica dei fornitori della materia prima | Finanziamento da parte di attori che operano a valle, direttamente interessati, di progetti minerari in paesi diversi dalla Cina e che hanno riserve disponibili come Canada, Mozambico, Brasile o Ucraina |
| | Concentrazione nel mercato dei fornitori della materia prima | Ampliamento del mercato nei paesi sopra citati con l'entrata di nuove imprese |
| Struttura del mercato della produzione dei semilavorati | Concentrazione geografica nel mercato dei semilavorati | Riprendendo il discorso fatto al passaggio precedente, bisognerebbe favorire, anche per quanto riguarda la lavorazione dei semilavorati, la nascita di fabbriche per lavorare il carbone in quelle regioni sopra citate per contrastare la concentrazione in Cina |
| | Concentrazione nel mercato dei fornitori dei semilavorati | Ampliamento del mercato nei paesi sopra citati con l'entrata di nuove imprese |
| Struttura del mercato della produzione dei prodotti finiti | Concentrazione geografica nel mercato dei prodotti finiti | Lo stesso vale per il mercato dei prodotti finiti, cercando di individuare aree più vicine alle gigafactory europee, se ci mettiamo in un'ottica europea, con l'Ucraina o il Canada tra le possibili regioni candidate allo sviluppo della nuova filiera |
| | Concentrazione nel mercato dei fornitori dei prodotti finiti | |
| Volatilità del prezzo | Equilibrio tra domanda e offerta | <ul style="list-style-type: none"> • Adozione di software previsionali avanzati da parte degli attori della SC • Firmare contratti di fornitura a lungo termine tra fornitori e clienti dei vari anelli della SC per garantire stabilità nel mercato e ridurre la volatilità |
| | Leggi che influenzano l'impiego del materiale negli EV (dazi, incentivi...) | <ul style="list-style-type: none"> • Le società possono acquistare una polizza assicurativa contro il rischio politico ed economico • Cercare fornitori in paesi meno esposti a rischi legati a dazi, riducendo così l'impatto di tali politiche sui costi delle materie prime • Stabilire contratti di fornitura a lungo termine con i produttori di nichel per garantire la stabilità dei prezzi |

| | | |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Volatilità della domanda | Previsione della domanda | <ul style="list-style-type: none"> • Strumenti statistici di previsione basati su dati storici, soprattutto per gli attori a valle • Incentivare ordini anticipati da parte degli acquirenti di veicoli elettrici • Contratti flessibili con i fornitori per modificare gli ordini senza penali |
| | Leggi che influenzano l'impiego del materiale negli EV (dazi, incentivi...) | <ul style="list-style-type: none"> • Le aziende clienti possono acquistare una polizza assicurativa contro il rischio politico ed economico • Cercare fornitori in paesi meno esposti a rischi legati all'imposizione di dazi, riducendo così l'impatto di tali politiche sui costi delle materie prime • Stabilire contratti di fornitura a lungo termine con i produttori di nichel per garantire la stabilità dei prezzi |
| | Effetto frusta | <ul style="list-style-type: none"> • Utilizzare sistemi informatici come ERP o altri software gestionali per facilitare la condivisione delle informazioni tra i vari attori della filiera • Concentrare le fasi produttive in aree limitrofe per evitare accumuli eccessivi di scorte e ridurre l'impatto dell'effetto frusta • Adottare contratti di fornitura flessibili per evitare ordini anticipati eccessivi |
| Geopolitico | Politica interna | Rischi che possono colpire paesi che si occupano dell'estrazione mineraria come Madagascar, Brasile, Mozambico e dunque i produttori di semilavorati e prodotti finiti che si approvvigionano della grafite da questi paesi possono fare ricorso all'assicurazione sul rischio politico |
| | Disordini civili | |
| | Squilibri economici | |
| | Rapporti commerciali tra stati facenti parte della SC | Attuare il friendshoring puntando sull'impegno degli stati e delle gigafactory europee (se ci mettiamo in un'ottica europea) favorendo l'approvvigionamento da paesi non al centro di tensioni geopolitiche, come ad esempio il Canada |
| Fattori ESG | Impatto ambientale | Introduzione di penali nei contratti di fornitura verso i fornitori a diversi livelli della catena produttiva che dimostrano scarso interesse per questo tema |
| | Lavoro minorile | Stipulare contratti con le società minerarie che includano KPI di sostenibilità, imponendo il rispetto di standard etici, con sanzioni o blocco delle forniture in caso di violazione |
| | Salari dei lavoratori | |
| | Condizioni di lavoro | |
| | Politiche governative per la sostenibilità nella filiera del materiale | Trasferimento ad organismi di controllo esterni come l'ISO, che ha il compito di certificare che gli attori della filiera rispettino degli specifici standard sulla sostenibilità, come l'ISO 20400:2017, pena l'esclusione dalla stessa |
| Tasso di riciclo del materiale | Le gigafactory devono cercare di implementare processi di riciclo nei loro stabilimenti | |

Tabella 20: riepilogo delle misure di risposta al rischio adottate per la grafite

5.4.5 Valutazioni di fattibilità delle misure di riduzione previste per il nichel

➤ Struttura del mercato a monte della filiera (estrazione)

La modifica della localizzazione delle fasi di estrazione dall'Indonesia, attuale maggiore estrattore mondiale di nichel, in altre zone più sicure e che possano garantire la nascita di nuovi mercati è possibile ma difficile da attuare. Infatti, alcuni paesi candidati sarebbero la Russia, Nuova Caledonia e Filippine, ma perdono subito interesse in quanto sono comunque caratterizzati da problemi geopolitici. Per questo motivo l'attenzione si è rivolta all'Australia e al Canada, paesi sui quali produttori di semilavorati, prodotti finiti o anche le stesse gigafactory possono pensare di fare investimenti, spinte soprattutto dagli aiuti statali finalizzati all'avvicinamento della SC dei materiali utili alla costruzione delle batterie per EV al fine di ritagliarsi uno spazio nel mercato. È chiaro che comunque questa strategia non è di immediata attuazione in quanto ci vogliono comunque dei tempi di sviluppo lunghi a seguito di permessi per l'estrazione ma anche investimenti economici consistenti, però il fatto che ci siano operazioni minerarie già attive nei territori citati può velocizzare le tempistiche.

➤ Struttura del mercato della produzione dei semilavorati

Anche cercare di integrare le fasi di raffinazione e produzione dei prodotti finiti con quelle dell'estrazione, con lo spostamento dalla Cina all'Australia e nel Canada è tecnicamente fattibile ma complicato. Il problema principale è soprattutto il vantaggio competitivo acquisito dalla Cina, che si basa su economie di scala e costi energetici e di lavorazione minori rispetto a quelli che si avrebbero nelle due regioni; dunque è difficile effettivamente portare avanti questa mossa, però sempre grazie al supporto governativo e alla volontà delle industrie del posto di emergere nel mercato del nichel si potrebbe pensare ad un processo graduale per sviluppare questo piano, ribadendo il concetto che ci vorrebbero svariati anni e investimenti ingenti in questi due paesi per attuarlo.

➤ Volatilità del prezzo

Per limitare squilibri tra domanda ed offerta sicuramente chi opera a valle principalmente potrebbe adottare strumenti di previsione statistici che si basano su dati storici che adottano nuove tecnologie emergenti come l'IA. L'altra opzione che consiste nel praticare metodi di gestione più efficaci, se si pensasse alla creazione di una filiera integrata che si sviluppi in aree come Australia e Canada, sicuramente escluderebbe il JIT perché è comunque troppo azzardoso dato che le distanze potrebbero essere notevoli tra i vari anelli e soprattutto con i mercati finali quali quelle con l'Europa ad esempio. Per

questo motivo si potrebbe pensare comunque all'applicazione del JIC o una combinazione con il JIT e JIC in base alla distanza dal fornitore.

Per evitare la volatilità del prezzo legata a incentivi o dazi da parte degli organi governativi si possono benissimo attuare contratti di fornitura a lungo termine tra gli attori dei vari anelli della filiera. L'altra opzione è quella di rifornirsi da paesi meno esposti a questi eventi, soprattutto all'imposizione di dazi, ma questo vorrebbe dire limitare l'approvvigionamento dalla Cina, che risulta molto difficoltoso, a seguito della centralità attuale che il paese occupa nelle fasi centrali della SC. Alcune regioni valide per ridurre il rischio geopolitico potrebbero essere il Brasile e il Canada per quanto riguarda l'estrazione, ma anche la Finlandia e la Norvegia.

➤ Volatilità della domanda

La previsione della domanda è un rischio che può essere sicuramente mitigato tramite l'adozione da parte degli attori della filiera di strumenti previsionali all'avanguardia; nello stesso tempo potrebbero decidere di adottare metodi di gestione delle scorte con stock elevati ma ciò non è molto attuabile a seguito dell'effetto frusta che è un altro rischio da tenere in considerazione per evitare la volatilità della domanda. Tuttavia, l'effetto bullwip può certamente essere limitato tramite l'adozione di sistemi che facilitino la condivisione delle informazioni lungo la SC, mentre la seconda opzione che riguarda l'avvicinamento dei vari anelli della filiera in zone geografiche adiacenti, per i motivi espressi nei paragrafi iniziali di questa sezione, risulta abbastanza complesso.

➤ Geopolitico

La riduzione del rischio geopolitico che caratterizza la SC del nichel legata all'instabilità politica e ai disordini civili prevederebbe il trasferimento delle fasi di estrazione della SC attualmente sviluppate in Indonesia sempre verso l'Australia e Canada, che sono paesi altamente stabili ma non è, come detto, di facile attuazione, almeno nel breve periodo. Gli attori della filiera che si riforniscono dai paesi soggetti a questo rischio possono adottare delle assicurazioni sul rischio politico per attenuare i possibili danni. Anche lo spostamento delle fasi di lavorazione del nichel al di fuori della Cina, a seguito della guerra commerciale con Europa e USA, potrebbe avere luogo in paesi geopoliticamente meno esposti come i due precedentemente citati ma risulta difficile.

Il rischio legato agli squilibri economici si può invece trasferire dal cliente al fornitore che si trova al livello superiore della catena, tramite clausole contrattuali di rinegoziazione.

➤ Trasporto

Per ridurre il rischio di costi di trasporto elevati, è effettivamente adottabile una logistica combinata, attraverso l'uso di navi con camion o treni, come già avviene tra Indonesia e Cina, e successivamente verso i produttori di componenti per batterie e le gigafactory; il fatto di abbassare la rischiosità ulteriormente attuando il nearshoring, che se ci mettiamo in un'ottica Europea vedrebbe il Canada come candidato data la vicinanza rispetto agli altri paesi che possiedono miniere, sarebbe un'alternativa valida in quanto ovviamente l'attuale lunghezza della filiera si ridurrebbe notevolmente ma che richiede tempo e costi ingenti per essere applicata.

I rischi invece legati ad eventuali problemi o scioperi che possono portare al blocco della SC si possono effettivamente trasferire tramite contratti CIF o CIP. L'adozione di assicurazioni, da parte delle società che lavorano il nichel, che copre problemi che nascerebbero dalla pericolosità del nichel durante il trasporto in seguito a danneggiamenti, oppure a calamità naturali che interromperebbero il trasporto, è un'opzione attuabile.

➤ Fattori ESG

Cercare l'approvvigionamento da paesi che hanno delle norme ferree sul rispetto dell'ambiente come Australia e Canada è sì possibile ma, comunque sono ancora paesi in cui l'estrazione annuale non è ai livelli dell'Indonesia e dunque non potrebbero soddisfare grandi volumi di domanda proveniente da valle.

Per quanto riguarda la sostenibilità sociale è vero che potrebbero essere messe delle penali sul non rispetto delle norme sul lavoro nei contratti con i fornitori, ma è anche vero che molte aziende non sono trasparenti e ci potrebbe essere il rischio di ritorsioni con blocchi ed aumento del prezzo della materia prima. Mentre, per rispondere al rischio che le politiche governative siano inadeguate, gli attori della filiera possono fare riferimento a organi di controllo come l'ISO per far attuare standard e garantire così una filiera sostenibile.

5.4.6 valutazioni di fattibilità delle misure di riduzione previste per la grafite

➤ Disponibilità della materia prima

Per rispondere al rischio che sul mercato ci sia una quantità di grafite insufficiente a soddisfare la domanda si può effettivamente trasferire il rischio attraverso penali ai produttori del minerale che ne sono responsabili, anche se si potrebbero inserire ulteriori clausole come quelle di forza maggiore che esentino il fornitore dal pagamento di penali in particolari casi che non dipendono dalla sua volontà.

Per il rischio che le riserve presenti attualmente non riescano a soddisfare la futura domanda si possono finanziare nuovi progetti esplorativi praticando accordi tra le società a valle che hanno interesse a ricevere il materiale e le società di estrazione.

Per quanto concerne il tasso di riciclo, le gigafactory grazie all'aumento della produzione delle batterie possono sfruttare le economie di scala per farsi carico anche dello smaltimento delle stesse, sfruttando anche gli incentivi statali, in modo tale da riutilizzare le materie prime per la costruzione di nuove LIB. Esempi attuali sono quelli di Tesla, Northvolt e BMW che stanno già portando avanti progetti di questo genere.

➤ Struttura del mercato a monte della filiera (estrazione)

Il rischio connesso alla struttura del mercato a monte che riguarda la concentrazione, come visto, dipende dalla Cina che controlla l'80% dell'estrazione della grafite. Quindi il fatto che chi opera a valle per garantirsi maggiore possibilità di diversificare l'approvvigionamento possa cercare di finanziare nuovi progetti minerari in paesi che hanno riserve come Canada, Madagascar e Mozambico, Brasile o Ucraina è sicuramente interessante, ma richiede come discusso per il nichel, sia ingenti investimenti che tempi lunghi per ottenere nuove concessioni, per questo motivo la probabilità che si possa attuare, specialmente nel breve termine risulta complicata. Inoltre, se ci mettessimo in un'ottica europea l'Ucraina potrebbe essere maggiormente interessata da questi investimenti da parte di attori della SC europei, ma a causa dell'attuale guerra con la Russia questa possibilità risulta vana. Comunque ci si sta muovendo già verso una diversificazione con nuove miniere che stanno nascendo in Alaska e Alabama e lo sviluppo degli già esistenti siti minerari Finlandia e Repubblica Ceca.

➤ Struttura del mercato della produzione dei semilavorati

La produzione dei semilavorati in grafite vede sempre il controllo da parte della Cina. Anche qua creare una catena integrata che vada oltre la presenza della Cina risulta difficile. Però a favore di questo progetto stanno nascendo industrie ad esempio in Europa, in particolar modo in Germania, con lo sviluppo di un impianto con la capacità di raffinare 10 tonnellate di grafite.

➤ Struttura del mercato della produzione dei prodotti finiti

Anche la produzione dei prodotti finiti risente degli stessi identici problemi di attuazione precedentemente enunciati per i segmenti a monte.

➤ Volatilità del prezzo

Per evitare il rischio della volatilità del prezzo, gli attori della catena di fornitura delle batterie specialmente quelli a valle che hanno più prontezza degli andamenti del mercato e che influenzano la produzione dei segmenti superiori, possono adottare strumenti di previsione statistici, ma potrebbero anche implementare metodi di gestione come safety stock, oppure è fattibile che gli attori ai vari livelli della SC possono prediligere contratti di fornitura a lungo termine per garantire la stabilità del mercato, dunque tutte alternative valide.

Mentre per rispondere al rischio di incentivi o dazi che altererebbero il prezzo delle materie prime, le società clienti possono usufruire di assicurazioni contro i rischi economici e politici.

➤ Volatilità della domanda

Per l'effetto frusta, come visto per il caso del nichel, si può benissimo ridurre il rischio incentivando l'implementazione tra i vari anelli della SC di sistemi per migliorare il flusso delle informazioni come gli ERP. Per quanto riguarda la gestione degli stock, per evitare che siano troppo elevati, è realizzabile la stipula di contratti di fornitura flessibili così da evitare stock elevati.

Il rischio di incorrere in previsioni della domanda errati si può attenuare con l'adozione di strumenti statistici che si basano su dati storici; inoltre, le gigafactory che hanno più visibilità degli andamenti di mercato, potrebbero essere invogliati da chi sta a monte della SC a fare degli ordini anticipati tramite incentivi contrattuali, anche se l'incertezza che popola nel mercato degli EV potrebbe non rendere ciò facile.

➤ Geopolitico

Per il rischio geopolitico, le società clienti nei vari punti della filiera possono fare ricorso ad assicurazioni per trasferire il rischio derivante da disordini civili, dall'instabilità politica e da squilibri economici che potrebbero colpire i fornitori localizzati in particolari paesi soggetti a questi ultimi.

Il friendshoring invece risulta difficile da applicare per contrastare le tensioni commerciali tra stati, proprio perché significherebbe trovare una supply chain che segue un flusso alternativo che non vede la Cina tra gli attori, e risulterebbe difficile, come detto nei paragrafi iniziali di questo capitolo, sostituirla del tutto nel breve periodo.

➤ Fattori ESG

È fattibile applicare delle penali ai fornitori che non rispettano le norme in materia di sostenibilità ambientale, ma nel concreto risulta complicato andare a verificare se ad esempio le società minerarie rispettino determinati limiti di CO2 nei loro processi; il tutto dovrebbe vedere per essere applicabile nel concreto l'azione di organi esterni come l'ISO.

Infatti, si può trasferire il rischio a enti di certificazione terzi che si occupano di applicare standard lungo la catena, come quello precedentemente citato, per rispondere al rischio che i governi non si interessino di fare applicare norme sulla sostenibilità, specialmente ciò è indirizzato ad alcuni paesi che si occupano delle fasi di estrazione della grafite.

Inoltre, l'applicazione di penali alle aziende che non rispettano le norme sulla tutela dei lavoratori da parte delle società che acquistano i loro prodotti, come nel caso di chi lavora il carbone per produrre grafite, è certamente una soluzione fattibile tramite l'implementazione di KPI di sostenibilità nei contratti. Tuttavia, la trasparenza delle aziende responsabili di questi abusi è molto scarsa, soprattutto in paesi come Brasile, Mozambico e Madagascar, che attualmente detengono una quota limitata nell'estrazione, però se si pensasse all'avvio di nuovi progetti minerari in queste aree, ciò attirerebbe sicuramente maggiore attenzione.

5.4.7 Considerazioni

Dopo aver analizzato le fonti di rischio associate al nichel e alla grafite, identificato azioni di mitigazione e valutato la loro fattibilità, si è osservata una riduzione del risk exposure per ciascuna categoria. Di conseguenza, anche il SCR relativo a queste due materie prime è diminuito. Questo ha permesso di procedere con il calcolo del nuovo livello di rischio complessivo della supply chain della batteria NMC 811.

Dopo la valutazione di fattibilità dei rischi, è emerso che alcune strategie di risposta, come la rilocalizzazione di fasi della supply chain in nuovi paesi più stabili, per garantire anche una maggiore competitività sui mercati, difficilmente vedranno un'attuazione concreta nel breve periodo.

Per questo motivo si può fare la seguente considerazione: dato che la mitigazione dei rischi ha come fine quello di rendere questi ultimi accettabili (valori di impatto e probabilità ≤ 3), e comunque ci sono dei rischi che, come quello citato prima non saranno mitigati, visto che la maggior parte delle misure può essere attuata si è pensato di considerare accettabili tutti i rischi con la conseguente riduzione dei valori di I e P pari a 3. Si tratta ovviamente di una semplificazione, poiché non è possibile determinare con precisione i valori di accettazione finali dopo la risposta ai rischi; tuttavia, ci potrebbero essere anche rischi che assumeranno, dopo le azioni di mitigazioni, valori di probabilità e impatto pari a 1, che andranno a compensare quelli che non è stato possibile ridurre e che comunque in termini numerici sono stati considerati ammissibili.

Dunque, nel file Excel "SCR materie prime" sono stati aggiornati i valori di impatto e probabilità delle fonti di rischio analizzate nei capitoli 5.4.1 e 5.4.2, sostituendo quelli precedentemente pari a 4 o 5 con un valore di 3.

ES. Per il nichel la fonte di rischio relativa a "Leggi che influenzano l'impiego del materiale negli EV (dazi, incentivi...)" che influenza la volatilità del prezzo aveva una probabilità di 4 e un impatto di 3. Per mitigare questo rischio si è pensato che le società che si rifornivano di nichel in un determinato anello della supply chain potessero siglare contratti di fornitura a lungo termine con i produttori del minerale in modo tale da garantire la stabilità dei prezzi. In questo modo, per il ragionamento fatto pocanzi, la nuova probabilità di accadimento ha raggiunto il valore pari almeno a 3, mentre l'impatto è rimasto 3, così il rischio è stato accettato.

Alla luce di quanto detto sono stati ricalcolati attraverso le formule (1) e (2) enunciate nel paragrafo 5.2 i nuovi RE e SCR per i due materiali. In questo modo per il nichel il valore del SCR è passato da 0,60 a 0,34, mentre per la grafite da 0,59 a 0,36.

Inoltre, sostituendo i nuovi risultati ottenuti nelle formule (4) e (5) trattate nel paragrafo 5.3, il rischio della supply chain associato alla batteria è diminuito dallo 0,42 precedente allo 0,31 attuale, come è facilmente visionabile nella tabella 19, passando da un valore di rischio intermedio ad uno basso.

| Materie prime | Nichel | Manganese | Cobalto | Litio | Rame | Alluminio | Grafite |
|-------------------------------------------------|--------|-----------|---------|-------|------|-----------|---------|
| Peso in Kg nel pacco | 5,63 | 0,71 | 0,66 | 0,83 | 3,88 | 2,40 | 8,64 |
| % in peso nel pacco | 18% | 2% | 2% | 3% | 13% | 8% | 28% |
| SCR materie prime | 0,34 | 0,58 | 0,69 | 0,66 | 0,50 | 0,54 | 0,36 |
| Quota di impatto sul SCR della batteria NMC 811 | 0,06 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,06 | 0,04 | 0,10 |
| SCR NMC 811 | 0,31 | | | | | | |

Tabella 21 : valore del SCR della batteria NMC 811 dopo la mitigazione dei rischi.

La tabella 21 mostra anche come a seguito della mitigazione dei rischi il nichel e la grafite impattino sul nuovo SCR della batteria con una quota inferiore rispetto a quanto avveniva prima; ciò può essere appurato confrontando la tab. soprastante con la tabella 2.



Figura 40: confronto tra la percentuale di impatto sul rischio della batteria delle materie prime prima e dopo la mitigazione dei rischi.

Applicando la formula (6) già incontrata nel capitolo 5.3, in termini percentuali la quota di impatto sul nuovo SCR di 0,31 si è ridotta per il nichel dal 26% al 20%, e per la grafite dal 39% al 32%, come rappresentato in figura 40.

Inoltre, se si volesse ridurre ulteriormente il supply chain risk della batteria, visti i nuovi valori con cui partecipano le materie prime al rischio, si dovrebbe agire sulla mitigazione dei rischi del rame e dell'alluminio.

Conclusioni

Il presente lavoro ha visto lo studio della supply chain delle batterie per auto elettriche, tema di forte interesse in quanto connesso alla transizione green che sta abbracciando l'intero globo che vede l'adozione dei veicoli elettrici, i quali montano per l'appunto le LIB. Inoltre, a causa dei numerosi fenomeni che caratterizzano la filiera e ne mettono a dura prova la stabilità, lo studio si è concentrato sull'analisi dei rischi che la potrebbero impattare, così da prevedere delle possibili strategie volte alla loro riduzione, in modo tale da creare un flusso dei materiali lungo la SC che possa procedere senza interruzioni e soddisfare la domanda delle gigafactory guidata da quella degli acquirenti finali di EV.

L'elaborato ha trattato inizialmente lo studio della filiera delle 7 principali materie prime per auto elettriche (rame, alluminio, cobalto, manganese, nichel, grafite e litio), individuandone i fattori che ne caratterizzano principalmente il mercato e la supply chain. È emerso dall'analisi un grave problema, ovvero il controllo delle fasi più importanti da parte di una potenza mondiale che è in continua crescita, cioè la Cina; ciò grazie al vantaggio competitivo assunto, in termini di costo di lavorazione e produzione dei principali componenti per le batterie, sfruttando know-how ed economie di scala, creando delle alte barriere all'entrata per le società operanti negli altri paesi. Per questo motivo le principali potenze, quali l'Europa e gli USA, hanno pensato di adottare normative come l'*Inflation Reduction Act (IRA)* negli Stati Uniti nel 2022 e il *Green New Deal (GND)* dell'Unione Europea, presentato nel 2019, che trattano gli obiettivi per la riduzione delle emissioni di CO₂, trainati dall'adozione dei veicoli green, con un'attenzione particolare al contrasto della crescita cinese nel mercato.

Attraverso l'analisi dei rischi della supply chain delle materie prime sono state individuate nove categorie di rischio, ognuna caratterizzata da delle fonti che hanno permesso di calcolarne il risk exposure con cui partecipano al supply chain risk relativo ad ogni materia prima.

Dallo studio è emerso che le fasi di estrazione presentano rischi relativi alla concentrazione del mercato in pochi paesi, i quali hanno accesso alle risorse minerarie, spesso caratterizzati da gravi problemi che fanno presagire possibili blocchi a monte della supply chain. Tuttavia, altri rischi derivano, come anticipato, dal predominio della Cina nella lavorazione delle materie prime e nella produzione dei prodotti finiti utilizzati per fabbricare i principali componenti per le batterie, come anodi, catodi, elettroliti e separatori. Inoltre, la posizione del paese, a seguito dei problemi geopolitici, con i dazi imposti da USA ed UE sull'importazione dei veicoli elettrici, fa aggravare la criticità della SC delle batterie. Ulteriori sfide che emergono sono quelle ambientali e sociali che riguardano l'impatto delle fasi di lavorazione ma anche la scarsa tutela dei lavoratori, oltre a quelli legati alla volatilità del prezzo e della domanda delle MP, e ai rischi connessi al trasporto delle stesse.

È emerso, dopo la valutazione del supply chain risk per ogni materia prima, e del successivo calcolo dei pesi dei materiali all'interno del pacco batteria della batteria NMC 811, che il nichel e la grafite sono quelle che influiscono maggiormente sulla rischiosità della SC della stessa. Per questo motivo la trattazione si è concentrata sulla mitigazione dei rischi che interessano i due minerali.

La strategia adottata mira a sviluppare una filiera integrata, spostando le fasi della supply chain, dall'estrazione delle MP fino alla produzione dei prodotti finiti, verso paesi ricchi di risorse minerarie e che attualmente hanno una bassa quota nella produzione globale, con limitati rischi geopolitici, lontani dalla Cina e più vicini ai paesi occidentali, in maniera tale da facilitare agli stessi l'ingresso nel mercato dei veicoli elettrici. L'obiettivo che ci si propone di raggiungere localizzando le fasi a valle vicino a quelle a monte, è quello di diversificare il mercato su più aree geografiche e favorire la nascita di nuove imprese. Creare una filiera maggiormente integrata favorirebbe anche un migliore flusso delle informazioni con miglioramenti previsionali della domanda ed anche minore volatilità del prezzo, creando un mercato stabile. Peraltro, anche i rischi del trasporto verrebbero ridotti data la vicinanza degli attori della supply chain. Si prevede anche l'adozione di standard per limitare le criticità legate alla sostenibilità ambientale e sociale lungo la filiera.

Dopo aver preso in considerazione questi possibili accorgimenti, grazie ai nuovi valori di impatto e probabilità assunti dalle fonti di rischio, i SCR per il nichel e la grafite hanno visto una notevole riduzione, con il conseguente calo del rischio della SC associato alla batteria NMC 811.

Alla luce di queste considerazioni, è chiaro che le modifiche suggerite implicano delle difficoltà attuative, soprattutto connesse al forte controllo della filiera da parte della Cina. È evidente però che bisogna porsi degli obiettivi, anche gradualmente, che nel tempo possano favorirle per ridurre al minimo il rischio che caratterizza una supply chain di così vitale importanza per il futuro delle principali economie mondiali. Il ruolo chiave sarà principalmente nelle mani dei governi occidentali, chiamati ad operare in un contesto geopolitico che si sta delineando come particolarmente complesso; tuttavia, l'adozione di leggi, come quelle dell'IRA e del GND enunciate in precedenza in favore della sostenibilità ambientale, lascia spazio a un cauto ottimismo.

Indice delle figure

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Andamento delle vendite delle auto elettriche dal 2014 al 2023..... | 1 |
| Figura 2: Composizione del pacco batteria. (Mellert, 2018) | 10 |
| Figura 3: Meccanismo di funzionamento della batteria agli ioni di litio. (Koech, 2024)..... | 10 |
| Figura 4: A) cella cilindrica, B) cella a pouch, C) cella prismatica. (TRUMPF, s.d.)..... | 11 |
| Figure 5: Previsione della domanda delle materie prime per le batterie agli ioni di litio..... | 13 |
| Figura 6: Processo di produzione dei fogli di rame. | 14 |
| Figura 7: Produzione mineraria di rame nel 2023. Fonte dati: (USGS, 2024)..... | 16 |
| Figura 8: Raffinazione del rame nel 2023. Fonte dati: (USGS, 2024)..... | 16 |
| Figura 9: Andamento del prezzo del rame.Fonte dati: (Il Sole 24 Ore, 2024)..... | 18 |
| Figura 10: Processo di produzione dei fogli di alluminio. | 23 |
| Figura 11: Estrazione mineraria di bauxite nel 2023. Fonte dati: (USGS, 2024) | 25 |
| Figura 12: Raffinazione di bauxite. Fonte dati: (USGS, 2024)..... | 25 |
| Figura 13: Produzione di alluminio nel 2023.Fonte dati (USGS, 2024)..... | 26 |
| Figura 14: Andamento del prezzo dell'alluminio. Fonte dati: (TRADING ECONOMICS, 2024)..... | 27 |
| Figura 15: Processo di produzione della grafite. | 33 |
| Figura 16: Distribuzione della produzione mineraria di grafite naturale nel 2023. Fonte dati: (USGS, 2024)..... | 35 |
| Figura 17: Andamento del prezzo della grafite naturale. Fonte dati: (SFA, 2024)..... | 36 |
| Figura 18: Processo di produzione del nichel..... | 42 |
| Figura 19: Estrazione mineraria del nichel nel 2023. Fonte dati: (USGS, 2024) | 44 |
| Figura 20: Andamento del prezzo del nichel. | 46 |
| Figura 21: Processo di produzione del cobalto..... | 50 |
| Figura 22: Estrazione mineraria del cobalto nel 2023.Fonte dati: (USGS, 2024) | 52 |
| Figura 23: Andamento del prezzo del cobalto. Fonte dati: (Trading Economics, n.d.)..... | 54 |
| Figura 24: Processo di produzione del manganese..... | 58 |
| Figura 25: Estrazione mineraria di manganese nel 2023. Fonte dati: (USGS, 2024)..... | 59 |
| Figura 26: Andamento prezzo del manganese. Fonte dati: (Business Analytiq, s.d.) | 61 |
| Figura 27: Processo di produzione del litio. | 64 |
| Figura 28: Estrazione mineraria del litio nel 2023. Fonte dati: (USGS, 2024) | 66 |
| Figura 29: Andamento del prezzo del litio. Fonte dati: (TRADING ECONOMICS, 2024) | 68 |
| Figura 30: Componenti della cella. (KVI battery, s.d.) | 72 |
| Figura 31: Tipologie di catodi. (uwa, n.d.)..... | 73 |
| Figura 32: Modulo batterie prismatiche. (LYTH, 2021)..... | 80 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 33: Andamento del prezzo delle batterie agli ioni di litio dal 2013 al 2024. Fonte: (BloombergNEF, 2024)..... | 81 |
| Figura 34: Market share produttori batterie agli ioni di litio. | 83 |
| Figure 35: Ciclo di vita delle batterie per auto elettriche. (Zanoletti, 2024)..... | 86 |
| Figura 36: A) Domanda annuale di batterie agli ioni di litio (LIB) in vari settori e (B) domanda di metallo per batterie al litio per i prossimi 6 anni. (C) LIB disponibili per il riciclaggio da varie fonti. (Roy, 2024) | 87 |
| Figura 37: Risk breakdown structure..... | 94 |
| Figura 38: Percentuale di impatto di ogni materia prima sul rischio della supply chain della batteria NMC 811..... | 109 |
| Figura 39: Matrice probabilità-impatto..... | 110 |
| Figura 40: Confronto tra la percentuale di impatto sul rischio della batteria delle materie prime prima e dopo la mitigazione dei rischi. | 135 |

Indice delle tabelle

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabella 1: Peso percentuale delle materie prime nel pacco batteria. | 107 |
| Tabella 2: Calcolo SCR della batteria NMC 811. | 108 |
| Tabella 3: Categoria di rischio "Struttura del mercato a monte della filiera (estrazione)" del nichel. | 111 |
| Tabella 4: Categoria di rischio "Struttura del mercato della produzione dei semilavorati" del nichel. | 112 |
| Tabella 5: Categoria di rischio "Struttura del mercato della produzione dei prodotti finiti" del nichel. | 112 |
| Tabella 6: Categoria di rischio "Volatilità del prezzo" del nichel. | 113 |
| Tabella 7: Categoria di rischio "Volatilità della domanda" del nichel. | 114 |
| Tabella 8: Categoria di rischio "Geopolitico" del nichel. | 115 |
| Tabella 9: Categoria di rischio del "Trasporto" del nichel. | 116 |
| Tabella 10: Categoria di rischio "Fattori ESG" del nichel. | 117 |
| Tabella 11: Categoria di rischio "Disponibilità della materia prima" della grafite. | 118 |
| Tabella 12: Categoria di rischio "Struttura del mercato a monte della filiera (estrazione)" della grafite. | 119 |
| Tabella 13: Categoria di rischio "Struttura del mercato della produzione dei semilavorati" della grafite. | 119 |
| Tabella 14: Categoria di rischio "Struttura del mercato della produzione dei prodotti finiti" della grafite. | 120 |
| Tabella 15: Categoria di rischio "Volatilità del prezzo" della grafite. | 120 |
| Tabella 16: Categoria di rischio "Volatilità della domanda" della grafite. | 121 |
| Tabella 17: Categoria di rischio "Geopolitico" della grafite. | 122 |
| Tabella 18: Categoria di rischio "Fattori ESG" della grafite. | 123 |
| Tabella 19: Riepilogo delle misure di risposta al rischio adottate per il nichel. | 125 |
| Tabella 20: Riepilogo delle misure di risposta al rischio adottate per la grafite. | 127 |
| Tabella 21: Valore del SCR della batteria NMC 811 dopo la mitigazione dei rischi. | 135 |

Bibliografia

- Wood Mackenzie. (2020, July 30). *Can LFP technology retain its battery market share?* Tratto da Wood Mackenzie: <https://www.woodmac.com/reports/power-markets-can-lfp-technology-retain-its-battery-market-share-428028/>
- Amrish Ritoe, I. P. (2022). *Graphite Supply chain challenges & recommendations for a critical mineral*.
- Ansa. (2023, settembre 15). *L'Italia primo produttore europeo di alluminio riciclato - Finanza & Impresa*. Tratto da Agenzia ANSA: https://www.ansa.it/ansa2030/notizie/finanza_impresa/2023/09/15/litalia-primo-produttore-europeo-di-alluminio-riciclato_9ccbc4a-84c1-43da-b26f-7e063dc2da8f.html
- ANSA. (2024, Aprile 23). *Aumentano le auto elettriche nel mondo, 17 milioni nel 2024 - Industria e Analisi*. Tratto da Agenzia ANSA: https://www.ansa.it/canale_motori/notizie/industria_analisi/2024/04/23/aumentano-le-auto-elettriche-nel-mondo-17-milioni-nel-2024_5c3da49e-8283-439b-ae55-1862119c374b.html
- Argonne. (2022). *Modeling the Performance and Cost of Lithium-Ion Batteries for Electric-Drive Vehicles*.
- Babu, H. (2023). *A supply chain risk assessment index for small and medium enterprises in post COVID-19 era*. Elsevier.
- Battery, F. (s.d.). *Come è prodotta una cella al litio? Tutto su miscelazione, assemblaggio e riempimento*. Tratto da Flash Battery: <https://www.flashbattery.tech/processo-produzione-cella-ioni-litio/>
- Bertelè, U. (2024, Dicembre 27). *Auto elettriche, effetto Cina: innoviamo o sarà la fine*. Tratto da Agenda Digitale: <https://www.agendadigitale.eu/mercati-digitali/auto-elettriche-la-cina-e-il-nuovo-ordine-mondiale-la-lezione-da-imparare/>
- BloombergNEF. (2024, Dicembre 10). *Lithium-ion battery pack prices see largest drop since 2017, falling to \$115 per Kilowatt-Hour*. Tratto da BloombergNEF: <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-see-largest-drop-since-2017-falling-to-115-per-kilowatt-hour-bloombergnef/>
- Born, K. (2024). *The limitations of end-of-life copper recycling and its implications for the circular economy of metals*. Elsevier.
- Borthomieu, Y. (2009). *Nickel Hydrogen Battery*. Elsevier.
- Business Analytiq. (s.d.). *Manganese ore price index*. Tratto da Business Analytiq: <https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/manganese-ore-price-index/>
- Cardone, P. (2023, December 13). *Come sono fatte le celle cilindriche delle batterie agli ioni di litio*. Tratto da InsideEVs Italia: <https://insideevs.it/news/700396/celle-cilindriche-batterie-ioni-di-litio/>
- Chandler, D. L. (2024, Novembre 1). *3 Questions: Can we secure a sustainable supply of nickel?* Tratto da Massachusetts Institute of Technology: <https://news.mit.edu/2024/3-questions-can-we-secure-sustainable-supply-nickel-1101>

- Chapman, T. (2024, August 30). *The Cost of Bypassing China in Copper Supply Chain*. Tratto da SupplyChainDigital: <https://supplychaindigital.com/supply-chain-risk-management/cost-of-bypassing-china-in-copper-supply-chain>
- Cochrane, L. (2024). *Strategic analysis of metal dependency in the transition to low-carbon energy: A critical examination of nickel, cobalt, lithium, graphite, and copper scarcity using IEA future scenarios*. Elsevier.
- Colletta, S. (2024, Luglio 24). *Alluminio: tutto ciò che si deve sapere*. Tratto da Meccanica News : <https://www.meccanicanews.com/2019/08/29/alluminio-tutto-cio-che-si-deve-sapere/>
- Corlin, P. (2024, ottobre 9). *Ue, continua il dibattito sulle auto elettriche*. Tratto da Euronews: <https://it.euronews.com/green/2024/10/09/ue-continua-il-dibattito-sulle-auto-elettriche-mentre-industria-e-in-crisi>
- CT. (2024, March 24). *Electrifying Insights: Navigating the Complex World of Lithium Battery*. Tratto da lithiumbatterytech: <https://www.lithiumbatterytech.com/electrifying-insights-navigating-the-complex-world-of-lithium-battery-electrolytes/>
- Daphal, P. (2024, Ottobre 7). *Commentary: Navigating the cobalt supply chain*. Tratto da Recycling today: <https://www.recyclingtoday.com/news/navigating-the-cobalt-supply-chain/>
- De Martini, A. (2023, Dicembre 7). *La grafite - le nuove vie dei materiali strategici*. Tratto da Aspenia Online: <https://aspeniaonline.it/la-grafite-le-nuove-vie-dei-materiali-strategici/>
- De Pieri, M. (2024). *Commodity della settimana: alluminio, il fattore Trump come driver di prezzo per il prossimo futuro*. Tratto da FinanzaOnline: <https://www.finanzaonline.com/notizie/commodity-della-settimana-alluminio-il-fattore-trump-come-driver-di-prezzo-per-il-prossimo-futuro>
- De Pieri, M. (2024). *Commodity della settimana: alluminio, sprint su scenario macro favorevole ma occhio alla volatilità*. Tratto da FinanzaOnline: <https://www.finanzaonline.com/notizie/commodity-della-settimana-alluminio-sprint-su-scenario-macro-favorevole-ma-occhio-alla-volatilita>
- Dempsey, H. (2024, Marzo 1). *Cobalt market stung by record oversupply*. Tratto da Financial Time: <https://www.ft.com/content/e6f131c8-4945-45f9-84ad-18eec58df0d9>
- Dolotko, O. G. (2023, March 28). *Universal and efficient extraction of lithium*. Tratto da Nature: <https://www.nature.com/articles/s42004-023-00844-2>
- ECGA. (2024, settembre 15). *Strategic & Critical*. Tratto da ECGA: <https://ecga.net/strategic-critical/#:~:text=Critical%20Raw%20Material&text=Moreover%2C%20battery-grade%20graphite%20has,access%20to%20these%20vital%20resources>
- Electricity Magnetism. (s.d.). *Batteria al piombo | Descrizione e applicazioni*. Tratto da Electricity Magnetism: <https://www.electricity-magnetism.org/it/batteria-al-piombo-descrizione-e-applicazioni/>
- Electrosuisse. (2024, June 6). *Confermata la qualità della grafite purificata da vecchie batterie agli ioni di litio*. Tratto da <https://www.electrosuisse.ch/it/la-grafite-purificata-da-vecchie-batterie-agli-ioni-di-litio> da Electrosuisse:

<https://www.electrosuisse.ch/it/grafite/#:~:text=Ogni%20anno%2C%20in%20Europa%20vengono,p er%20separarla%20da%20altri%20materiali>

Ella Nilsen. (2025, Gennaio 23). *China made a bet decades ago because it couldn't compete with the US on cars. That bet is paying off big.* Tratto da CNN: <https://edition.cnn.com/2025/01/23/climate/china-evs-growth-oil-market/index.html>

Eppers, O. (2023). *Why Graphite is a critical Battery Raw Material similar to Lithium.*

ESG. (2023, Giugno 26). *GM ed Element 25 espanderanno la catena di fornitura di veicoli elettrici negli Stati Uniti con la produzione domestica di solfato di manganese.* Tratto da ESG news: <https://esgnews.com/it/gm-ed-element-25-per-espandere-la-catena-di-fornitura-di-us-ev-con-la-produzione-domestica-di-solfato-di-manganese/>

Flash Battery. (2023). *Batterie al sodio: la tecnologia del futuro?* Tratto da Flash Battery: <https://www.flashbattery.tech/batterie-al-sodio/>

Forbes. (2024, Settembre 19). *Crollano le vendite di auto elettriche: ora i costruttori chiedono risposte all'UE.* Tratto da Forbes: <https://forbes.it/2024/09/19/crollano-vendite-auto-elettriche-costruttori-chiedono-risposte-ue/>

Forbes. (2025, Gennaio 29). *EV Sales In Europe Set To Spurt But 2030 Mandate Looks Impossible.* Tratto da Forbes: <https://www.forbes.com/sites/neilwinton/2025/01/29/ev-sales-in-europe-set-to-spurt-but-2030-mandate-looks-impossible/>

futuremarketinsights. (2023, marzo 23). *Copper Foil market.* Tratto da futuremarketinsights.com: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/copper-foil-market>

Geologyscience. (2023). *Minerale di manganese (Mn).* Tratto da Geologyscience: <https://it.geologyscience.com/ore-minerals/manganese-ore/>

GMCELL. (2024). *Batterie al nichel-metallo idruro e batterie agli ioni di litio: un confronto completo.* Tratto da GMCELL: Batterie al nichel-metallo idruro e batterie agli ioni di litio: un confronto completo

HDINresearch. (2021). *Electrolytic copper foil manufacturers and Electrolytic copper foil market trend.* Tratto da HDIN research: <https://www.hdinresearch.com/news/102>

Heimes, H. (2019). *BATTERY MODULE AND PACK ASSEMBLY PROCESS.* VDMA Battery Production.

IDTechEx. (2017, June). *The Electric Vehicle Market and.* Tratto da International Copper Association: <https://internationalcopper.org/wp-content/uploads/2017/06/2017.06-E-Mobility-Factsheet-1.pdf>

Il Sole 24 Ore. (2024, ottobre 21). *Quotazione Rame in tempo reale: prezzo al grammo oggi .* Tratto da Il Sole 24 Ore: <https://mercati.ilsole24ore.com/materie-prime/commodities/rame/EFCUDWZ.LME>

International Copper Association. (2024). *Copper Life Cycle.* Tratto da International Copper Association: <https://internationalcopper.org/sustainable-copper/about-copper/copper-life-cycle/>

International Energy Agency . (2022). *Global Supply Chains of EV Batteries.*

International Energy Agency. (2024). *Global EV Outlook 2024.*

- International Energy Agency. (2024). *Trends in electric vehicle batteries*. Tratto da IEA: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-vehicle-batteries>
- ISPI. (2024, July 12). *Australia: ponte di litio per l'UE?* Tratto da Ispionline: <https://www.ispionline.it/it/pubblicazione/australia-ponte-di-litio-per-lue-179738>
- Jennifer B. Dunn, J. C. (2015). *Material and Energy Flows in the Production of Cathode and Anode Materials for Lithium Ion Batteries*.
- Jingluan Yang, W. C. (2023). *Unravelling the landscape of global cobalt trade: Patterns, robustness, and supply chain security*. Elsevier.
- Kalungi, P. (2024). *Aspects of Nickel, Cobalt and Lithium, the Three Key Elements for Li-Ion Batteries: An Overview on Resources, Demands, and Production*.
- Karan Bhuwarka, E. O. (2024). *Nickel Market Dynamics and the Security of the Battery Supply Chain*.
- Kim, T.-Y. (2022). *New method for selective recovery of manganese from NCM-based cathode material of spent Li-ion batteries*. Elsevier.
- Koech, A. K. (2024). *A review of improvements on electric vehicle battery*.
- Koroma, M. S. (2024). *Life cycle assessment of battery electric vehicles: Implications of future electricity mix and different battery end-of-life management*.
- KVI battery. (s.d.). *The Battery Intelligence Company*. Tratto da KVI battery: <https://www.kvibattery.iboostmorocco.com/>
- L, J. (2024, Novembre 6). *The Nickel Market is Changing Big Time: Is a Supply-Demand Shift Underway?* Tratto da Carbon Credits.com: <https://carboncredits.com/nickel-market-is-changing-big-time-is-a-supply-demand-shift-underway/>
- La Stampa. (2024, May 31). *Rame: performance e prospettive nel medio e lungo periodo*. Tratto da La Stampa: <https://finanza.lastampa.it/News/2024/05/31/rame-performance-e-prospettive-nel-medio-e-lungo-periodo/NDffMjAyNC0wNS0zMV9UTEI>
- Lecron share. (2024, August 2024). *Understanding PVDF Binder for Lithium Ion Battery*. Tratto da Lecron share: <https://www.lecronchem.com/understanding-pvdf-binder-for-lithium-ion-battery/>
- Liu, B. (2020). *Nickel Iron Battery*. Elsevier.
- Londono, V. (2024). *Mineral Commodity Summaries 2024*. U.S. Geological Survey.
- LYTH. (2021). *what is battery module*. Tratto da Lyth energy technology: what-is-battery-module
- Marcoli, T. (2024, ottobre 15). *Boom di vendite auto elettriche negli USA, ora valgono il 10% del mercato*. Tratto da Tomshw: <https://www.tomshw.it/automotive/a-sorpresa-boom-di-vendite-auto-elettriche-negli-usa-2024-10-15>
- Marta Wincewicz-Bosy, M. D. (2021). *The Supply Chain of the Mining Industry: The Case of Copper Mining*. *European Research Studies Journal Volume XXIV*, 204-225.

- Mat, M. (2023, Aprile 23). *Minerale di cobalto (Co)*. Tratto da Geology Science: https://it.geologyscience.com/ore-minerals/cobalt-ore/#google_vignette
- Mellert, L. D. (2018). *Eidgenössisches Departement für*. Tratto da Eidgenössisches Departement für
- Mero, J. L. (2024, Novembre 14). *Prospecting and exploration*. Tratto da Britannica: <https://www.britannica.com/technology/mining/Prospecting-and-exploration>
- Miller, J. (2021). *Cobalt Blue launches new program to examine cobalt recovery from waste streams*. Tratto da Proactive: <https://www.proactiveinvestors.com/companies/news/945392/cobalt-blue-launches-new-program-to-examine-cobalt-recovery-from-waste-streams-945392.html>
- Oguz, B. V. (2023, Maggio 7). *Graphite: An Essential Material in the Battery Supply Chain*. Tratto da ELEMENTS: <https://elements.visualcapitalist.com/graphite-essential-material-in-battery-supply-chain/>
- P. P. Prosin, C. C. (2014). *Sintesi e caratterizzazione strutturale e morfologica di materiali anodici e catodici*.
- P.A. Nelson, K. G. (2012). *Modeling the Performance and Cost of Lithium-Ion Batteries for Electric-Drive Vehicles*.
- Palleschi, C. (2023, July 18). *La guerra del litio: dentro la sfida tra Europa e Cina per il petrolio del XXI secolo*. Tratto da Forbes: <https://forbes.it/2023/07/18/litio-petrolio-xxi-secolo-sfida-cina-europa/>
- Qi, L. (2023). *Manufacturing processes and recycling technology of automotive lithium-ion battery: A review*. Elsevier.
- Redaktion, A. (2024). *Market outlook for 2024 – a year of hope and optimism*. Tratto da International Aluminium Journal: [https://www.aluminium-journal.com/market-outlook-for-2024-a-year-of-hope-and-optimism#:~:text=The%20average%20LME%20cash%20aluminium,%2C000%2Ft%20\(Bank%20of](https://www.aluminium-journal.com/market-outlook-for-2024-a-year-of-hope-and-optimism#:~:text=The%20average%20LME%20cash%20aluminium,%2C000%2Ft%20(Bank%20of)
- rho motion. (2023, Gennaio 14). *Over 17 million EVs sold in 2024 - Record Year*. Tratto da rho motion.
- Rinnovabili. (2025, Gennaio 7). *Auto elettriche in Italia, nel 2024 vendite giù del 2% nonostante gli incentivi*. Tratto da Rinnovabili: <https://www.rinnovabili.it/mobilita/automotive/vendita-auto-elettriche-italia-2024/#:~:text=Vendita%20auto%20elettriche%2C%20i%20dati%20del%202024&text=Per%20quanto%20riguarda%20il%20segmento,del%2014%25%20anno%20su%20anno>
- Roy, J. J. (2024). *Direct recycling of Li-ion batteries from cell to pack level: Challenges and prospects on technology, scalability, sustainability, and economics*. Carbon Energy.
- Schlögl, G. G. (2024). *Sustainable battery lifecycle: Non-Destructive separation of batteries and potential second life applications*. Batteries.
- SFA, O. (2024, Giugno 20). *Can graphite export restrictions lift supply?* Tratto da SFA (Oxford): <https://www.sfa-oxford.com/market-news-and-insights/sfa-graphite-export-restrictions-could-finally-be-the-push-needed-to-develop-domestic-resources/>

Shanghai Metals Market. (2024, October 17). *Lithium Carbonate (99.2% Industrial Grade) price today | Historical Lithium Carbonate (99.2% Industrial Grade) Price Charts*. Tratto da SMM: <https://www.metal.com/Lithium/201905160001>

shanghai metals market. (s.d.). *Natural Graphite(High-end) Price*. Tratto da SMM: https://www.metal.com/Anode_Materials/202005200007

Silva, E. (2023, Agosto 15). *North American graphite market to disconnect from Chinese prices*. Tratto da S&P Global: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/north-american-graphite-market-to-disconnect-from-chinese-prices-76963809>

Silva, E. (2024, Agosto 2). *Battery chemistry innovation to increase manganese demand*. Tratto da S&P global: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/battery-chemistry-innovation-to-increase-manganese-demand-82622881>

SMM. (s.d.). *Manganese Sulfate(Battery Level) Price*. Tratto da SMM: <https://www.metal.com/Manganese/201805300001>

Sun, H. (2024). *End-of-life nickel recycling: Energy security and circular economy development*. Elsevier.

Takano, M. (2022). *Recovery of nickel, cobalt and rare-earth elements from spent nickel–metal-hydride battery: Laboratory tests and pilot trials*. Elsevier.

Tecnobattery. (2024, June 27). *la grafite nelle batterie*. Tratto da Tecnobattery: <https://www.tecnobattery.it/2023/12/la-grafite-nelle-batterie/>

Temponi Trattamenti Termici. (2024). *La produzione dell'alluminio*. Tratto da Temponi Trattamenti Termici: <https://trattamentimetalli.com/la-produzione-dellalluminio/>

Tong, T. (2024, ottobre 25). *GEMCO's manganese ore suspension: a volatile market driven by weak Chinese steel demand, panic buying*. Tratto da Fastmarkets: <https://www.fastmarkets.com/insights/gemcos-manganese-ore-suspension-a-volatile-market-driven-by-weak-chinese-steel-demand-panic-buying/>

TRADING ECONOMICS. (2024). *Aluminum - price - chart - Historical data - news*. Tratto da TRADING ECONOMICS: <https://tradingeconomics.com/commodity/aluminum#:~:text=Aluminum%20increased%20287%20USD%2FTonne,4103%20in%20March%20of%202022>

TRADING ECONOMICS. (2024). *Lithium - price - chart - historical data - news*. Tratto da TRADING ECONOMICS: <https://tradingeconomics.com/commodity/lithium>

Trading Economics. (n.d.). *Cobalt price*. Tratto da Trading Economics: <https://it.tradingeconomics.com/commodity/cobalt>

TRUMPF. (s.d.). *La sfida: una produzione redditizia e in sicurezza di processo di batterie agli ioni di litio ad alte prestazioni per l'elettromobilità*. Tratto da TRUMPF: https://www.trumpf.com/it_IT/soluzioni/settori/automotive/e-mobility/celle-di-batterie-e-moduli/

USGS. (2024). *Mineral Commodity Summaries 2024*. U.S. Geological Survey.

uwa, ©. A.-A.-A. (n.d.). *kathodenmaterialien*.

Warner, K. (2024, Aprile 10). *Syrah and Indonesia's big graphite deal*. Tratto da Metal Tech News:
<https://www.metaltechnews.com/story/2024/04/10/tech-metals/syrah-and-indonesias-big-graphite-deal/1713.html>

Yang, L. (2024). *High efficiency and cost-effective innovative self-oxidation in-situ removal scheme for the preparation of battery-grade manganese sulphate*. Elsevier.

Zanoletti, A. (2024). *A Review of Lithium-Ion Battery Recycling: Technologies, Sustainability, and Open Issues*. Elsevier.

Zhao, J. (2024). *Sodium Sulfur Battery*. Elsevier.

Zubi, G. (2018). *The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives*. Elsevier.

Ringraziamenti

Desidero dedicare questo spazio conclusivo della mia tesi di laurea ai ringraziamenti per tutte le persone che mi hanno sostenuto e accompagnato in questo percorso di crescita, sia personale che professionale.

Innanzitutto, desidero ringraziare il mio relatore, il professore Carlo Rafele, il professore Giulio Mangano e il dottore Dario Alidoost per i loro preziosi consigli, la disponibilità e la gentilezza dimostratami durante quest'ultima fase del mio percorso di studi, concedendomi la possibilità di raggiungere questo traguardo.

Ringrazio i miei genitori e mio fratello Calogero per il sostegno che mi hanno dimostrato fin dal primo giorno, credendo sempre in me ed aiutandomi nei momenti più complessi incontrati durante questo percorso accademico. Ringrazio i miei nonni che ho sempre sentito vicini a me nonostante la lontananza.

Ringrazio gli amici di una vita: Vittorio, Calogero, Stefano ed Elena, con cui ho condiviso momenti indimenticabili e che sono stati una presenza preziosa in questo percorso.

Ringrazio i miei colleghi e i miei coinquilini con i quali ho condiviso questo viaggio ed ho passato momenti divertenti e spensierati.