
UNIVERSITÀ DI GENOVA
SCUOLA DI SCIENZE SOCIALI
DIPARTIMENTO DI ECONOMIA



Tesi di laurea magistrale in
Temi di Politica Economica

Le materie prime e l'impatto ambientale dei veicoli elettrici

Relatore: Luca Beltrametti

Candidato: Matteo Randisi

Anno accademico
2022/2023

INDICE

ABSTRACT	4
CAPITOLO 1 – I veicoli elettrici: introduzione	6
1.1) Cenni storici.....	6
1.2) Tipologie e funzionamento	8
1.3) Il trend di mercato.....	10
CAPITOLO 2 – Le materie prime e i loro mercati	15
2.1) Le batterie: tipologie e importanza	15
2.2) Le materie prime fondamentali.....	18
2.2.1) Grafite	20
2.2.2) Litio.....	22
2.2.3) Nichel.....	24
2.2.4) Cobalto.....	25
2.2.5) Manganese	28
2.3) La domanda di litio, cobalto e nichel.....	30
2.4) Il dominio cinese.....	31
2.5) Le conseguenze sul prezzo	33
2.6) Le politiche per mitigare il monopolio cinese	35
CAPITOLO 3 – Un focus sulle terre rare.....	39
3.1) Le terre rare.....	39
3.2) L'utilizzo delle terre rare nei veicoli elettrici	42
3.3) La previsione della domanda	45
3.4) I principali player.....	47
3.5) Il mercato	51

CAPITOLO 4 – L’impatto ambientale dei veicoli elettrici in ottica <i>life cycle assessment</i>	56
4.1) Definizione del life cycle assessment	56
4.2) LCA applicato ai veicoli elettrici.....	57
4.3) La metodologia WtW e il social lifecycle cost	59
4.4) LCA completo.....	61
4.4.1) La fase di fabbricazione	62
4.4.2) La fase di utilizzo.....	63
4.4.3) La fase di fine vita	64
4.4.4) Risultati.....	65
4.5) Il riciclo delle batterie	67
4.6) L’impatto ambientale a livello locale	69
CONCLUSIONI.....	73
BIBLIOGRAFIA.....	77

ABSTRACT

Lo scopo di questo lavoro è analizzare un argomento di grande attualità, il quale è stato al centro di numerosi dibattiti negli ultimi anni: i mercati delle materie prime necessarie alla costruzione dei veicoli elettrici e se, questa tecnologia, sia veramente sostenibile.

Per comprendere al meglio questo argomento, ho inizialmente introdotto i veicoli elettrici, in modo da capire le tipologie e le prospettive future. Una volta compreso quali sono le materie prime necessarie alla loro costruzione, mi sono concentrato sui loro mercati, analizzato le aziende e i paesi che detengono il controllo su di essi e dedicando un capitolo esclusivamente alle terre rare. Infine, ho discusso diversi studi e metodologie atte a capire e valutare i costi ambientali dei veicoli elettrici e se essi siano sostenibili nel lungo termine.

Dalla prima parte emerge un dominio indiscusso della Cina, che va dall'estrazione delle materie prime fino alla produzione di batterie e magneti. Nella seconda parte, invece, si arriva alla conclusione che, la costruzione dei veicoli elettrici, genera dei costi ambientali non trascurabili.

The aim of this assignment is to analyse a current topic, which was debated in the last years: the markets of raw materials necessary for the construction of electrical vehicles and if this technology is really sustainable.

To understand better this topic, I have initially described electrical vehicles to seize the typologies and the future prospects. After understanding which raw materials are necessary to build electrical vehicles, I analysed firms and countries which have the control on these markets dedicating a chapter only to rare earths. Finally, I discussed distinct methodologies and studies about the environmental costs of electrical vehicles and evaluate if they are sustainable in the long term.

In the first part arises a Chinese monopoly, from the extraction of raw materials to the production of batteries and magnets. Instead, in the second part, the conclusion is that the production of electrical vehicles causes considerable environmental costs.

CAPITOLO 1 – I veicoli elettrici: introduzione

Secondo vari report pubblicati dall’Agenzia europea per l’ambiente, nel 2019 il settore dei trasporti è stato responsabile di circa un quarto delle emissioni totali di CO₂ in Europa e, va evidenziato come questo dato è in costante crescita dal 1990 ad oggi. Di queste emissioni circa il 71,7% è dovuto esclusivamente al trasporto su strada e, più della metà di esse, è da attribuire al traffico automobilistico. Per ovviare a questo problema, la maggior parte delle potenze mondiali sta investendo tempo e denaro sui veicoli elettrici. Lo scopo di questo lavoro è evidenziare le problematiche, attuali e future, di questi veicoli, soffermandosi sulla *supply chain* delle batterie e andando a capire se, effettivamente, questa “nuova” tecnologia sia sostenibile per l’ambiente nel medio e lungo termine.

1.1) Cenni storici

Differentemente da quanto si possa pensare, i primi rudimentali progetti di e-car risalgono all’inizio del 1800 quando alcuni scienziati e ricercatori compresero le potenzialità insite nel fluido elettrico “continuo” delle pile. Un nuovo modo di immagazzinare l’energia che richiese altri 60 anni per essere messa a punto e dare alla luce un’invenzione fondamentale: l’accumulatore elettrico di Planté. Gaston Planté, professore universitario, dopo vari esperimenti arrivò alla conclusione che il piombo era il materiale più idoneo per dare origine ad una pila reversibile, cioè sostanzialmente ricaricabile. Grazie agli elettrodi di piombo immersi in acido solforico che fornivano una tensione e una corrente stabile, nacque un accumulatore elettrico efficace e poco costoso (Fagioli, 2020).

Nel 1867 Franz Kavogl, inventore austriaco, presentò il primo veicolo a trazione elettrica all’Esposizione Universale di Parigi. Successivamente una serie di innovazioni, che portarono più autonomia e più velocità, innescarono a cavallo tra il 1800 e il 1900, un breve periodo di successo per l’auto elettrica. A Londra e New York nel 1897 vennero introdotti i taxi elettrici e in Francia si organizzarono le prime competizioni che portarono l’auto elettrica a raggiungere e superare i 100 km/h, velocità proibitiva per i veicoli dell’epoca. Molti inventori si dedicarono allo sviluppo dei veicoli elettrici (EV) e tra questi figurava anche Thomas Edison, che contribuì al miglioramento delle batterie. Nel

1901 Ferdinand Porsche, fondatore dell'omonima casa automobilistica, diede alla luce la prima auto ibrida. Il veicolo era alimentato dall'energia elettrica proveniente dalle batterie al piombo e da un motore a scoppio alimentato a benzina. La diffusione delle auto elettriche toccò l'apice nel primo decennio del secolo scorso in America, dove il loro successo fu incredibile tra i membri dell'alta borghesia. I modelli in circolazione erano circa un terzo del totale in quanto più facili da usare, più silenziose e senza emissione di sgradevoli odori (Fagioli, 2020).

In quegli anni però le reti stradali migliorarono e, di conseguenza, la domanda richiese veicoli con maggiore autonomia. Contemporaneamente la scoperta di vasti giacimenti petroliferi rese più economica la benzina e nel 1912, con l'arrivo dell'avviamento elettrico, l'automobile con motore a scoppio diventò anche più semplice da guidare. Tutti questi eventi portarono al declino inesorabile delle automobili elettriche (ormai esclusivamente utilizzate in contesti urbani) a favore delle auto a combustione interna (alimentate a benzina o diesel).

Lo strapotere delle auto a benzina e diesel eclissò completamente le auto elettriche fino agli anni 70 quando la crisi petrolifera ridiede interesse e slancio a questo tipo di veicoli. Nel 1971 fu la General Motors a risvegliarne l'interesse, sviluppando un prototipo di city car elettrica. Dal 1973 al 1997 un'altra city car, della casa automobilistica Sebring-Vanguard, venne prodotta in duemila esemplari e la sua popolarità rese la casa il sesto produttore di auto degli Stati Uniti. Ma la rinascita dell'elettrico ebbe breve durata in quanto le performance e l'autonomia rispetto al motore a scoppio erano ancora troppo limitate e per tutti gli anni 80 sparirono dal mercato (Fagioli, 2020).

Nel 1990 però alcune leggi californiane contro l'inquinamento ne riaccessero l'interesse a livello internazionale e nel 1997 la Toyota presentò la Prius, veicolo passato alla storia come la prima auto ibrida di massa che riscosse un successo incredibile a livello mondiale. La tecnologia delle batterie montate su questo modello era completamente diversa dalle precedenti: si passò dalle batterie al piombo a quelle al nichel idruro di metallo che permettono autonomie e durata maggiori. Nel 2003 un modello prodotto dalla General Motors venne richiamato ed eliminato dal mercato a causa dei suoi innumerevoli difetti e dello scarso successo ottenuto. A seguito di questa decisione Martin Eberhard e Marc Tarpenning fondarono una startup chiamata Tesla. L'anno seguente Elon Musk entra a far parte della società come investitore principale e così nacque la prima auto

prodotta dall'azienda: la Roadster. Essa è stata la prima automobile a utilizzare batterie con celle agli ioni di litio, all'epoca costosissime (Fagioli, 2020).

Da quel momento l'incredibile successo della casa automobilistica e la rinnovata attenzione alle questioni ambientali hanno portato l'*e-car* al centro del dibattito mondiale innescando innovazioni e continui investimenti.

1.2) Tipologie e funzionamento

Le tipologie e le tecnologie dei veicoli elettrici (EV) sono in continuo sviluppo e modifica ma sicuramente possiamo suddividerle in due macrocategorie: i veicoli 100% elettrici e i veicoli ibridi (Enel x, 2020).

I veicoli 100% elettrici, indicati anche con la sigla BEV (*Battery Electric Vehicles*), sono vetture dotate esclusivamente di uno o più motori elettrici, alimentati da una o più batterie. Nello specifico l'energia presente nelle batterie (generalmente per tali veicoli si utilizzano le batterie agli ioni di litio) viene trasformata in energia meccanica dal motore e più precisamente dallo statore. La componente mobile, ossia il rotore, ne riprende il movimento e, grazie alla presenza di riduttori, l'energia meccanica viene trasferita alle ruote. In genere tali auto hanno un'autonomia maggiore nei percorsi urbani in quanto sono dotate di una tecnologia particolare che gli permette di recuperare energia tramite un meccanismo inverso: in fase di rilascio dell'acceleratore, le forze derivanti dal movimento del veicolo mettono in movimento il rotore che trasferisce tale energia alla batteria, incrementandone l'autonomia (Enel x, 2020). Questo è sicuramente uno dei vantaggi di questi veicoli. Generalmente vengono elencati altri vantaggi, tra i quali troviamo:

- zero emissioni allo scarico;
- possibilità di ricarica mediante fonti rinnovabili (impatto zero);
- notevole affidabilità dei componenti elettrici rispetto alla controparte meccanica;
- manutenzione ridotta;
- possibilità di ricarica autonoma mediante stazioni proprie di ricarica.

L'altra macrocategoria è composta dai veicoli ibridi. In essi troviamo la presenza di un motore a combustione interna (motore termico alimentato a benzina) e un motore elettrico alimentato tramite una o più batterie. Si distinguono diverse categorie a seconda della tecnologia e della percorrenza media in modalità esclusivamente elettrica:

- *Micro Hybrid*: il motore elettrico non è dedicato alla trazione del veicolo e per questo da molti non è definito come un vero e proprio motore. Esso è uno *starter* collegato ad una piccola batteria supplementare e dedicato esclusivamente al sistema *start & stop*. Non consente nessuna percorrenza in elettrico e l'efficienza nel consumo di carburante è molto limitata (Il motorista, 2020);
- *Mild Hybrid*: è il cosiddetto “ibrido leggero” ed è una delle tecnologie più diffuse al momento grazie anche al suo basso costo. In esso è presente un motogeneratore che recupera energia in fase di rilascio dell'acceleratore. L'energia viene accumulata in una batteria che entra in funzione solo all'accensione del veicolo e nei primissimi km durante la fase di accelerazione (Il motorista, 2020);
- *Full Hybrid*: in questi veicoli sia la batteria che il motore elettrico sono più grandi e più prestanti rispetto a quelle presenti sulle mild. Anche in questo caso la batteria si ricarica sfruttando l'energia prodotta dal motore termico e dalle decelerazioni, successivamente entra in funzione per qualche km in fase di accelerazione. Con questa tecnologia l'efficienza nel consumo di carburante comincia ad essere notevole (Il motorista, 2020);
- *Plug-In Hybrid*: anch'esse contengono componenti elettriche più grandi e capienti, ma la loro caratteristica principale è di essere dotate di una presa di ricarica elettrica. Grazie alla sola potenza delle batterie possono percorrere anche 50,60 Km o apportare benefici di coppia e potenza nell'uso in modalità “mista” (Il motorista, 2020).

Le prime tre categorie vengono indicate con la sigla HEV (*Hybrid Electric Vehicle*), mentre l'ultima viene indicata con la sigla PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*). Tutte queste tipologie di veicoli ibridi, al contrario dei veicoli *full electric*, presentano comunque emissioni non trascurabili in quanto alimentati prevalentemente con combustibili fossili. Esse comunque garantiscono un efficientamento nel consumo di carburante che, come si è visto in precedenza, varia molto a seconda della tecnologia utilizzata (Enel x, 2020).

Esiste un'ulteriore categoria che sta riscuotendo meno successo e sta attirando meno attenzione: i *Fuel Cell Vehicles* (FCV) o *Fuel Cell Electric Vehicles* (FCEV). I veicoli FCV sono composti da un serbatoio a idrogeno, un complesso di celle in cui avviene la

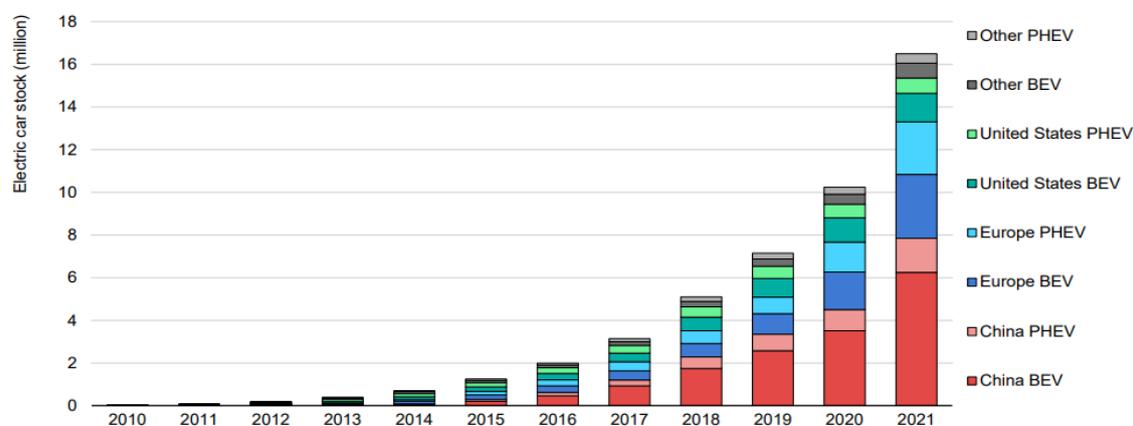
generazione di energia e una piccola batteria per recuperare l'energia in fase di decelerazione. L'idrogeno viene inviato dal serbatoio alle celle dove si combina con l'ossigeno, e con questa reazione chimica si genera una corrente elettrica, utilizzata per far muovere il veicolo, e una certa quantità di calore e vapore acqueo come unico prodotto di scarto (Einaudi, 2019). Il vantaggio principale è che il veicolo non produce emissioni dannose per l'ambiente e inoltre l'idrogeno è considerato una fonte rinnovabile e pulita. D'altro canto, la tecnologia sembra ancora molto prematura, in quanto il sistema è molto complesso e il peso del veicolo finito risulta eccessivo. Inoltre, lo stoccaggio del metano e la catena di rifornimento di tali veicoli sono molto limitati e complessi (Einaudi, 2019). Per questo motivo al momento sono prodotti pochissimi modelli (i più conosciuti sono la Toyota Mirai e la Hyundai Nexa) che però hanno ottenuto scarso successo, anche se molti la considerano la tecnologia del futuro.

1.3) Il trend di mercato

Come riportato dalla maggior parte degli analisti, il mercato dei veicoli elettrici è in forte espansione a livello globale.

International Energy Agency (IEA) è un'agenzia internazionale composta da ben 31 paesi membri (tra cui figura anche l'Italia e i principali paesi occidentali) e 10 paesi associati (tra cui Cina e India). Essa si occupa di monitorare gli aspetti economici, climatici e politici delle principali fonti di energia (tra cui le energie rinnovabili). Tutti gli anni pubblica un report che presenta *trend*, *outlook* e molto altro sui veicoli elettrici.

Grafico 1.1: stock globale di veicoli elettrici, 2010-2021.



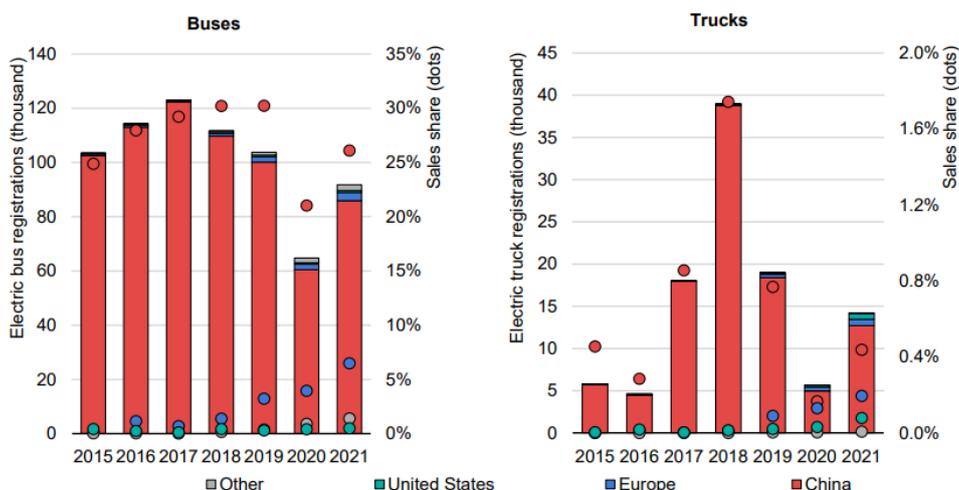
Notes: BEV = battery electric vehicle; PHEV = plug-in hybrid electric vehicle. Electric car stock in this figure refers to passenger light-duty vehicles. "Other" includes Australia, Brazil, Canada, Chile, India, Japan, Korea, Malaysia, Mexico, New Zealand, South Africa and Thailand. Europe in this figure includes the EU27, Norway, Iceland, Switzerland and United Kingdom.

Fonte: IEA, 2022.

Nel report 2022, come si può vedere dal Grafico 1.1, IEA ha stimato uno stock di circa 16,5 milioni di *electric light-duty vehicles* a livello globale (autoveicoli leggeri *full electric* o PHEV.) La quantità di questi veicoli presenti in circolazione è circa triplicata tra il 2018 e il 2021: a trainare questa incredibile crescita è stata la Cina, con quasi la metà delle auto elettriche presenti in circolazione nel 2021 (circa 8 milioni). Altro fattore da notare è come Europa e Cina contino circa l'85% dello stock totale, mentre gli USA si fermano soltanto al 10%, e il restante 5% è composto da altri paesi, tra cui Canada e India. Inoltre, nel 2021, la vendita dei BEV e PHEV è stata circa il 9% del totale delle vendite nel settore dei veicoli leggeri (IEA, 2022).

Guardando invece a quelli che vengono definiti *heavy-duty vehicles*, principalmente camion e bus, la tendenza risulta essere meno costante e delineato, anche se il settore sembrerebbe essere in crescita.

Grafico 1.2: immatricolazione di autobus e camion elettrici e la loro quota di mercato, 2015-2021.



IEA. All rights reserved.

Notes: Other = Australia, Brazil, Canada, Chile, Korea, India, Indonesia, Japan, Mexico, South Africa, Thailand, Malaysia and New Zealand. Electric bus and truck registrations and stock data can be interactively explored via the [Global EV Data Explorer](#).

Fonte: IEA, 2022.

Il grafico analizza le immatricolazioni annue e la percentuale di vendita di EV nel mercato dei camion e dei bus. Da esso si evince che il *trend* è generalmente in crescita, ma non costantemente e con una percentuale di vendita di camion elettrici che rimane intorno allo 0,5\1% del totale. La Cina domina incontrastata il mercato, con circa il 90% di registrazioni in entrambe le categorie (IEA, 2022).

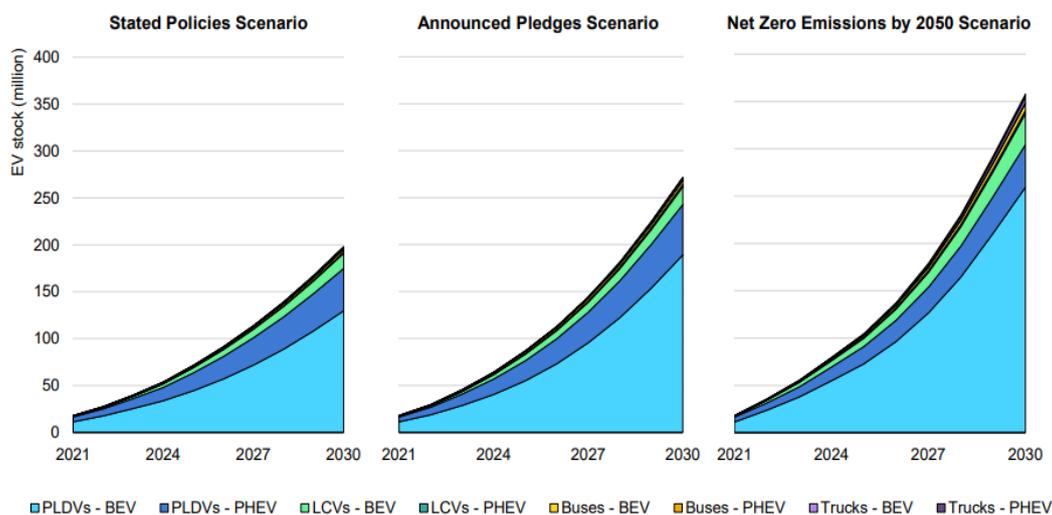
Secondo le statistiche di EV Volumes, il maggior produttore di veicoli *full electric* e *plug-in hybrid*, nel 2022, è stato BYD, produttore cinese, il quale fatturato deriva quasi esclusivamente da vendite sul mercato nazionale. Esso ha venduto circa 1,8 milioni di veicoli. Al secondo posto troviamo Tesla, che produce esclusivamente veicoli *full electric* (BEV) con circa 1,3 milioni di esemplari venduti. A seguire il gruppo Volkswagen con circa 900 mila veicoli venduti nel 2022 (EV Volumes, 2022).

Per quanto riguarda il futuro, per quanto esso sia molto incerto e imprevedibile, IEA propone una previsione a seconda di tre diversi scenari politici e legislativi:

- *Stated Policies Scenario*: suppone che le attuali politiche, leggi e misure già implementate dai principali player internazionali cambino (IEA, 2022).;
- *Announced Pledges Scenario*: nel quale le ambizioni e i target fissati a livello internazionale e nazionale siano raggiunti nei tempi e nei modi stabiliti. Per quanto riguarda i veicoli elettrici, uno di questi obiettivi potrebbe essere il raggiungimento di un certo stock in circolazione nel medio e lungo periodo. Ad esempio, questo scenario si realizzerebbe solamente se tutti i paesi presenti raggiungessero gli obiettivi fissati dalla COP26 (Conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici, anno 2021) (IEA, 2022);
- *Net Zero Emissions by 2050 Scenario*: questo è lo scenario più favorevole a livello ambientale. Si prevede come sarà il mercato dei veicoli elettrici nel caso si dovesse raggiungere l'obiettivo delle emissioni zero entro il 2025. Questo è sicuramente la previsione che si verificherà più difficilmente, visto le scarse politiche messe in atto fino a questo momento (IEA, 2022).

La previsione che ne scaturisce può essere riassunta con il seguente grafico.

Grafico 1.3: previsione stock globale di veicoli elettrici per scenario, 2021-2030.



IEA. All rights reserved.

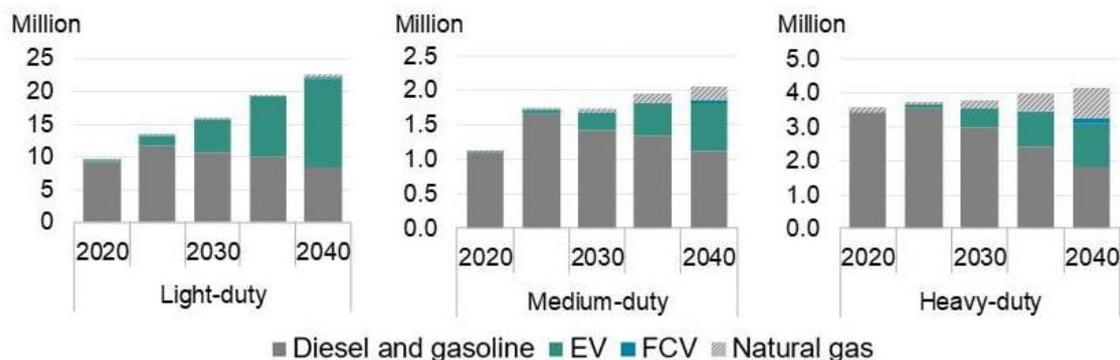
Notes: PLDVs = passenger light-duty vehicles; BEV = battery electric vehicle; LCVs = light commercial vehicles; PHEV = plug-in hybrid electric vehicle. The figure does not include electric two/three-wheelers. For reference, total road vehicle stock (excluding two/three-wheelers) in 2030 is 2 billion in the Stated Policies Scenario, 2 billion in the Announced Pledges Scenario and 1.8 billion in the Net Zero Emissions by 2050 Scenario.

Fonte: IEA, 2022.

Come si evince, lo stock degli EV sembrerebbe in netta crescita fino al 2030, ma con sostanziali differenze a seconda dello scenario. Nel primo scenario si arriverebbe a 200 milioni di veicoli, nel secondo scenario a più di 250, mentre nello scenario più favorevole (Emissioni zero entro il 2050) lo stock di EV raggiungerebbe circa 350 milioni di veicoli. In tutti gli scenari più della metà dello stock è composto dai veicoli PLDVs-BEV (veicoli leggeri *full electric*), seguiti dai PLDVs-PHEV (veicoli leggeri *Plug-in Hybrid*) e da una parte minoritaria di veicoli pesanti, come bus e camion (IEA, 2022).

La quota dei veicoli elettrici venduti sul totale del settore sarebbe in forte crescita, come riporta un'analisi effettuata da Bloomberg nel 2022 e sintetizzata nel seguente grafico.

Grafico 1.4: previsione di vendita dei veicoli elettrici per tipologie e scenario, 2020-2040.



Source: BNEF. Note: Electric includes battery-electric, plug-in hybrid electric and range-extender; natural gas includes compressed and liquefied natural gas.

Fonte: BloombergNEF, 2022.

La quota dei *light-duty electric vehicles* nel 2040 supererebbe il 50% del totale, con quote crescenti anche per i *medium e heavy-duty vehicles* (BloombergNEF, 2022).

Tutti gli *outlook* e grafici riportati sono previsioni svolte da enti importanti e di rilievo internazionale, ma in quanto previsioni effettuate in un ambiente incerto a livello politico, tecnologico e ambientale quale quello attuale, esse vanno considerate e analizzate con cautela.

CAPITOLO 2 – Le materie prime e i loro mercati

2.1) Le batterie: tipologie e importanza

Come spiegato brevemente nel Capito 1, il vero cuore dei veicoli elettrici sono il motore e le batterie, sulle quali negli ultimi anni è ricaduto gran parte dell'interesse.

Esistono tanti tipi diversi di tecnologie, a seconda della chimica utilizzata le batterie variano molto in costo, autonomia e durata del ciclo di vita. Effettuando una semplificazione, possiamo riassumere e aggregare le tipologie nelle seguenti categorie:

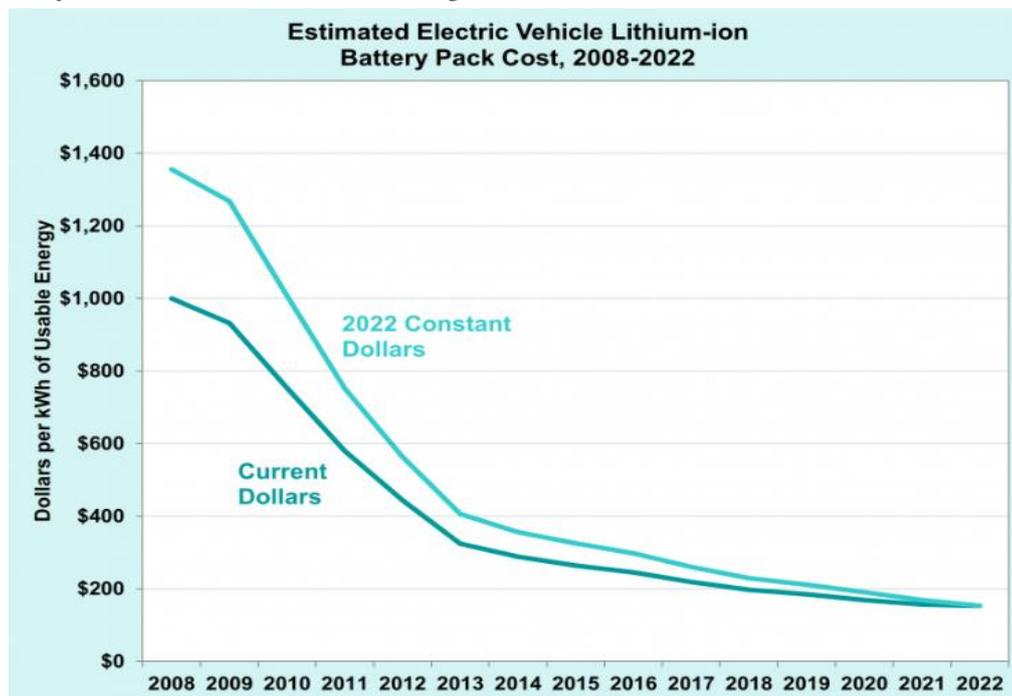
- batterie al piombo-acido: sono le batterie più utilizzate in passato, ma oggi si può ritenere questa tecnologia ormai matura e superata. Alcune caratteristiche però la rendono ancora appetibile per certi usi legati alla mobilità. Esse, infatti, sono molto economiche comparate alle altre tecnologie sottoelencate, e hanno un ciclo di vita lungo. Però le prestazioni sono modeste, hanno un peso specifico elevato e devono essere smaltite con molta attenzione a causa del grande impatto ambientale che possono avere. Inoltre, per la ricarica richiedono molto tempo in quanto possono essere ricaricate esclusivamente a potenze abbastanza contenute (Barontini, 2022);
- batterie al nichel-metallo idruro (NiMH): esse hanno trovato una scarsa applicazione nei veicoli *full electric* (BEV), ma sono principalmente utilizzate nei veicoli ibridi prodotti da Toyota. Ad esempio, la Toyota Prius, veicolo *plug-in hybrid* (PHEV), monta questo tipo di batterie ed è stata a lungo l'auto ibrida più venduta al mondo (Barontini, 2022). Tra i loro vantaggi possiamo elencare sicuramente l'alta densità energetica, che gli consente buone prestazioni. Si caricano rapidamente, sono più leggere e hanno un impatto sull'ambiente più contenuto rispetto alle batterie al piombo-acido. D'altro canto, esse soffrono del cosiddetto effetto memoria, che le porta a perdere abbastanza velocemente nelle proprie prestazioni e in più si scaricano velocemente, caratteristica che le ha portate ad essere utilizzate solamente nelle vetture ibride (Barontini, 2022);

- batterie agli ioni di litio (Li-ion): sono l'attuale standard di mercato e sono montate nella maggior parte dei veicoli prodotti da Tesla e BYD, i due più grossi produttori a livello mondiale di EV. Sono considerate come il compromesso migliore in quanto hanno buone prestazioni, alta densità energetica, carica rapida, sono leggere e durano abbastanza a lungo (Barontini, 2022). Il rovescio della medaglia è che le batterie agli ioni di litio tradizionali hanno una breve durata del ciclo di vita, solitamente misurata in cicli di ricarica. Inoltre, presentano un significativo degrado delle prestazioni al passare del tempo e sono facilmente infiammabili in caso di incidente (Barontini, 2022). Per ovviare a questi problemi, negli ultimi anni, sono state sviluppate e successivamente montate nelle auto diverse tipologie che vengono realizzate modificando la chimica del catodo: al litio vengono aggiunti altri materiali quali nichel, cobalto, manganese e grafite. Le principali tipologie vengono definite con le seguenti sigle: NCA (*Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide*), NMC (*Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide*) e LFP (*Lithium Iron Phosphate*).

Come si è detto in precedenza, l'autonomia è una caratteristica fondamentale per la diffusione degli EV. Secondo una prova su strada effettuata nel 2022 da Insideevs su 10 differenti modelli di *e-car* prodotti da case diverse (montanti batterie agli ioni di litio di diverse tipologie), l'autonomia media di un'auto BEV si aggira intorno ai 300km, ma essa varia molto a seconda dello stile di guida e del percorso (Barontini, 2023). Da sottolineare come la prova sia stata svolta su veicoli di media-alta fascia, e come l'autonomia dei veicoli elettrici più piccoli, come le *e-city car*, sia molto inferiore. L'autonomia di un'auto *plug-in hybrid*, in modalità totalmente elettrica e non mista, si aggira intorno ai 50-60 km (Insideevs, 2022).

L'altro fattore fondamentale nella diffusione degli EV è sicuramente il costo delle batterie. Infatti, nei primi anni 2000 esso pesava per circa il 30% del costo totale del veicolo, come nel caso della Tesla Roadster (Fagioli, 2020). Uno studio effettuato dal Dipartimento dell'energia degli Stati Uniti d'America (DOE) fornisce un'idea del calo notevole che si è verificato nel costo di produzione delle batterie.

Grafico 2.1: costo delle batterie agli ioni di litio, 2008-2022.

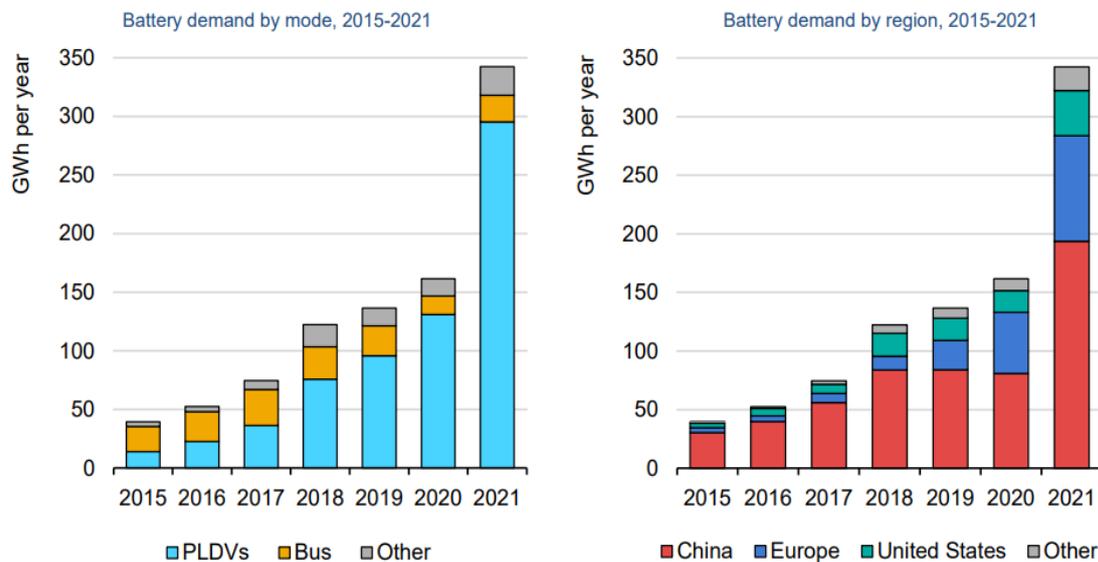


Fonte: DOE, 2023.

Come risulta dall'analisi del Grafico 2.1, il DOE stima che il prezzo medio del pacco batteria sia passato da 1355 \$/kWh nel 2008 a 153 \$/kWh nel 2022; tale dato è relativo solamente alle batterie agli ioni di litio e comporta una diminuzione di circa l'89% in 14 anni (DOE, 2023).

Altro fattore interessante da analizzare è la domanda di batterie per i veicoli elettrici: relativamente alle sole batterie agli ioni di litio, secondo IEA, negli ultimi anni si è verificato un netto aumento spinto dalla domanda crescente di veicoli elettrici e dal calo dei prezzi. (IEA, 2022). Il Grafico 2.2 illustra il *trend* degli ultimi 7 anni, esprimendo la quantità in GWh (Gigawatt/ora).

Grafico 2.2: domanda di batterie derivante dai veicoli elettrici, suddivisa per tipologia e regione, 2015-2021.



IEA. All rights reserved.

Notes: GWh = gigawatt-hours; PLDVs = passenger light-duty vehicles; other includes medium- and heavy-duty trucks and two/three-wheelers. This analysis does not include conventional hybrid vehicles.

Fonte: IEA, 2022.

La domanda di batterie è passata da circa 50 GWh annui nel 2015, a quasi 350 GWh annui nel 2021. Da notare come nel 2021, nonostante i problemi relativi alla pandemia, la domanda sia aumentata di circa il 140% rispetto all'anno precedente. Guardando alla categoria di veicoli, la domanda è trainata dai veicoli PLDVs (*Light-Duty Vehicles*, cioè principalmente automobili), con circa 300 GWh annui nel 2021 (IEA, 2022).

Andando ad analizzare la domanda per paese, la Cina ha sempre avuto la quota maggiore, ma essa è diminuita progressivamente a favore di Europa e USA. Nel 2021 però la quota cinese era ancora di gran lunga superiore alla metà della domanda totale, con circa 200 GWh annui (IEA, 2022).

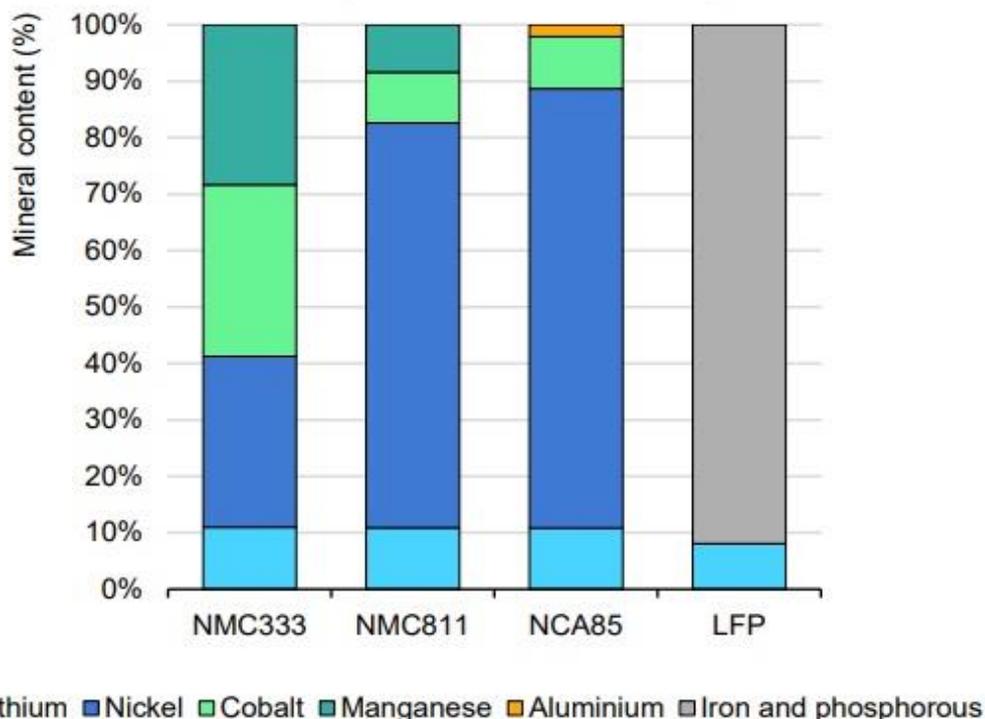
2.2) Le materie prime fondamentali

Come già detto nel capitolo precedente, le batterie agli ioni di litio (Li-on) sono ampiamente le più utilizzate e sono composte da formule chimiche molto complesse che prevedono l'utilizzo di molte materie prime. Bisogna distinguere due componenti fondamentali di tali batterie: l'anodo e il catodo.

Le materie prime presenti nel catodo, oltre ovviamente al litio, sono principalmente nichel, cobalto, manganese, alluminio, ferro e fosforo e vengono utilizzate in percentuali

diverse a seconda della formula chimica utilizzata. Il Grafico 2.3 mostra in che percentuale essi sono presenti nei catodi a seconda delle diverse tipologie di batterie.

Grafico 2.3: composizione chimica dei catodi delle batterie agli ioni di litio.



Fonte: IEA, 2022.

Come si nota immediatamente, il litio è presente per circa il 10% in tutte le tipologie. Il materiale più presente nei catodi è il nichel, seguito da cobalto e manganese. Per le batterie LFP, meno utilizzate rispetto agli altri tipi, i materiali fondamentali sono il ferro e il fosforo (IEA, 2022).

Come riportato da IEA, la chimica del catodo basata sul nichel, cioè le batterie agli ioni di litio denominate con le sigle NCA (*Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide*) e NMC (*Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide*) sono ampiamente le più utilizzate, con circa il 75% della domanda totale (IEA, 2022). Però, negli ultimi anni, l'utilizzo delle batterie LFP (*Lithium Iron Phosphate*) è cresciuto notevolmente raggiungendo il 25% della domanda totale: la maggior parte sono utilizzate in Cina per la realizzazione di *medium and heavy-duty vehicles*, in quanto più adatte a questo tipo di veicoli (IEA, 2022).

Ma effettivamente, per produrre un catodo di una batteria, quanti di questi materiali servono? La quantità ovviamente varia molto a seconda della chimica utilizzata e dei kW/h (kilowatt/ora) che essa riesce ad esprimere. A tal fine, uno studio effettuato da alcuni docenti da un'idea delle quantità necessarie (Tabella 2.1). Il valore viene espresso in kg/kWh (chilogrammo per chilowatt/ora).

Tabella 2.1: quantità delle principali materie prime presenti nei catodi delle batterie agli ioni di litio (kg/kWh).

	Li	Ni	Co	Mn
NCA	0.1	0.67	0.13	0.00
NMC 111	0.15	0.4	0.40	0.37
NMC 433	0.14	0.47	0.35	0.35
NMC 532	0.14	0.59	0.23	0.35
NMC 622	0.13	0.61	0.19	0.20
NMC 811	0.11	0.75	0.09	0.09
LFP	0.1	–	–	–

Fonte: Palacios et al., 2022.

Più semplice invece la formula chimica dell'anodo, praticamente composto esclusivamente da grafite. Questo fatto rende anch'essa un materiale fondamentale e al momento insostituibile nella produzione delle batterie.

Questi materiali stanno giocando e giocheranno in futuro un ruolo chiave nel mercato dei veicoli elettrici e, se effettivamente diventeranno il nuovo standard sostituendo gli attuali veicoli a combustione interna, potranno spostare gli equilibri geopolitici mondiali. Successivamente si analizzeranno il mercato e la produzione di queste materie prime, ponendo un focus, nel capitolo successivo, sulle terre rare.

2.2.1) Grafite

Come detto precedentemente, la grafite (Gr) è il minerale principalmente utilizzato per costruire l'anodo delle batterie. Essa può essere ottenuta dall'estrazione mineraria (grafite naturale) o prodotta sinteticamente dalla lavorazione di idrocarburi (ad esempio petrolio e catrame). La grafite naturale può essere ritenuta abbondante in natura ma la sua qualità e purezza variano molto. A tal proposito, se ne possono distinguere tre tipi (Palacios et al., 2022):

- fiocchi o scaglie (*flake graphite*): è la forma meno comune di grafite e costa circa quattro volte in più rispetto all'amorfa. Essendo più pregiata è ritenuta la migliore e la più ricercata per la costruzione di batterie agli ioni di litio;
- microcristallina o amorfa (*amorphous graphite*): è la più abbondante nella crosta terrestre ma non può essere utilizzata per molti componenti elettrici, a causa della sua scarsa qualità;
- vene o noduli (*high crystalline vein*): la sua rarità e il prezzo troppo elevato fanno sì che questo tipo sia scarsamente utilizzato in quasi tutti i settori.

Per essere resa utilizzabile la grafite naturale deve subire una serie di lavorazioni ma, per ottenere una materia prima di alta qualità, sono necessarie ulteriori fasi di lavorazione che prevedono più passaggi chimici. La grafite di alta qualità viene principalmente usata per tutti i tipi di batterie, ma anche per materiali refrattari, acciaio e lubrificanti (Palacios et al., 2022).

Il flake di grafite a scaglie larghe è il più adatto per le batterie agli ioni di litio tanto che si stima che l'anodo di grafite venga prodotto con circa il 75% di grafite naturale a scaglie larga e la restante parte con grafite sintetica. Entrambe le tipologie sono molto costose in quanto la prima deve avere un certo grado di purezza, mentre la seconda richiede tutta una serie di lavorazioni costose (La Monica et al., 2020).

Il mercato della grafite nel 2017 valeva circa 15,8 miliardi e, come si può vedere dalla Tabella 2.2, la Cina deteneva circa il 67% dell'estrazione mondiale, con 780.000 tonnellate estratte (La Monica et al., 2020).

Tabella 2.2: riserve ed estrazione mondiale di grafite naturale suddivise per nazioni nel 2017.

Exploration			Extraction		
Reserves - Country	Tons	%	Mine production - Country	Tons	%
Turkey	90.000.000	33,3	China	780.000	66,6
Brazil	70.000.000	25,9	India	150.000	12,8
China	55.000.000	20,4	Brazil	95.000	8,1
Mozambique	17.000.000	6,3	Canada	30.000	2,6
Tanzania	17.000.000	6,3	Mozambique	23.000	2,0
India	8.000.000	3,0	Russia	19.000	1,6
Mexico	3.100.000	1,1	Ukraine	15.000	1,3
Other	9.900.000	3,7	Other	60.000	5
Total	270.000.000	100,0	Total	1.172.000	100,0

Fonte: La Monica et al., 2020.

Il secondo produttore mondiale è l'India, che si fermava a solo 150.000 tonnellate, corrispondenti ad una quota del 12,8% a livello mondiale (La Monica et al., 2020).

Il monopolio cinese deriva sia dall'estrazione che dalla lavorazione. Con costi di lavorazione molto inferiori rispetto agli altri paesi (a causa principalmente del basso costo della manodopera) e minori restrizioni ambientali sull'uso di reagenti, IEA stima che nel 2021 la percentuale di produzione cinese sia addirittura salita ed arrivi ad oltre il 70%. Circa il 35% dell'estrazione cinese è destinata ad uso interno. Da segnalare però che negli ultimi anni molte miniere sono state chiuse a causa del mancato rispetto delle nuove normative ambientali (La Monica et al., 2020).

Il colosso cinese produce principalmente grafite di media-scarso qualità ed è per questo che potrebbe crearsi in futuro un vuoto tra domanda e offerta. Tutta via, al momento, la più grande fornitrice mondiale di grafite naturale per batterie agli ioni di litio rimane la BTR, multinazionale cinese operante in molti campi (La Monica et al., 2020).

L'industria siderurgica rimane il motore storico della produzione e dei prezzi della grafite. È la produzione di acciaio ad influenzare principalmente questo mercato in quanto, nel 2017, contava per circa il 52% del totale della domanda mentre solo il 10% della grafite veniva richiesta per la produzione di batterie. Anche se al momento non esistono stime precise, la quota di domanda è sempre più tirata ed influenzata dalla domanda di batterie per i veicoli elettrici e si pensa che essa continuerà a crescere in futuro (La Monica et al., 2020).

La grafite non viene scambiata in borsa e, al di fuori della Cina, il prezzo è fissato tramite accordi e contratti. Internamente invece il prezzo della grafite è principalmente controllato da una società statale che produce circa il 90% della fornitura mondiale. Un'altra particolarità è che il costo di trasporto incide fortemente sul prezzo finale. Per esempio, nel caso del trasporto via mare, esso può arrivare a pesare anche il 30% del prezzo totale (La Monica et al., 2020).

2.2.2) Litio

Il litio (Li) viene estratto da due fonti: rocce dure (pegmatiti) e salamoie. Il concentrato di litio può essere utilizzato direttamente nelle industrie senza essere lavorato, al fine di produrre principalmente ceramica, vetro e altre applicazioni industriali. Per produrre i catodi delle batterie agli ioni di litio, invece, deve subire tutta una serie di lavorazioni che lo trasformano in carbonato di litio e idrossido di litio. Al momento, in

quasi nessuna delle applicazioni elencate precedentemente, il litio risulta sostituibile con altri elementi chimici (Palacios et al., 2022).

Il litio è ritenuto un materiale abbondante nella crosta terrestre, tanto che molti esperti ipotizzano come le riserve siano abbastanza abbondanti da sostenere la domanda di batterie nelle prossime decadi. La Tabella 2.3 riporta le riserve e l'estrazione totale di litio nel 2017 per nazione.

Tabella 2.3: riserve ed estrazione mondiale di litio suddivise per nazioni nel 2017.

Exploration			Extraction		
Reserves Country	Tons	%	Mine production - Country	Tons	%
Chile	7.500.000	46,9	Australia	18.700	43,5
China	3.200.000	20,0	Chile	14.100	32,8
Australia	2.700.000	16,9	Argentina	5.500	12,8
Argentina	2.000.000	12,5	China	3.000	7,0
Portugal	60.000	0,4	Zimbabwe	1.000	2,3
Brazil	48.000	0,3	Portugal	400	0,9
United States	35.000	0,2	Brazil	200	0,5
ROW	457.000.000	2,8	ROW	100	0,2
Total	16.000.000	100	Total	43.000	100

Fonte: La Monica et al., 2020.

Le riserve sono presenti soprattutto in Sud America, Australia e Cina. Una piccola parte di tali riserve (circa lo 0,4% mondiale) è presente anche in Europa, più precisamente in Portogallo, il quale produce attualmente una quota minima non sufficiente a coprire la domanda di litio europea. L'Australia è il primo produttore a livello mondiale con quasi il 43,5% del totale nel 2017, seguito dai paesi del Sud America (Chile e Argentina) e dalla Cina. Da sottolineare come la Tabella 2.3 si riferisca esclusivamente alle riserve e all'estrazione (stage 1 del processo di lavorazione).

Per quanto riguarda invece le lavorazioni eseguite al fine di ottenere il carbonato di litio e idrossido di litio, con il quale vengono prodotte le batterie, dobbiamo distinguere quattro stage differenti. Gli ultimi due stage vengono svolti, per il 60% della produzione totale mondiale, in Cina. La restante parte è concentrata soprattutto in Russia e in altri paesi, ma bisogna notare come, anche in questo caso, il dominio cinese sia abbastanza evidente (Palacios et al., 2022).

Il mercato del litio, con circa 220.000 tonnellate di produzione nel 2017 per un valore di circa 3 miliardi di dollari, può essere ritenuto un mercato relativamente piccolo. Questo mercato può essere ritenuto opaco e ristretto a pochissimi player: il litio non è

quotato in borsa e la produzione viene controllata da un oligopolio formato principalmente da imprese australiane, cinesi e cilene. Il prezzo viene stabilito con contratti a lungo termine tra di esse (La Monica et al., 2020). Ad evidenza di ciò, l'IEA stima che la produzione di carbonato di litio e idrossido di litio sia concentrata in sole cinque aziende.

La domanda è in costante crescita: secondo IEA nel 2017 ammontava a circa 40 kt (chilotonnellate) mentre nel 2021 essa era praticamente duplicata, arrivando a circa 80 kt. Questo incremento vertiginoso è guidato per circa il 47% dalla domanda di batterie per gli EV ed essa, nel 2021, ha consumato quasi il 47% del litio prodotto a livello mondiale. Da sottolineare come la domanda sia stata trainata dal continente asiatico e soprattutto dalla Cina. Questo deriva principalmente alle politiche messe in atto da Pechino, al fine di incentivare l'acquisto di veicoli elettrici e ridurre l'inquinamento atmosferico.

Fino a qualche anno fa nel mercato del litio l'offerta eccedeva la domanda e quindi si verificò una diminuzione del prezzo. Dal 2020 ad oggi, però, come vedremo in seguito, con i due fattori nominati precedentemente (domanda in crescita e oligopolio), la pandemia, la guerra in Ucraina, l'inflazione e il fatto che al momento il litio è insostituibile, il prezzo è diventato volatile e instabile.

2.2.3) Nichel

La domanda di nichel (Ni) è dominata dalla produzione di acciaio inossidabile, ma si stima che questo elemento chimico sia presente in più di 300.000 prodotti. La quota della domanda relativa alle batterie per i veicoli elettrici è relativamente piccola anche se è in crescita negli ultimi anni. Essa è passata dal 4% nel 2020 al 7% nel 2021. Per la produzione dei catodi delle batterie agli ioni di litio si utilizza il nichel di classe 1, più pregiato e più costoso in quanto la sua purezza deve essere superiore del 99,8%. Il nichel di classe 2, cioè con purezza inferiore al 99,8%, è più comune e meno costoso sul mercato. Anch'esso può essere utilizzato per la realizzazione di batterie ma richiede ulteriori lavorazioni (IEA,2022).

Esso è il quinto materiale più comune nel nostro pianeta, anche se la maggior parte dei suoi depositi si trovano in profondità e sono impossibili da estrarre. Nei primi strati della crosta terrestre si trova in due forme: solfuro e laterite. I depositi di solfuro si collocano principalmente in Russia, Canada e Australia e solitamente, il nichel estratto

da questi depositi, è più puro rispetto ai depositi di laterite, situati principalmente in Indonesia, New Caledonia e Filippine. La Tabella 2.4 riporta la produzione per paese nel 2018.

Tabella 2.4: produzione di nichel mondiale suddivisa per nazioni nel 2018.

Country	Nickel 2018 production in t	%
Indonesia	560.000	24%
Philippines	340.000	15%
Russia	210.000	9%
New Caledonia	210.000	9%
Australia	170.000	7%
Other	810.000	35%
World Total	2.300.000	

Fonte: elaborazione sulla base di Palacios et al., 2022.

L'Indonesia è il maggior produttore a livello mondiale, seguito da Filippine e Russia. La produzione risulta essere nettamente meno concentrata rispetto ai materiali discussi precedentemente anche se nove imprese detengono circa la metà della produzione mondiale (Palacios et al., 2022).

Da notare come, in questo caso, la Cina non sia tra i principali produttori mondiali di nichel e come la supply chain di questo elemento chimico sembra più equilibrata e meno soggetta ad oligopoli cinesi (Palacios et al., 2022). Tuttavia, la Cina ha messo le mani su una larga fetta della lavorazione del nichel classe 2, arrivando a detenere circa il 30% delle lavorazioni mondiali di questo elemento chimico. Inoltre, nel 2021, la quota russa di produzione del nichel di classe 1 è salita e ha raggiunto quasi il 20%. Con lo scoppio della guerra in Ucraina e le sanzioni economiche poste dai paesi occidentali, in futuro potremmo assistere ad un ulteriore incremento di prezzo e a un cambio di scenario che in passato sembrava più favorevole ai paesi occidentali (IEA, 2022).

2.2.4) Cobalto

Il cobalto (Co) è molto diffuso nel nostro pianeta ma i suoi depositi sono molto dispersi nella crosta terrestre. Tracce di cobalto sono presenti in molte rocce e in altri metalli ma in concentrazioni molto basse, fatto che rende impossibile il loro sfruttamento e utilizzo. Attualmente la maggior parte di questo elemento chimico presente sul mercato viene ricavato, come prodotto secondario, dall'estrazione di metalli più abbondanti quali

rame e nichel. Per separare ed isolare il cobalto si effettua un processo di raffinazione e lavorazione che porta a derivati utilizzabili per molti usi quale il cobalto metallico, l'ossido di cobalto e altri.

Nel 2017 si stima che siano state estratte circa 108 mila tonnellate di cobalto e che esso provenga per circa il 98% dall'estrazione di rame (66%) e nichel (32%) (La Monica et al., 2020). La tabella sotto (Tabella 2.5) riporta le riserve e l'estrazione di cobalto nel 2017.

Tabella 2.5: riserve ed estrazione mondiale di cobalto suddivise per nazioni nel 2017.

Exploration			Extraction		
Reserves - Country	Tons	%	Mine production - Country	Tons	%
D.R. Congo	3.500.000	49,6	D.R. Congo	64.000	58,8
Australia	1.200.000	17	Russia	5.600	5
Cuba	500.000	7,1	Australia	5.000	4,6
Philippines	280.000	4	Canada	4.300	4
Zambia	270.000	3,8	Cuba	4.200	3,9
Canada	250.000	3,5	Philippines	4.000	3,7
Russia	250.000	3,5	Madagascar	3.800	3,5
Madagascar	150.000	2,1	Papua New Guinea	3.200	2,9
Papua New Guinea	51.000	0,7	Zambia	2.900	2,7
South Africa	29.000	0,4	New Caledonia	2.800	2,6
United States	23.000	0,3	South Africa	2.500	2,3
Other countries	560.000	7,9	Other countries	6.550	6
Total	7.063.000	100	Total	108.850	100

Fonte: La Monica et al., 2020.

Con quasi il 60% dell'estrazione mondiale nelle mani della Repubblica Democratica del Congo, l'estrazione mondiale di questo elemento chimico risulta essere molto concentrata. Il paese africano è seguito dalla Russia e da molti altri paesi, che raggiungono tutti quote estrattive non superiori al 5%. Per quanto riguarda le riserve, la R.D. Congo detiene quasi il 50% delle riserve totali, dato che sembra attribuirgli un ruolo centrale anche in futuro (La Monica et al., 2020).

Sempre nel 2017, il mercato era praticamente controllato dall'azienda Svizzera Grencore, con circa il 24% della produzione mondiale, e dalla cinese China Molybdenum (controllata dal governo), con circa il 14% della produzione mondiale (La Monica et al., 2020).

Secondo IEA, nel 2021, la domanda di cobalto è stata di circa 170 kt: circa 100 kt di questa domanda proveniva dalla produzione di batterie e, andando nello specifico, la domanda relativa alla produzione di batterie agli ioni di litio per veicoli elettrici è stata di circa 40 kt, circa il 24% del totale. La restante parte viene principalmente utilizzata per la produzione di superleghe e altri metalli.

Ancora una volta, la Cina non figura né nell'estrazione né nelle riserve ma essa detiene praticamente il monopolio assoluto in tutta la filiera del cobalto: dalle miniere (controllando indirettamente molte infrastrutture e imprese minerarie in Congo) agli impianti di lavorazione di questo elemento chimico. Si stima che circa il 70% della raffinazione e lavorazione del cobalto sia in mano ad aziende cinesi e che circa 80% della produzione mondiale di prodotti chimici a base di cobalto utilizzati per le batterie, come l'ossido o il solfato, abbia almeno uno stadio di lavorazione effettuato in Cina (Palacios et al., 2022).

L'azienda svizzera Grencore, la maggior produttrice di cobalto al mondo, nonostante la sua nazionalità, detiene strettissimi rapporti con la Cina e la maggior parte delle sue attività vengono svolte nel paese del dragone (Palacios et al., 2022).

Da sottolineare come l'attenzione pubblica, negli ultimi anni, si sia anche soffermata sull'estrazione di tale minerale in Congo. L'artigianalità dell'estrazione ne favorisce il controllo da parte di trafficanti, mafie e aziende locali senza scrupoli. Più di un'associazione umanitaria, attivista o giornalista ha dimostrato come nell'estrazione del cobalto i diritti dei lavori siano praticamente inesistenti e come sia la norma l'utilizzo di bambini. Inoltre, va evidenziato come la D.R Congo, attualmente, è controllato da una dittatura totalitaria e, per questo e per la presenza di molte gang rivali, sia un paese completamente instabile da un punto di vista politico. Nella tabella alla pagina successiva (Tabella 2.6) vengono riportati i principali problemi e rischi nella filiera produttiva del cobalto.

Tabella 2.6: problematiche inerenti alla filiera di produzione del cobalto.

Rischi per la fornitura	Problematiche
Produzione dipendente da altri materiali	Il cobalto al 98% viene prodotto come sottoprodotto di nichel e rame, il che lo rende vulnerabile alle fluttuazioni di questi mercati
Concentrazione geografica	<p>Il Congo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • produce il 66% di cobalto • è un Paese instabile • manca di infrastrutture per aumentare la produzione • vuole imporre alte royalties <p>La Cina:</p> <ul style="list-style-type: none"> • produce circa il 60% del cobalto raffinato • controlla il 70% della raffinazione mondiale • produce l'80% di prodotti chimici raffinati del cobalto • controlla indirettamente gran parte del restante 20% dei prodotti chimici raffinati
Questione etica	Il 20% delle miniere congolese utilizza lavoro minorile e non ha alcuna attenzione alla sicurezza dei lavoratori

Fonte: La Monica et al., 2020.

Come evidenziato dall'IEA, questi problemi nella filiera stanno spingendo le imprese occidentali, quali Tesla e altre, a ricercare nuove soluzioni tecnologiche al fine di ridurre la quantità di cobalto presente nelle batterie. Negli ultimi anni queste operazioni sembrano avere avuto un discreto successo e il cobalto è stato sostituito in parte dal nichel. Però, ad oggi, questo elemento chimico rimane ancora fondamentale, soprattutto nelle batterie NMC333, nelle quali rappresenta circa il 30% del totale (IEA,2022).

Nel 2021, come vedremo nel capitolo successivo la posizione cinese, in questo mercato, sembra essersi leggermente affievolita a favore di paesi europei quali la Finlandia.

2.2.5) Manganese

Anche se il manganese è ritenuto da molti meno critico e meno importante rispetto alle altre materie prime, è utile parlarne brevemente in quanto esso è molto presente nelle batterie NMC333, composte da quasi il 25% di questo metallo. Esso però è completamente assente nelle batterie LFP e NCA85, mentre nelle NMC811 è presente in quantità minore al 5%. Inoltre, si stima che solamente il 5% dell'offerta totale sia utilizzata per la produzione di batterie.

Il manganese (Mn) è un metallo paramagnetico, relativamente duro ma fragile, molto diffuso in natura soprattutto nelle rocce e nelle acque. Questo metallo ha due principali applicazioni: metallurgiche e non metallurgiche. Nelle prime il manganese è usato principalmente nella produzione di diverse leghe e dell'acciaio mentre, nelle applicazioni non metallurgiche, l'uso più importate riguarda il settore delle batterie. In

questo settore non viene usato il manganese naturale ma bensì quello di sintesi, in quanto più puro e più adatto. Ne esistono tre differenti tipi: manganese elettrolitico (EMM), biossido di manganese elettrolitico (EMD) e solfato di manganese (MS) (La Monica et al., 2020).

Il manganese è il dodicesimo minerale più presente nella crosta terrestre e la sua estrazione risulta meno concentrata e più distribuita anche se, come si può vedere dalla Tabella 2.7, il primo produttore mondiale nel 2017 era il Sud Africa, con una quota vicina al 34%.

Tabella 2.7: riserve ed estrazione mondiale di manganese suddivise per nazioni nel 2017.

Exploration			Extraction		
Reserves - Country	Tons	%	Mine production - Country	Tons	%
South Africa	200.000.000	29,5	South Africa	5.300.000	33,1
Ukraine	140.000.000	20,6	China	2.500.000	15,6
Brazil	120.000.000	17,7	Australia	2.200.000	13,8
Australia	94.000.000	13,8	Gabon	1.600.000	10
China	48.000.000	7,1	Brazil	1.200.000	7,5
India	34.000.000	5,0	India	790.000	4,9
Gabon	20.000.000	2,9	Ghana	550.000	3,4
Ghana	13.000.000	1,9	Ukraine	380.000	2,4
Kazakhstan	5.000.000	0,7	Malaysia	270.000	1,7
Mexico	5.000.000	0,7	Other countries	1.210.000	7,6
Total	679.000.000	100,0	Total	16.000.000	100

Fonte: La Monica et al., 2020.

Il secondo produttore mondiale è la Cina, con una quota del 15%, seguita da molti paesi con quote minori ma comunque più equamente distribuite rispetto a cobalto, litio e grafite (La Monica et al., 2020).

I timori riguardanti la produzione di batterie non derivano dalla sua scarsità o dalla concentrazione dell'estrazione, ma bensì dalla purezza e dalle lavorazioni necessarie (Palacios et al., 2022). Nel 2017 si stima che il manganese puro rappresentava solo il 10% dell'intero mercato ma pesava per circa il 40% in termini di valore. La Cina detiene la stragrande maggioranza del mercato della raffinazione, arrivando a detenere circa il 97% del commercio del manganese EMM. Questo rischio è ulteriormente aggravato dal fatto che circa il 50% della produzione globale proviene da due soli produttori cinesi, l'azienda Ningxia Tianyuan Manganese Industry e la Citic Dameng (La Monica et al., 2020). Altri

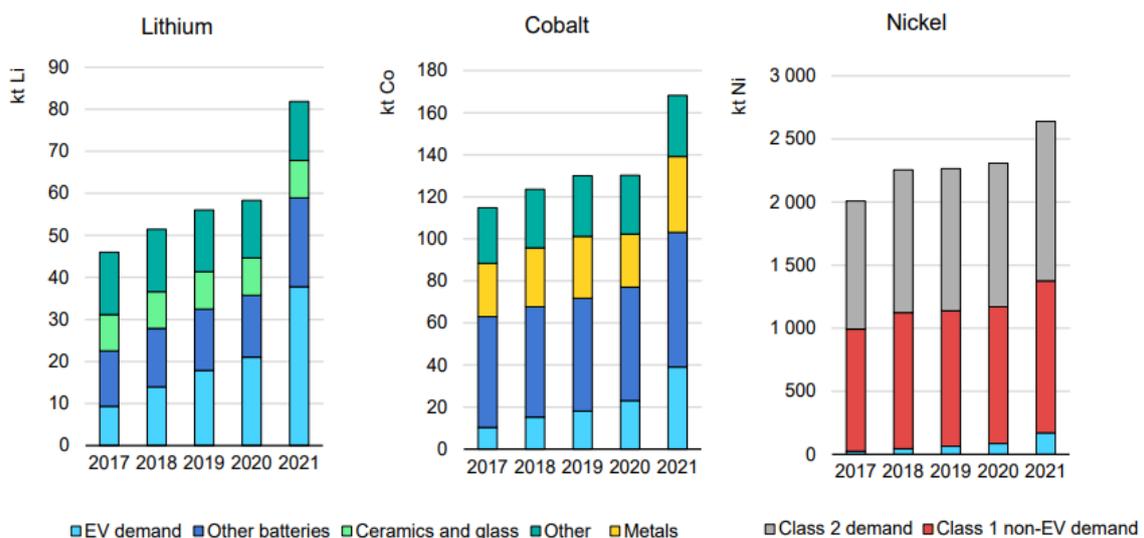
due fattori di rischio sono la diminuzione della purezza del manganese proveniente dalla Cina e le nuove normative ambientali cinesi, più restrittive in alcuni passaggi nel processo di raffinazione, ritenuti da molti estremamente inquinanti e pericolosi (La Monica et al., 2020).

Tutti questi fattori potrebbero portare ad un aumento del prezzo ma questo, teoricamente, influirebbe relativamente poco sul costo finale delle batterie in quanto, come detto in precedenza, questo minerale è meno influente (La Monica et al., 2020).

2.3) La domanda di litio, cobalto e nichel

Ma la domanda di questi minerali è effettivamente tirata dalla domanda di batterie per i veicoli elettrici? Il grafico sotto (Grafico 2.4) da un'idea su quale potrebbe essere la risposta a questa quesito.

Grafico 2.4: domanda mondiale di litio, cobalto e nichel, 2017-2021.



Fonte: IEA, 2022.

Esso descrive la domanda di litio, cobalto e nichel dal 2017 al 2021. Il grafico conferma quanto affermato nel Sottoparagrafo 2.2.2: la domanda di litio derivante dagli EV è passata da circa il 20% della domanda totale a oltre il 47%, con quasi 40 chilotonnellate (kt) totali nel 2021. Se la domanda di EV continuerà ad aumentare, come è previsto che faccia, è molto probabile che l'importanza dei veicoli elettrici, in questo mercato, continuerà a crescere (IEA, 2022).

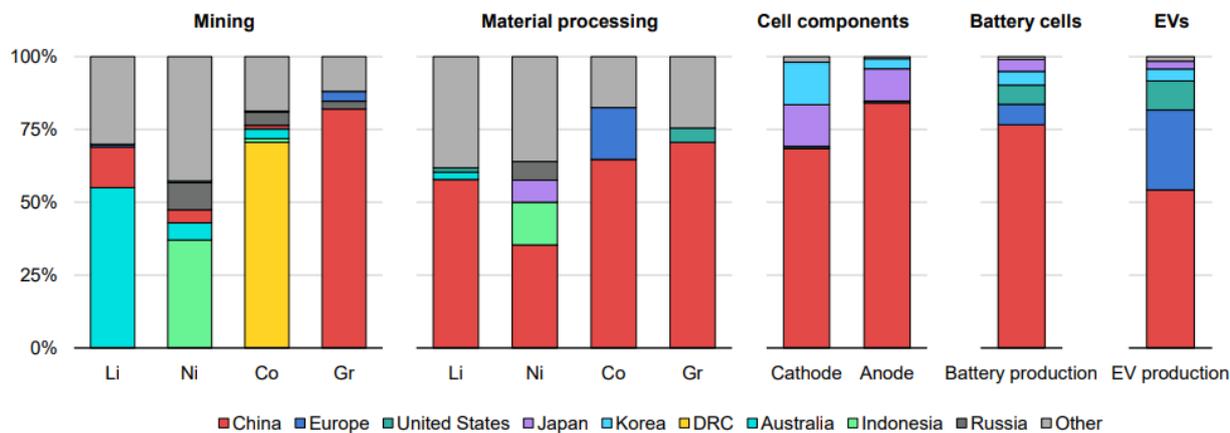
Meno marcata e decisa invece è la domanda di cobalto proveniente da questa tipologia di veicoli. Nonostante ciò, essa ha fatto registrare un incremento notevole arrivando al 24% nel 2021, rispetto al 18% dell'anno precedente (IEA, 2022).

Differente invece la composizione della domanda di nichel: come detto nell'apposito sottoparagrafo, questo mercato è molto influenzato dal settore siderurgico anche se va fatto notare come, la domanda relativa agli EV, è in crescita ed è passata dal 4% nel 2020 al 7% nel 2021. Il settore rimane comunque prevalentemente trainato dalla domanda proveniente dalle acciaierie e dalle fonderie (IEA, 2022).

2.4) Il dominio cinese

Come visto precedentemente, la domanda di minerali per le batterie è in crescita e si può affermare che, attualmente, è un singolo paese a detenere il controllo della *supply chain* delle batterie dei veicoli elettrici. Il grafico a barre sotto (Grafico 2.5) evidenzia la situazione attuale, descrivendo la distribuzione geografica nelle fasi di produzione nel 2021.

Grafico 2.5: distribuzione geografica supply chain delle batterie dei veicoli elettrici.



Notes: Li = lithium; Ni = nickel; Co = cobalt; Gr = graphite; DRC = Democratic Republic of Congo. Geographical breakdown refers to the country where the production occurs. Mining is based on production data. Material processing is based on refining production capacity data. Cell component production is based on cathode and anode material production capacity data. Battery cell production is based on battery cell production capacity data. EV production is based on EV production data. Although Indonesia produces around 40% of total nickel, little of this is currently used in the EV battery supply chain. The largest Class 1 battery-grade nickel producers are Russia, Canada and Australia.

Fonte: IEA, 2022.

È evidente come sia la Cina a dominare ogni fase della *supply chain* delle batterie per veicoli elettrici. Infatti, il paese del dragone detiene il monopolio assoluto nella filiera della grafite, con circa il 75% del *mining* e del *material processing* di questo minerale. Per quanto riguarda l'estrazione di litio, nichel e cobalto, la posizione cinese risulta essere

nettamente inferiore in quanto, queste materie prime, sono presenti solo in piccole quantità nel suo territorio. Essa però detiene anche grossa parte delle lavorazioni e raffinazioni del litio e cobalto, con quote attorno al 60%. Il nichel, come detto precedentemente, sembra avere una filiera più equilibrata e meno monopolizzata anche se la Cina, nel 2021, si è resa responsabile di circa il 30% delle lavorazioni mondiali (IEA, 2022).

Il colosso asiatico sembra monopolizzare anche la produzione di celle e, di conseguenza, la produzione finale di batterie, detenendo circa il 75% della produzione mondiale di catodi e 85% della produzione mondiale di anodi. Da sottolineare come essa controlla completamente tutta la filiera di questi ultimi, in quanto principalmente composti da grafite.

Andando ad analizzare gli altri paesi, si può vedere come l'Europa è responsabile di oltre un quarto della produzione di veicoli elettrici ma detiene molto poco della catena di fornitura a valle. Il vecchio continente deve importare la stragrande maggioranza delle materie prime, non avendo siti di estrazione rilevanti e, per quanto riguarda le lavorazioni, l'unica voce positiva è il cobalto, con circa il 20% a livello mondiale. Queste attività di lavorazione e raffinazione vengono svolte principalmente in Finlandia. La quota europea nella produzione dei componenti e batterie finite è quasi irrilevante, in quanto non raggiunge neanche il 5% a livello mondiale (IEA, 2022).

Nonostante l'azienda statunitense Tesla sia la seconda produttrice mondiale di auto elettriche, gli Stati Uniti hanno un ruolo minore nella catena di fornitura globale di batterie per veicoli elettrici, con solo il 7% della produzione mondiale di batterie finite (IEA, 2022).

Sia la Corea che il Giappone hanno quote importanti della filiera a monte degli EV: la prima produce circa il 15% e il 3% dei catodi e degli anodi a livello mondiale, mentre il Giappone rappresenta rispettivamente il 14% e l'11% di queste produzioni (IEA, 2022).

Per quanto riguarda l'estrazione di materie prime, i metalli delle batterie sono altamente concentrati geograficamente e, quindi, maggiormente soggetti a shock e a oligopoli. Più della metà del litio mondiale è prodotto in Australia e il 70% del cobalto mondiale è prodotto nella R.D. Congo. Per il nichel, invece, è l'Indonesia a detenere la maggior parte dell'estrazione mondiale, ma si tratta prevalentemente di nichel classe 2, poco utilizzabile per la produzione di batterie. Attualmente la Russia è il terzo estrattore

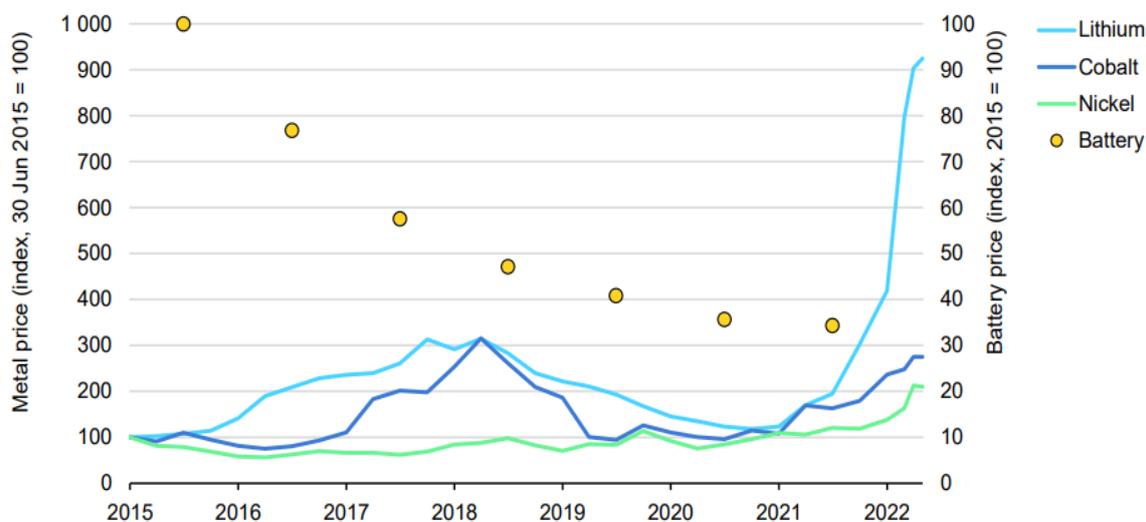
mondiale di nichel e la più grande produttrice mondiale di nichel di classe 1 (il più puro e il più utilizzato per la produzione di batterie), con circa il 20% dell'offerta globale (IEA, 2022).

Per concludere si può affermare che la Cina è responsabile di circa il 75% della produzione mondiale di celle per batterie, dato che la rende indiscutibilmente in una posizione di forza, attuale e probabilmente futura, rispetto a paesi come Stati Uniti ed Europa, completamente dipendenti dal colosso asiatico.

2.5) Le conseguenze sul prezzo

Lo strapotere cinese e la dipendenza quasi totale dei paesi occidentali, insieme ad altri fattori di incertezza hanno portato a problematiche e instabilità nei mercati delle materie prime. Questo fenomeno si può osservare nell'andamento dei prezzi, descritto nel Grafico 2.6.

Grafico 2.6: andamento del prezzo delle batterie e dei principali minerali che le compongono, 2015-2022.



Fonte: IEA, 2022.

Il grafico indicizza i prezzi di litio, cobalto e nichel dal 2015 a fine maggio 2022. Come si nota immediatamente, i prezzi sono abbastanza volatili: le oscillazioni sono molte e in più spesso, come nel 2022, l'aumento è molto significativo. A inizio 2021 il prezzo di questi minerali era più o meno in linea con l'anno 2015 (l'indice era circa 100), ma a maggio 2022 il litio arrivò a costare anche 9 volte di più, il cobalto era quasi triplicato e il nichel più che raddoppiato. Questo aumento senza precedenti è frutto dell'incremento

della domanda, dell'aumento della pressione sulla *supply chain* e le conseguenti preoccupazioni sulla fornitura di questi elementi chimici. Andando nel dettaglio, secondo IEA, lo squilibrio tra domanda e offerta è stato causato da tre principali fattori: il blocco delle forniture dovuto ai frequenti e lunghi lockdown cinesi, le preoccupazioni per lo scoppio della guerra in Ucraina e la scarsità di investimenti nel triennio precedente al 2021, quando il prezzo era ancora basso. Quest'ultimo aspetto è stato particolarmente significativo in quanto alcuni produttori hanno posticipato o addirittura cancellato numerosi investimenti. Inoltre, per esempio, nel 2019 la compagnia mineraria australiana Galaxy Resources ha ridotto l'estrazione di litio di circa il 40% (IEA, 2022).

Mentre il cobalto aveva già raggiunto prezzi simili nel 2017 a causa di una bolla economica dovuta al troppo ottimismo sulla domanda futura di batterie, il litio ha toccato il suo massimo storico, arrivato a triplicare il valore raggiunto nel 2017 (IEA, 2022).

Il nichel, invece, ha subito un ulteriore aumento in quanto è stato influenzato dallo scoppio della guerra in Ucraina. Le preoccupazioni per le sanzioni occidentali e un attacco speculativo effettuato da una multinazionale cinese hanno fatto sì che, il prezzo medio per una tonnellata di nichel di classe 1, sia passato da 18.500 USD a inizio 2021, a circa 100.000 USD a fine 2022, raggiungendo il suo apice storico (IEA, 2022).

I prezzi elevati possono portare, nel lungo termine, ad effetti positivi quali l'aumento degli investimenti, al fine di riequilibrare domanda e offerta. Ad esempio, da quando nel 2020 i prezzi hanno iniziato a salire, gli investimenti in questi settori sono aumentati a dismisura e si stima che, le attività di perforazione e ricerca di nuovi siti, siano aumentate di circa il 50% (IEA, 2022).

Nonostante questo aumento nel costo delle materie prime, il costo totale delle batterie è continuato a diminuire. Secondo un'indagine svolta dall'IEA, tra il 2019 e il 2020 il prezzo è calato di circa il 13% e, nell'anno successivo, il prezzo medio delle batterie ponderato per le vendite era di 132 USD/kWh., facendo così registrare una diminuzione del 6% rispetto al 2020. Questo fenomeno è in parte imputabile al fatto che, l'aumento dei prezzi delle materie prime ha incentivato la sostituzione di alcuni elementi chimici più costosi e maggiormente soggetti a oligopoli. Ad esempio, molte case automobilistiche hanno sostituito le batterie con catodo prevalentemente a base di nichel (NMC e NCA) con le batterie LFP, con catodo composto esclusivamente da ferro, litio e fosforo. Su altri modelli, invece, le case automobilistiche hanno sostituito le batterie

NCA85 e NCM333, contenenti grossi quantitativi di cobalto, con le batterie di tipo NMC811. Queste ultime rimpiazzano, in parte, il manganese e il cobalto con il nichel (IEA,2022).

Tuttavia, questo fenomeno è da imputare principalmente al fatto che i prezzi delle materie prime sono rimasti relativamente bassi per tutta la prima metà del 2021. Ciò comporta un aumento dei prezzi delle batterie concluse che potrebbe non essersi ancora manifestato. Inoltre, generalmente, le case automobilistiche acquistano grosse quantità di materie prime con contratti collegati ai relativi prezzi. Questo implica un time lag tra il costo delle batterie e il costo delle materie prime. Se i prezzi di questi elementi chimici dovessero rimanere in linea con quelli fatti registrare nel 2022, il prezzo medio ponderato delle batterie potrebbe anche aumentare del 15% su base annua (IEA, 2022).

2.6) Le politiche per mitigare il monopolio cinese

Come visto precedentemente, il controllo del mercato delle batterie si sta giocando sull'approvvigionamento delle materie prime e, a valle di questo processo, sulla produzione finale di celle.

La loro fabbricazione avviene nelle cosiddette *gigafactory*, termine derivante dall'inglese che significa letteralmente fabbriche di grandi dimensioni. Esso è stato adottato inizialmente per definire le fabbriche di batterie agli ioni di litio di Tesla, la quale è stata la prima casa automobilistica a sviluppare questo tipo di stabilimenti, in grado di sfruttare economie di scala e altri vantaggi. Successivamente, quando altri produttori sono entrati nel mercato dei veicoli elettrici, questo termine è stato, ed è tutt'ora, utilizzato per tutte le fabbriche produttrici di batterie in questo settore. Attualmente, la più grossa si trova in Nevada ed è di proprietà di Tesla ma, ancora una volta, è la Cina a detenere gran parte della capacità produttiva a livello mondiale, misurata in GWh (gigawatt/ora). Infatti, nell'area di Shanghai, c'è un'alta concentrazione di queste fabbriche in parte di proprietà di Tesla, la quale ha annunciato l'ampliamento delle capacità produttiva di alcune di esse e, in parte, di vari fornitori di BYD, il colosso cinese primo produttore al mondo di veicoli elettrici.

Ma che politiche stanno attuando Stati Uniti ed Europa per ridurre la loro dipendenza dalla Cina?

Partendo dagli Stati Uniti, l'ultimo piano di investimenti varato è l'*Inflation Reduction Act*, definito con l'acronimo IRA e voluto fortemente dalla presidenza Biden.

Come dice il nome, questo provvedimento è nato per ridurre l'inflazione e ha un valore di circa 738 miliardi ma, al suo interno, sono stati stanziati circa 391 miliardi di dollari a favore della lotta al cambiamento climatico e al passaggio alle energie rinnovabili. Ovviamente, questi investimenti contengono alcuni provvedimenti volti a ridurre drasticamente il dominio cinese. Il più importante e discusso è una particolare formula di incentivi all'acquisto, i quali arrivano fino a 7500 dollari a veicolo elettrico. Tuttavia, il mezzo di trasporto elettrico acquistato deve soddisfare due requisiti fondamentali: il "contenuto locale" per i materiali critici e per i componenti della batteria (Re, 2023). Per soddisfare il primo requisito, materie prime come litio e cobalto dovranno essere estratte o lavorate per almeno il 40% del loro valore negli Stati Uniti. In alternativa, con la stessa percentuale di valore, esse possono essere riciclate in Nord America o provenire da paesi che hanno siglato con gli USA degli accordi di libero scambio. Questa percentuale aumenterà del 10% annuo, arrivando ad un massimo dell'80% nel 2027. Per quanto riguarda i componenti delle batterie, invece, si prevede che almeno il 50% del loro valore complessivo sia prodotto o assemblato in Nord America. Anche in questo caso, la percentuale salirà anno dopo anno, fino ad arrivare al 100 % nel 2029. I veicoli che rispettano questi due requisiti verranno inseriti in una speciale lista, la quale certifica il "contenuto locale" di tutta la filiera di produzione (Re, 2023). Il piano sicuramente è molto ambizioso e visto l'attuale dipendenza dalla Cina, che ovviamente rimarrebbe esclusa dai paesi fornitori, è difficilmente realizzabile. Però va evidenziato come, nella nota del Tesoro che definisce i dettagli, si sia usata una terminologia vaga e aperta a possibili cambiamenti da attuare nell'eventuale caso che queste politiche risultino eccessivamente restrittive (Re, 2023).

Per quanto riguarda l'Unione europea (UE), invece, non può non essere nominato il Next Generation Eu, il fondo istituito dal Consiglio europeo con lo scopo principale di permettere, agli Stati membri, di superare lo shock economico causato nel 2020 dalla pandemia di Covid19. Il valore totale è di 750 miliardi e circa il 30% di essi verranno utilizzati per la lotta al cambiamento climatico e il sostegno ai progetti *green*. Anche se gli Stati membri hanno la facoltà di spenderli in modi differenti, tutte le politiche di spesa sono sottoposte a determinati vincoli e all'approvazione degli organi comunitari. Per questo va evidenziato come molte risorse saranno spese nel settore dei veicoli elettrici e,

sicuramente, rientreranno in questo piano anche politiche volte a ridurre la dipendenza dalla Cina.

Tuttavia, il pacchetto di misure che sembrerebbe essere un vero punto di svolta nella lotta alla dipendenza cinese è il *Critical Raw Materials Act*. Approvato nel settembre 2022, questo provvedimento ha come obiettivo principale quello di garantire l'approvvigionamento "sicuro, diversificato e sostenibile" delle materie prime ritenute critiche per la futura sostenibilità ambientale e, di conseguenza, per la produzione di veicoli elettrici. Andando nello specifico, gli obiettivi da raggiungere entro il 2030 sono quattro (Commissione europea, 2023):

- almeno il 10% delle materie prime critiche consumate nell'UE dovrà essere estratto da miniere europee;
- almeno il 40% delle materie prime critiche consumate nell'UE dovranno essere lavorate in Europa;
- almeno il 15% delle materie prime critiche consumate nell'UE dovrà essere fornito da attività di riciclo;
- non più del 65% del consumo annuale di ogni materia prima strategica potrà essere soddisfatto da un singolo paese terzo fornitore.

Per raggiungere tali obiettivi, gli interventi sono molti e ovviamente su più fronti. I principali e più interessanti possono essere riassunti nei seguenti punti (Circular Economy Network, 2023):

- semplificazione e velocizzazione delle pratiche di implementazione e sviluppo dei progetti estrattivi, con una riduzione drastica delle tempistiche di rilascio dei permessi di estrazione, trasformazione e riciclaggio;
- semplificazione degli iter normativi per le aziende del settore che vorranno ottenere finanziamenti;
- maggior coordinamento tra gli stati;
- ricerca e formazione al fine di sviluppare e incrementare le competenze necessarie;
- diversificazione dei partner commerciali e stipula di nuovi accordi di scambio.

Questi due pacchetti, insieme a molte altre misure, secondo un'analisi svolta a inizio 2023 dal sito web Transport & Environment, dovrebbero portare ad un netto miglioramento della situazione. Nello specifico, il sito prevede che, entro il 2027, UE sarà in grado di

assemblare il 100% delle celle e di produrre il 67% dei catodi necessari al soddisfacimento della domanda interna. Inoltre, il sito prevede che l'Unione europea sarà in grado di lavorare il 50% del litio necessario al suo fabbisogno e di incrementare considerevolmente i tassi di riciclo di cobalto, nichel e litio.

Insomma, visto l'attuale grado di dipendenza si può affermare che, nonostante queste previsioni ottimistiche e le politiche messe in atto, il cammino verso la riduzione della dipendenza dalla Cina, sia per l'Unione europea che per gli Stati Uniti, è rischioso, difficile e sicuramente dal risultato molto incerto. Inoltre, molti esperti pongono l'accento sulle recenti tensioni tra i paesi occidentali e la Cina e, sicuramente, si può facilmente intuire come, queste politiche messe in atto sul breve e medio periodo, potranno creare nuove tensioni e innescare ritorsioni politiche e economiche da parte del paese del drago.

Va sottolineato anche come, le materie prime approfondite in questo capitolo, non sono le uniche indispensabili e soggette al monopolio cinese. Di particolare rilevanza e rilievo sono le terre rare, elementi chimici molto discussi e al centro del dibattito mondiale. Nel capitolo successivo verranno analizzati i loro utilizzi e il loro mercato.

CAPITOLO 3 – Un focus sulle terre rare

3.1) Le terre rare

In un'economia che dovrebbe avviarsi verso la transizione ecologica e verso il passaggio dai veicoli a combustione a quelli elettrici, si è sentito molto parlare delle terre rare. Secondo l'opinione di molti esperti e scienziati questi elementi sono indispensabili per un futuro green e a basse emissioni di gas serra. Attualmente li possiamo trovare in quasi tutti i *devices* elettronici, nei veicoli elettrici e in migliaia di altri usi. Ma quali sono questi elementi?

Differentemente da quanto si possa pensare, le terre rare non sono rare. Tale nome esprime molto di più la loro storia e non le effettive quantità che possiamo trovare nella crosta terrestre. La loro scoperta risale al 1788 quando un minatore a Ytterby, in Svezia, trovò uno strato nero di roccia e questo venne identificato, nel 1794, come un nuovo tipo di "terra". Poiché questo nuovo tipo di elemento non era stato trovato da nessun'altra parte, si dedusse che esso fosse scarso e da ciò derivò il nome "terre rare". Questo termine è arrivato fino a giorni nostri, perdurando per più di 200 anni (Klinger, 2017).

Questi elementi chimici fanno parte della serie dei lantanidi e, sin dalla loro scoperta, gli elementi inclusi nella dicitura "terre rare" sono stati incerti e variabili a seconda dell'interpretazione che si dà a questo termine. Ad esempio, durante la corsa alla realizzazione della bomba nucleare, l'uranio è stato indicato come elemento rientrante in questa dicitura, a causa della sua affiliazione chimica e delle frequenti coincidenze geologiche (Klinger, 2017). Tutt'oggi non è pacifico se essi siano 16 o 17, in quanto lo scandio è da molti ritenuto un elemento non appartenente a tale gruppo. Al fine di essere il più chiaro possibile, mi allineerò alla visione dello IUPAC (Unione Internazionale Di Chimica Pura e Applicata), che considera nella sua definizione anche lo scandio, arrivando quindi a 17 elementi.

Nella Figura 3.1 (pagine successiva), è raffigurata la tavola periodica con un focus su questi elementi, evidenziati in rosso.

Figura 3.1: tavola periodica con focus sulle terre rare.

The image shows a standard periodic table with the rare earth elements highlighted. A red box encloses Scandium (Sc), Yttrium (Y), and Lanthanum (La) in the main body of the table. A second red box encloses the entire Lanthanide series (Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) in the separate row below. The rest of the periodic table is shown in a standard color-coded layout.

Fonte: Boromeo, 2021.

Come si può vedere dall’immagine, essi possono essere divisi in tre famiglie: scandio (Sc), ittrio (Y) e lantanoidi (La). Questa ultima comprende circa 15 elementi che, come vedremo in seguito, sono quelli più comunemente presenti nelle tecnologie green (Boromeo, 2021).

Generalmente le terre rare vengono anche definite con la sigla REE, acronimo del termine inglese *rare earth elements*. Esse, sulla base del loro peso atomico e del loro utilizzo, vengono suddivise in due macrogruppi: le terre rare leggere e le terre rare pesanti (Wübbeke, 2016). Le prime vengono spesso riportate con l’acronimo LREE (*Light Rare Earth Elements*), mentre le seconde con l’acronimo HREE (*Heavy Rare Earth Elements*). Nella tabella alla pagina successiva (Tabella 3.1) è riportata tale suddivisione, il loro nome, il numero atomico e il simbolo chimico che li rappresenta.

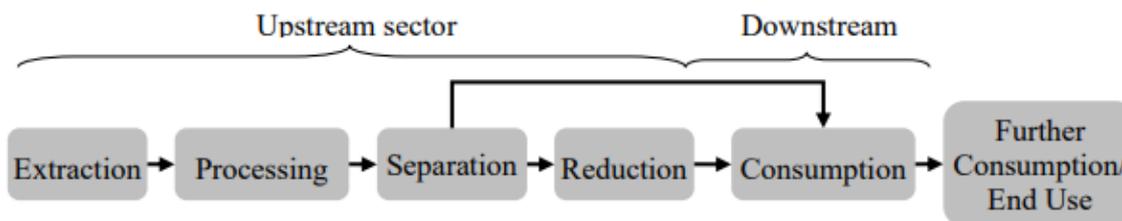
Tabella 3.1: suddivisione per peso atomico delle terre rare.

	Element	Atomic Number	Symbol		Element	Atomic Number	Symbol
LREE	Lanthanum	57	La	HREE	Terbium	65	Tb
	Cerium	58	Ce		Dysprosium	66	Dy
	Praseodymium	59	Pr		Holmium	67	Ho
	Neodymium	60	Nd		Erbium	68	Er
	Promethium	61	Pm		Thulium	69	Tm
	Samarium	62	Sm		Ytterbium	70	Yb
	Europium	63	Eu		Lutetium	71	Lu
	Gadolinium	64	Gd		Scandium	21	Sc
					Yttrium	39	Y

Fonte: Wukkube, 2016.

Per capire appieno i paragrafi successivi, è utile fare qualche cenno alla catena del valore di questi elementi. Essa può essere descritta, in maniera semplificata, con la Figura 3.2.

Figura 3.2: catena del valore semplificata delle terre rare.



Fonte: Wukkube, 2016.

Dopo l'estrazione, gli elementi vengono processati e successivamente separati e liberati dai metalli e dalle terre estrattive. La metodologia utilizzata dipende molto dal tipo e dalla natura del deposito, del recupero di altri minerali preziosi e dalla percentuale di terre rare presenti. Comunque, solitamente, in quasi tutti i casi questo procedimento viene effettuato tramite separazione magnetica o flottazione. Successivamente si effettua un trattamento chimico che purifica ulteriormente il concentrato di REE. I prodotti principali che escono da queste prime due fasi sono definiti chimicamente come ossidi, solfati e cloruri di terre rare. Essi sono molto diversi e il loro utilizzo varia molto a seconda dell'applicazione finale (Wübbecke, 2016).

Come vedremo nei paragrafi successivi, questi elementi sono indispensabili per le tecnologie green. Al fine di questa applicazione, le REE devono raggiungere un elevato grado di purezza e ciò avviene tramite la fase di riduzione. Gli ossidi, i solfati e i cloruri

vengono ridotti chimicamente tramite estrazione elettrica o riduzione termica. Con quest'ultima fase si può arrivare a minerali puri al 99,9% (Wübbecke, 2016).

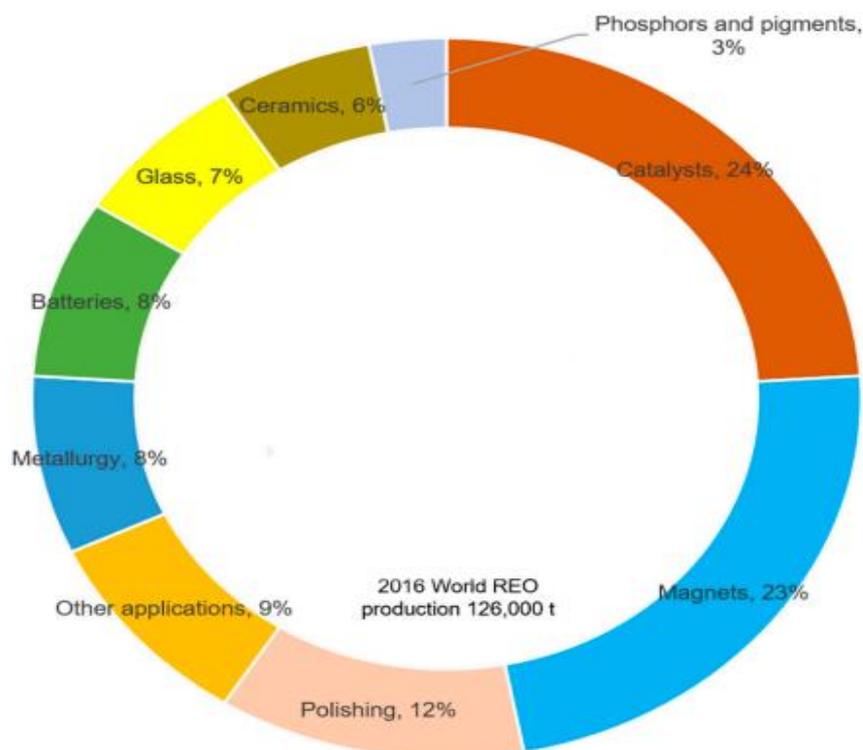
Successivamente questi elementi chimici sono pronti per l'utilizzo in diversi specifici settori, che verranno analizzati nel paragrafo successivo.

3.2) L'utilizzo delle terre rare nei veicoli elettrici

Spesso si sente dire che queste terre rare siano ovunque e, anche se non ce ne accorgiamo, fanno parte della nostra vita quotidiana. Ma è effettivamente così?

Per rispondere a questa domanda, si può partire dall'osservazione del Grafico 3.1, il quale analizza il consumo globale, suddiviso in settori, delle terre rare nel 2016.

Grafico 3.1: consumo mondiale di terre rare suddiviso per settori nel 2016.



Fonte: Zhou et al., 2017.

Come si può dedurre dal grafico, le REE hanno eccellenti proprietà elettriche, magnetiche, catalitiche e ottiche. Il consumo globale nel 2016 è stato stimato in circa 126.000 tonnellate. Gli autori del grafico, al fine di fornire una visione più accurata, hanno suddiviso il consumo di esse in nove settori: catalizzatori, magneti, metallurgia, vetro, batterie, ceramica, lucidanti e altri. Il settore dei catalizzatori e dei magneti insieme vanno

a coprire quasi il 50% della domanda globale, seguiti da altri settori come i lucidanti e la metallurgia. Da segnalare come il settore delle batterie pesi per circa 8% totale del consumo globale.

Andando ad analizzare nel dettaglio gli utilizzi elemento per elemento, possiamo notare come essi siano presenti in oggetti molto comuni e diffusi nella vita di tutti i giorni.

Tabella 3.2: utilizzo terre rare per elemento.

REE	Application
Lanthanum (La)	Battery alloys, metal alloys, auto catalysts, petroleum refining, polishing powders, glass additives, phosphors, ceramics, and optics
Cerium (Ce)	Battery alloys, metal alloys, auto catalysts (emissions control), petroleum refining, polishing powders, glass additives, phosphors, and ceramics
Praseodymium (Pr)	Battery alloys, metal alloys, auto catalysts, polishing powders, glass additives, and coloring ceramics
Neodymium (Nd)	Permanent magnets, battery alloys, metal alloys, auto catalysts, glass additives, and ceramics
Promethium (Pr)*	Watches, pacemakers, and research
Samarium (Sm)	Magnets, ceramics, and radiation treatment (cancer)
Europium (Eu)	Phosphors
Gadolinium (Gd)	Ceramics, nuclear energy, and medical (magnetic resonance imaging, X-rays)
Terbium (Tb)	Fluorescent lamp phosphors, magnets especially for high temperatures, and defense
Dysprosium (Dy)	Permanent magnets
Holmium (Ho)	Permanent magnets, nuclear energy, and microwave equipment
Erbium (Er)	Nuclear energy, fiber optic communications, and glass coloring
Thulium (Tm)	X-rays (medical) and lasers
Ytterbium (Yb)	Cancer treatment and stainless steel
Lutetium (Lu)	Age determination and petroleum refining
Yttrium (Y)	Battery alloys, phosphors, and ceramics
Scandium (Sc)	High strength, low weight aluminum scandium alloys

Fonte: Pezzalli, 2019.

Come si evince dal grafico e dalla tabella sopra, questi elementi risultano indispensabili nella transizione da un'economia basata sui combustibili fossili ad un'economia green e sostenibile. Essi, infatti, risultano fondamentali nella produzione dei magneti permanenti delle turbine eoliche, nei magneti permanenti dei motori dei veicoli elettrici, nelle batterie NiMH (nichel-metallo idruro) per i veicoli elettrici e nei convertitori catalitici.

Si stima che questi prodotti, insieme ai tipi più comuni di lampadine, abbiano richiesto circa 35k tonnellate nel 2016, quasi un terzo del totale (Zhou et al., 2017).

La stima delle quantità presenti in questo tipo di applicazioni è riportata nella tabella sotto (Tabella 3.3).

Tabella 3.3: quantità terre rare presenti nelle principali tecnologie green.

Application	La (kg)	Ce (kg)	Nd (kg)	Eu (kg)	Tb (kg)	Dy (kg)	Y (kg)
Wind turbines (/WM)			120			12	
Electric vehicles (/motor)			0.45			0.075	
Electric bicycles (/motor)			0.038			0.031	
NiMH battery (/battery)	0.61	0.86	0.255				
CFL (/bulb)	0.0000765	0.00018		0.0000405	0.000045		0.000558
LFL (/bulb)	0.000462	0.000137		0.0000945	0.000105		0.0013
LED (/bulb)				0.0000004			0.000005
Catalytic converter (/auto)		0.02					

Fonte: Zhou et al., 2017.

Nelle batterie NiMH, le terre rare necessarie alla produzione di una singola batteria sono consistenti: si stima che occorrono circa 0,61 kg di lantanio (La), 0,86 kg di cerio (Ce) e 0,255 kg di neodimio (Nd). Tutti questi elementi sono principalmente presenti nell'anodo, mentre il catodo contiene solitamente una quantità di ittrio relativamente trascurabile (Zhou et al., 2017). Come detto nel capitolo 2, la tendenza sembra essere nettamente indirizzata al passaggio dalle batterie NiMH a quelle agli ioni di litio. Questo fenomeno in corso è evidenziato dal fatto che si è assistito, tra il 2010 e il 2020, a una diminuzione del 50% di veicoli alimentati a batterie NiMH presenti in circolazione in Europa (Silvestri et al., 2021). Nonostante ciò, questo tipo di batterie oggi sono utilizzate, da molte case automobilistiche, nei modelli *hybrid*. Un esempio lampante è la Toyota, che monta questo tipo di batterie nei modelli Yaris e Prius e che sta investendo molto nello sviluppo di veicoli *plug-in hybrid* (PHEV). Sulla Toyota Prius si stima addirittura che, le terre rare utilizzate, ammontino a circa 2,5 kg totali (Silvestri et al., 2021). Secondo molti questa tendenza sostitutiva continuerà in futuro ma, le batterie NiMH, rimarranno molto utilizzate nel prossimo decennio. Da sottolineare come, nelle batterie agli ioni di litio (Li-ion), non siamo presenti terre rare (Silvestri et al., 2021).

Tuttavia, questi elementi chimici attualmente risultano fondamentali nella costruzione dei magneti permanenti, necessari al funzionamento dei motori a propulsione elettrica. Si stima che, per ogni motore elettrico prodotto, siano necessari circa 0,45 kg di neodimio (Nd) e circa 0,075 kg di disprosio (Dy). Le quantità non sono incredibilmente

elevate ma, al momento, questi elementi sono insostituibili e quindi si prevede che giocheranno un ruolo chiave in futuro (Zhou et al., 2017).

Da segnalare anche che i catalizzatori dei veicoli contengono circa 0,02 kg di cerio (Ce). La quantità è abbastanza ridotta ma essa contribuisce a portare, insieme ai catalizzatori industriali, la domanda di terre rare dei catalizzatori al 24%, facendone il settore che richiedeva più terre rare nel 2016 (Zhou et al., 2017).

Come affermato da molti autori, le terre rare hanno un mercato relativamente piccolo comparato a quello dei minerali e metalli descritti nel capitolo precedente. Tali elementi però, come appena visto, risultano indispensabili per la transizione ecologica e, come vedremo in seguito, la catena di approvvigionamento è sostanzialmente nelle mani di un unico player mondiale che ne controlla il prezzo e le quantità presenti sul mercato. Prima però è utile analizzare la previsione della domanda futura, al fine di comprendere appieno la direzione e l'importanza di queste materie prime.

3.3) La previsione della domanda

La domanda di terre rare, nei prossimi anni, sarà ampiamente influenzata dalla diffusione delle tecnologie green. Gli autori di questa previsione (Zhou et al., 2017), al fine di calcolare la domanda futura di REE proveniente da queste tecnologie, hanno fatto assunzioni e semplificazioni rilevanti. Infatti, le stime sono state effettuate prendendo a riferimento i dati fatti registrare nel 2016 e supponendo che la quota di vendita, consumo e installazione annua dei principali prodotti green, che contengono REE, sarà quella riportata nella tabella sotto (Tabella 3.4).

Tabella 3.4: previsione della domanda di tecnologie green, 2016-2030.

Year	Wind Power (MW)	Lighting			Electric Vehicles		Batteries	Catalytic Converter
		LFL	CFL	LED	Electric Cars	Electric Bicycles	NiMH Batteries	
		(Million Cps)			(Car)		(Battery)	
2016	63,350	2142	2903	2675	750,000	35,000,000	580,125	95
2020	79,005	1604	1491	4828	2,140,000	35,500,000	1,251,900	100
2025	76,810	1116	662	5874	7,953,375	36,200,000	715,803	111
2030	107,488	776	294	7146	29,530,323	37,000,000	2,657,729	117

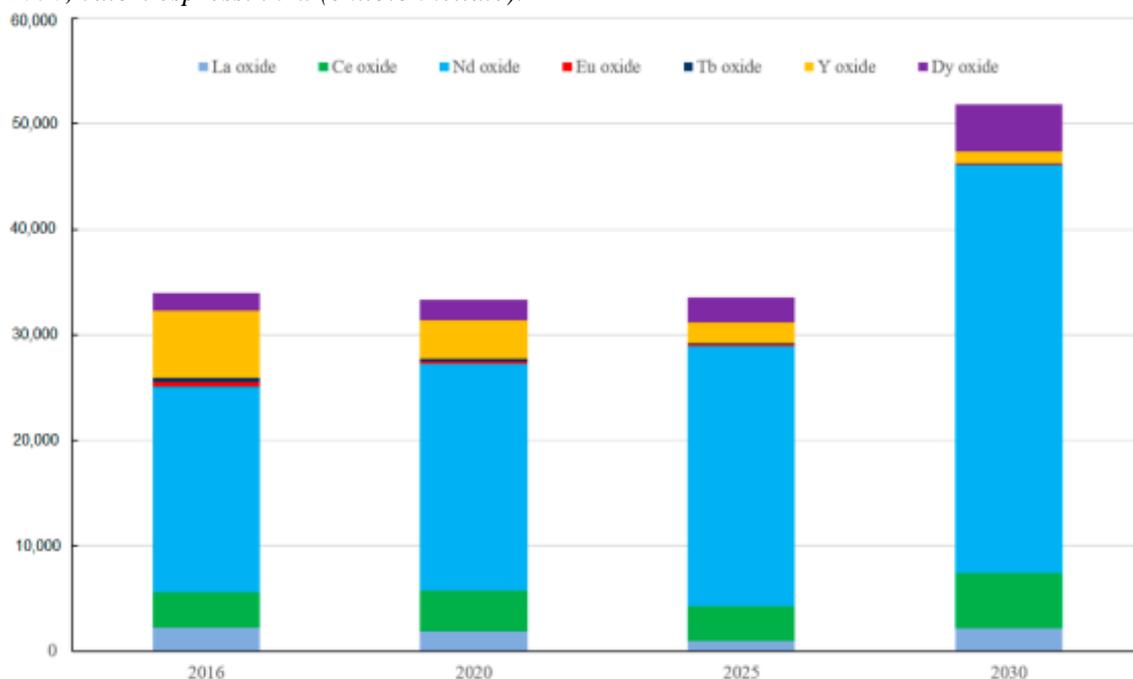
Fonte: Zhou et al., 2017.

Le voci di maggior peso e influenza sono l'energia eolica, i veicoli elettrici e le relative batterie NiMH. Per quanto riguarda le prime, la potenza eolica installata annualmente dovrebbe aumentare da 63.350 MW (Megawatt) nel 2016 a 107.488 MW nel 2030,

ipotizzando quindi che la quota di mercato delle turbine eoliche aumenterà del 5% ogni 5 anni e che il 50% di esse usino magneti permanenti contenenti REE (Zhou et al., 2017). Per quanto riguarda invece le immatricolazioni di nuove auto elettriche, esse sono state oltre 750.000 nel 2016 e gli autori fissano un obiettivo ambizioso, cioè che i veicoli *full electric* (BEV) raggiungano il 30% del totale dei veicoli immatricolati nel 2030. In questo modo si prevede un aumento annuale di circa il 30% e che i magneti permanenti siano usati nel 100% dei veicoli elettrici. La quota di mercato delle batterie NiMH nei veicoli elettrici ibridi diminuirà tra il 2020 e il 2025, per poi risalire e raggiungere circa il 10% del mercato totale nel 2030 (Zhou et al., 2017).

Con queste ipotesi gli autori stimano che la domanda di REE crescerà, rispetto ai livelli raggiunti nel 2016, del 5% entro il 2025 (Zhou et al., 2017). Tuttavia, l'incremento previsto è decisamente più marcato nel 2030 e i volumi di utilizzo futuri variano molto a seconda dell'elemento in quanto, come riportato dalla Tabella 3.3, solo 7 elementi su 17 sono indispensabili per la transizione ecologica. Questo farà in modo che la domanda non cresca in maniera uniforme, come evidenziato dal Grafico 3.2.

Grafico3.2: previsione domanda globale di terre rare derivante dalle tecnologie green fino al 2030, valori espressi in kt (chilotonnellate).



Fonte: Zhou et al., 2017.

Secondo queste stime effettuate nel 2017, la domanda mondiale di REE proveniente dalle tecnologie green passerà da circa 35 kt nel 2016, a 51,9 kt nel 2030. La domanda proveniente dal settore dell'illuminazione diminuirà drasticamente, passando da circa il 30% del totale della domanda nel 2016, al 3% nel 2030. Contrariamente a questa tendenza, si prevede una crescita della quota di mercato del settore dell'energia eolica, che passerà dal 11% al 13%. Però, la crescita più significativa si avrà nei veicoli elettrici e nelle batterie NiMH, che passeranno rispettivamente dal 50% e 3% nel 2016, a quasi il 70% e 10% nel 2030 (Zhou et al., 2017).

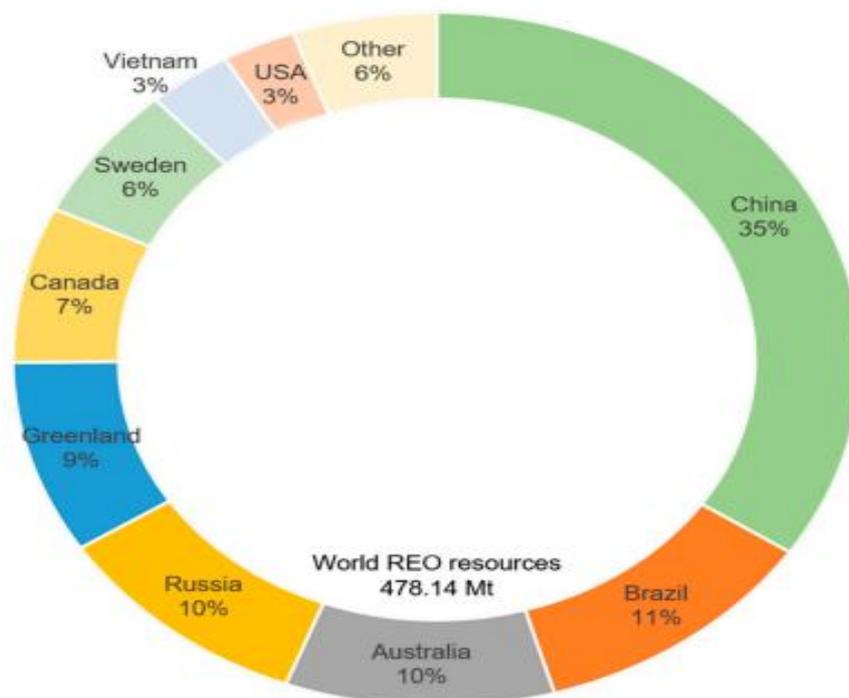
Gli elementi che caratterizzeranno questo incremento sono il neodimio (Nd) e il disprosio (Dy), con un aumento previsto del 270% rispetto al 2016. Essi giocheranno un ruolo fondamentale in futuro, a discapito di altri elementi, quali l'eurobio (Eu) e il terbio (Tb), utilizzati esclusivamente per l'illuminazione. Invece, per quanto riguarda il cerio (Ce) e il lantanio (La), fondamentali alla produzione delle batterie NiMH, la loro richiesta in futuro aumenterà ma non in maniera molto significativa (Zhou et al., 2017).

3.4) I principali player

Come affermato nell'introduzione di questo capitolo le terre rare, nonostante il loro nome, possono essere ritenute abbondanti nella crosta terrestre.

Andando ad analizzare l'estrazione di questi elementi, al fine di individuare e creare un sito produttivo, possiamo distinguere tre fasi principali: la scoperta della risorsa in un determinato territorio, l'esplorazione e l'individuazione dei depositi e, infine, la creazione del sito estrattivo e la relativa produzione. Si stima che, nel 2017, erano stati individuati e catalogati circa 851 depositi di terre rare in tutto il mondo, per un totale di circa 478 milioni di tonnellate (Zhou et al., 2017). Il Grafico 3.3 illustra le riserve mondiali suddivise per nazione.

Grafico 3.3: riserve mondiali di terre rare suddivise per nazioni nel 2017.



Fonte: Zhou et al., 2017.

Come si evince dal grafico, la Cina è la nazione con più riserve al mondo con circa 164 milioni di tonnellate (Mt), ovvero il 35% del totale. A seguire troviamo quattro nazioni con quote vicine al 10%: Brasile (55 Mt), Australia (49 Mt), Russia (48 Mt) e Groenlandia (43 Mt). Le restanti 119 Mt sono distribuite principalmente tra Canada, Svezia e Stati Uniti (Zhou et al., 2017).

Da evidenziare come, nei principali siti d'estrazione, le terre rare sono un sottoprodotto dall'estrazione mineraria di altri metalli primari come ferro, titanio, niobio o uranio (Wübbecke, 2016).

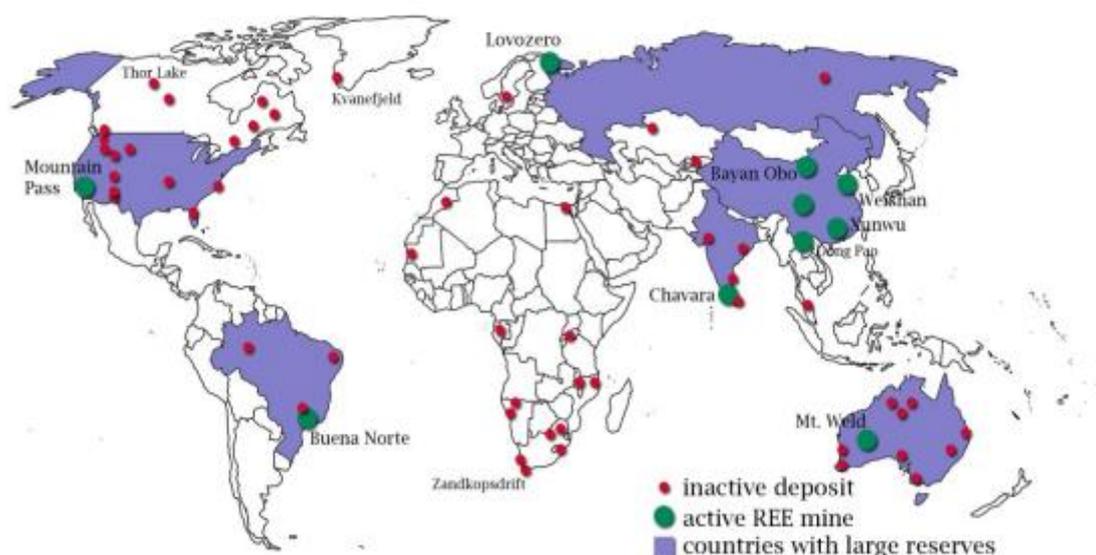
Inoltre, degli 851 depositi presenti a livello mondiale, solamente pochissimi hanno superato la seconda fase e sono attualmente attivi. A partire dal 2011, però, dopo una rovinosa crisi in questo mercato, molte aziende investirono tempo e denaro al fine di evitare un'ulteriore impennata dei prezzi. Nel 2017, infatti, erano stati identificati ulteriori 178 depositi e di essi 59 sono poi successivamente entrati nelle prime fasi di produzione. Alcuni di questi depositi potrebbero diventare nuovi fornitori di REE in futuro, andando a migliorare la situazione attuale del mercato (Zhou et al., 2017).

Un ulteriore fatto, che contribuisce ad accentrare ulteriormente la produzione, è il tipo di deposito. Esso influenza il grado di presenza di REE nelle terre estrattive. Si stima

che circa il 27% dei depositi ha un grado minore allo 0,2%, il 55% dei depositi ha un grado minore all'1% e solo il 5% dei depositi ha concentrazioni superiori al 10%.

Queste caratteristiche fanno sì che l'estrazione e la produzione siano concentrate principalmente in alcuni siti di grandi dimensioni, come Bayan Obo in Cina, Buena Norte in Brasile, e Lovozero in Russia. Spesso, nei pressi di questi siti, è conveniente svolgere tutte le fasi di lavorazione in quanto, come ad esempio in Cina e Brasile, il costo della manodopera è basso. Diverso invece è il discorso per paesi più industrializzati, come Australia e USA. Nella figura sotto (Figura 3.3) sono riportati i principali siti attivi e inattivi.

Figura 3.3: principali siti di estrazione di terre rare, attivi e inattivi.



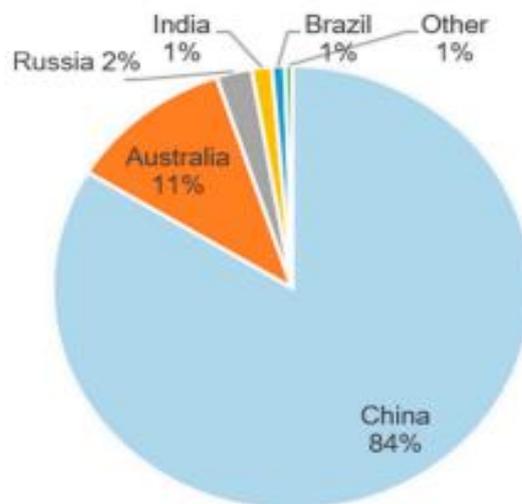
Fonte: Wukkube, 2016.

Come confermato dalla figura, i siti sono numerosi ma la maggioranza di essi sono inattivi. La miniera dell'American Mountain Pass, situata negli Stati Uniti, è una delle poche miniere che estraggono terre rare come fonte primaria ed essa, a cavallo tra gli anni 90 e 2000, era la miniera più grande del mondo. La produzione è cessata nel 2002 a causa della concorrenza cinese e dei problemi ambientali, ma fu ripresa nel 2010 a causa dei problemi di approvvigionamento. Mountain Pass attualmente produce circa 4000t (tonnellate) all'anno, molto meno delle 20.000t estratte negli anni 90. Mt. Weld, in Australia, è un'altra grande miniera non cinese con una produzione di circa 2000 t annue. La società estrattiva spedisce i concentrati di terre rare al suo impianto di lavorazione in Malesia, per le varie lavorazioni atte a rendere il prodotto finito e utilizzabile. Ulteriori

miniere estraggono REE a Buena Norte in Brasile e Chavara in India. La miniera russa di Lovozero, nella penisola di Kola, estrae terre rare che successivamente vengono lavorate nelle raffinerie in Kazakistan ed Estonia (Wübbecke, 2016).

La Cina, però, è ampiamente il più grande produttore di terre rare al mondo. Nel 1992, il paese del drago ha sostituito gli Stati Uniti e, da allora, essa ha via via accumulato sempre più potere nelle sue mani. La sua quota è passata da circa il 33% della produzione mondiale nel 1992, all'85% nel 1999 e il 97% nel 2005. Nel 2010, la Cina produceva il 97% delle terre rare globali. Con la crisi del 2010 e i conseguenti nuovi progetti estrattivi da parte dei paesi occidentali, la Cina ha perso terreno (Wübbecke, 2016). Ma, nonostante ciò, nel 2016, come si può vedere dal Grafico 3.4, essa deteneva circa 84% della produzione mondiale.

Grafico 3.4: produzione mondiale di terre rare per paese nel 2016.



Fonte: Zhou et al., 2017.

La seconda produttrice mondiale, l'Australia, nel 2016 aveva una quota solamente dell'11%. Essa era seguita da numerosi paesi, tra cui Russia, Brasile e Stati Uniti, con quote piccolissime, inferiori al 2%. La Cina è indiscutibilmente la leader di mercato in tutta la filiera delle REE, dall'estrazione a tutte le fasi descritte nel Paragrafo 3.1, fino alla produzione dei magneti permanenti utilizzati nei veicoli elettrici e nelle turbine eoliche.

D'altro canto, c'è da sottolineare, come detto precedentemente, che a livello mondiale il mercato delle terre rare valga relativamente poco, specialmente se comparato al mercato del carbone, acciaio, ferro e litio. Per dare un'idea di ciò, basta analizzare il peso delle REE nell'economia cinese. Il mercato del carbone e del ferro, nel 2016, si aggirava intorno a valori di produzione industriale pari a circa 1 trilione e 144 miliardi di RMB (renminbi, la valuta ufficiale della Repubblica Popolare Cinese). L'industria delle REE, invece, aveva un valore di produzione di circa 0,8 miliardi di RMB. Nonostante ciò, l'industria è un pilastro fondamentale di alcune economie locali in quanto, anche internamente alla Cina, la loro produzione è molto concentrata. Basti pensare che i maggiori giacimenti si trovano nella Mongolia Interna e sono in mano ad un'unica società controllata dallo stato, la China Northern Rare Earth Group High-Tech Company. Questi depositi rappresentano circa l'84% delle riserve nazionali anche se, i depositi più a Sud, restano fondamentali per la produzione e l'estrazione di HREE. Il sito di Bayan Obo è il più grande della Cina e del mondo. Esso è una miniera a cielo aperto che si estende per un'area enorme: circa 18 km da Est a Ovest e 3 km da Nord a Sud. Per la scarsità di acqua e spazi, le terre e i minerali vengono trasportati fino a Baotou, dove vengono svolte le fasi di separazione e riduzione. Grazie a questo sito e alle sue enormi riserve, la Mongolia Interna è il più grande produttore di REE, con oltre 47.000 t annue prodotte, cioè il 59% circa dell'estrazione nazionale cinese (Wübbecke, 2016).

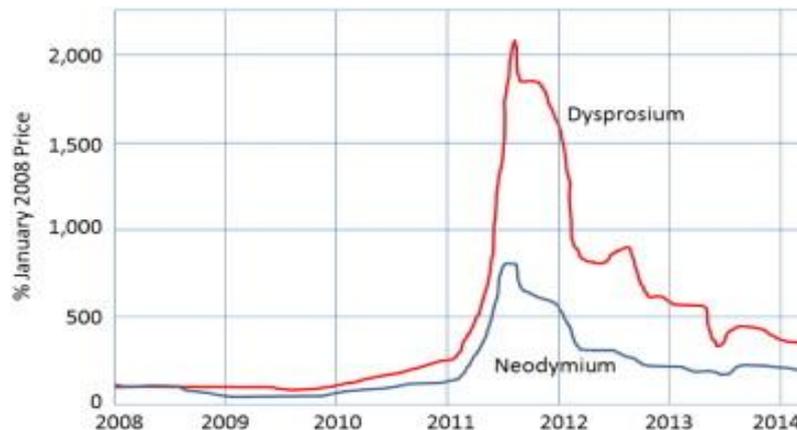
Nonostante i valori di mercato siano relativamente piccoli, come detto precedentemente, questi minerali giocheranno un ruolo fondamentale in futuro e, ancora una volta, è la Cina a detenere, quasi completamente, il controllo di tale filiera produttiva. Questo, oggi come in passato, ha giocato un ruolo fondamentale nel mercato delle REE e nel loro relativo prezzo.

3.5) Il mercato

Attualmente nessuno dei 17 elementi che compongono le terre rare sono scambiati in borsa. Nel mercato la compra/vendita di questi elementi viene effettuata tramite contratti tra privati e il prezzo, a livello mondiale, per tutte le ragioni che abbiamo visto nel paragrafo precedente, viene sostanzialmente controllato dalle aziende e dal governo cinese (Money.it 2022). Al fine di chiarire le dinamiche dei mercati in chiave futura, in questo paragrafo si analizzerà il prezzo del neodimio (Nd) e del disprosio (Dy) che, come si è visto nel Paragrafo 3.3, giocheranno un ruolo fondamentale in futuro.

Precedentemente si è accennato alla crisi del 2011 e alla conseguente impennata dei prezzi. Il Grafico 3.5 pone a zero i prezzi di neodimio e disprosio nel 2008, evidenziando la percentuale di crescita rispetto a quell'anno.

Grafico 3.5: incremento dei prezzi del neodimio e disprosio durante la crisi del 2011.



Fonte: Widmer et al., 2015.

L'evento scatenante ebbe luogo alla fine di settembre 2010, quando l'esercito cinese bloccò una nave cargo carica di terre rare diretta verso il Giappone. La Cina giustificò questo fatto con scuse apparentemente di facciata e, dopo qualche mese, le autorità di Pechino arrivarono addirittura a negare l'accaduto. Circa due mesi dopo il governo centrale fece riprendere le spedizioni, ma ormai il mercato era compromesso. L'incremento che si verificò fu incredibile e il disprosio fu la materia prima che ne risentì di più. In pochissimi mesi il prezzo schizzò alle stelle, passando da 110 USD/kg (dollari statunitensi per chilogrammo) nel 2008 a 2031 USD/kg a metà 2011, arrivando quindi a toccare un aumento del 2000%. Il neodimio fu meno influenzato da questa crisi, ma anche il suo prezzo ne risentì notevolmente, arrivando a toccare un aumento del 700% in più rispetto al livello fatto registrare nel 2008 (Klinger, 2017).

Questo incidente fu in seguito definito come la goccia che fece traboccare il vaso. Infatti, circa cinque anni prima dell'accaduto, il governo centrale cinese iniziò ad attuare politiche atte a frenare la produzione di terre rare, in risposta alle allarmanti crisi ambientali nelle regioni minerarie e al timore che le riserve si fossero esaurite nel medio termine. Il primo effetto tangibile di queste politiche si verificò nel 2008 durante il quale,

per la prima volta nella storia, le esportazioni cinesi diminuirono rispetto all'anno precedente (Klinger, 2017).

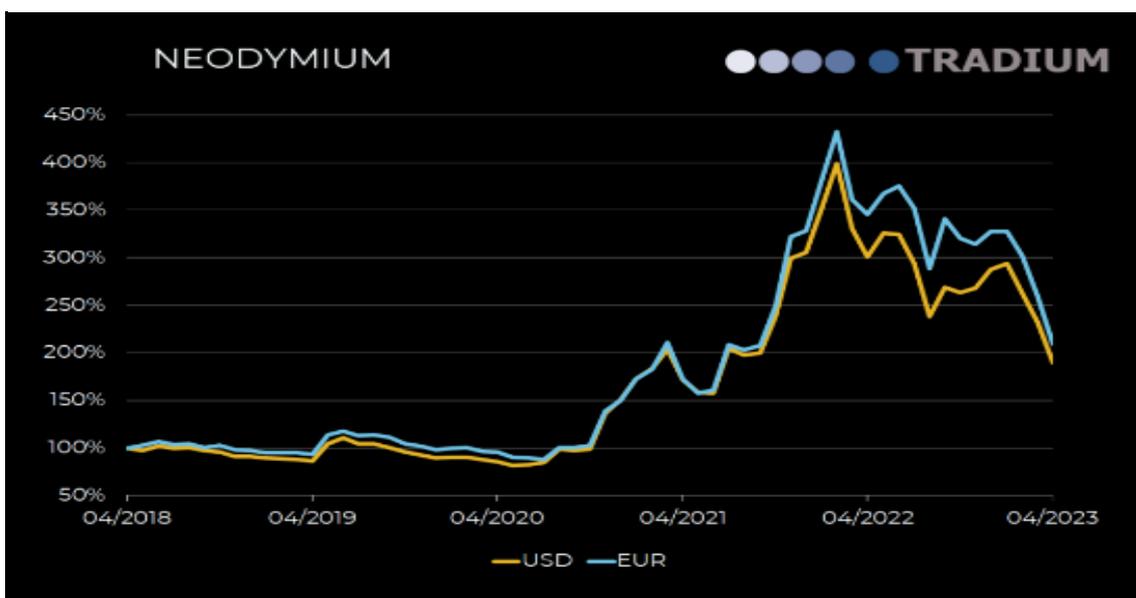
Prima di allora l'interesse per questi elementi era relativamente basso ma improvvisamente, tra la fine del 2010 e l'inizio del 2011, i mercati e i principali player si resero conto della minaccia derivante dal monopolio cinese e questo scatenò il panico, con il conseguente caos che ne derivò. Uno studio ha evidenziato come questa crisi abbia influenzato l'industria a valle: secondo tali calcoli, gli aumenti di prezzo tra luglio e settembre 2011 hanno ridotto l'utile netto di una big company statunitense, operante nel settore dell'high tech, di circa il 37% (Klinger, 2017).

Successivamente ne seguì un acceso dibattito sulla globalizzazione e su come, nei decenni precedenti, l'occidente abbia fatto fare "il lavoro sporco" alla Cina, in modo da preservare il territorio da miniere inquinanti che, come quelle presenti in Mongolia, devastano e inquinano il territorio circostante. Un altro tema dibattuto è sicuramente il prezzo, che è rimasto stabile e basso per anni grazie alle condizioni di lavoro precarie e alle scarse tutele ambientali.

Come accennato nel Paragrafo 3.3, da questa crisi sono scaturiti ingenti investimenti che, qualche anno più tardi, hanno portato ad un leggero indebolimento del monopolio della Cina. Tutto ciò ha influenzato i prezzi i quali, una volta finita la crisi e sgonfiatosi il panico generale, sono diminuiti ma non sono più tornati ai livelli precedenti. Essi rimasero abbastanza stabili attestandosi, tra il 2014 e il 2020, all'incirca tra i 65 e 80 USD/kg per il neodimio e tra i 200 e 250 USD/kg per il disprosio (SMI, 2023).

Successivamente, negli ultimi tre anni, il prezzo di questi materiali ha risentito dello shock causato dalla pandemia da Covid19, dalla seguente inflazione e dalla crisi degli approvvigionamenti che ne è scaturita. La Cina, con la politica zero Covid, i lockdown frequenti e prolungati nei grandi centri abitati come Shanghai (uno dei principali snodi al mondo) e grazie al controllo che ha su questo mercato, ha influenzato molto questo incremento. Il Grafico 3.6 riporta l'aumento di prezzo del neodimio, partendo dall'aprile 2018 e arrivando all'aprile 2023. Per analizzare meglio questo fenomeno, gli autori pongono a 100 il prezzo di partenza. Inoltre, essi evidenziano la differenza tra euro e dollaro statunitense in quanto, il tasso di cambio con i renminbi cinesi, influenza molto il prezzo finale pagato dai paesi occidentali.

Grafico 3.6: andamento del prezzo del neodimio, dall'aprile 2018 all'aprile 2023.

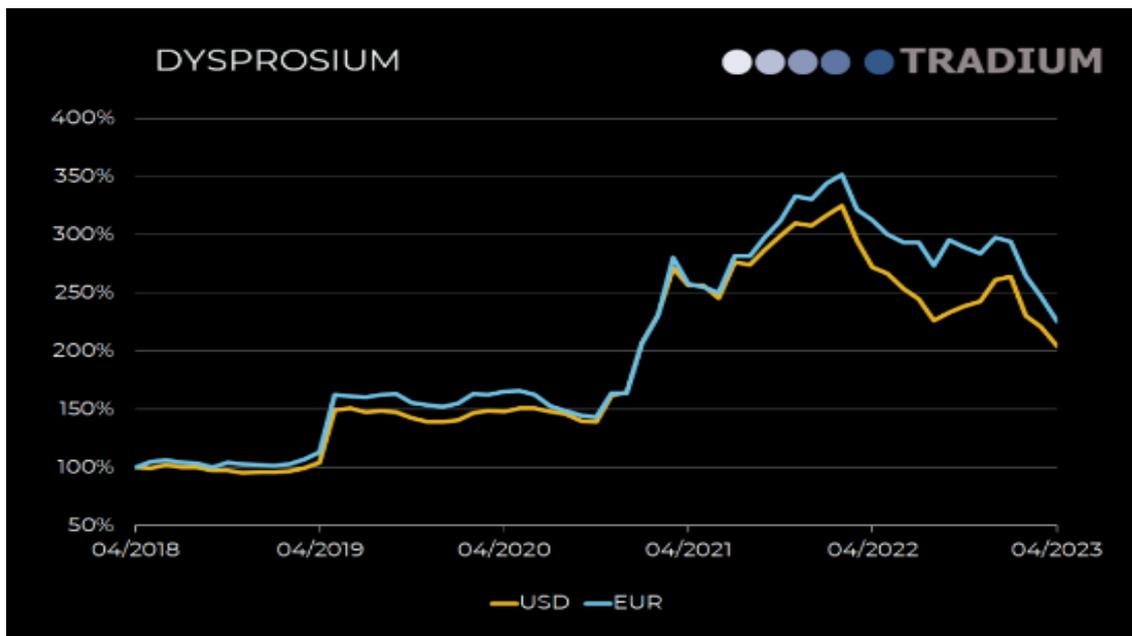


Fonte: SMI, 2023.

Il prezzo nel neodimio, nell'aprile 2018, era di circa 70 USD/kg. Esso si è mantenuto relativamente stabile fino all'aprile 2020 quando, a causa del primo lockdown, è diminuito arrivando a 65 USD/kg. Successivamente, con la ripresa e i motivi elencati sopra, il prezzo è aumentato molto nel giro di un anno. Esso ha raggiunto i 222 USD/kg all'inizio del 2022, facendo registrare un aumento di oltre il 300%, cifre che non si vedevano dalla crisi del 2011. In seguito, il prezzo è diminuito, ma esso non si è ancora stabilizzato. Ad aprile 2023 è stato registrato un prezzo medio di 133,80 USD/kg, circa il doppio rispetto al prezzo fatto registrare nel 2018 (SMI, 2023).

Andando a prendere gli stessi riferimenti temporali e lo stesso metodo di analisi, lo stesso fenomeno è riscontrabile nel prezzo del disprosio, descritto alla pagina seguente dal Grafico 3.7.

Grafico 3.7: andamento del prezzo del disprosio, dall'aprile 2018 all'aprile 2023.



Fonte: SMI, 2023.

Nell'aprile del 2018 un kilogrammo di disprosio valeva all'incirca 238 USD/kg. A differenza del neodimio, il prezzo del disprosio fece registrare un primo aumento, di circa il 50%, già dei primi mesi del 2019. L'incremento più significativo è avvenuto successivamente, nei primi mesi del 2021, quando il suo valore ha toccato i 770 USD/kg, quasi 3 volte in più rispetto al valore fatto registrare nel 2018. Successivamente anche il valore di questo elemento è diminuito e, ad aprile 2023, si aggirava all'incirca sui 503 USD/kg, più del doppio rispetto ai livelli fatti registrare nel periodo precedente alla pandemia (SMI, 2023).

Questi due fenomeni, combinati con il boom della domanda post lockdown e i conseguenti colli di bottiglia che si sono formati, hanno contribuito ad incrementare il fenomeno inflazionistico che stiamo affrontando oggi. Tutto ciò, con l'incremento della domanda di veicoli elettrici e di tecnologie green prevista per il futuro, rischia di influenzare ulteriormente i prezzi e i tempi di consegna degli EV.

Un altro dato di fatto è il controllo della Cina su questo mercato che, volontariamente o involontariamente, può utilizzare per causare shock economici a livello mondiale.

CAPITOLO 4 – L’impatto ambientale dei veicoli elettrici in ottica *life cycle assessment*

Nel mercato e nella produzione di veicoli elettrici (EV), come accennato nei capitoli precedenti, oltre ai problemi di approvvigionamento delle materie prime esistono anche numerosi problemi ambientali e di natura etica. Partendo dall’estrazione e lavorazione delle materie prime, fino alla produzione, l’utilizzo e il riciclo degli EV, l’impatto di questi veicoli sull’ambiente non è trascurabile come si possa pensare.

Secondo molti, negli ultimi anni, ci si sta concentrando esclusivamente sulla quantità di gas di scarico che escono dalla marmitta di un veicolo ed essa, nel caso dei veicoli *full electric* (BEV), è pari a zero. Questo fatto è ben visibile nella direzione che stanno prendendo le leggi e le iniziative adottate da Europa e Stati Uniti le quali, sostanzialmente, sembrano categorizzare i veicoli elettrici come non inquinanti e quasi completamente green. Ovviamente ciò è vero solo in parte: come verrà analizzato e discusso in questo capitolo, tutte le fasi del ciclo di vita influenzano l’impatto ambientale totale prodotto da una determinata tecnologia. Inoltre, questo tipo di analisi, va effettuata in un’ottica comparativa, in modo da capire se effettivamente questa nuova generazione di veicoli inquinano meno rispetto ai veicoli tradizionali, alimentati a combustibili fossili.

4.1) Definizione del *life cycle assessment*

Attualmente, al fine di valutare quanto effettivamente un prodotto inquina nell’arco del suo intero ciclo di vita, la metodologia di analisi più utilizzata è il *life cycle assessment*, spesso esplicitato con l’acronimo LCA.

Nonostante quanto detto durante l’apertura del capitolo, la Commissione europea definisce questa metodologia come il migliore strumento per valutare l’effettivo impatto di un prodotto sull’ambiente. Inoltre, la definisce come quell’analisi che va a valutare tutti quei processi, nel ciclo di vita di un prodotto, significativamente impattanti sull’ambiente. Generalmente sono da prendere in considerazione l’estrazione delle materie prime, la produzione dei singoli componenti, l’assemblaggio finale, il trasporto, l’eventuale smaltimento o riciclaggio del prodotto e, più in generale, tutte quelle fasi che hanno un impatto ambientale significativo. Aggregando tutte queste informazioni e analizzandole nel dettaglio è possibile valutare il prodotto da un punto di vista ambientale e non solo.

Come esplicitato dalla definizione data dalla Commissione europea, LCA è utilizzata, o ne è consigliato l'utilizzo, a tutte le aziende anche al fine di migliorare il processo produttivo, formulare strategie, ridurre costi sia ambientali che monetari e valutare le opportunità di riciclo e riuso dei propri prodotti. Successivamente, l'organo europeo pone l'accento su come LCA andrebbe integrata nei processi di ricerca e sviluppo, anche al fine di valutare i corretti investimenti e formulare le strategie più sostenibili (Commissione europea, 2005).

Infine, si evidenzia come questa metodologia sia essenziale per il settore pubblico in quanto essa garantisce il quadro generale riguardante l'impatto ambientale di un prodotto. In questo modo, LCA dovrebbe contribuire all'analisi delle prestazioni ambientali e a verificare se esse rientrano negli standard normativi nazionali ed europei (Commissione europea, 2005).

Inoltre, va evidenziato come questa metodologia sia standardizzata a livello internazionale dalla normativa ISO 14040. Questa norma prevede che tali valutazioni siano effettuate con i seguenti passaggi: la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dell'analisi, la stesura di un inventario degli input e degli output di un determinato prodotto o sistema, la valutazione del potenziale impatto ambientale di output, input e del loro eventuale assemblaggio e infine l'interpretazione dei risultati dalla quale deve derivare una valutazione dettagliata e precisa. La norma specifica anche che i dati utilizzati devono essere coerenti, di qualità garantita e devono riflettere i processi industriali reali (Commissione europea, 2005).

4.2) LCA applicato ai veicoli elettrici

Il life cycle assessment è stato applicato da numerosi studiosi agli EV e agli *internal combustion engine vehicle* o ICEV, cioè sostanzialmente i tradizionali veicoli alimentati a combustibili fossili. In un'ottica di comparazione tra queste due tipologie, i risultati derivanti da questi studi sono stati fonte di numerose e crescenti controversie. Infatti, i risultati finali e intermedi variano molto e, secondo Messagie (2014), questo è dovuto principalmente a cinque fattori:

- la variazione dei limiti del sistema, cioè la scelta delle fasi da considerare nel sistema e la scelta della metodologia da utilizzare;

- l'utilizzo di diversi mix energetici. Ad esempio, molti studiosi, nei loro calcoli, prevedono che in futuro si utilizzeranno solo fonti rinnovabili, mentre altri rimangono molto più cauti e pessimisti su questa previsione;
- la scelta del database per effettuare la stima. Alcuni studiosi si basano su database forniti dall'Unione europea, mentre altri utilizzano dati rilevati da loro misurazioni o da altri sistemi;
- la formulazione dell'inventario dei componenti, definito da molti con i termini inglesi "*glider*" e "*powertrain*". A seconda della scelta della tipologia di batteria o di altri componenti i risultati possono variare sensibilmente;
- la durata del ciclo di vita del veicolo e delle relative batterie. Con tale scelta, si influenza molto l'impatto ambientale totale che, nel caso di durate più lunghe, sarà ammortizzato in più anni.

Per quanto riguarda il primo punto, sempre secondo Messagie, si possono individuare due principali metodologie di analisi LCA:

- l'approccio "*well-to-wheel*" (WtW), termine inglese che significa letteralmente "dal pozzo alla ruota". Questo approccio si concentra esclusivamente sul ciclo di vita delle fonti di energia che alimentano i veicoli, cioè i combustibili fossili (principalmente benzina e diesel) per quanto riguarda gli ICEV e l'energia elettrica per quanto riguarda gli EV. In questo caso si valuta esclusivamente la fonte di energia analizzandola dalle materie prime necessarie per produrla, fino al suo utilizzo e consumo (Messagie, 2014);
- l'approccio LCA completo. In questo caso, oltre a considerare l'impatto ambientale derivante dalla fonte di energia, si aggiungono i costi ambientali legati al ciclo di vita di ogni singolo componente della vettura. Questo approccio risulta più complesso e, da esso, ne scaturiscono le analisi più dettagliate e approfondite (Messagie, 2014).

Nei paragrafi successivi, verranno analizzate entrambe le metodologie a partire dalla prima, nel complesso meno significativa ma che fornisce informazioni utili sul reale impatto ambientale dei veicoli elettrici.

4.3) La metodologia WtW e il social lifecycle cost

Una tipologia di analisi WtW, interessante da analizzare, è quella che va a stimare i costi che ogni singolo cittadino impone alla società ogni qualvolta decide di utilizzare un veicolo per i propri spostamenti. Essa parte dal presupposto che, ogni qualvolta un autista viaggia tramite un veicolo, impone delle esternalità negative che ricadono su tutta la collettività. Queste esternalità vengono aggregate e calcolate in costi, definiti con il termine inglese *Social Lifecycle Costs* (Runich et al., 2016).

Anche quest'analisi è stata oggetto di molte critiche e spesso, a seconda dell'autore, ha dato risultati a favore o a sfavore degli EV. In questo paragrafo analizzerò i risultati rilevati da Rusich e Danielis, i quali sembrano tendere a favore dei veicoli alimentati ad energia elettrica. Infatti, secondo tali stime, gli EV dovrebbero avere un GWP (*Global Warming Potential*) inferiore rispetto ai veicoli a benzina e diesel.

L'algoritmo ideato da questi due autori va a stimare, in diverse tipologie di EV e ICEV, tre tipi di costi sociali:

- *WtW Global Air Pollution Cost*, ovvero il costo delle emissioni di anidride carbonica (CO₂) relative all'intero ciclo di vita dei combustibili fossili e dell'energia elettrica;
- *WtW Local Air Pollution Cost*, cioè la somma del costo delle emissioni di diossido di azoto (NO_x), di ossidi di zolfo (SO_x) e di particolato (PM) relative all'intero ciclo di vita dei combustibili fossili e dell'elettricità;
- *TtW Noise Cost*, ovvero il costo dell'inquinamento acustico e dei relativi danni causati all'ambiente e all'essere umano.

Da segnalare come, quest'ultimo tipo di costo sociale riporti la sigla TtW, derivante dall'acronimo inglese "*tank-to-wheel*". In questo caso si va a considerare esclusivamente le esternalità prodotte dal serbatoio alla ruota, cioè sostanzialmente i costi derivanti dall'inquinamento acustico prodotto dagli EV o dagli ICEV durante il loro utilizzo. Questo parametro è dato dalla somma dell'inquinamento acustico urbano più l'inquinamento acustico extraurbano (Runich et al., 2016).

Gli autori, inoltre, partono da assunzione rilevanti riguardanti i costi delle esternalità, i quali variano molto a seconda dell'agenti inquinante considerato.

Tali costi sono espressi in €/g (euro per grammo), sono suddivisi per le metodologie considerate (WtW e TtW) e sono riportate nella tabella sotto (Tabella 4.1).

Tabella 4.1: costo sociale per ogni sostanza inquinante.

Air Pollutant	WtT	TtW
NOX	0.01	0.01
SOX	0.01	0.01
PM rural	0.12	0.12
PM urban	0.21	0.21
PM metropolitan	0.65	0.65
CO2	0.000093	0.000093

Fonte: Runich et al., 2016.

Partendo da queste approssimazioni si può calcolare SLC a seconda dei chilometri percorsi all'anno da un veicolo EV o ICEV. La Tabella 4.2 riporta i risultati di questa analisi, suddivisi per tipologia di veicolo.

Tabella 4.2: risultati analisi Social Lifecycle Cost (SLC).

Powertrain	Social Lifecycle Cost (€) for 10 years of use and varying km/year driven				
	5000	10,000	15,000	20,000	25,000
Gasoline	993	1,986	2,979	3,973	4,966
Diesel	881	1,763	2,644	3,526	4,407
Gasoline HEV	719	1,438	2,156	2,875	3,594
Diesel HEV	705	1,410	2,115	2,820	3,525
EV	398	796	1,194	1,592	1,990
PHEV	517	1,034	1,551	2,068	2,585

Fonte: Runich et al., 2016.

L'impatto sociale dei veicoli *full electric* (nella Tabella 4.2 indicati con la sigla EV) varia tra 297 €, quando si percorrono 5.000 km/anno e 1.487 €, quando si percorrono 25.000 km/anno. Le prestazioni SLC dei veicoli *plug-in hybrid* hanno valori che si avvicinano ai veicoli *full electric* e questo è dovuto al fatto che, in quest'analisi, si considera che essi siano usati prevalentemente in modalità elettrica e che, il motore alimentato a combustibili fossili, entri esclusivamente in funzione quando l'utente deve effettuare tratte lunghe. Questa differenza stimata tra le due tipologie di veicoli elettrici oscilla tra

86 €, nel caso dell'ipotesi di percorrenza più basse, e 429 € nell'ipotesi più alta (Runich et al., 2016).

Dall'analisi emerge anche che i modelli *micro, mild e full hybrid* a benzina o diesel (HEV) consentono una riduzione delle esternalità negative prodotte dai combustibili fossili, producendo però benefici non paragonabili ai PHEV e *full electric*. Rispetto a quest'ultimi, SLC degli HEV è più alto di circa 223 € quando si percorrono 5.000 km/anno e, questo aumento, raggiunge i 1.113 € quando si percorrono 25.000 km/anno. La differenza tra HEV a benzina e diesel è sostanzialmente irrilevante, in quanto SLC è molto simile in tutti e cinque le ipotesi di percorrenza (Runich et al., 2016).

Nei classici modelli ad alimentazione a combustibili fossili, invece, SLC delle auto diesel è migliore di quelle a benzina di circa 51€ nella prima ipotesi e 203 € nell'ultima ipotesi. La differenza di SLC tra i veicoli *full electric* e quelli a diesel oscilla tra 378 € e 1.891 €, differenza che sale tra 429 € e 2.145 € nel caso dei modelli alimentati a benzina (Runich et al., 2016).

Da questa analisi possiamo trarre conclusioni rilevanti: i veicoli *full electric e plug-in hybrid* sembrerebbero essere nettamente meno inquinanti rispetto ai tradizionali veicoli a combustibili fossili, mentre le categorie di veicoli *hybrid non plug-in* apportano benefici marginali che potrebbero non bastare a contrastare il cambiamento climatico (Runich et al., 2016).

4.4) LCA completo

Come detto nel Paragrafo 4.2, LCA completo è il modo migliore per valutare l'effettivo impatto ambientale di uno o più prodotti anche se, come si è detto in precedenza, i risultati cambiano molto a seconda dell'autore e dei parametri considerati. In questo paragrafo analizzerò uno studio pubblicato nel 2016 sulla rivista scientifica *Chemical Engineering Research and Design*, svolto in collaborazione tra l'Università di Londra e di Salerno. In questo caso, gli autori si pongono lo scopo di analizzare diverse tipologie di EV e di ICEV, al fine di svolgere un'analisi comparativa e di decretare se e in che misura i veicoli *full electric* hanno un minore impatto sull'ambiente, rispetto ai classici veicoli a combustione fossile (Tagliaferri et al., 2016).

L'impatto ambientale totale viene calcolato e stimato sulla base di tre macrocategorie:

- *Global Warming Potential* (GWP), il quale calcola l'impatto dei gas serra, emessi da un prodotto durante il suo ciclo di vita, in base alla loro capacità di riscaldare l'atmosfera globale. I valori di riferimento vengono presi da uno studio dell'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), il quale stima quanto una determinata sostanza influisca sul riscaldamento globale in un dato arco temporale dopo la sua emissione. Il valore viene espresso in kg CO₂eq (chilogrammo per Co₂ equivalente);
- *Abiotic Depletion* (AD) affronta invece il problema ambientale della diminuzione delle risorse scarse quali minerali di ferro, petrolio e molte altre. Il valore viene espresso in MJ (mega joule);
- *Human Toxicity Potential* (HTP), il quale riflette il danno potenziale derivato da determinate sostanze chimiche riversate nell'ambiente. Questo valore viene stimato sulla base della loro tossicità per l'ambiente e per l'essere umano. Il suo valore viene espresso in kg DCBeq (chilogrammo di diclorobenzene equivalente).

Gli autori svolgono l'analisi su quattro tipi di modelli denominati con le seguenti sigle: EVI, EVII, ICEV e HEV (30%). I primi due sono modelli *full electric* e la loro differenza verrà spiegata nel Sottoparagrafo 4.4.1, mentre l'ICEV è una normale *city-car* alimentata a diesel e l'HEV è un *mild hybrid* alimentato anch'esso a diesel e, per il 30%, a energia elettrica. Inoltre, gli autori definiscono i modelli di riferimento e specificano che l'elenco dei componenti di tali veicoli sono stati presi dagli inventari presenti nei database comunitari (Tagliaferri et al., 2016).

Un altro punto molto rilevante sono, come si è detto precedentemente, i limiti del sistema e le fasi considerate. In questo modello, gli autori calcolano l'impatto ambientale di tre macrofasi: la fase di fabbricazione (*manufacturing*), la fase di utilizzo (*use*) e la fase di fine vita (*disposal*). Per ognuna di esse sono state fatte assunzioni rilevanti che verranno spiegate nei sottoparagrafi successivi (Tagliaferri et al., 2016).

4.4.1) La fase di fabbricazione

LCA della fase di fabbricazione (*manufacturing*) è sostanzialmente l'impatto ambientale della produzione del veicolo e di tutti i suoi componenti. In questo caso si

parte dal presupposto che il veicolo è composto da più unità, le quali possono essere divise in sottounità fino al singolo componente. Le due principali macro-unità che sono state considerate nei modelli sono il *powertrain* e il *glinder*. Con il secondo termine si intende il telaio, la carrozzeria e tutte le altre componenti necessarie a rendere il veicolo utilizzabile mentre, con il primo termine, si intende tutto l'apparato motrice dei veicoli, cioè sostanzialmente tutte le componenti dal serbatoio al motore (Tagliaferri et al., 2016).

Quest'ultimo è il vero cuore dei veicoli elettrici e, come si è detto prima, nel modello vengono analizzati due differenti tipi di veicoli *full electric*, che differiscono tra loro per la composizione chimica delle batterie. In entrambi i casi le batterie sono agli ioni di litio, composte con l'anodo prevalentemente in grafite ma, nel EVI, sono presenti gli elementi chimici acido acrilico e carbossimetilcellulosa, mentre nel EVII essi sono sostituiti con il tetrafluoroetilene. Il 60% di questa macro-unità è composta dalla batteria ed essa causa la maggior parte delle emissioni prodotte in questa fase (Tagliaferri et al., 2016).

4.4.2) La fase di utilizzo

Nella fase di utilizzo (*use*) gli autori prendono in considerazione le emissioni dovute all'uso dei veicoli, cioè le cosiddette emissioni dirette, e le emissioni dovute alla produzione del carburante, ovvero le emissioni indirette. Per i veicoli elettrici si considera l'energia elettrica, mentre per gli ICEV si considerano i combustibili fossili, quali diesel e benzina.

Il consumo energetico riportato in questi studi varia sensibilmente a seconda della durata del ciclo di vita ipotizzato. In questo caso si ipotizza una durata di circa 150.000 km per tutte le tipologie di veicolo analizzate. Inoltre, nel caso dei veicoli elettrici, si è stimato che l'energia necessaria per percorrere 1 km equivalga a 0,56 MJ, cioè sostanzialmente circa 17 kWh per 100 km, percorsi su un mix di strade urbane ed extraurbane. Per i veicoli ICEV, invece, si è preso come riferimento un veicolo Euro 5, il quale consumo è stimato in circa 50,04 ml/km (Tagliaferri et al., 2016).

Un altro fattore molto rilevante è il mix energetico utilizzato per alimentare i veicoli elettrici. Si è supposto che, tra il 2015 e il 2050, si abbia una diminuzione dell'energia elettrica prodotta da fonti fossili, un aumento del 6% del nucleare e un aumento di tutte le fonti rinnovabili. Nonostante ciò, con lo scopo di rispecchiare maggiormente la realtà attuale, gli autori suppongono che il mix di energia prodotta da fonti fossili e nucleare

rimanga del 64%. Per il diesel, invece, si è previsto che diventi meno inquinante e che, in futuro, sarà composto per circa il 73% da diesel convenzionale e, per la restante parte, da biodiesel (Tagliaferri et al., 2016).

4.4.3) La fase di fine vita

Nella fase di fine vita (*disposal*) si va sostanzialmente a considerare in che misura e a che costo ambientale i metalli presenti nel sistema veicolo siano riciclabili o smaltibili.

In questa fase, sono stati previsti due scenari: *high recycling rate* e *low recycling rate*. Per quanto riguarda il primo scenario, nonché il più favorevole e auspicabile per la transizione ecologica, si è ipotizzato che l'intera flotta dei veicoli prodotti e venduti in Unione europea sia poi smaltita o riciclata all'interno dei suoi confini. Al contrario, nel secondo scenario, si prevede che solo il 57% della flotta di veicoli sia smaltita in Unione europea e che, la restante parte, finirà in discariche fuori dai confini del vecchio continente (Tagliaferri et al., 2016). Nei risultati descritti dal sottoparagrafo seguente vengono calcolati in caso di *high recycling rate*. Va evidenziato come, la differenza tra i due scenari sul risultato finale del modello, è irrilevante (Tagliaferri et al., 2016).

Nel caso dei veicoli tradizionali a combustione fossile, invece, lo studio presuppone che durante questa fase l'alluminio, il rame e l'acciaio vengono riciclati al 100% mentre, il resto dei materiali, sia smaltito tramite inceneritori o altri sistemi (Tagliaferri et al., 2016).

Per i veicoli elettrici questa fase è molto più complessa in quanto il *glider* viene smaltito o riciclati con le stesse modalità e percentuali degli ICEV mentre, il *powertrain*, si presuppone che sia smaltito con un procedimento molto complesso e articolato. Questo procedimento richiede sostanzialmente due fasi principali:

- il trattamento piro-metallurgico. Il prodotto finale di questa prima fase sono delle scorie composte da diversi materiali. Dalla trasformazione delle batterie in queste scorie si può riciclare prevalentemente nichel, cobalto, rame, acciaio e litio. Quest'ultimo, però, non è stato considerato nel modello in quanto il minerale recuperabile, rispetto al totale del peso della batteria, è trascurabile (Tagliaferri et al., 2016);

- il trattamento idro-metallurgico, durante il quale avviene l'estrazione dei minerali dalle scorie prodotte durante la prima fase. Da quest'ultima fase si riesce a recuperare nichel, cobalto, acciaio e rame (Tagliaferri et al., 2016).

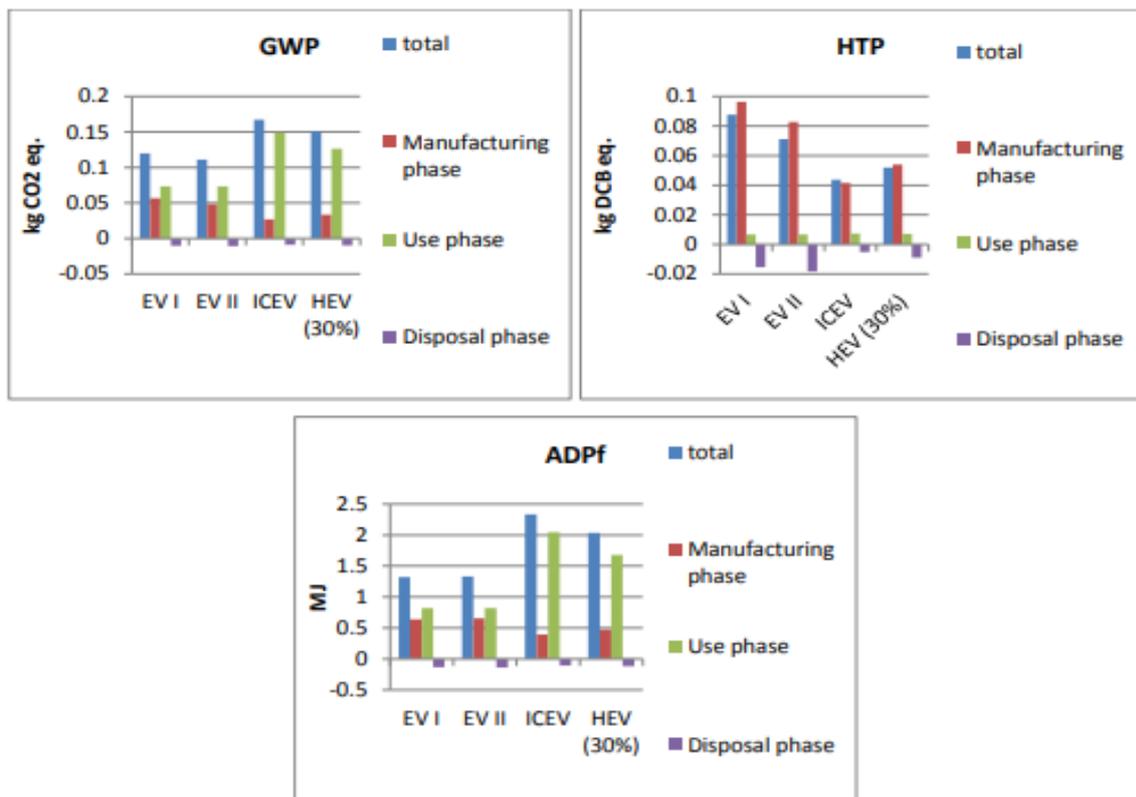
Dal processo di riciclaggio di 1 kg di batterie agli ioni di litio, si può stimare i seguenti tassi di riciclo (Tagliaferri et al., 2016):

- 7,7% di cobalto derivante dalla prima fase e un 13,6% derivante dalla seconda fase;
- 9,6% di rame derivante dalla seconda fase;
- 10,8% e 6,6% di acciaio derivanti rispettivamente dalla prima e seconda fase;
- 6% del nichel derivante dalle due fasi.

4.4.4) Risultati

I risultati dell'LCA, suddivisi per ogni singola fase e per singolo impatto ambientale, sono riassunti dal Grafico 4.1.

Grafico 4.1: risultati analisi life cycle assessment (LCA).



Fonte: Tagliaferri et al., 2016.

Il *Global Warming Potential* (GWP) totale dei due modelli EV sono molto simili, attestandosi a 0,12 kg di CO₂eq per EVI e 0,11 kg di CO₂eq per EVII, mentre il GWP dell'ICEV è superiore del 45%, attestandosi a 0,16 kg di CO₂eq. Questa differenza tra EV e ICEV è dovuta, in gran parte, alla fase di utilizzo, mentre la fase di fine vita da all'incirca gli stessi risultati e la fase di fabbricazione risulta avere valori più bassi nell'ICEV. Sostanzialmente possiamo riassumere che, per quanto riguarda il GWP, i veicoli EV sono più inquinanti nella fase di produzione, ma questo è ampiamente compensato dalla fase di utilizzo, la quale è molto influenzata dai gas serra emessi dagli ICEV. Per tutti i modelli la fase di utilizzo determina il maggior contributo al GWP totale, arrivando anche a toccare 80% del totale negli ICEV. La fase di dismissione, invece, determina un contributo a beneficio dell'ambiente grazie al riciclo dei materiali anche se, nel complesso, non contribuisce fortemente alla riduzione dell'impatto ambientale. Questo è dovuto principalmente al fatto che, attualmente, il riciclo di questi materiali è molto oneroso in termini ambientali e scarsamente praticato. Da segnalare anche come, nella fase di produzione, il GWP prodotto dagli EV derivi, per circa la metà del suo ammontare, dalla produzione del *powertrain* (Tagliaferri et al., 2016).

Una tendenza simile è riscontrata nell' *Abiotic Depletion* (ADP), che rispecchia quasi tutte le considerazioni fatte per il GWP. Anche in questo caso, l'inquinamento prodotto dalla fase di produzione dagli EV è molto simile all'inquinamento prodotto dalla fase di uso, mentre per gli ICEV c'è una gran differenza tra le due fasi, delle quali prevale ampiamente la fase di uso (Tagliaferri et al., 2016).

Una diversa tendenza è evidenziata dal Grafico 4.1 per *Human Toxicity Potential* (HPT). In questo caso il totale dei due EV è circa il 40% superiore rispetto a quello degli ICEV. La fase di produzione dei veicoli elettrici, ancora una volta, contribuisce a quasi il totale dell'inquinamento generato. Ciò è causato principalmente dai processi e dalle lavorazioni chimiche dei metalli utilizzati nella fase di fabbricazione delle batterie, descritte brevemente nel Capitolo 2. Questi processi hanno un grosso impatto tossicologico ma c'è da segnalare come, in minima parte, questo impatto venga compensato dalla fase del fine vita che, per gli EV, ha un apporto benefico di circa il doppio rispetto agli ICEV (Tagliaferri et al., 2016).

Per riassumere e trarre delle conclusioni si può affermare che, considerando i parametri GWP e ADP, i veicoli *full electric* hanno un impatto minore sull'ambiente rispetto ai veicoli tradizionali. Tuttavia, la situazione è nettamente ribaltata nel caso dell'impatto derivanti da sostanza tossiche (HPT), dove i *full electric* hanno un impatto maggiore rispetto agli ICEV. Ciò è dovuto principalmente alla fabbricazione delle batterie e ai materiali contenuti in esse (Tagliaferri et al., 2016).

Da questa analisi possiamo anche trarre un'altra importante conclusione: i veicoli HEV, ibridi al 30%, hanno all'incirca gli stessi valori dei veicoli ICEV, in tutti e tre gli impatti ambientali considerati (Tagliaferri et al., 2016).

4.5) Il riciclo delle batterie

Il riciclo delle materie prime presenti nelle batterie è un tema molto attuale e dibattuto. Come visto nell'analisi LCA, attualmente, questo processo sembrerebbe essere molto oneroso sia in termini ambientali che di costi. Inoltre, si può affermare che la maggior parte delle tecniche di riciclo sia ancora in fase di studio e per questo motivo si trovano poche informazioni a riguardo. Nonostante ciò, si può comunque fare il punto della situazione attuale andando ad analizzare, minerale per minerale, le quote di riciclo e le prospettive future.

Attualmente si stima che solo il 3% del litio prodotto globalmente viene riciclato e riutilizzato in svariati prodotti. Il minerale recuperato dalle batterie, come evidenziato anche dall'analisi LCA, è praticamente nullo. Da segnalare però come alcuni paesi produttori, come ad esempio l'Australia, hanno intravisto un'opportunità di mercato e si stanno muovendo in questo senso. Ciò è dovuto principalmente al fatto che questo minerale può essere riciclato un numero illimitato di volte. Tuttavia, ad oggi, non esiste un processo di riciclo in grado di produrre litio abbastanza puro da essere riutilizzato per la produzione di una nuova batteria. Nel 2016 la Commissione europea stimava che da 20 t di batterie agli ioni di litio si possa recuperare solamente 1 t di litio scarsamente puro e che, la quota di riciclo di questo minerale in Unione europea, sia bassissima e si aggiri intorno a quote inferiori all'1%. Un altro grosso problema è che questo processo risulta essere molto costoso, arrivando ad essere due volte più oneroso rispetto all'estrazione e lavorazione. Ovviamente questo fattore ha influito molto sui tassi di riciclo attuali (La Monica et al., 2020).

Il riciclo della grafite svolge un'importanza parziale in quanto, come visto nel Capitolo 2, esso è utilizzato esclusivamente nell'anodo che ha un valore minore rispetto al catodo. Tuttavia, è interessante rilevare come la grafite riciclata sia poca e che essa provenga principalmente da prodotti refrattari e lubrificanti. L'unico recupero di fiocco di grafite di alta qualità, attualmente possibile ma poco praticato, proviene dall'acciaio. Da segnalare anche come le informazioni a riguardo siano scarse e gli studi in materia pochi. La situazione attuale è da imputarsi principalmente al fatto che, questo minerale, è molto abbondante sul mercato e che esso si possa trovare a costi relativamente contenuti (La Monica et al., 2020).

Ragionamento simile può essere fatto per il nichel e il manganese: le informazioni in materia sono scarsissime in quanto, la domanda di questi due minerali per le batterie, è relativamente piccola rispetto all'utilizzo nel settore siderurgico. Inoltre, va sottolineato come, il manganese, non è un metallo molto remunerativo sul mercato e per tale ragione l'interesse nella ricerca di processi di riciclo è scarsa (La Monica et al., 2020).

Molto differente invece è la situazione del cobalto. Come visto nel Capitolo 2, esso è fondamentale nelle batterie degli EV, grazie alla sua incredibile proprietà di immagazzinare grandi quantità di energia, limitando al contempo il surriscaldamento del sistema. Per questo motivo, attualmente, la sua sostituzione è impensabile anche se, negli ultimi anni, si sono studiati sistemi per diminuire l'impiego all'interno del catodo. Per tale ragione, il suo valore strategico ed economico è molto elevato. Questo ha fatto sì che sia il minerale più riciclato e, come supposto nell'analisi LCA, il suo tasso di riciclo si aggiri attorno al 20% per ogni kg di batteria. Inoltre, grazie ad un elevato grado di purezza che si stima essere del 98÷99%, esso viene riutilizzato direttamente nella produzione di batterie. Come evidenziato da uno studio della Commissione europea, il flusso del cobalto riciclato era già rilevante nel 2015 ed è continuato a crescere d'importanza negli ultimi anni. Va sottolineata anche l'importanza etica del riciclo del cobalto in quanto, come verrà approfondito nel paragrafo seguente, la sua estrazione viene svolta principalmente in Congo da lavoratori, spesso minori, che operano in condizioni di lavoro terribili (La Monica et al., 2020).

Il riciclo delle terre rare, invece, è descritto da molti studiosi come una delle possibili soluzioni future alla loro scarsità, alla riduzione del potere cinese in questo mercato e al loro costo monetario e ambientale elevato. Tuttavia, attualmente meno

dell'1% del consumo annuo viene riciclato. Questo è dovuto, in parte, al fatto che essi sono elementi chimici incorporati in altri metalli. Ciò comporta un processo di separazione da prodotti quali magneti, leghe, laser, batterie, e chip molto complicato e dispendioso in termini di energia e sostanze chimiche. Un altro grosso ostacolo è dato dal fatto che, le quantità di terre rare presenti in ogni prodotto, variano molto a seconda della tecnologia utilizzata, della marca e del modello. In altre parole, non è affatto facile risalire alle esatte quantità contenute in un prodotto in quanto questi dati, solitamente, sono strettamente confidenziali e protetti dal segreto aziendale o da brevetti. Inoltre, la fattibilità di qualsiasi iniziativa di riciclaggio andrebbe valutata attentamente in quanto, ad oggi, la qualità delle terre rare riciclate non è ancora stata dimostrata (Klinger, 2017). Per quanto riguarda il riciclo delle terre rare dalle batterie degli EV le informazioni, anche in questo caso, sono scarse o del tutto assenti e questo non permette di costruire un quadro completo. Tuttavia, va citato uno studio effettuato da alcuni studiosi italiani e pubblicato sulla rivista scientifica *Journal of Cleaner Production*: esso va ad ipotizzare i possibili tassi di riciclo futuri a seconda di 8 scenari e ci dice che, in quasi tutti gli scenari, il riciclo di questi elementi chimici dai veicoli elettrici dovrebbe aumentare considerevolmente entro il 2030 (Silvestri et al, 2021).

4.6) L'impatto ambientale a livello locale

Per concludere questo capitolo, va sottolineato come i modelli LCA analizzati sembrano tenere poco in considerazione l'impatto ambientale locale dei siti estrattivi e di lavorazione delle materie prime. Infatti, come visto in più occasioni, spesso queste strutture devastano paesaggisticamente il territorio, inquinano l'ambiente circostante con sostanze chimiche e, in alcuni casi, le condizioni lavorative sono precarie e molto al di sotto degli standard etici.

Per quest'ultimo fatto, come affermato nel Capitolo 2, l'estrazione del cobalto in Congo è l'esempio più lampante. Secondo molti, attualmente, non c'è un altro paese al mondo con uno squilibrio tra la ricchezza di risorse naturali e povertà della popolazione così elevato. Questo è dovuto in gran parte alla sua storia: prima la colonizzazione francese del secolo scorso e poi, negli ultimi anni, la colonizzazione economica da parte della Cina, la quale controlla indirettamente la maggior parte delle miniere del paese (Tratta, 2022).

L'estrazione del cobalto avviene principalmente nella regione del Katanga, la quale detiene una caratteristica molto particolare: la maggior parte di questo minerale presente sul territorio si trova praticamente in superficie e, per questo motivo, l'attività non richiede impianti e investimenti costosi. Questo ha permesso la costruzione di un sistema di estrazione che si potrebbe definire "artigianale", nel quale donne, bambini e uomini estraggono a mani nude il cobalto senza alcuna tutela. Secondo i dati Unicef, sono circa 40.000 i bambini impiegati per l'estrazione del cobalto e la loro paga giornaliera ammonta a circa un dollaro (Tratta, 2022). Negli ultimi anni, in paesi come Francia e Germania, si è studiato e messo in pratica alcune normative atte a regolamentare la provenienza del cobalto. Tali legislazioni, però, hanno avuto scarsa efficacia in quanto dovrebbero essere adottate quantomeno a livello europeo, se non mondiale, per ottenere gli effetti sperati. Tuttavia, il problema più grosso è che le stesse aziende operanti nel settore hanno enormi difficoltà a delimitare il confine tra cobalto estratto artigianalmente e industrialmente. Queste due tipologie quasi sempre vengono mischiate in Congo, al fine proprio di eludere eventuali controlli una volta esportati (Focsiv, 2023).

Invece, per quanto riguarda l'inquinamento ambientale, l'esempio più lampante è l'estrazione di terre rare. L'industria delle REE ha alcuni impatti che si possono riscontrare in tutte le attività estrattive, ma ci sono anche aspetti particolari e unici. Come detto precedentemente, la Cina detiene il monopolio dell'estrazione e della lavorazione ma, questo potere, ha avuto un notevole effetto sui territori dove sono presenti queste strutture.

Gli impatti ambientali provocati dalle terre rare possono essere suddivisi in tre categorie: l'inquinamento geografico, l'inquinamento idrico e l'inquinamento atmosferico (Wübbecke, 2016).

La prima categoria riguarda l'impatto devastante che quest'industria ha sul paesaggio e sull'ambiente circostante. Questo è ben visibile nella Figura 4.1, la quale rappresenta un'immagine satellitare di Bayan Obo, il sito estrattivo più grande al mondo. In questa immagine si possono notare delle enormi chiazze nere intorno alla città di Baotou: esse non sono altro che gli enormi scavi dal quale si estraggono le REE e altri minerali (Wübbecke, 2016).

Figura 4.1: immagine satellitare di Bayan Obo, la più grossa miniera al mondo di terre rare.



Fonte: Wübbeke, 2016.

L'inquinamento idrico, invece, deriva principalmente dal trattamento e dalla separazione delle terre rare dalle rocce. Lo svolgimento di questi processi utilizza enormi quantità d'acqua mischiate a numerose sostanze chimiche, le quali successivamente vengono riversate nell'ambiente circostante. Si stima che l'industria delle terre rare scarichi a Baotou tra le otto e le dieci milioni di tonnellate di acque di scarico all'anno. Le quantità di sostanze chimiche e la loro tossicità varia molto a seconda dell'elemento chimico da processare, ma diversi studi hanno confermato che le sostanze più utilizzate sono acido solforico e ammonio. Queste sostanze sono pericolosissime sia per l'uomo che per gli animali in quanto, pochissime quantità assunte con il cibo nel corso degli anni, possono causare tumori o intossicazioni. Il governo centrale cinese ha imposto degli standard minimi antinquinamento, ma nella maggior parte dei casi non vengono rispettati e le autorità locali chiudono un occhio a riguardo. Inoltre, l'industria delle REE scarica nell'ambiente grandi quantità di metalli pesanti come il piombo, cadmio, rame, zinco e alluminio. Anche queste sostanze, successivamente, entrano nella catena alimentare cinese (Wübbeke, 2016).

Per ultimo ma non meno importante, l'industria delle terre rare emette grandi quantità di gas di scarico, i quali hanno un impatto locale notevole sulla qualità dell'aria. Si stima

che l'estrazione e la lavorazione di una tonnellata di terre rare produca all'incirca 5500 m³ di gas di scarico. Questi gas di scarico sono principalmente acido solforico, zolfo, biossido, fluoruro, nitrato di ammonio e acido cloridrico, tutte sostanze estremamente inquinanti per l'ambiente (Wübbecke, 2016).

Un altro aspetto da non sottovalutare è il fatto che, la maggior parte delle miniere della Mongolia Interna, estraggono REE da altri minerali e rocce, le quali contengono alcuni elementi radioattivi come il torio e uranio. Tuttavia, il vero problema avviene nelle fasi di lavorazione e separazione quando questi due elementi, in particolar modo il torio, generano scorie radioattive, le quali pongono un problema di smaltimento. Attualmente questi impianti non recuperano il torio e questo causa un problema di radioattività dell'area circostante: diverse analisi hanno evidenziato come a Baotou la radioattività intorno alle raffinerie è significativamente superiore alla media e come le acque circostanti superino di gran lunga gli standard nazionali (Wübbecke, 2016).

Si può concludere che, nonostante gli EV vengano presentati come veicoli non inquinanti, essi hanno comunque un impatto sull'ambiente non trascurabile. Inoltre, se non si regolamenta ulteriormente il settore, con la domanda in forte crescita e la richiesta di batterie sempre più elevata, l'impatto totale di questi veicoli non potrà che crescere.

CONCLUSIONI

Secondo l'opinione di molti, una delle possibili soluzioni della crisi climatica che stiamo vivendo oggi e che, probabilmente, peggiorerà in futuro, è la sostituzione dei veicoli a combustione interna con i veicoli elettrici. Ovviamente, questo processo sarebbe lungo e molto complesso in quanto, come si è visto nel corso di questo lavoro, i problemi di approvvigionamento delle materie prime sono molti e, inoltre, la sostenibilità ambientale di questo nuovo modello non è scontata come apparentemente può sembrare.

In primis va precisato che, come si è visto nel Capitolo 1, i veicoli elettrici sono stati sviluppati e inizialmente introdotti nel mercato sin dagli albori dell'automobile ma, hanno immediatamente trovato pochissimo spazio sul mercato. Oggi giorno, esistono diverse tipologie di essi, le quali variano molto a seconda della tecnologia utilizzata e del chilometraggio che riescono a percorrere alimentati esclusivamente ad energia elettrica. Le due tipologie che attualmente dominano il mercato sono i BEV, cioè veicoli alimentati esclusivamente ad energia elettrica, e i PHEV o, meglio, i veicoli *plug-in hybrid*, alimentati da un motore a combustibili fossili e da un motore elettrico, il quale garantisce autonomie notevoli, soprattutto su percorsi urbani. Secondo *International Energy Agency* (IEA) lo stock globale di veicoli elettrici è passato da poco più di 2 milioni di veicoli nel 2016 a ben 16 milioni di veicoli presenti in circolazione nel 2021 ed è previsto che, questi numeri, continuino ad aumentare esponenzialmente, andando a sostituire buona parte dei veicoli tradizionali e arrivando, nello scenario migliore, a 350 milioni di veicoli nel 2030. Questa, ovviamente, è una previsione e in quanto tale non è detto che si realizzi. A tal ragione, l'IEA prevede altri due scenari nel quale le politiche ambientali sono meno adottate e meno vincolanti e ciò comporterebbe vendite minori e un minor tasso di sostituzione. Comunque, in tutti gli scenari, gli EV sembrano essere destinati a dominare il mercato automobilistico e dei mezzi di trasporto.

Ma, come detto in apertura, le problematiche sono tante e una delle principali è l'approvvigionamento delle materie prime e la produzione delle batterie. Queste ultime sono state definite da molti esperti in materia come il vero cuore dei veicoli elettrici. La tipologia più comunemente utilizzata è la batteria agli ioni di litio (Li-ion), la quale contiene molti minerali ma i più problematici, da un punto di vista dell'approvvigionamento per le nazioni e le imprese occidentali, sono litio, cobalto e

grafite. Partendo da quest'ultimo, attualmente insostituibile nella composizione chimica dell'anodo, l'estrazione, la lavorazione e infine anche la produzione dei componenti è quasi completamente in mani Cinesi, arrivando a toccare 80% del totale a livello mondiale. Il litio, invece, presenta una situazione diversa in quanto la Cina non controlla direttamente l'estrazione di questo minerale, la quale è prevalentemente in mano all'Australia, ma detiene una larghissima fetta, corrispondente a circa il 60% del totale a livello mondiale, delle lavorazioni necessarie e rendere questo minerale utilizzabile nelle batterie. Situazione simile si presenta nel mercato del cobalto, il quale viene estratto in Congo ma, questa attività, avviene sotto il controllo indiretto cinese, il quale poi effettua la lavorazione di oltre il 60% del cobalto successivamente utilizzato per le batterie. Altro dato preoccupante, questa volta nel mercato del nichel, è la forte ingerenza russa, la quale detiene circa il 20% della lavorazione del nichel di classe 1, il nichel più puro in circolazione e l'unico utilizzabile nelle batterie dei veicoli elettrici. Questi dati evidenziano un potere di mercato elevato di queste nazioni, le quali potrebbero volutamente manipolare il flusso degli approvvigionamenti a fini speculativi. Altro fattore di pericolo è la possibile esposizione a shock economici globali, i quali avrebbero un impatto notevole sui paesi occidentali, com'è già successo in passato e come sta accadendo dal 2020 ad oggi. Attualmente, questo fenomeno è facilmente riscontrabile nell'andamento dei prezzi e, da esso, si nota subito come il valore di litio, cobalto e nichel abbia subito un'impennata notevole: a inizio 2021 il prezzo di questi minerali era più o meno in linea con l'anno 2015 ma, a maggio 2022, il litio arrivò a costare anche 9 volte di più, il cobalto era quasi triplicato e il nichel più che raddoppiato. Questo fenomeno è stato generato dalle tensioni sulla supply chain provocata dalla ripresa post-pandemia occidentale, i continui lockdown in Cina dovuti alla politica zero-covid e la domanda di batterie che sembra già essere notevolmente cresciuta nel periodo post-Covid, la quale si prevede che continuerà ad aumentare di pari passo con la domanda di veicoli elettrici. Questa situazione ha messo a dura prova il mercato dei veicoli che, attualmente, è ancora sottoposto a ritardi nelle consegne e inflazione elevata.

Nel dibattito pubblico, si è spesso sentito parlare delle cosiddette terre rare, elementi che, come si è visto nel Capitolo 3, risultano essere indispensabili per il passaggio da un'economia basata sui combustibili fossili ad un'economia *green*. Essi sono 17 e trovano

moltissimi usi nel mondo di oggi in quanto indispensabili per le turbine eoliche, le batterie NiMH, le lampadine al led, i magneti permanenti dei motori e molti altri usi.

Tuttavia, diversamente da quanto si possa pensare, per quanto riguarda i veicoli elettrici, questi elementi chimici non sono indispensabili per la produzione di batterie (fatta eccezione delle batterie NiMH, nominate precedentemente) ma bensì per la produzione dei magneti permanenti dei motori, parte altrettanto fondamentale in tutte le tipologie di veicoli. In questo caso, gli elementi utilizzati sono esclusivamente due: neodimio e disprosio. Essi sono utilizzati in quantità notevoli e attualmente, nonostante l'intenzione di alcuni costruttori, come ad esempio Tesla, di rimpiazzarli con altri materiali, rimangono indispensabili e insostituibili. Il controllo assoluto di questo mercato, anche in questo caso, appartiene alla Cina: si stima che essa detenga circa 84% della produzione totale di terre rare. Anche in questo caso, i prezzi di neodimio e disprosio sono aumentati molto a cavallo tra 2021 e 2022 e ovviamente ciò ha contribuito ad alimentare il fenomeno inflazionistico che stiamo subendo da circa un anno a questa parte. Ovviamente, i timori per il futuro non sono pochi in quanto, come probabilmente successo del 2011, questi mercati sono esposti anche ad attacchi inflazionistici che, visto gli attuali rapporti tesi tra Stati Uniti e Cina, non sono così improbabili.

Le politiche atte a ridurre la dipendenza dal colosso cinese, come visto brevemente nel Paragrafo 2.6, investiranno o stanno investendo ingenti capitali e si sono poste obiettivi molto ambiziosi. Tali obiettivi, visto l'attuale stato delle cose, sono difficilmente raggiungibili, richiedono molto tempo e sicuramente ci renderebbero molto più indipendenti ma, dall'altro lato, contribuirebbero ad aumentare i malesseri e le tensioni internazionali già in atto da anni.

Infine, ci si è posti la domanda se i veicoli elettrici presentino costi ambientali minori rispetto ai classici veicoli alimentati a combustibili fossili. Per rispondere a tale quesito, ho analizzato degli studi effettuati con i modelli LCA (*Life Cycle Assessment*), i quali vanno a stimare l'impatto ambientale dell'intero ciclo di vita del prodotto. Da quest'analisi è scaturito un risultato abbastanza evidente: i veicoli elettrici, nella fase di utilizzo, sono nettamente meno inquinanti ma, va evidenziato come questo dato sia in parte compensato dall'inquinamento provocato dalla loro produzione. Infatti, la produzione delle batterie e la lavorazione chimica dei minerali ed elementi chimici presenti in esse hanno un grosso impatto ambientale, non tanto nell'emissione di gas serra

e quindi nel surriscaldamento dell'atmosfera, ma bensì nel rilascio di sostanze chimiche nell'ambiente estremamente tossiche per l'uomo, per la vegetazione e per gli animali. Inoltre, va precisato come, questi modelli, tengono poco conto delle questioni etiche riguardanti le condizioni estreme e precarie dei minatori e l'impatto ambientale a livello locale, particolarmente devastante nell'industria delle terre rare.

Per concludere si può affermare che i veicoli elettrici, secondo le stime riportate, sembrano essere effettivamente i veicoli del futuro ma, la produzione delle batterie e di altri componenti in mano alla Cina, pone moltissimi problemi di approvvigionamento, i quali si potrebbero ripercuotere nella transizione dai veicoli tradizionali ad essi. Inoltre, si devono vedere e analizzare questi prodotti criticamente e migliorare i processi di produzione, i quali portano, senza dubbio, ad un impatto ambientale apparentemente minore rispetto ai veicoli tradizionali, ma certamente non trascurabile.

BIBLIOGRAFIA

Barontini F. (2023). L'autonomia reale delle 10 auto elettriche del momento. La super prova. Risorsa web reperibile all'indirizzo:

<https://insideevs.it/reviews/631320/autonomia-reale-auto-elettriche-2023/> (consultato 5 aprile 2023).

Barontini F. (2022). Batterie per auto elettriche: come sono e quanti tipi ne esistono. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://insideevs.it/news/625277/batterie-auto-elettriche-tipi-tecnologie/> (consultato 6 aprile 2023).

BloombergNEF (2022). Electric vehicle global outlook 2022. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://bnef.turtl.co/story/evo-2022/page/1?teaser=yes> (consultato 5 aprile 2023).

Boromeo E. (2021). Smartphone, miniera di terre rare. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://www.rsi.ch/news/oltre-la-news/Smartphone-miniera-di-terre-rare-14085004.html> (consultato 5 maggio 2023).

Circular Economy Network (2023). Critical Raw Materials: la strategia UE per le materie prime critiche. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://circulareconomynetwork.it/2023/03/17/critical-raw-materials-act/> (consultato 12 giugno 2023).

Commissione europea (2005). European Platform on Life Cycle Assessment (LCA). Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://ec.europa.eu/environment/ipp/lca.htm> (consultato 20 maggio 2023).

Commissione europea (2023). Critical Raw Materials: ensuring secure and sustainable supply chains for EU's green and digital future. Risorsa web reperibile all'indirizzo: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1661 (consultato 12 giugno 2023).

Department of Energy's (DOE) (2023). Electric Vehicle Battery Pack Costs in 2022 Are Nearly 90% Lower than in 2008, according to DOE Estimates. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/fotw-1272-january-9-2023-electric-vehicle-battery-pack-costs-2022-are-nearly> (consultato 5 aprile 2023).

Einaudi F. (2019). Fuel cell, cosa sono e come funzionano. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://insideevs.it/features/388133/auto-idrogeno-come-funzionano-fuel-cell/#:~:text=Come%20funzionano%20le%20celle%20di,come%20unico%20prodotto%20di%20scarto> (consultato 4 aprile 2023).

Enel x (2020). Qual è la differenza tra auto elettrica e ibrida? Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://corporate.enelx.com/it/question-and-answers/what-is-the-difference-between-hybrid-and-electric-cars#:~:text=La%20differenza%20fondamentale%20%C3%A8%20che,di%20elettricit%C3%A0%20e%20carburante%20convenzionale> (consultato 3 aprile 2023).

Fagioli F. (2020). I 150 anni dell'auto elettrica. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://www.cobat.it/comunicazione/rivista-ottantadue/articolo/i-150-anni-di-storia-dellauto-elettrica> (consultato 3 aprile 2023).

Focsiv (2023). Formalizzare l'estrazione artigianale di cobalto in Congo. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://www.focsiv.it/formalizzare-lestrazione-artigianale-di-cobalto-in-congo/> (consultato 25 maggio 2023).

IEA (2022). Global EV outlook 2022. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022> (consultato 4 aprile 2023).

Il motorista (2020). Tutto quello che devi sapere sulle auto ibride. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://clubdeimotori.it/notizia/guide/tutto-quello-che-devi-sapere-sulle-auto-ibride/> (consultato 4 aprile 2023).

Klinger J.M, 2017. “What are rare earth elements?”, in J.M. Klinger (a cura di), RARE EARTH FRONTIERS, From Terrestrial Subsoils to Lunar Landscapes, Cornell university press, pp. 41-67.

La Monica M., Scagliarino C., Nania F., Massacci G., Cutaia L., 2020. Materie prime principali e critiche nelle batterie agli ioni di litio degli autoveicoli elettrici: analisi della catena del valore in un’ottica di economia circolare, relazione presentata al 5th symposium on urban mining and circular economy SUM 2020, Venezia, 18-20 novembre 2020.

Messagie M. (2014). Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles. Risorsa web reperibile all’indirizzo: <https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/TE%20-%20draft%20report%20v04.pdf> (consultato 18 maggio 2023).

Money.it (2022). Tre modi per investire in azioni di terre rare. Risorsa web reperibile all’indirizzo: <https://www.money.it/tre-modi-per-investire-azioni-terre-rare> (consultato 9 maggio 2023).

Palacios L., Pelegry E., Rodríguez J., 2022, “The Interest of Mineral Raw Materials in the Development of Electric Vehicles”, in Vargas.A (a cura di), The Role of the Electric Vehicle in the Energy Transition, Springer, pp. 133-155.

Parlamento europeo (2019). Emissioni di CO2 delle auto: i numeri e i dati. Risorsa web reperibile all’indirizzo: <https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20190313STO31218/emissioni-di-co2-delle-auto-i-numeri-e-i-dati-infografica> (consultato 3 aprile 2023).

Pezzali R. (2021). Le terre rare sono ovunque ma solo la Cina le estrae. Risorsa web reperibile all’indirizzo: <https://www.dday.it/redazione/30986/terre-rare-cina-huawei> (consultato 5 maggio 2023).

Re L. (2023). Auto elettrica, quali impatti avranno le nuove regole dell'IRA Usa sulla filiera globale? Risorsa web reperibile all'indirizzo:

<https://www.qualenergia.it/articoli/auto-elettrica-nuove-regole-ira-usa-impatti-filiera-globale/> (consultato 11 giugno 2023).

Runich A. e Danielis R., 2016, “The private and social cost of the electric car: a comparison between models of different car market segments”, in Romeo Danielis (a cura di), L'auto elettrica come innovazione radicale: scenari di penetrazione di mercato e ricadute economiche e sociali, pp.30-46.

Silvestri L., Forcina A., Silvestri C., Traverso M., 2021, “Circularity potential of rare earths for sustainable mobility: Recent developments, challenges and future prospects”, Journal of Cleaner Production, Vol. 292.

Strategic metal invest (SMI) (2023). Neodymium Prices. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://strategicmetalsinvest.com/neodymium-prices/> (consultato 9 maggio 2023).

Strategic metal invest (SMI) (2023). Dysprosium Prices. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://strategicmetalsinvest.com/dysprosium-prices/> (consultato 9 maggio 2023).

Tagliaferri C., Evangelisti S., Acconcia F., Domenech T., Ekins P., Barlett D., Lettieri P., 2016, “Life cycle assessment of future electric and hybrid vehicles: A cradle-to-grave systems engineering approach”, Chemical Engineering Research And Design, Vol. 112, pp. 298–309.

Transport & Environment (2023). Europe could end reliance on Chinese Li-ion battery cells by 2027 – forecast. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://www.transportenvironment.org/discover/europe-could-end-reliance-on-chinese-li-ion-battery-cells-by-2027-forecast/> (consultato 12 giugno 2023).

Trotta M. (2022). In Congo tra le miniere di cobalto e le guerre invisibili. Risorsa web reperibile all'indirizzo: <https://www.liberopensiero.eu/29/12/2022/diritti/diritti-umani/congo-cobalto-guerre/> (consultato 25 maggio 2023).

Widmer James D., Martin R., Kimiabeigi M., 2015, "Electric vehicle traction motors without rare earth magnets", *Sustainable Materials and Technologies*, Vol. 3, pp 7-13.

Wübbecke J., 2016, "The rare earth industry", in Jost Wübbecke (a cura di), *Problems, Strategy and Implementation in China's Rare Earth Industry*, Freien Universität Berlin, pp. 37-59.

Zhou B., Zhongxue Li, Congcong C., 2017, "Global Potential of Rare Earth Resources and Rare Earth Demand from Clean Technologies", *MDPI Journal*, Vol. 7.