

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

***Relazione per la prova finale
«Fabbisogno materiali per scenari
elettrici 100% rinnovabili»***

Tutor universitario: Prof. Giuseppe Zollino

Laureando: *Pietro Casarin*

Padova, 21/09/2023

“Saranno disponibili sufficienti forniture minerarie sostenibili e di provenienza responsabile per sostenere l'accelerazione delle transizioni energetiche?” (*World Energy Outlook*, IEA, 2022)

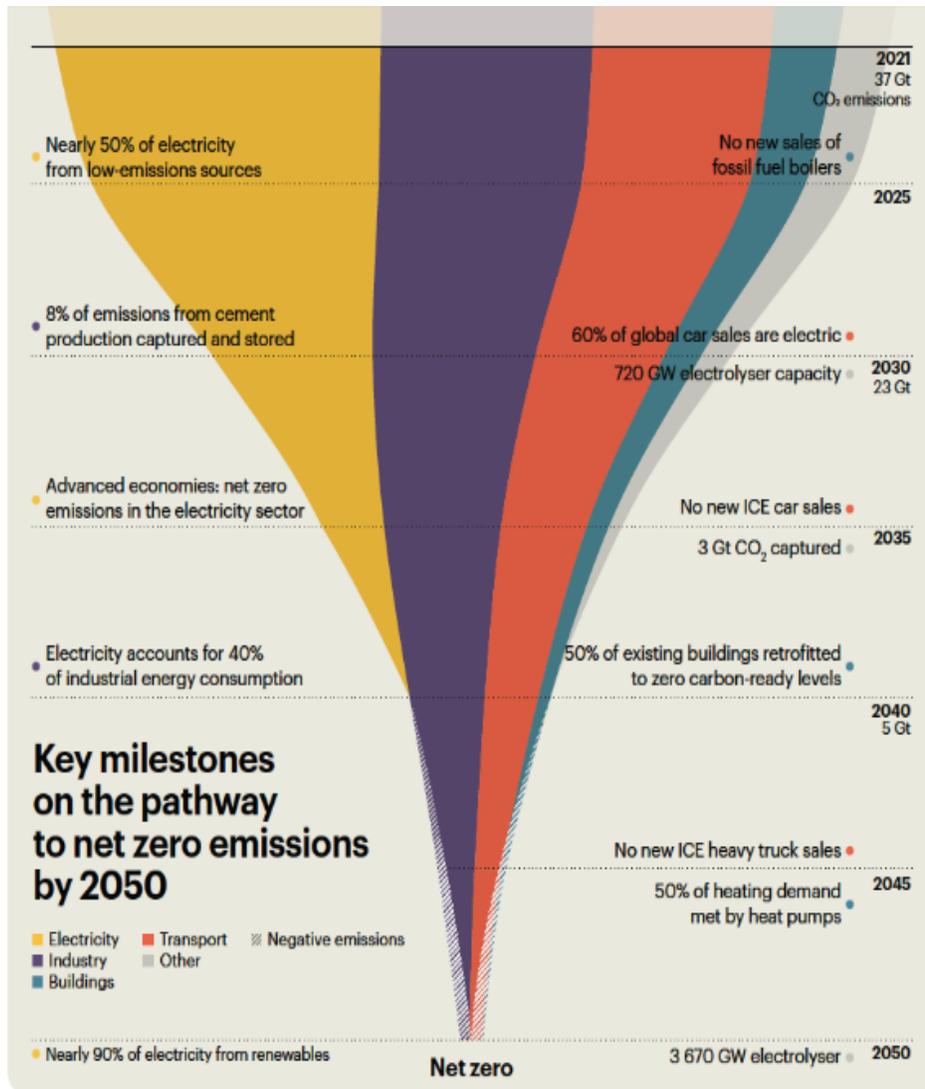
Oggetto: La ricerca si focalizza sulla **questione dei materiali** necessari per la produzione delle **tecnologie rinnovabili** di generazione di energia elettrica.

La **questione dei materiali** è **complessa** e si interfaccia con il concetto di **Sostenibilità, ambientale, sociale ed economica:**

- *Impact Leakage*, crisi della catena di approvvigionamento delle materie prime, disponibilità di risorse, resilienza e diversificazione della *Supply chain*, maturazione delle tecnologie, scelte di policy sia aziendali che di governo, accettazione sociale e altre esternalità ambientali e di mercato, nonché di stabilità politica delle singole nazioni.



- Analisi del Paniere elettrico rinnovabile nello scenario NZE 2050
- Fabbisogno Materiali delle tecnologie rinnovabili nello scenario NZE
- Confronto domanda materiali tra le varie tecnologie
- Prospettive future di fabbisogno
- Approfondimenti



Roadmap NZE 2050 IEA

Fabbisogno:

- **14,86 Gtep del 2021 → 12,7 Gtep nel 2050:**
 - **misure di efficientamento energetico** nel settore industriale e edilizio
 - **elettrificazione** del settore elettrico e dei trasporti

Elettrificazione:

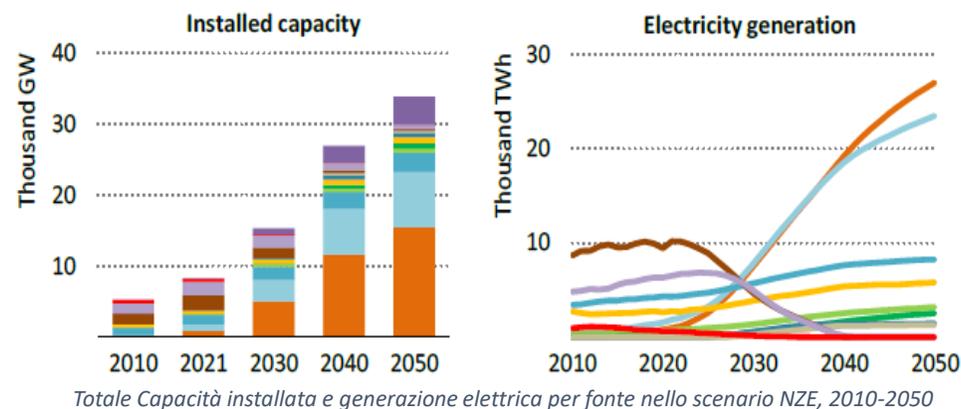
- Sui consumi finali **aumenta di oltre due volte e mezzo**, con un **tasso medio annuo del +3,3%** e una **penetrazione finale del 50%** su tutti i settori;
- Indice di **migliore qualità della vita e sviluppo tecnologico**, nonché riduzione delle emissioni grazie alle **migliori efficienze** dei processi;
- **Neutralità carbonica del settore elettrico conseguita nel 2035**
 - *phase-out* delle tecnologie tradizionali
 - **Rinnovabili: 28% → quasi 90% nel 2050**, con una capacità installata che aumenta di oltre sette volte. Il **solare fotovoltaico e l'eolico** sono i **principali mezzi per ridurre le emissioni** del settore elettrico: la loro quota globale di produzione di elettricità aumenta dal 10% nel 2021 al 40% entro il 2030 e al 70% entro il 2050.

■ **Fotovoltaico:** Ha il maggior tasso di crescita medio tra tutte le rinnovabili, +10% annuo fino al 2050, con una penetrazione finale del 46% nel settore elettrico, specialmente grazie all'espansione della generazione distribuita in aggiunta a quella utility-scale, oltre alla progressiva riduzione dei costi legata anche alla maturazione tecnologica e di mercato. La soluzione dominante è quella al silicio monocristallino, seguita dal poli-Si e *thin film*.

■ **Eolico:** E' ad oggi la seconda maggiore fer dopo l'idroelettrico e lo scenario indica un tasso del +8 % d'installazione annua dal 2021 al 2050, con una quota finale del 23% sulla capacità totale. L'onshore è tuttora la tecnologia prevalente, ma si prevede la crescita dell'eolico offshore, grazie alle maggiori capacità specifiche, i migliori fattori di carico, legati alle migliori condizioni del vento.

■ **Altre rinnovabili:** tra le quali il CSP, oggetto di ricerca e le cui capacità sono ridotte ma indicate in forte aumento fino al 2050 (+15% annuo dal 2021), seppur trascurabili sul totale (1%), a partire da una penetrazione praticamente nulla.

■ **Idroelettrico:** nel 2021 era la tecnologia rinnovabile con maggior capacità installata (17% del totale), grazie alla dispacciabilità che fornisce flessibilità al sistema. Nello scenario NZE viene ribadita questa funzione, ad integrazione delle crescenti generazioni da rinnovabili aleatorie, seppur con un incremento di capacità più contenuto, al +2,4% medio fino al 2050



■ **Batterie:** Complessivamente lo stoccaggio delle batterie annuale cresce di 80 volte dal 2020 al 2050, soprattutto grazie alle politiche sulle auto elettriche, ma anche lo storage aumenta, con un tasso di +19% annuo e una penetrazione dell'11% sulla totale capacità installata nel 2050, per garantire più flessibilità al sistema, a sostituzione del gas naturale.

■ **Idrogeno:** Sebbene non compaia tra i protagonisti della generazione elettrica futura, esso costituisce un vettore energetico implementabile nei prossimi anni. L'idrogeno a basse emissioni aggiunge 3000 TWh alla domanda entro il 2030 e oltre 14800 TWh entro il 2050.

■ **Nucleare:** I tassi di crescita di capacità nucleare al 2050 sono quasi quattro volte la loro media storica recente

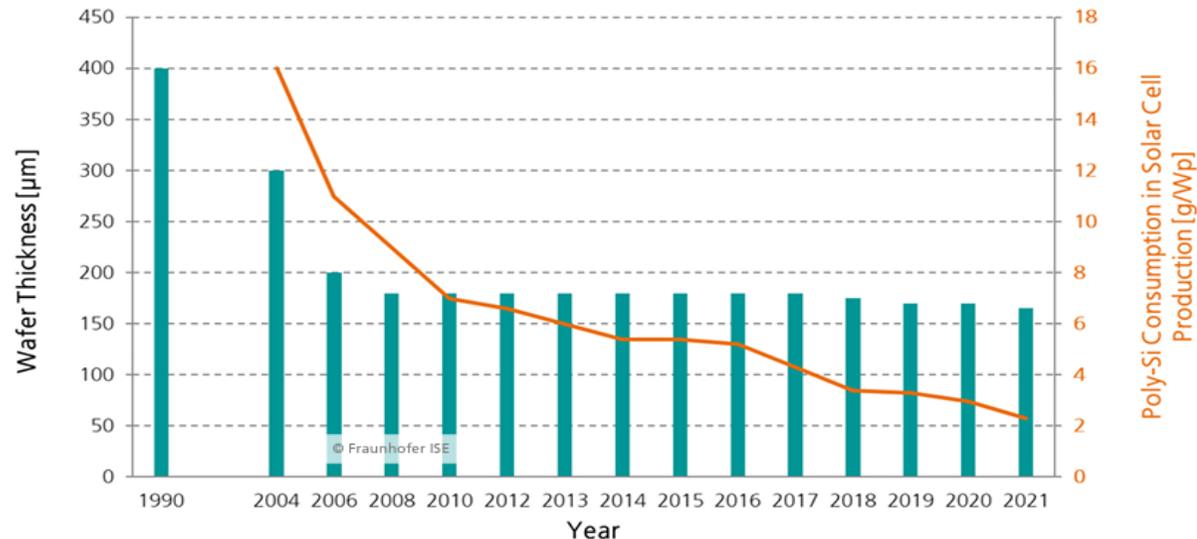
■ **Carbone (senza CCUS), Gas naturale (senza CCUS) e Petrolio** vengono sostituiti parzialmente dai **fossili con CCUS**, e dalle rinnovabili, tra cui le **bioenergie**, anch'esse in crescita e fisse al 2% sulla capacità totale.

Reti di trasmissione e distribuzione elettrica: ingenti investimenti saranno destinati all'ampliamento, rafforzamento e digitalizzazione delle reti.

Soluzioni tecnologiche:

- I **Cristalli di silicio** sono la **soluzione dominante** e a **maggior intensità di minerali critici** (oro e argento) e **silicio** rispetto ai *thin film*, i quali però richiedono **materiali più specifici** (indio, tellurio, cadmio,...) e vetro
- **Soluzioni alternative** come la tecnologia alla perovskite o all'arsenide di gallio (GaAs) favoriscono la **diversificazione**, per alleviare in parte la domanda di Ag per i moduli al silicio cristallino
- Le applicazioni per la **generazione distribuita** necessitano del **40% in più di rame** rispetto alle *utility scale*, avendo stringhe di inverter o microinverter

Sviluppo Cella Solare al c-Si: spessore del wafer [μm] e uso di silicio [g/Wp]

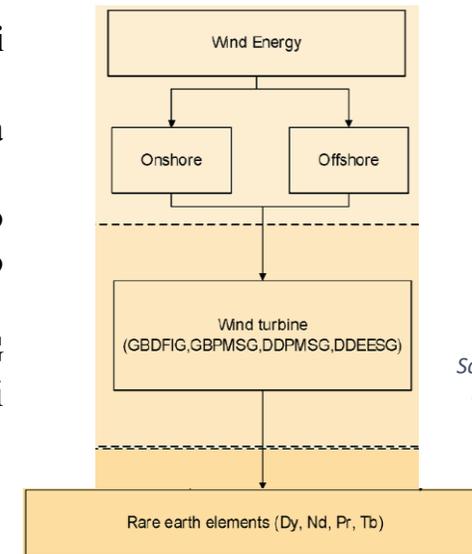


Data: until 2012: EU PV Technology Platform Strategic Research Agenda, from 2012: ITRPV 2015; ISE 2016 without; 2017 to 2020 with recycling of Si. Graph: PSE Projects GmbH 2021

Fabbisogno materiali:

- La **maturazione tecnologica** ha portato a **minori prezzi, maggior efficienza dei moduli e minor intensità specifica di materiali**:
 - (vedi figura) Dal 2004 ad oggi il *wafer* del c-Si è passato da uno spessore di 0,3 mm a poco più di 0,15, con un utilizzo di silicio crollato da 16 g/Wp a 2g/Wp. Inoltre, anche la domanda di argento è crollata di oltre l'80%;
- L'**ingente capacità da installare** causa comunque un **aumento del 200-300%** di domanda di **materiali critici per il PV** entro il 2030 rispetto al 2021, a seconda del materiale:
 - **Ag**: il PV ne richiede **dal 11% (2021) al 35% (2030)** di produzione globale, nonostante un atteso **calo** di un **fattore quattro dell'intensità dell'Ag**.
 - Il **PV** è la tecnologia più **intensiva di rame** di tutto il paniere.

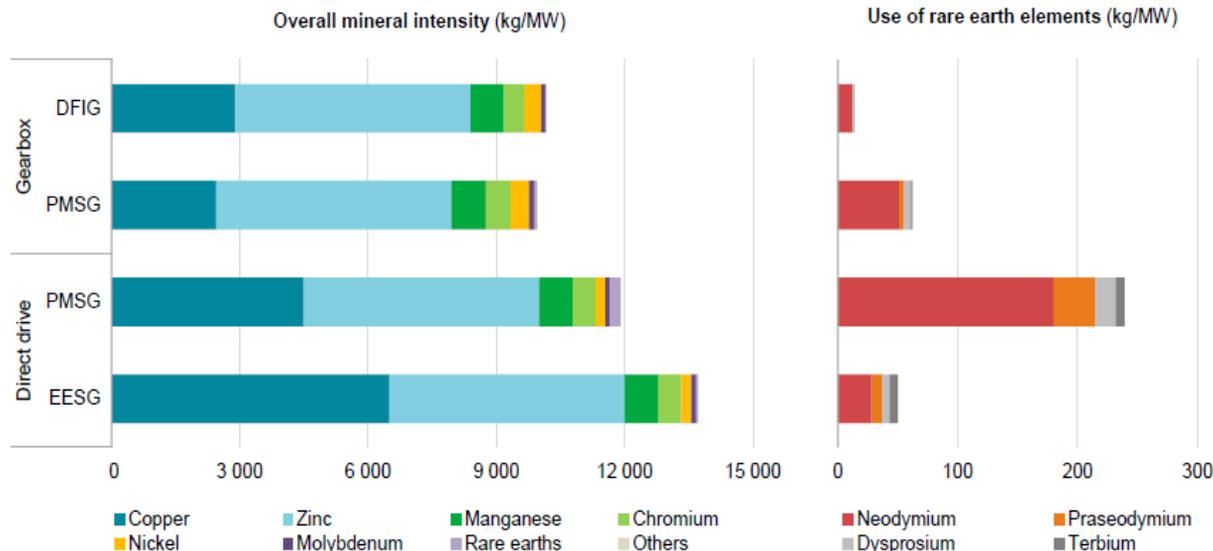
- L'aumento delle taglie degli aerogeneratori e l'innovazione tecnologica comportano **meno materiali** per unità di potenza
- Le soluzioni **offshore** richiedono **più del doppio di rame** rispetto all'onshore, per l'allacciamento alla rete e il cablaggio.
- L'intensità dei materiali dipende fortemente dal tipo di generatore installato all'interno dell'aerogeneratore, in quanto **influisce** sia sulla quantità di **rame** e **zinco** (anticorrosivo), ma soprattutto sul **fabbisogno di terre rare**:
 - I generatori a **magneti permanenti** richiedono **neodimio (Nd)** e **disprosio (Dy)**. I **DD-PMSG** sfruttano generalmente più terre rare dei GB-PMSG per conseguire dimensioni e peso ridotti compatibilmente con una maggior efficienza.



Schema delle terre rare utilizzate per l'eolico

www.dii.unipd.it

Intensità di minerali per la potenza eolica per tipo di turbina



IEA. All rights reserved.

Onshore: Ad oggi prevalgono generatori a induzione (**GB-DFIG**), che contano per oltre il **70%**, mentre i **DD-PMSG** hanno **raddoppiato** la loro diffusione negli ultimi dieci anni dal 10% al 20% (2020);

Offshore: le turbine **DD-PMSG** sono la scelta principale, (**60% di penetrazione** sul mercato) poiché garantiscono maggiori efficienze e leggerezza (di fronte a rotori più grandi), oltre a ridotti costi di manutenzione.

Concentrated Solar Power:

- Il **Central Tower** richiede **più materiali critici** (complessivamente) rispetto ai **Parabolic Through**, otto volte più manganese, quattro volte più nickel e due volte più argento. Di contro, i **PT** utilizzano più del doppio di rame.
- La **Crescita di capacità installata** è comunque **ininfluente** sulla quota complessiva di rinnovabili, però comporta ugualmente una **maggiore domanda soprattutto di Cr** e poi di **Cu, Mn e Ni**. Questi aumenti andrebbero **tenuti presente** in caso di uno sviluppo del CSP su scale maggiori.

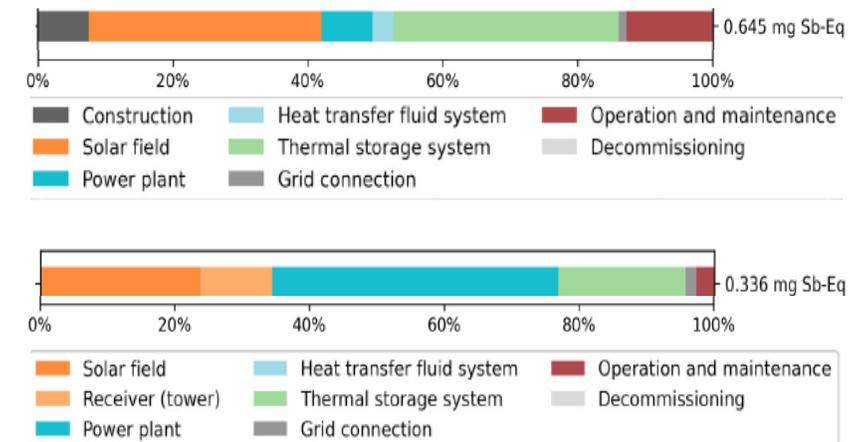
Idroelettrico:

L'intensità di minerali è molto bassa rispetto alle altre *low carbon*, non utilizzando minerali critici ma piuttosto cemento e calcestruzzo, il cui settore produttivo è già predisposto all'aumento di domanda e dunque non risentirà della Transizione.

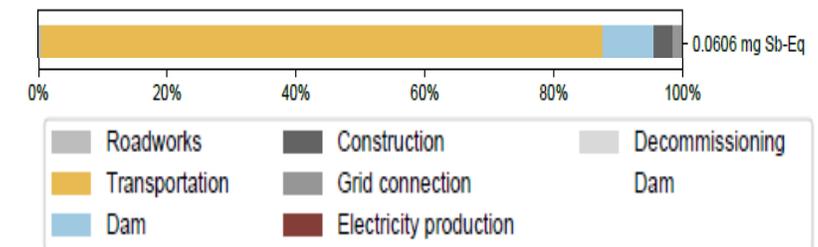
Reti elettriche:

- Per le nuove reti inter-array e linee di trasmissione **d'energia derivante da PV o ed eolico** (e altre RES) su scala industriale, nello scenario NZE 2050 si ha **domanda ingente di rame, alluminio e acciaio**:
 - Nel 2050 il rame necessario costituirebbe il 16% della sua domanda complessiva per la Transizione (2% per l'alluminio);
 - Il **PV utility-scale** utilizza **più rame** per le sue reti, seguito dall'eolico offshore, mentre l'onshore sfrutta più alluminio, che è oggetto di sviluppo tecnologico;
- L'estensione della **durata di vita dei progetti rinnovabili**, oltre a politiche come il **ripotenzamento** ridurrebbero la domanda di metalli nei sistemi di rete elettrica associati

Impatti minerals and metals del ciclo vita da 1 KWh di produzione CSP PT (sinistra) e CT (destra), Europa, 2020



Impatti minerals and metals del ciclo vita da 1 KWh di produzione idroelettrica (360 MW), Europa, 2020

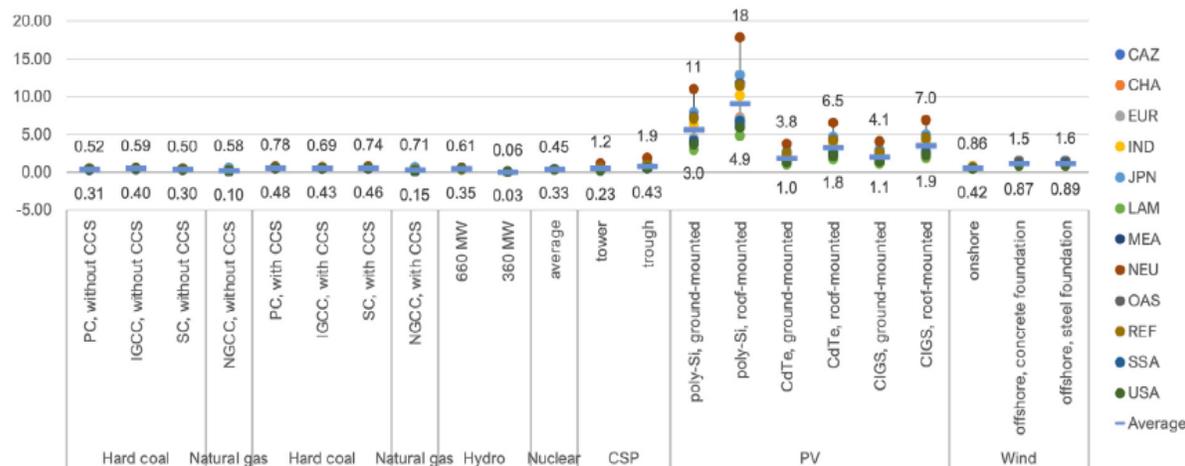


Valutazione impatti:

Dato il rischio di *Impact Leakage* soprattutto per le RES, si utilizza la **metodologia LCA** (standardizzata ISO) per caratterizzare il **quadro completo degli impatti** sottesi dalla generazione elettrica unitaria derivante da ogni tecnologia studiata, **valutando ciascuna fase di vita del prodotto** e non solo quella d'uso.

Scarsità di risorse (esaurimento abiotico) [g Sb-eq/MWh]: si confrontano le riserve stimate di ogni elemento con quelle dell'antimonio, per esprimere il **rischio di approvvigionamento**; tra tutti emerge il **PV in poli-Si** (utilizzo di **oro e argento**), soprattutto per produzioni in regioni a minor maturazione tecnologica, mentre i valori sono **bassi per tecnologie ad alta intensità di infrastrutture** come idroelettrico, nucleare e centrali a carbone e gas, seppur la CCUS comporti un lieve rialzo.

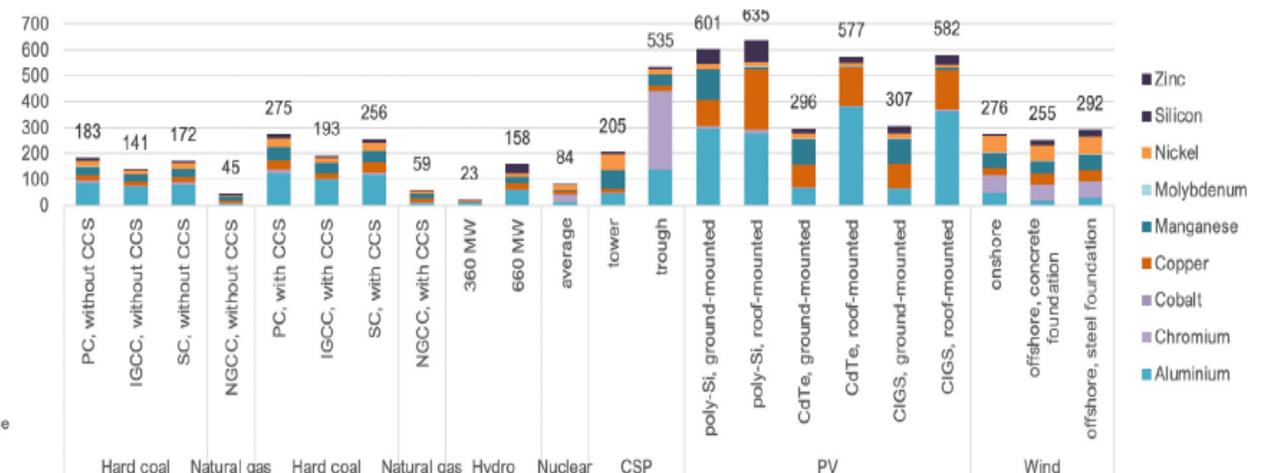
Requisiti di minerali e metalli nel ciclo vita secondo variazione regionale, in g Sb-eq per MWh, 2020



Requisiti materiali [g/MWh]: estrapolazione e contabilizzazione dall'inventario delle quantità di metalli non ferrosi richiesti per unità d'energia:

- **Le rinnovabili** richiedono un **maggior apporto di materiali** critici rispetto ai sistemi a fonte fossile, a parità di energia prodotta;
- Il **fotovoltaico** appare come la tecnologia **più intensiva di Cu e Al** del paniere, a causa delle apparecchiature elettriche e dell'infrastruttura, con un **fabbisogno alto** a seconda della tecnologia, **300-600 g/MW**
- **CSP:** soprattutto **romo** per l'acciaio inossidabile incorporato nell'infrastruttura del parabolic through (**300 g / MWh**).
- **Turbine eoliche:** relativamente ad **alta intensità di acciaio** e domanda di **60-70 g di cromo**, nonché di **nicel**. In totale, circa **300 g/MWh** di metalli non ferrosi;
- **Tecnologie tradizionali** (gas e carbone): **minori quantità di materiali non ferrosi (100-200 g)**, maggiori per integrazione con il CCS

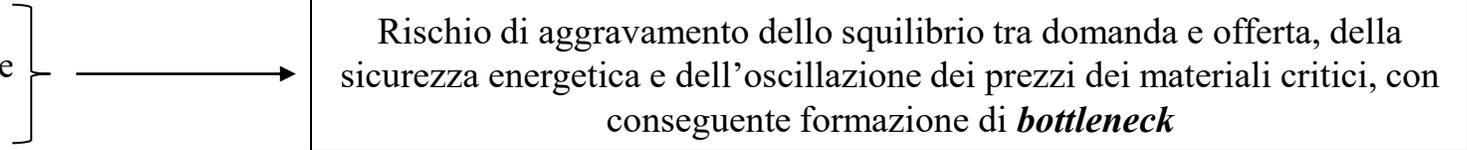
Requisiti di materiali, in g per MWh



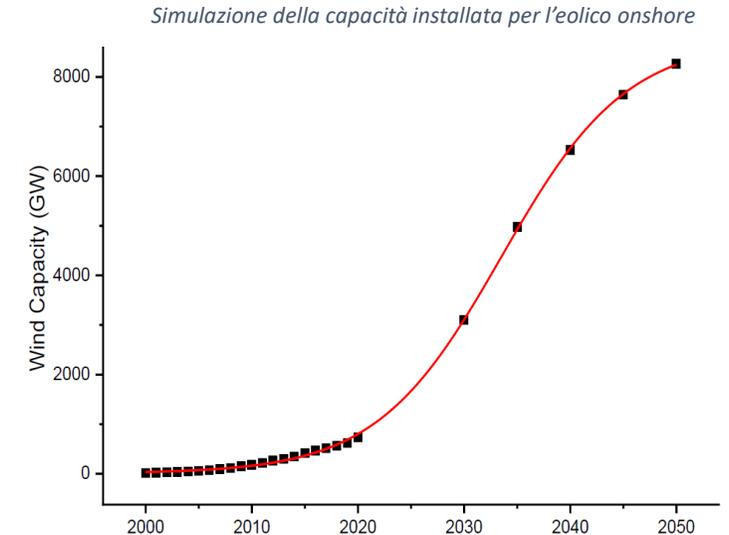
La **domanda di materiali critici nel 2050 aumenterà di 16 volte** (4 volte nel 2030) **rispetto al 2020** nello **scenario NZE**, sulla spinta di eolico, PV ed elettrificazione della mobilità.

Di fronte al **maggior aumento** in termini **assoluti** della domanda di **rame**, altri minerali critici, come **Ag, Si, REEs e Li** sperimentano **maggiori tassi di crescita**, che dovranno interfacciarsi con alcune criticità:

- Elevata concentrazione geografica
- Lunghi tempi di messa in funzione delle nuove miniere
- Declino della qualità delle risorse
- Tensioni politiche



1. **Andamento capacità installata:** simile a una **curva logistica** per eolico e PV:
 - fino al **2035**, incrementi mirati **all'espansione della capacità globale e all'accumulo di scorte in uso**; tra il **2046** e il **2050**, prevale la **sostituzione della capacità**
2. **Discrepanza tra la durata tecnica e la vita economica:**
 - Il compromesso tra **smantellamento** o **estensione** della durata dei sistemi è difficile da determinare → dualismo tra vita tecnica e vita economica dei sistemi
3. **Maturazione tecnologica:**
 - **Espansione degli impianti di lavorazione, diminuzione domanda specifica** e processi a minori emissioni di carbonio
 - **Diversificazione della produzione**, contestualmente all'approvvigionamento delle nuove materie prime in riserve economicamente valide



I veicoli elettrici utilizzano oltre sei volte più minerali rispetto ai corrispettivi termici, soprattutto per la presenza del motore elettrico e delle batterie.

Motori elettrici: tipologie più comuni di motori elettrici plug-in:

- Motore sincrono a magneti permanenti: maggiore efficienza e densità energetica e **più mineral-intensive**,
- Motore a induzione: costi minori, a spese del rendimento, per le perdite negli avvolgimenti di rame, il quale è molto richiesto (11-24 kg/veicolo); assente l'uso di REEs

Batterie: (cella+modulo+pacco)

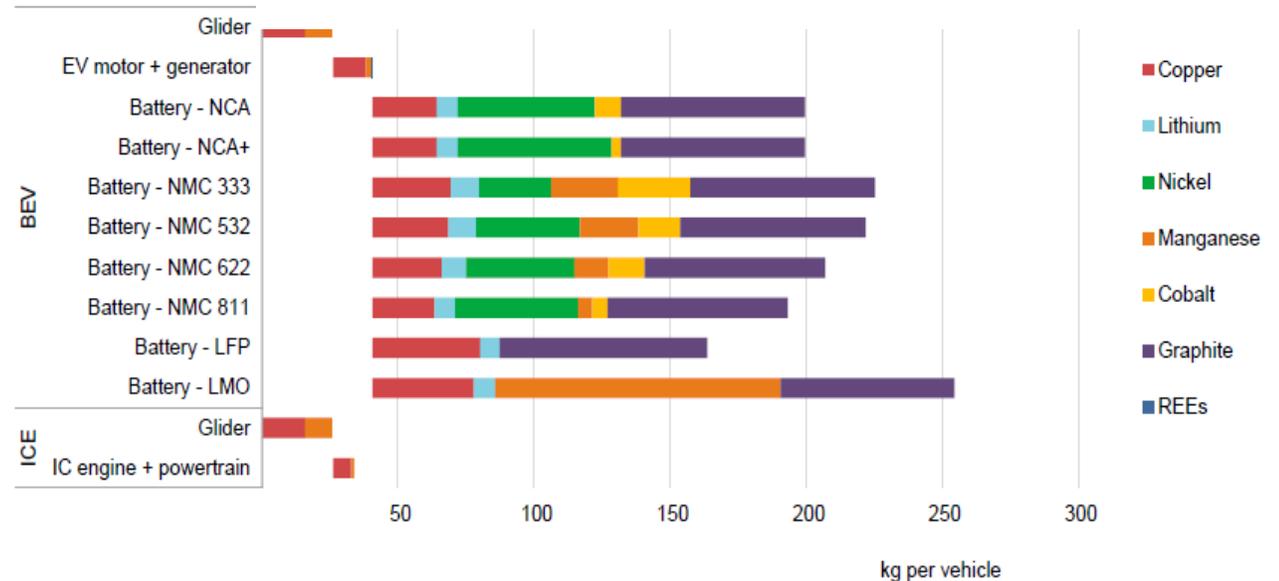
- La **chimica della batteria** (all'anodo e catodo della cella) determina le **proporzioni dei materiali** richiesti (Ni, Mn, Co, Al, Li, Fe, P, Cu, grafite), con una ricerca volta alla **diminuzione della domanda di alcuni metalli** (come Co e Mn) con conseguente **trasferimento di domanda** verso altri (Li e Ni)

Prezzi: **-86% nell'ultimo decennio: economie di scala e innovazione** lungo tutta la catena di approvvigionamento

Regionalizzazione: La capacità di produzione di batterie è concentrata in Cina (70%), anche se entro il 2030 un quarto dovrebbe essere in Europa e negli Stati Uniti

Dimensioni: +60% tra il 2015 e il 2021 e in **trend positivo**, ma **nello scenario NZE**, apposite politiche, ad esempio l'attribuzione di **incentivi** all'acquisto anche al peso del veicolo, potrebbero **ridurre** la domanda di materiali per le batterie di circa il **7% entro il 2030**.

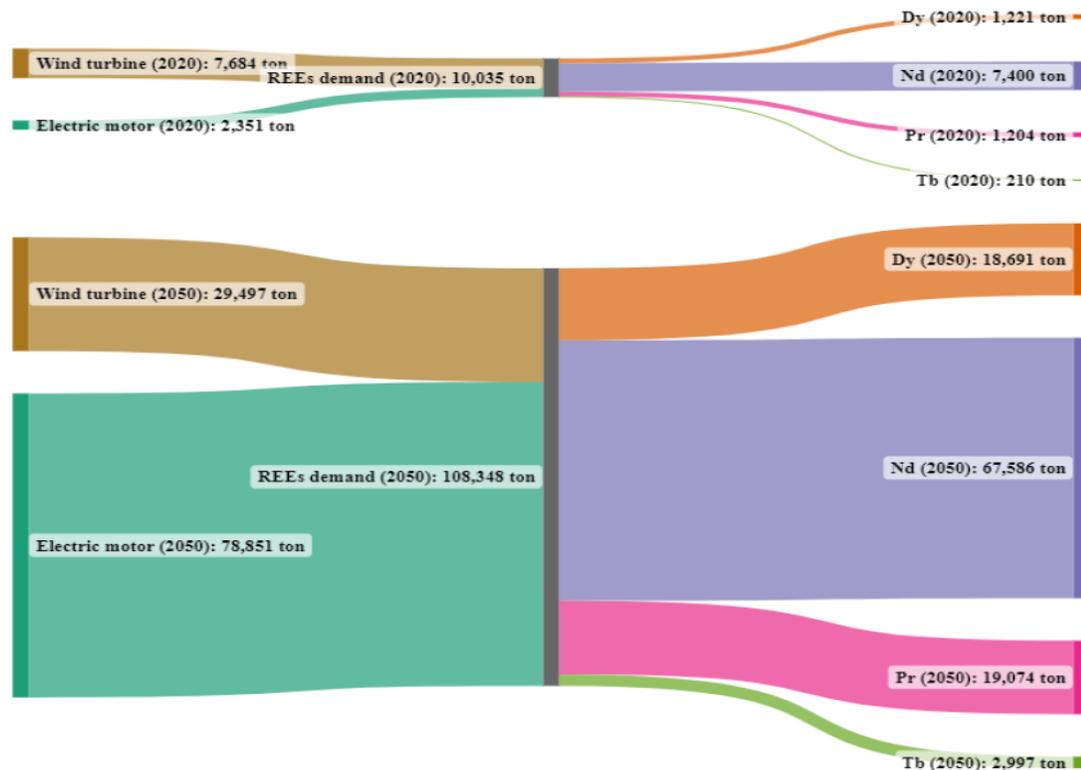
Tipico utilizzo di minerali in un veicolo a MCI o EV



Terre rare (REEs):

- Si giungerà a un complessivo di 105 348 ton di REE nel 2050, rispetto alle 10 035 ton del 2020, con un **trasferimento della domanda dall'eolico ai motori elettrici** per l'utilizzo diffuso dei magneti NdFeB

Diagrammi di Sankey della domanda di terre rare per turbine eoliche e motori elettrici, 2020-2050



Quantità materiali:

• Rapporto Domanda-offerta:

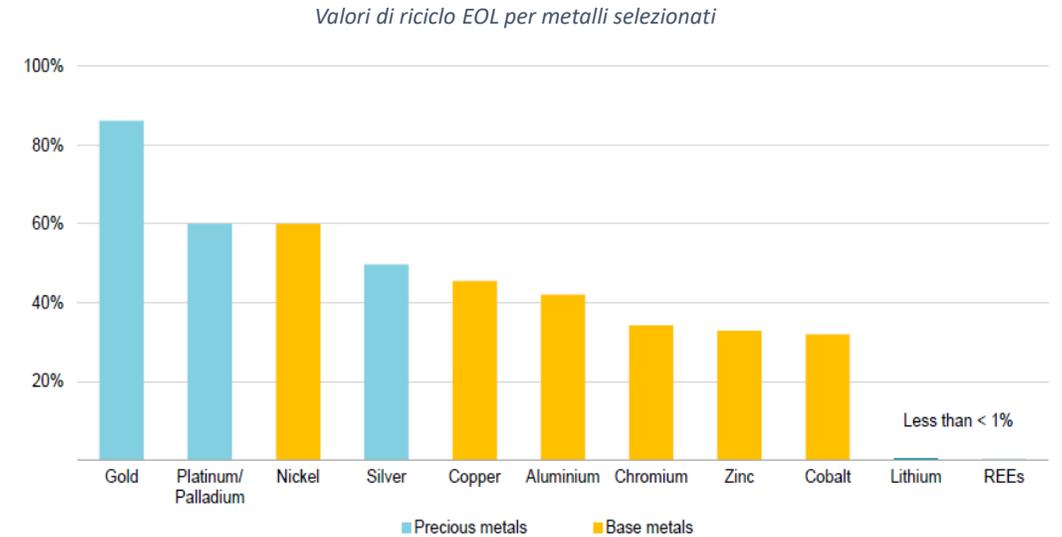
- Scenari intensivi: oltre il 100% già nel 2030 per le REE nelle turbine eoliche e per i moduli fotovoltaici;
- Domanda media: aumenta di circa 3,5 volte per le REE nelle turbine eoliche e di 3-7 volte per materiali specifici nel PV. La stima mediana per il picco di cobalto è circa il doppio della produzione attuale.

Qualità materiali:

- **In calo continuo** su una vasta gamma di materie prime (-30% per il Cu in Cile negli ultimi 15 anni) → estrazioni più energivore → pressione al rialzo sui costi di produzione, sulle emissioni di gas serra e sui volumi di rifiuti.
- **Tempi lunghi** tra la scoperta del minerale e la produzione → molte compagnie mantengono la produzione di materie prime tradizionali.

Parametri di riciclo (IEA):

- *Recycling input rates*, valuta la quota di risorse secondarie su tutto il fabbisogno.
- *EOL: End of life rates*, misura la quota di materiali inclusi nei flussi di rifiuti che sono realmente riciclati:
 - **Elevati livelli di EOL** per i metalli base utilizzati in grandi volumi come **Cu, Ni e Al** così come per altri più preziosi (**platino, oro e palladio**), grazie al collezionismo e al riciclo del prodotto. Dunque questi valori coprono il **95% in peso dei componenti di PV e turbine eoliche**, ad eccezione di alcuni semiconduttori o le pale eoliche in plastica rinforzata in fibra di vetro
 - **Li e REEs** sono pressoché **esclusi dal sistema di riciclo**, in parte per la limitata collezione e per vincoli tecnici (reattività del Li);
 - **Differenze regionali**: tra zona UE e resto del mondo (50% di metallo riciclato contro 18%)



IEA. All rights reserved.

Reti Elettriche: il totale riciclo e riuso di Cu, Al e acciaio **eviterebbe** oltre il **20%** della **domanda** di metallo vergine nel **2021-2050**.

Metalli critici: incentivi futuri allo sviluppo di una catena di riciclo matura:

- Riuso delle batterie esaurite: per applicazioni stazionarie come **l'accumulo elettrico**. Si stima che per il **2040**, le quantità riciclate di Cu, Li, Ni e Co dalle batterie esauste potrebbero **ridurre il fabbisogno primario** combinato di questi minerali **di circa il 10%**.
- Recupero Batterie: in aumento dopo il 2030. Nel 2050, con un basso tasso di riciclaggio (10%), l'offerta secondaria soddisferà meno del 7% dell'intera domanda, invece, **se i tassi salissero all'80%, la domanda primaria potrebbe essere coperta al 50%**.
- Magneti rottamati: un **crescente flusso per i futuri 30 anni** → in uno scenario **ad alti livelli di recupero** (100% nelle turbine eoliche e 80% nei motori), **l'offerta secondaria può soddisfare il 35% della domanda primaria**.

Negli ultimi anni si sta attuando **una transizione** “da un sistema energetico *fuel-intensive* a uno *mineral-intensive*”

- La domanda di materiali critici nel 2050 aumenterà di 16 volte (4 volte nel 2030) rispetto al 2020 nello scenario NZE, sulla spinta di eolico, PV ed elettrificazione della mobilità.

Sostenibilità ambientale:

- **Impoverimento delle miniere**, oltre a rallentare la catena produttiva, rende più energivora e inquinante la Transizione stessa;
- **Esaurimento abiotico**: Molto maggiore per le rinnovabili rispetto alle tecnologie tradizionali (gas, petrolio e carbone) e al nucleare;
- **Diversificazione, riciclo e investimenti su tecnologie *low carbon* meno intensive di materiali** (nucleare) possono alleviare la pressione sugli ecosistemi marini e terrestri;

Sostenibilità economica:

- **Serve maggiore resilienza e diversità nelle catene di approvvigionamento**, per evitare *bottleneck* per la diffusione dell'energia pulita
 - Gli investimenti volti a **nuove esplorazioni di giacimenti** e a una **catena di produzione più efficiente e sicura**, dovranno aumentare rapidamente e in modo significativo se l'offerta deve tenere il passo della crescente domanda
 - **Approvvigionamento e processamenti** di materiali e tecnologie sono ancora **fortemente concentrati** in alcune regioni del mondo
- **Il sistema di riciclo è maturo solo per alcuni materiali e composti, quasi assente per i minerali critici come le terre rare** → sviluppo di un'**economia di scala** per l'industria del riciclaggio nel momento in cui più soggetti parteciperanno.
- Definizione di **parametri di riferimento affidabili** per i prezzi di minerali con mercati più piccoli (e dunque più volatili), al fine di migliorare la trasparenza e sostenere lo sviluppo del mercato basato su una catena di approvvigionamento resiliente.
- Crescita economica dei Paesi Emergenti.