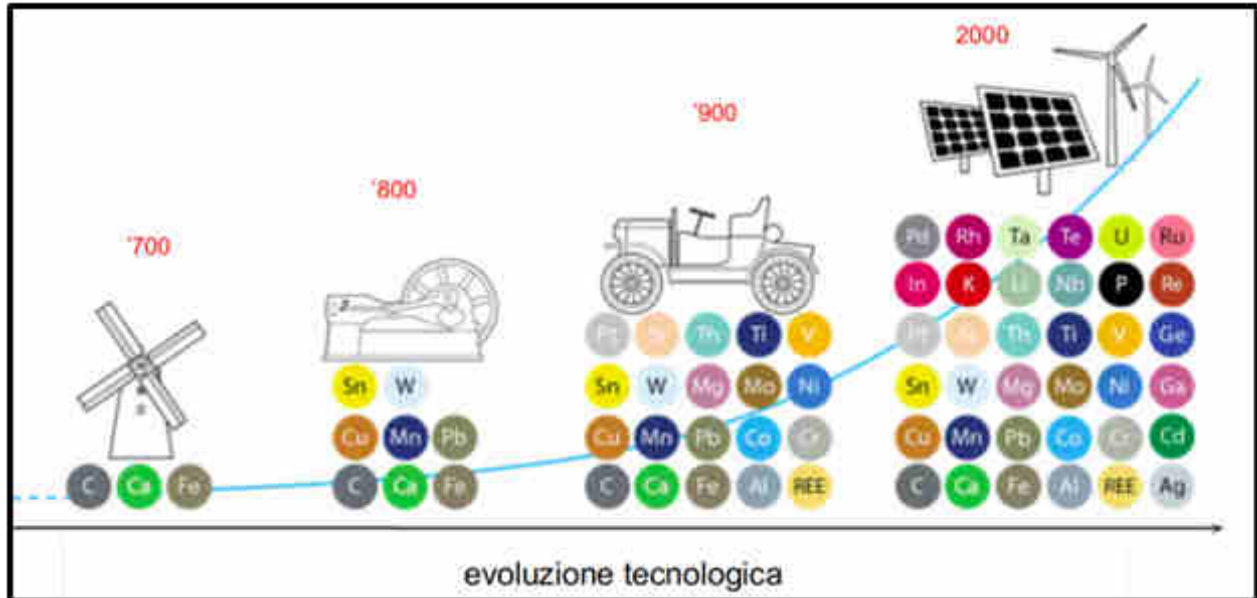


Verso un sistema energetico rinnovabile. Sarà sufficiente per uscire dalla crisi ecologica?

Franco Padella



Il passaggio del sistema energetico dalle tecnologie fossili alle tecnologie rinnovabili è un cambiamento divenuto assolutamente necessario. Il raggiungimento di 417 parti per milione di CO₂ nell'atmosfera non è certo un dato che si possa osservare con superficialità. Tuttavia c'è un secondo dato che di solito resta in secondo piano se non totalmente trascurato: la transizione comporterà l'utilizzo di una grande quantità di materiali, con un contributo di specie chimiche molte delle quali differenti da quelle tradizionalmente utilizzate nel modello energetico fossile. In **figura 1** sono rappresentate le specie rilevanti per le tecnologie energetiche in funzione del loro grado di sviluppo.



Elenco dei principali elementi chimici conosciuti. In rosso le terre rare

Simbolo	Nome	Simbolo	Nome	Simbolo	Nome	Simbolo	Nome	Simbolo	Nome
H	Idrogeno	Sc	Scandio	Nb	Niobio	Pm	Promezio	Tl	Tallio
He	Elio	Ti	Titanio	Mo	Molibdeno	Sm	Samario	Pb	Piombo
Li	Litio	V	Vanadio	Tc	Tecnezio	Eu	Europio	Bi	Bismuto
Be	Berillio	Cr	Cromo	Ru	Rutenio	Gd	Gadolinio	Po	Polonio
B	Boro	Mn	Manganese	Rh	Rodio	Tb	Terbio	At	Astato
C	Carbonio	Fe	Ferro	Pd	Palladio	Dy	Disprosio	Rn	Radon
N	Azoto	Co	Cobalto	Ag	Argento	Ho	Olmio	Fr	Francio
O	Ossigeno	Ni	Nichel	Cd	Cadmio	Er	Erbio	Ra	Radio
F	Fuoro	Cu	Rame	In	Indio	Tm	Tulio	Ac	Attinio
Ne	Neon	Zn	Zinco	Sn	Stagno	Yb	Itterbio	Th	Torio
Na	Sodio	Ga	Gallio	Sb	Antimonio	Lu	Lutezio	Pa	Protoattini
Mg	Magnesio	Ge	Germanio	Te	Tellurio	Hf	Afnio	U	Uranio
Al	Alluminio	As	Arsenico	I	Iodio	Ta	Tantalio	Np	Nettunio
Si	Silicio	Se	Selenio	Xe	Xeno	W	Wolframio	Pu	Plutonio
P	Fosforo	Br	Bromo	Cs	Cesio	Re	Renio	Am	Americio
S	Zolfo	Kr	Cripto	Ba	Bario	Os	Osmio	Cm	Curio
Cl	Cloro	Rb	Rubidio	La	Lantanio	Ir	Iridio	Bk	Berkelio
Ar	Argo	Sr	Stronzio	Ce	Cerio	Pt	Platino	Cf	Californio
K	Potassio	Y	Ittrio	Pr	Praseodimi	Au	Oro	Es	Einsteinio
Ca	Calcio	Zr	Zirconio	Nd	Neodimio	Hg	Mercurio	Fm	Fermio

Figura 1. In alto: Elementi chimici ed evoluzione delle tecnologie energetiche.(1)

In basso: principali elementi conosciuti, simbologia e denominazione. In rosso è rappresentata la famiglia di elementi denominata Terre Rare (Rare Earth Elements, REE).



Come rappresentato in **figura 2** i materiali necessari alla transizione sono ubiquitari, presenti in tutti i flussi di implementazione delle tecnologie necessarie alla transizione. Le quantità in gioco già oggi lasciano intravedere rischi nell'approvvigionamento sia in termini di disponibilità fisica che in relazione a problematiche di tipo geopolitico.

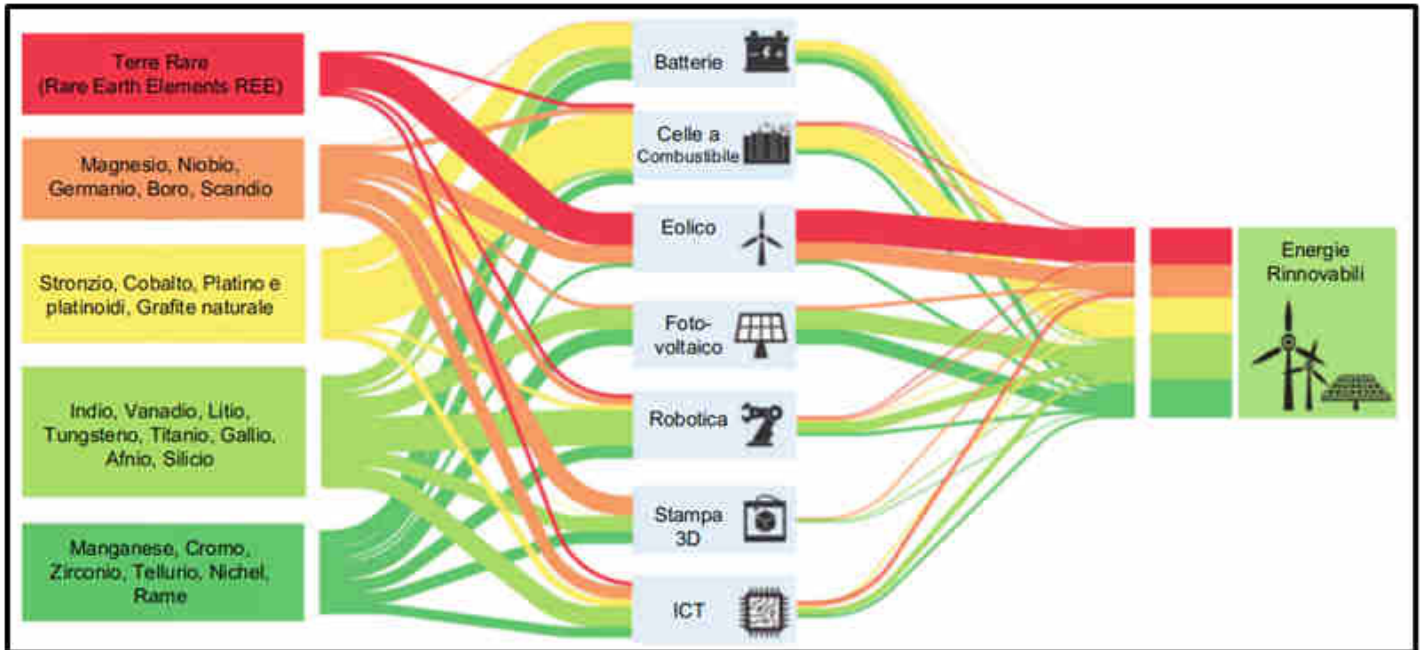


Figura 2. Flussi di materia nelle tecnologie necessarie alla transizione. Non sono considerati i materiali strutturali e conduttori di uso generale, quali acciaio, rame ed alluminio. ⁽²⁾

Accanto ai materiali di *“nuovo”* utilizzo, le tecnologie a basse emissioni di carbonio risultano anche essere a molto più alta intensità di metalli *“tradizionali”* rispetto alle tecnologie correnti. Un'auto elettrica contiene in genere 80 kg di rame ed anche i sistemi di generazione eolica o fotovoltaica contengono più rame di quelli fossili a parità di potenza. E' quindi del tutto logico aspettarsi una domanda di materie prime incrementata, con un altrettanto incrementata crescita in ricerca e produzione mineraria.

Nel seguito sono riportati gli schemi delle principali tecnologie necessarie alla transizione energetica focalizzando l'attenzione sui materiali ad essa necessari, sul potenziale incremento della domanda e sulle capacità del pianeta di rispondere al fabbisogno richiesto. A partire da ciò si evidenziano le criticità che una espansione tumultuosa delle attività di reperimento delle risorse, ove lasciata alle usuali dinamiche di mercato, farà ancora una volta ricadere in termini di impatti ambientali e sociali sull'intero ecosistema terrestre .





Incidenza dei materiali nelle tecnologie

Per valutare l'impatto che un dato materiale ha nello sviluppo di una tecnologia risulta utile utilizzare un indicatore che preveda l'incidenza di tale materiale nell'ottenimento di un determinato output. Tale indicatore, detto intensità del materiale, viene espresso come il quantitativo del materiale necessario per ottenere una unità di risultato nel servizio prodotto.

Nel caso della produzione di energia, l'intensità del materiale corrisponde al rapporto della massa dello specifico materiale utilizzato in una determinata tecnologia (o dispositivo) per unità di potenza installata (MW o multipli/sottomultipli). Una stima delle necessità globali dei materiali nella transizione energetica deriva quindi dalla stima della produzione di energia prevista nella specifica tecnologia, dal mix energetico di produzione rinnovabile ad un dato tempo e dalle modifiche nelle tecnologie dei consumi (come ad esempio la sostituzione dell'auto con il motore a scoppio con l'auto elettrica). In uno scenario ad alta ambizione, del 55% di riduzione di climalteranti al 2030 e 100% al 2050 (rispetto al 1990), si suppone un raddoppio della produzione elettrica finale al 2050, con una produzione da eolico e solare dell'80%. In tale scenario, nel settore trasporti, che nelle economie avanzate pesa per circa il 30%, si suppone una completa transizione elettrica ottenuta per mezzo di batterie o di idrogeno + celle a combustibile.





Le tecnologie per l'elettrificazione

Il solare fotovoltaico

Sebbene i pannelli solari siano costituiti prevalentemente (ma non solo) da silicio nel materiale attivo, acciaio e alluminio e rame sono ampiamente utilizzati per strutture, connessioni e cablaggio (vedere figura 3 per una rappresentazione completa dei materiali necessari alle differenti implementazioni possibili della tecnologia).

Calcestruzzo, plastica, vetro, sono pure presenti nei componenti strutturali e comuni a tutte le tecnologie fotovoltaiche. Per i materiali funzionali si notano intensità variabili in funzione della specifica tecnologia e della sua evoluzione. Oltre al silicio si notano indio, gallio e selenio, il rame è anche componente funzionale nella tecnologia CIGS che insieme al

silicio amorfo e al tellururo di cadmio (CdTe) fa parte della famiglia dei film sottili.

Complessivamente per il solo rame si valuta un incremento di 7-10 milioni di tonnellate rispetto al consumo attuale per soddisfare la domanda di energia solare al 2030 (anche se molto dipende dal tipo di tecnologia solare che si rivelerà dominante). Considerando il solo obiettivo intermedio del 2030, il dato mondiale per i materiali strutturali sale a oltre 100 miliardi di tonnellate/anno di richiesta, per il silicio ammonta a oltre 1,5 milioni di tonnellate, per l'argento a circa 5000 tonnellate, mentre selenio, tellurio e cadmio stanno tra 1000 e 1650 tonnellate/anno. Gadolinio, germanio ed indio sono a 120, 225 e 450 tonnellate anno. ⁽⁴⁾

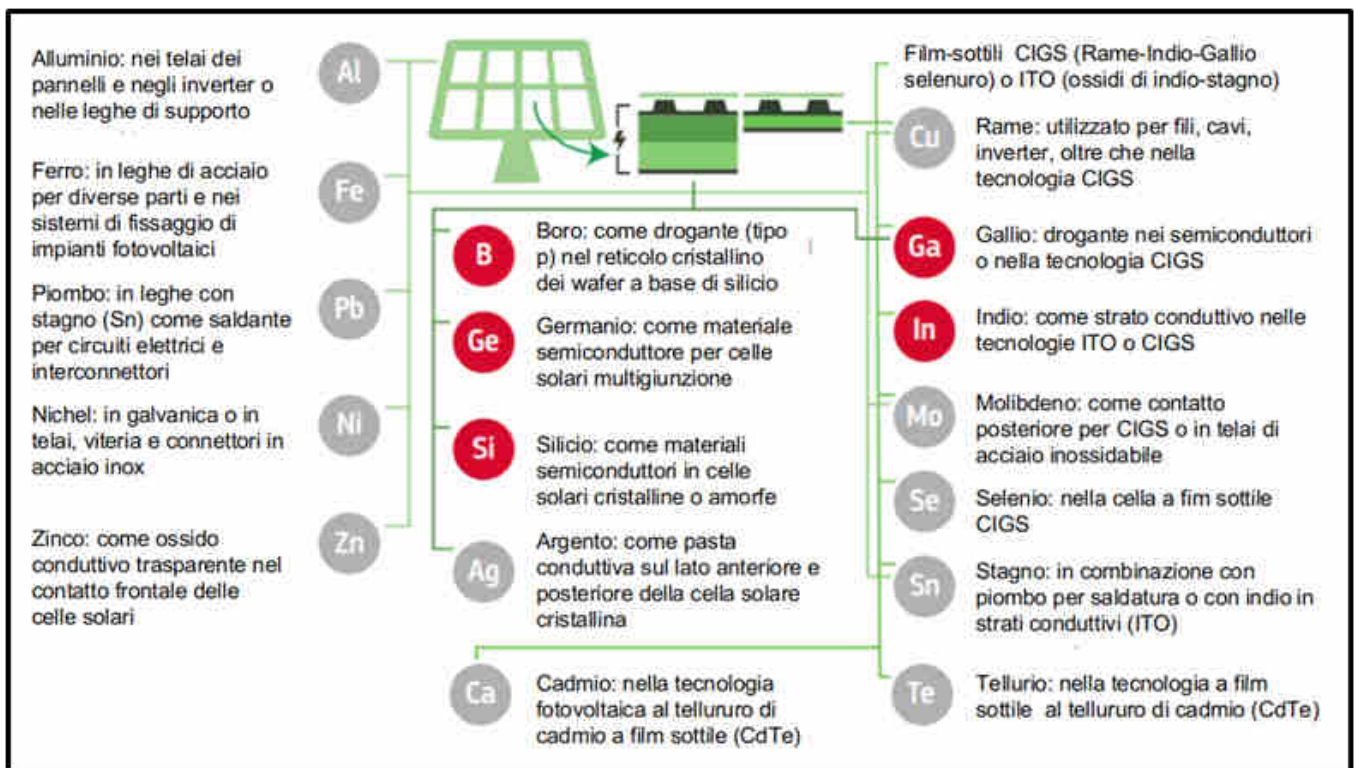


Figura 3. Materiali e loro utilizzo nella tecnologia fotovoltaica. ⁽³⁾



Intensità dei materiali e previsione di richiesta per la generazione fotovoltaica

Intensità dei materiali per la generazione fotovoltaica attuale e stimata

Tecnologia	Materiale	Unità	Anno		
			2018	2030	2050
Tutte	Calcestruzzo	t/MW	60.7		
	Acciaio		67.9		
	Plastica		8.6		
	Vetro		46.4		
	Al		7.5		
	Cu		4.6		
c-Si	Si	t/GW	4	3.5	3
	Ag		20	11	5
CdTe	Cd	t/GW	85	60	35
	Te		95	70	40
CIGS	Cu	t/GW	24	17.5	15
	In		27	17	10
	Ga		7	4.5	2.5
	Se		60	40	20
a-Si	Si	t/GW	150	130	110
	Ge		48	32	20

Consumo di materiali attuale e stimato per la generazione fotovoltaica.

Materiale	Stima situazione europea			Stima situazione mondiale		
	Domanda Attuale*	Incremento fabbisogno annuale stimato		Domanda Attuale*	Incremento fabbisogno annuale stimato	
	quantità (t)	% al 2030	% al 2050	quantità (t)	% al 2030	% al 2050
Calcestruzzo	493 959	850	2 100	6071 429	520	690
Acciaio	552 072			6785 714		
Plastica	69 735			857 143		
Vetro	377 734			4642 857		
Alluminio	61 019			750 000		
Rame	37 777			464 329		
Argento	155	400	400	1 908	260	150
Cadmio	16.3	1 300	3 600	201	820	1 200
Gallio	1.1	1 400	3 800	14	860	1 260
Germanio	1.2	2 500	8 500	15	1 500	2 800
Indio	4.3	1 300	4 000	53	850	1 300
Selenio	9.5	1 500	3 700	117	900	1 180
Silicio	31 045	700	1 200	381 585	420	400
Tellurio	18.2	1 400	3 800	224	850	1 220

*2018



L'eolico

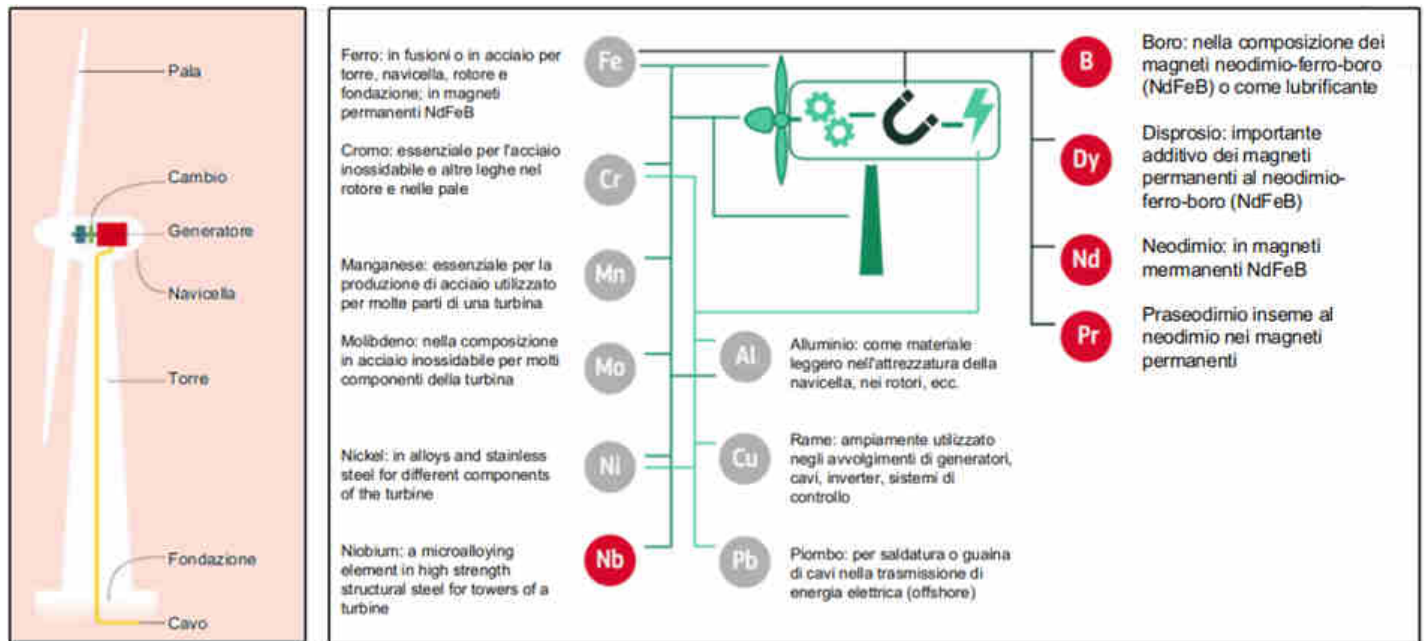


Figura 4. Sinistra: schema di una generica pala eolica. Destra: materiali e loro utilizzo nella tecnologia eolica. (2) (3)

Le turbine eoliche richiedono grandi quantità di acciaio. Per raggiungere gli obiettivi della transizione energetica servirà un gran numero di turbine eoliche, la cui la capacità di generazione sta aumentando rapidamente, arrivando al momento attuale fino a 15 MW per turbina. Man mano che le turbine diventano più potenti, il numero necessario diminuirà e quindi diminuirà il consumo di acciaio dell'industria eolica. La domanda di altri metalli dipende dal tipo di turbina eolica che viene adottata. Esistono sostanzialmente due tipi di turbine eoliche: ad ingranaggi ed a trasmissione diretta. Nelle prime la velocità di rotazione relativamente bassa della turbina è convertita in una velocità molto più elevata per il generatore, mentre nelle seconde è utilizzato un generatore a bassa velocità. La maggior parte delle turbine a trasmissione diretta ha magneti permanenti, contenenti terre rare. In **figura 4** è riportata la rappresentazione di

una generica pala eolica, con i dettagli relativi ai materiali ed al loro utilizzo per la tecnologia. Le installazioni eoliche hanno una forte dipendenza dalle specifiche scelte costruttive effettuate: trasmissione diretta o ad ingranaggi, potenza del generatore, altezze, scelta dei materiali strutturali, eccetera. Per tale motivo si registra un'ampia variabilità nelle intensità dei materiali utilizzati, che vengono a dipendere anche dalle scelte ingegneristiche della ditta costruttrice, oltre che dai vincoli fisici e tecnologici sottostanti. L'incremento annuale del consumo di materie prime previsto per l'eolico è del 650% per i materiali strutturali e conduttivi al 2030, dato che diventa il 750% al 2050. Per quanto riguarda i materiali funzionali l'incremento va dal 1000% al 1500% per il boro rispettivamente per il 2030 e il 2050, con valori leggermente inferiori ma di andamento analogo per le terre rare disprozio, neodimio, praseodimio, terbio. (4)



Intensità dei materiali e previsioni di richiesta per la generazione eolica

Materiale	t/GW	
	Min	Max
Calcestruzzo	243 500	413 000
Acciaio	107 000	132 000
Polimeri	4 600	
Compositi	7 700	8 400
Alluminio	500	1 600
Boro	0	6
Cromo	470	580
Rame	950	5 000
Disprosio	2	17
Ferro (cast)	18 000	20 800
Manganese	780	800
Molibdeno	99	119
Neodimio	12	180
Nichel	240	440
Praseodimio	0	35
Terbio	0	7
Zinco	5 500	





Consumo attuale e incrementi stimati per i materiali necessari nelle installazioni eoliche in sede europea e nel mondo

	Materiale	Domanda attuale*			Incremento fabbisogno annuale stimato	
		Onshore	Offshore	Totale	% al 2030	% al 2050
		quantità (t)				
Stima situazione europea	Calcestruzzo	2979731	1098398	4078129		
	Acciaio	961081	441507	1402588		
	Plastica	37598	17489	55087		
	Vetro	65429	31104	96533		
	Alluminip	9645	3030	12675		
	Cromo	4210	2053	6263		
	Rame	20046	9302	29347		
	Ferro	158566	77139	235705		
	Manganese	6442	3014	9456		
	Molibdeno	876	425	1301		
	Nichel	3211	1118	4329		
	Zinco	44954	20911	65865	500	1150
	Boro	5	18	23		
	Disprosio	42	53	95		
	Neodimio	305	552	857		
	Praseodimio	49	101	150		
	Terbio	12	20	32	600	1500
Stima situazione mondiale	Calcestruzzo	16171760	1380150	17551910		
	Acciaio	5397950	525758	5923708		
	Plastica	216200	20700	236900		
	Vetro	371394	36446	407840		
	Alluminip	56870	4010	60880		
	Cromo	23486	2375	25861		
	Rame	89911	11131	101042		
	Ferro	890086	89600	979686		
	Manganese	36914	3557	40471		
	Molibdeno	4907	493	5400		
	Nichel	18330	1442	19772		
	Zinco	258500	24750	283250	650	750
	Boro	57	16	73	1000	1500
	Disprosio	262	51	314	850	1150
	Neodimio	2302	512	2814	900	1300
	Praseodimio	356	94	450	950	1380
	Terbio	98	19	117	850	1180

*2018

Intensità dei materiali e tecnologie eoliche

- **Calcestruzzo.** Esistono diversi requisiti di massa per le turbine eoliche onshore e offshore, con valori inferiori per queste ultime rispetto alle prime.
- **Acciaio.** I modelli di turbine esistenti utilizzano tra 107 e 132 t di acciaio per MW di capacità installata.
- **Materiali polimerici e compositi.** I valori sono praticamente identici tra i diversi tipi di turbina.
- **Alluminio.** Nelle turbine a trasmissione diretta è preferito il rame. Ci possono essere requisiti diversi per le turbine eoliche onshore e offshore ed anche in una certa misura la sostituzione selettiva del rame con l'alluminio nel trasformatore a bobina nella navicella o nella torre.
- **Boro.** Materiale utilizzato nel magnete permanente del generatore a turbina. La stima più bassa è per turbine ad alta e media velocità con cambio; la stima più alta è per le turbine a trasmissione diretta.
- **Cromo.** Utilizzato negli acciai, con un contenuto più elevato negli acciai altolegati.
- **Rame.** Presente in tutti i tipi e modelli di turbine, la gamma di valori possibili per il rame è ampia con un valore mediano di circa 2 100 t / GW. I generatori a trasmissione diretta possono utilizzare tre volte più rame rispetto alle configurazioni con il cambio.
- **Disprosio.** Il disprosio è prevalentemente utilizzato nei magneti permanenti del generatore a turbina. La stima più bassa è per i dispositivi ad alta e media velocità con cambio; la stima più alta è per le turbine a trasmissione diretta.



- **Ghisa.** La ghisa viene utilizzata nella fusione della navicella, negli alberi principali, nel cambio, nel generatore e nel mozzo della pala. L'utilizzo della ghisa è molto simile per diversi tipi di turbine. Il ferro è utilizzato anche nei magneti permanenti: la stima più bassa è per le velocità medio-alte; la stima più alta è per le turbine a trasmissione diretta.
- **Manganese.** Il contenuto di manganese è identico per diversi tipi di acciaio e potenzialmente identico per diversi tipi di turbina. Come per il cromo, le cifre si riferiscono a diverse ipotesi sulla composizione dell'acciaio.
- **Molibdeno.** Il contenuto più elevato è correlato all'utilizzo di acciai altolegati.
- **Neodimio.** Il neodimio è utilizzato nei magneti permanenti del generatore, ma anche nei magneti per il fissaggio di dispositivi interni all'interno della torre della turbina. La quantità di neodimio nelle turbine a trasmissione diretta è sostanzialmente più alta.
- **Nickel.** Il contenuto più elevato è correlato all'uso di acciai altolegati (turbine più pesanti dispiegate in terraferma). Le stesse considerazioni del cromo e del manganese valgono per le ipotesi sulla composizione dell'acciaio.
- **Praseodimio.** Il praseodimio viene utilizzato nel magnete permanente del generatore a turbina insieme al neodimio. La stima inferiore è per turbine da alta a media velocità con cambio la stima più alta è per le turbine a trasmissione diretta.
- **Terbio.** Il terbio viene utilizzato nel magnete permanente del generatore a turbina dove sostituisce il disprosio. La stima inferiore è per turbine da alta a media velocità con cambio; la stima più alta è per le turbine a trasmissione diretta.
- **Zinco.** Lo zinco è usato come rivestimento protettivo contro la corrosione delle turbine eoliche.





Motori elettrici e mobilità leggera

Attualmente ci sono circa 8 miliardi di motori elettrici in uso nell'UE, nei prodotti elettronici di piccole dimensioni così come nei motori di grandi dimensioni che si trovano nei veicoli e nei trasporti elettrici pesanti. Si prevede che il numero di motori crescerà in modo significativo in futuro, soprattutto a causa dell'ampia diffusione di motori a trazione nei veicoli elettrici.

La maggior parte dei veicoli ibridi ed elettrici utilizza motori sincroni con magneti Nd-Fe-B, o leghe che possono contenere altre terre rare come praseodimio e disprosio. In alternativa ai motori sincroni si possono utilizzare motori a induzione che non contengono materiali magnetici permanenti ma quantità elevate di rame. Data la maggior efficienza, si prevede che la tecnologia dei magneti Nd-Fe-B dominerà il mercato. In **figura 5** è riportata una rappresentazione di un motore elettrico, con evidenza dei materiali necessari al suo funzionamento.

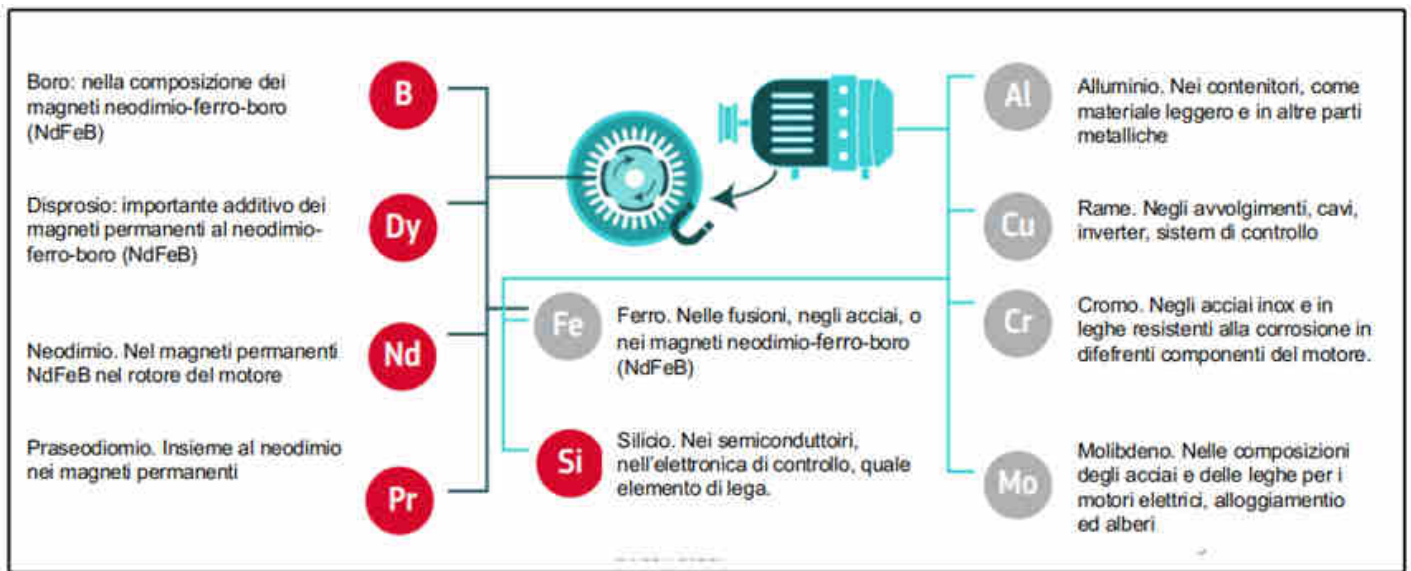


Figura 5. Materiali necessari al funzionamento di un moderno motore elettrico. (2) (3)

La richiesta di terre rare per i motori nel solo mercato europeo è attualmente di 200, 400 e 4000 tonnellate anno rispettivamente per disprosio, praseodimio e neodimio. Nel 2050, ci si aspetta che tale richiesta incrementi del 600% per il disprosio, mentre è atteso un incremento attorno al 100% per gli altri due minerali.





Le batterie per la mobilità leggera e per gli accumuli di energia elettrica

Scopo delle batterie è accumulare energia elettrica. La tecnologia delle batterie al litio permette di accumulare relativamente grandi quantità di energia, rendendo possibili applicazioni che vanno dalla stabilizzazione della rete elettrica⁽⁵⁾ all'autotrasporto leggero.⁽⁶⁾ In questo campo l'obiettivo della transizione energetica è la sostituzione dei motori termici automobilistici con motori elettrici, cosa che renderà necessario l'utilizzo di un gran numero di batterie di capacità relativamente elevata.⁽⁷⁾ La **figura 6** contiene la rappresentazione di una batteria agli ioni di litio, con l'indicazione dei materiali utilizzati per il suo funzionamento. Accanto alle batterie per autotrazione sono da considerare, seppure in misura significativamente meno rilevante rispetto alla mobilità, le batterie per accumulo di energia ai fini della stabilizzazione della rete.

(8)

L'*International Energy Agency* stima nello scenario più ambizioso, che la domanda di batterie per veicoli elettrici crescerà di quasi 40 volte tra il 2020 (per 160 GWh di energia accumulata) e il 2040 (per 6.200 GWh). Corrispondentemente la domanda complessiva di minerali cresce di 30 volte tra il 2020 e il 2040, da 400.000 tonnellate a 11.800.000 tonnellate. La domanda di nichel cresce di 41 volte, mentre il cobalto aumenta 'solo' di 21 volte, poiché le chimiche del catodo si spostano verso le chimiche a basso contenuto di cobalto. La domanda di litio cresce di 43 volte, mentre il rame cresce di 28 volte. La domanda di grafite cresce di 25 volte. Il silicio registra la maggiore crescita relativa, oltre 460 volte, poiché gli anodi di grafite drogati con silicio crescono da una quota dell'1% nel 2020 al 15% nel 2040. La domanda di terre rare cresce di oltre 15 volte fino a 35 kt nel 2040

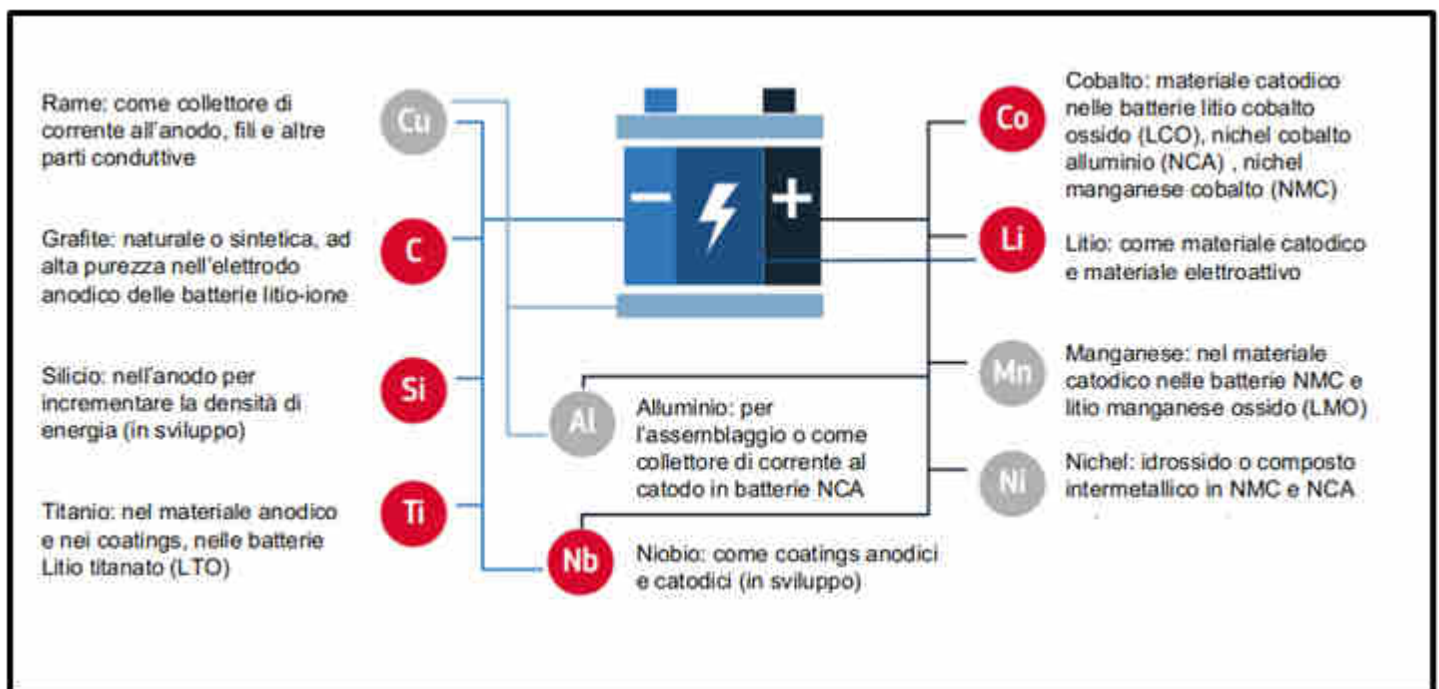
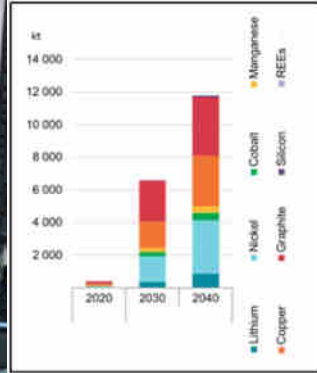


Figura 6. Rappresentazione di una batteria agli ioni di litio. (2) (3)



Le batterie per la mobilità leggera e per gli accumuli di energia elettrica



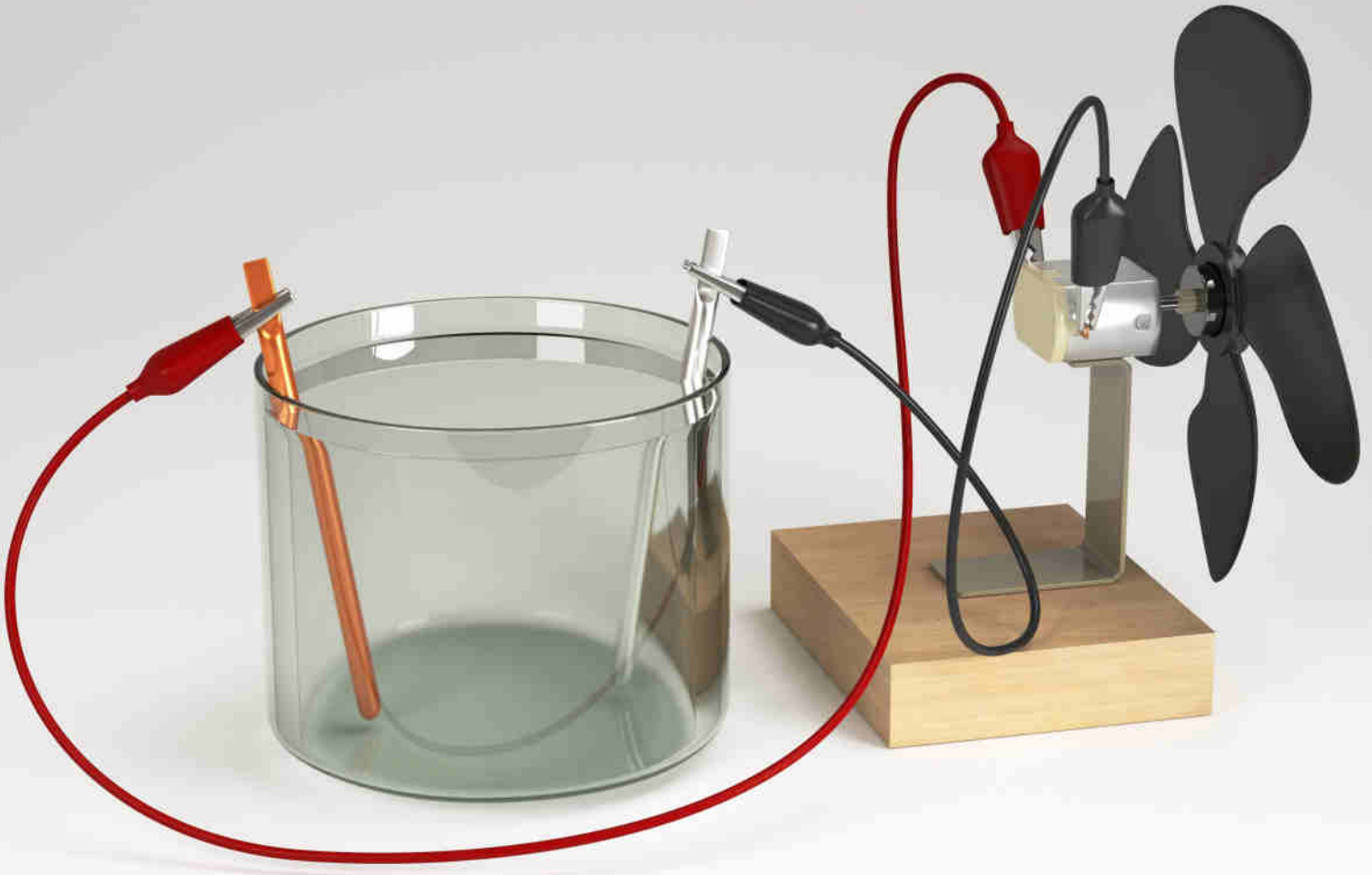
Elemento	Intensità (kg/veicolo)	Richiesta 2020 (kt)	Incremento stimato al 2040 (%)
Rame	53.2	110	2800
Manganese	24.5	25	1600
Litio	8.9	20	4300
Nichel	39.9	80	4100
Cobalto	13.3	21	2100
Grafite	66.3	141	2500
Terre Rare	0.5	2	1750

L'idrogeno verde per i consumi di difficile decarbonizzazione e, in prospettiva, per l'accumulo di energia

Nella strategia europea per la decarbonizzazione è prevista la pressoché totale elettrificazione dei consumi energetici, con elettricità prodotta da fonti rinnovabili.

La stessa strategia valuta la permanenza di un 15-20% di consumi di difficile decarbonizzazione (industria metallurgica e chimica, trasporti a lunga distanza, portualità e navigazione marittima ed aerea), per i quali la Commissione Europea ha dato avvio ad un ambizioso piano che prevede l'utilizzo di idrogeno verde,⁽⁹⁾ in grado di portare alla decarbonizzazione piena anche in questi settori. Man mano che le rinnovabili saranno sviluppate su larga scala, l'idrogeno potrebbe rappresentare una soluzione anche per l'immagazzinamento di energia, sia per la rete elettrica che per i veicoli elettrici leggeri. L'idrogeno è l'elemento più leggero in natura e non si trova allo stato libero sulla terra





Tuttavia può essere prodotto liberandolo chimicamente dalle molecole che lo contengono, utilizzando processi di diversa natura. Attualmente l'idrogeno è utilizzato fondamentalmente per la chimica industriale e pressoché totalmente ottenuto da reazioni chimiche con fossili, mediante reazioni che emettono al contempo elevate quantità di CO₂. L'elettrolisi dell'acqua, che scinde la molecola in idrogeno e ossigeno grazie all'immissione di una corrente appropriata in un dispositivo detto elettrolizzatore, quando è alimentata con energia elettrica prodotta da fonte rinnovabile è l'unico processo di generazione di idrogeno pienamente sostenibile. Il gas generato, infatti, può di nuovo essere fatto reagire con l'ossigeno in un dispositivo elettrochimico chiamato cella a

combustibile; si produce acqua e si chiude il ciclo di materia.

Pur esistendo differenti tecnologie, con diverse chimiche dei materiali costituenti e operanti a diverse temperature di esercizio, concettualmente un elettrolizzatore ed una cella a combustibile sono dispositivi molto simili e gli apparati condividono molti dei materiali necessari, riportati schematicamente in **figura 7**. Le strategie di decarbonizzazione in corso lasciano prevedere un consistente incremento nella potenza installata sia in generazione elettrolitica che in utilizzo di idrogeno (vedi **figura 8**). In generazione, da 150 GW previsti nel 2030 si arriverebbe a 1.400 GW installati nel 2050, mentre per l'utilizzo si prevede un incremento di capacità a 20.000 GW installati nel 2050.

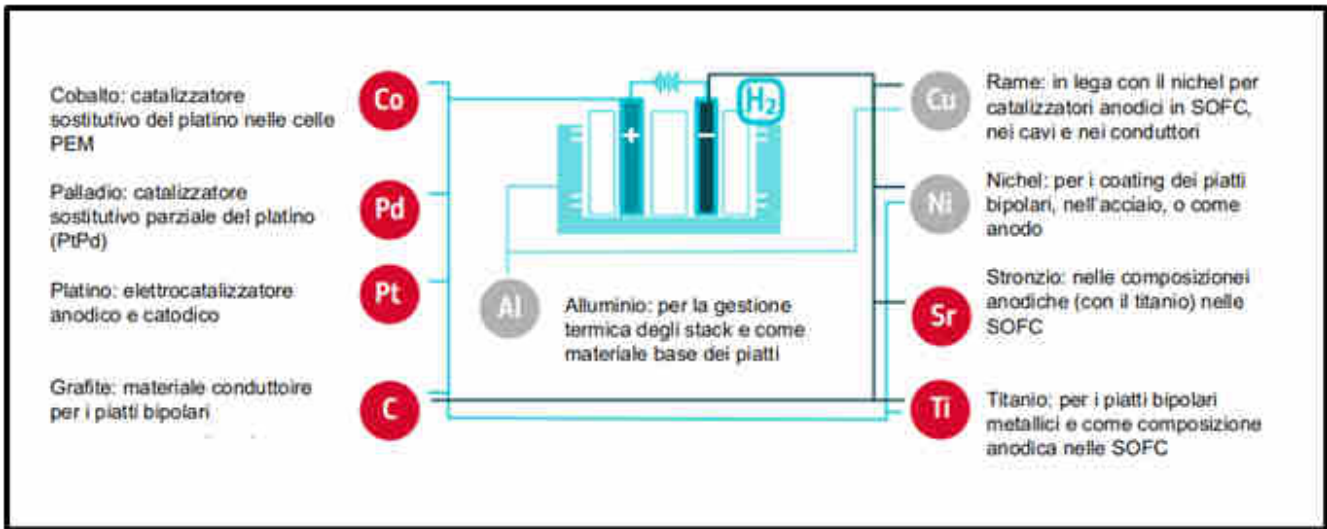
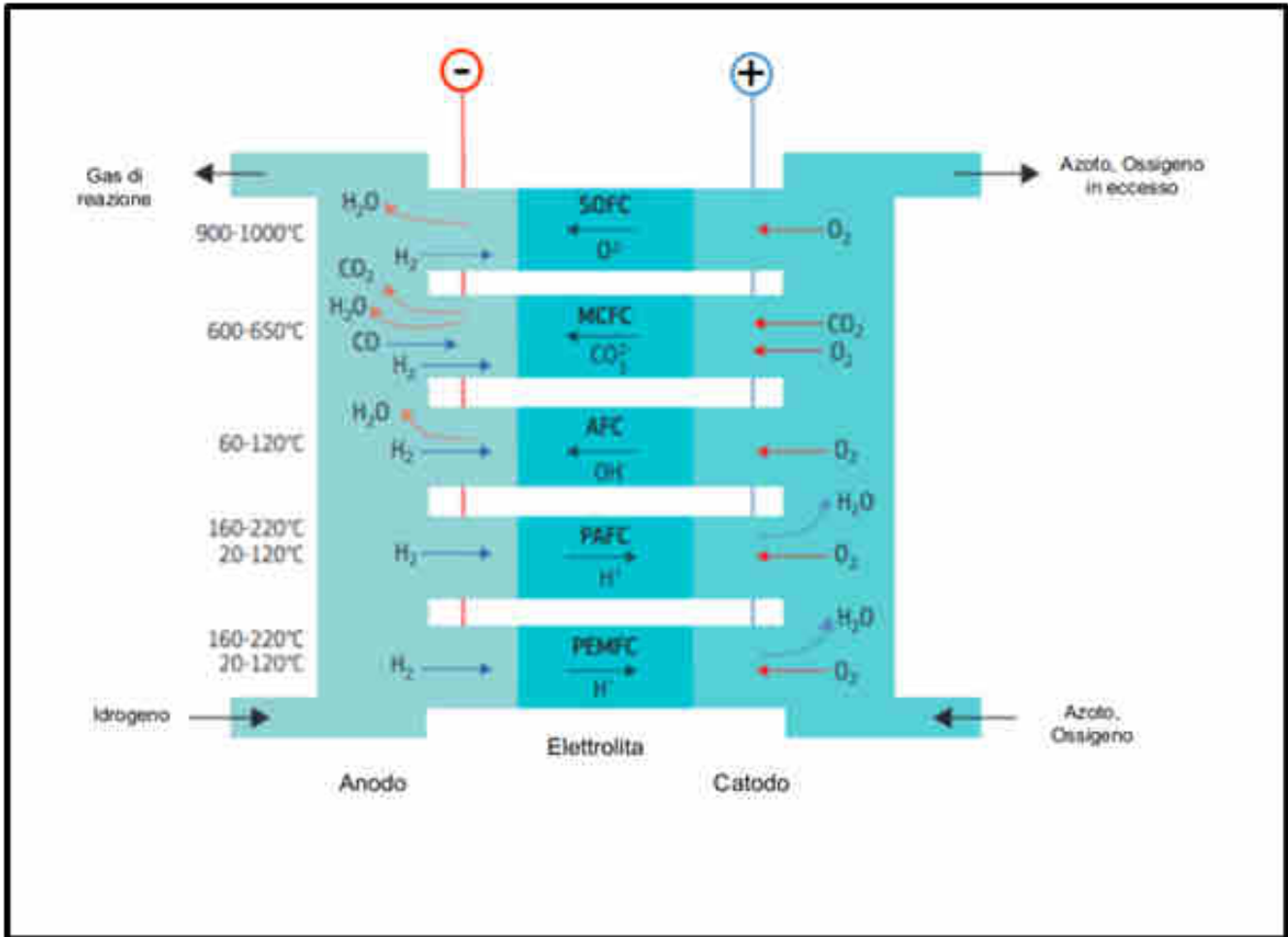


Figura 7. Alto: schema generale per diverse tecnologie di celle a combustibile (fuel cell, FC). L'elettrolita determina la chimica ionica del sistema e la tecnologia. Dal basso: Membrana Elettrolita Polimerico (PEM FC), Acido Fosforico (PA FC) Alcalina (A FC) Carbonati fusi (MC FC) Ossidi Solidi (SO FC). Basso: Schema rappresentativo di una cella a combustibile e dei materiali in essa contenuti. Con modifiche nel funzionamento, gli stessi materiali sono condivisibili nelle tecnologie degli elettrolizzatori. **(2) (3)**

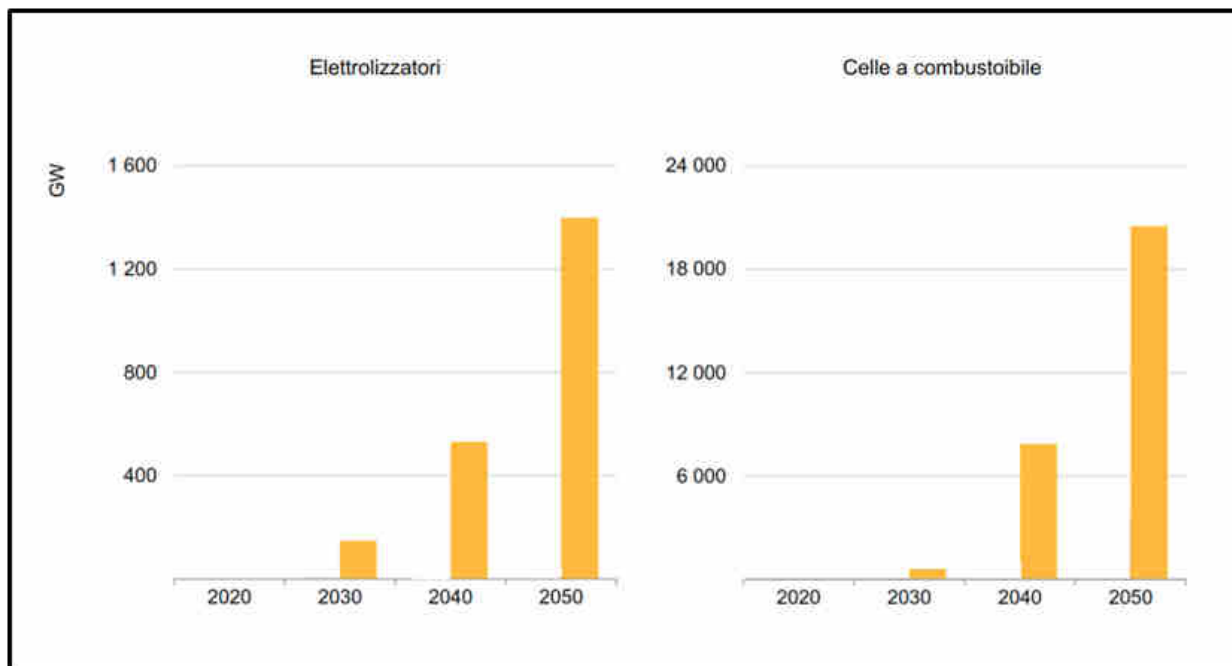


Figura 8. Incremento stimato nella potenza installata degli elettrolizzatori e delle celle a combustibile. ⁽⁸⁾

Per quanto riguarda le intensità dei materiali necessari allo sviluppo delle tecnologie dell'idrogeno si può fare riferimento a quanto riportato in **figura 9**, dove i quantitativi sono normalizzati all'energia di output e non alla potenza di installazione. La stima della richiesta integrale di tali materiali, tuttavia, risulta fortemente dipendente dalle tipologie di tecnologia che si affermeranno, essendo il settore ancora non ben consolidato.

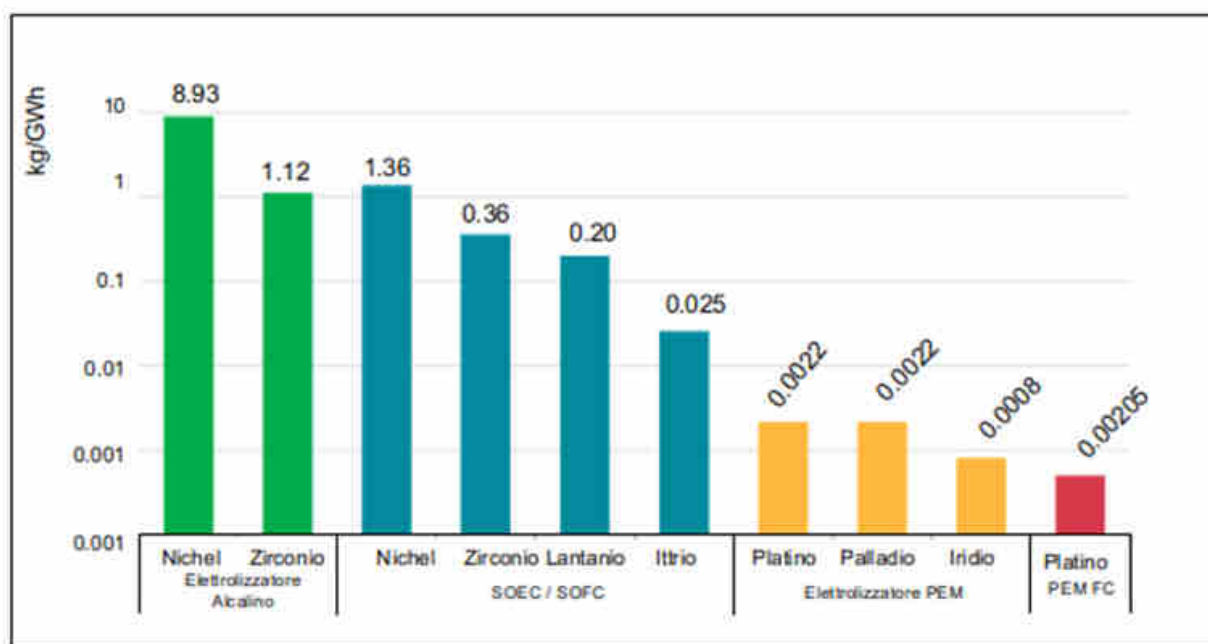


Figura 9. Intensità dei materiali per differenti tecnologie di elettrolizzatori e di cella a combustibile. PEM=Membrana ad Elettrolita Polimerico; SOEC: Cella di Elettrolisi ad Ossidi Solidi; SOFC: Cella a Combustibile ad Ossidi Solidi. ⁽⁸⁾



Le materie prime

Necessità, riserve e risorse ⁽¹⁰⁾

Dalle sezioni precedenti si evince che le grandi quantità di materiali necessari alla transizione energetica pongono immediatamente il problema della sostenibilità in termini quantitativi: sono oggi disponibili riserve sufficienti dei materiali necessari? Se le riserve non sono sufficienti, l'entità stimata delle risorse è in grado di rispondere alla richiesta crescente? Utilizzando i valori noti delle riserve e la stima delle risorse disponibili, in uno scenario di trasformazione del sistema energetico ambizioso, uno studio⁽¹¹⁾ del 2018 ha valutato le possibilità di esaurimento delle materie prime necessarie alla transizione a tecnologie attuali.

La **figura 10** riporta il rapporto stimato tra l'incremento della domanda cumulativa di materiali al 2060 e l'entità delle riserve e delle risorse oggi note. L'incremento della quantità dei materiali necessario alla transizione energetica è tale da non poter essere soddisfatto per molti dei metalli richiesti. E' da sottolineare che per alcuni dei metalli indicati (ferro, alluminio, rame ecc., che pure hanno potenzialità consistenti di riutilizzo e riciclo) avverrà anche un incremento della domanda dovuta ad attività "tradizionali" quale conseguenza dello sviluppo economico dei paesi attualmente meno sviluppati. Questo potrà rendere la situazione ancor più critica di



quanto non appaia nella sola correlazione con la transizione energetica. Naturalmente (e per fortuna) la situazione potrebbe migliorare considerevolmente inserendo nel computo sia gli effetti delle innovazioni tecnologiche, che si aspetta possano provocare contrazioni più o meno rilevanti dell'intensità dei materiali, che gli effetti dei processi di riutilizzo e riciclo a fine ciclo vita, secondo i principi della cosiddetta economia circolare. Seppure da un semplice punto di vista concettuale, per molti dei materiali necessari è possibile prevedere un sostanziale miglioramento nell'utilizzo a fine ciclo vita, con una conseguente richiesta primaria di minerale potenzialmente ridotta dal 20 al 70%. Tuttavia, permangono almeno due criticità al momento difficilmente supera-

bili: il tempo di vita delle installazioni e limiti tecnologici intrinseci derivanti dall'utilizzo di alcuni dei materiali critici, specie quelli con caratteristiche funzionali. Per i materiali strutturali, infatti, il riutilizzo, recupero e riciclo si può considerare relativamente semplice, perché correlato a processi consolidati e per i quali sono anche facilmente prevedibili miglioramenti derivanti dalla maggiore efficienza dei sistemi di raccolta a fine ciclo vita. Tuttavia, mediamente il tempo di vita di una installazione fotovoltaica o eolica può superare i 20 e raggiungere i 30 anni, periodo nel quale si prevede contemporaneamente una persistente crescita delle installazioni, cosa che richiederà necessariamente materie di prima estrazione.

Stime materiali

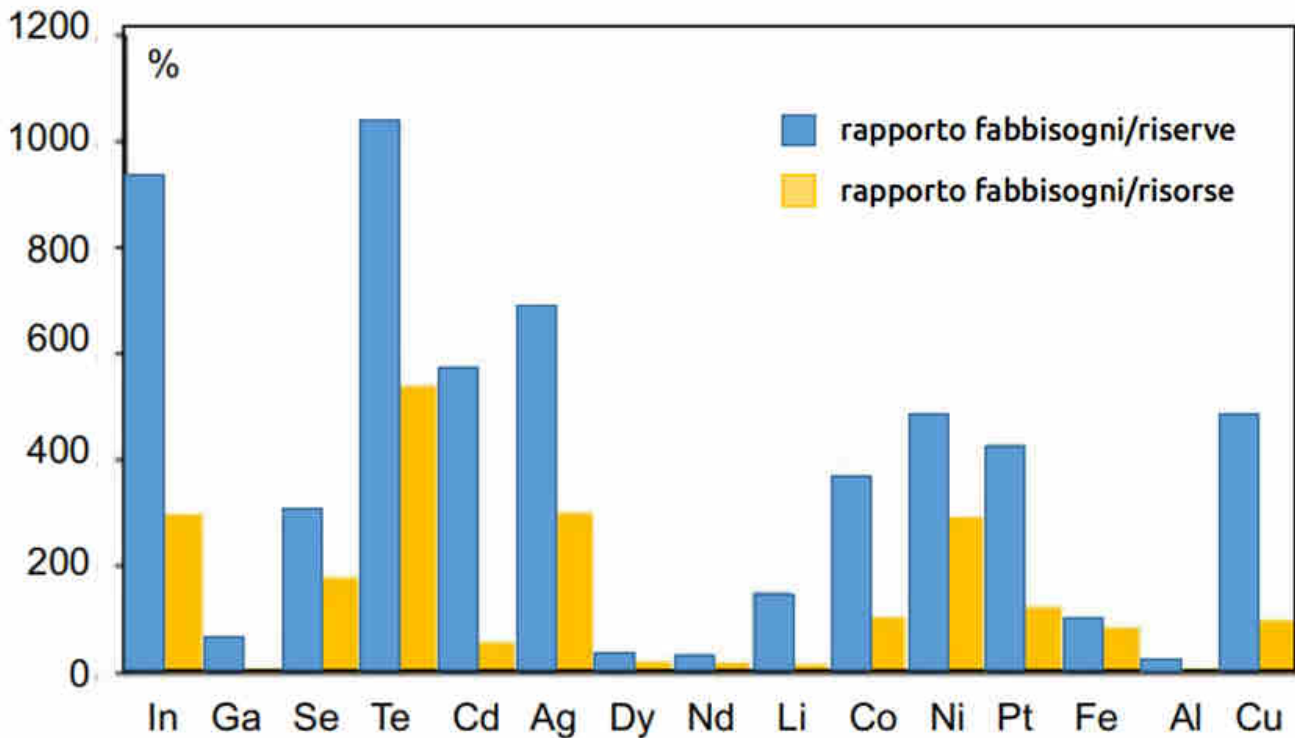


Figura 10. Incremento cumulativo stimato al 2060 del fabbisogno di materiali di interesse energetico rapportati all'entità nota delle riserve e all'entità stimata delle risorse. (Rielaborazione da ⁽¹¹⁾).



Entità delle riserve e delle risorse stimate, e loro criticità

Materiale	Riserva		Risorsa	
	Quantità (kt)	Criticità (anno)	Quantità (kt)	Criticità (anno)
Indio	15	2030	47	2040
Gallio	110	-	1 000	-
Selenio	100	2040	171	2050
Tellurio	25	2030	48	2040
Cadmio	500	2030	600	-
Argento	570	2030	1 308	2040
Disprosio	1 100	-	1 980	-
Neodimio	12 800	-	23 040	-
Litio	14 000	2050	39 500	-
Cobalto	7 100	2040	145 000	-
Nichel	79 000	2035	130 000	2040
Platino	6	2035	20	2055
Alluminio	28000 000	-	55 000	-
Rame	720 000	2030	3500 000	2060

Per le batterie, in linea di principio, la situazione potrebbe essere più favorevole, prevedendosi una vita media ben inferiore. Tuttavia qui intervengono le criticità tipiche di alcuni materiali con proprietà funzionali specifiche, spesso presenti in forma complessa, o in quantità dopanti.

Per molti di questi materiali i processi di ricestrazione, seppure possibili, possono essi stessi diventare critici dal punto di vista ambientale e/o comportare grande dispendio di risorse energetiche e/o economiche.

Alle criticità tecniche e ambientali, infine, possono aggiungersi criticità geo-strategiche, specie quando il controllo di alcuni materiali risulta essere pressoché in regime di monopolio da parte di alcuni Paesi, come avviene per esempio per le terre rare nel caso della Cina. In questo quadro è difficile supporre il totale superamento delle criticità che per diversi motivi, si prevede, potrebbero permanere per metalli quali indio, argento, tellurio, nichel, platino e litio. Per molti dei materiali necessari alla transizione la capacità attuale di riciclo risulta inferiore all'1%.⁽¹²⁾



Riduzione, riuso, riciclo

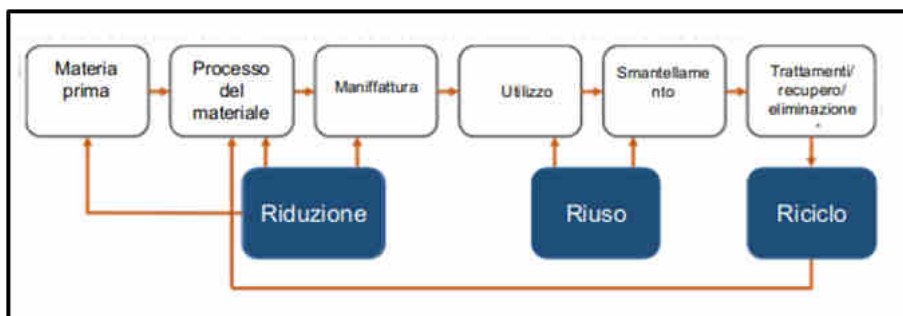


Tabella periodica e tasso di riciclo

1																	2																																																												
H																	He																																																												
3	4											5	6	7	8	9	10																																																												
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne																																																												
11	12											13	14	15	16	17	18																																																												
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar																																																												
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36																																																												
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr																																																												
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54																																																												
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe																																																												
55	56	*	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86																																																												
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																																																												
87	88	**	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118																																																												
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Sg	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uug	Uup	Uuh	Uus	Uuo																																																												
		<p>* Lanthanides</p> <table border="1"> <tr> <td>57</td><td>58</td><td>59</td><td>60</td><td>61</td><td>62</td><td>63</td><td>64</td><td>65</td><td>66</td><td>67</td><td>68</td><td>69</td><td>70</td><td>71</td> </tr> <tr> <td>La</td><td>Ce</td><td>Pr</td><td>Nd</td><td>Pm</td><td>Sm</td><td>Eu</td><td>Gd</td><td>Tb</td><td>Dy</td><td>Ho</td><td>Er</td><td>Tm</td><td>Yb</td><td>Lu</td> </tr> </table> <p>** Actinides</p> <table border="1"> <tr> <td>89</td><td>90</td><td>91</td><td>92</td><td>93</td><td>94</td><td>95</td><td>96</td><td>97</td><td>98</td><td>99</td><td>100</td><td>101</td><td>102</td><td>103</td> </tr> <tr> <td>Ac</td><td>Th</td><td>Pa</td><td>U</td><td>Np</td><td>Pu</td><td>Am</td><td>Cm</td><td>Bk</td><td>Cf</td><td>Es</td><td>Fm</td><td>Md</td><td>No</td><td>Lr</td> </tr> </table>																57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71																																																															
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu																																																															
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103																																																															
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr																																																															

> 50%
 > 25-50%
 > 10-25%
 1-10%
 < 1%



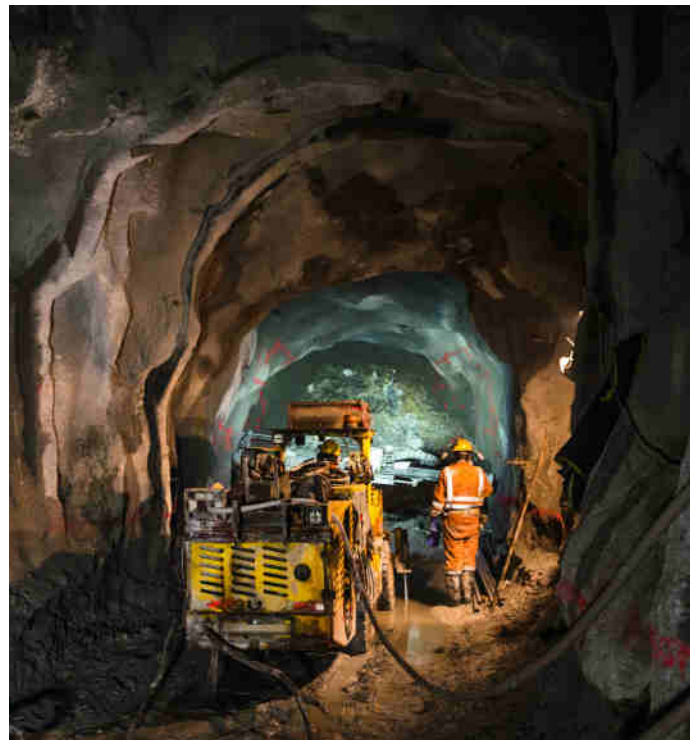
Dal petrolio ai metalli. Nuove tecnologie, vecchi problemi



La transizione del sistema energetico porta con sé una grande richiesta di materiali che sarà pressoché totalmente demandata all'azione mineraria, almeno in fase di avvio. L'estrazione e la purificazione di minerali è una attività fortemente inquinante e richiede notevoli quantità di energia, con potenziali effetti significativi sullo stesso stato del pianeta, che possono sia trasformarsi in un ulteriore (e grave) problema per l'ecosistema che contribuire ad ulteriormente alimentare percorsi di ingiustizia sociale. Un contributo nell'abbattimento nell'utilizzo dei materiali da prima estrazione potrà avvenire dal riciclo, con l'implementazione di tecniche di economia circolare e produzione di elevate quantità di materiali riciclati. Tuttavia queste potranno dare un contributo significativo solo una volta a regime, quando le installazioni energetiche saranno già effettive e via via stabilizzate nel numero.

Le stesse azioni di riciclo, se non svolte correttamente, condividono con l'estrazione primaria molte delle problematiche ambientali.

Le criticità sono tali che sono entrate nell'orizzonte anche possibilità di estrazione di minerali in siti marini, ⁽¹³⁾ costose ma comunque appetibili per la presenza nei fondali di alcuni dei minerali necessari alla transizione. In generale il più delle volte i progetti minerari sono tutt'altro che ambientalmente e socialmente sostenibili, specie quando avvengono in condizione di scarsi o nulli controlli del rispetto delle norme lavorative ed ambientali, come per il caso più noto del minerale di cobalto in Congo. ⁽¹⁴⁾





Fattori di inquinamento nell'attività estrattiva e di recupero dei materiali

Attività	Sorgente di emissione	Inquinanti principali
Estrazione (a cielo aperto o nel sottosuolo)	Sovraestrazione Rifiuti rocciosi Accumuli di minerali Accumuli di residui	Materiali radiattivi Metalli Acque minerarie Drenaggi acidi Drenaggi alcalini Polveri & inquinanti trasportati
Processi	Macinazione	Polvere
	Scarti Accumulo degli scarti Rifiuti liquidi di processo	Materiali radiattivi Metalli Torbidità Organici Polveri inquinate
Riciclo	Raccolta	Inquinamento da trasporto
	Demolizione & separazione Frammentazione Interramento	Polveri inquinanti Solventi organici volatili Metalli Organici
	Processi	Solventi organici volatili Diossine Metalli Altri organici

Tutti i processi minerari sono caratterizzati da grandi movimenti di materiale che si verificano per tutto il ciclo di vita della miniera. Questi movimenti si traducono in ammassi di rifiuti e in numerosi scavi, che sono la principale causa di inquinamento diretto del suolo. In termini utilizzo delle aree, le zone di stoccaggio dei materiali trattati (e spesso inquinati) e non più produttivi, detti sterili, possono coprire anche la metà dell'intera area di lavoro. ⁽¹⁵⁾ Le sostanze presenti all'interno del materiale dissotterrato e le pareti vuote degli scavi, esposte a vento, pioggia e aria, favoriscono reazioni chimiche, lisciviazione e diffusione dell'inquinamento, drenando polveri e agenti chimici.

Quando non effettuato correttamente il contenimento a lungo termine dei mucchi degli scarti, in maniera tale da garantire l'integrità strutturale degli accatastamenti, può portare al collasso dei minerali "sterili" con gravi impatti sulle comunità e gli ecosistemi. Le attività minerarie e di lavorazione nei siti minerari, inoltre, hanno un elevato fabbisogno idrico. ⁽¹⁶⁾

L'acqua dolce utilizzata è acqua di alta qualità il cui utilizzo, essendo potenzialmente adatta per il consumo umano, entra in competizione diretta con le necessità delle popolazioni. Fattori quali inadeguata gestione dell'acqua della miniera, elevato prelievo, bassi tassi di riutilizzo delle acque e smaltimenti impropri



impattano pesantemente sulle risorse idriche locali e influenzano gli ecosistemi circostanti. Le attività estrattive colpiscono gli *habitat* naturali sia all'interno che all'esterno della locazione mineraria.

Accedere e trasportare il minerale richiede zone di accesso che vanno ben oltre l'area mineraria vera e propria, con impatti pesanti e rischi per la conservazione della biodiversità.



Le persone che vivono o lavorano nelle vicinanze di un progetto minerario diventano portatori di rischio sociale.

Comunità presenti in loco ben prima dello sviluppo della miniera debbono far posto e adattarsi alle attività minerarie e ai cambiamenti ambientali, a partire dalla fase di prima esplorazione e fino alla chiusura della miniera. Dal punto di vista del minerale, successivamente all'estrazione mineraria sono necessari processi di concentrazione, separazione, fusione e raffinazione fino ad ottenere l'elemento nella sua forma metallica. In ogni fase, le impurità vengono separate e la concentrazione del metallo nel prodotto finale aumenta.

Spesso è richiesta un'elevata intensità energetica e il controllo delle differenti fasi è spesso basato sull'uso diretto di combustibili fossili sia come riducenti chimici che indirettamente per il calore e/o l'elettricità.⁽¹⁷⁾ Come conseguenza l'impronta climalterante dell'estrazione mineraria è un fattore tutt'altro che trascurabile.⁽¹⁸⁾

L'intensità energetica dell'estrazione e dell'arricchimento aumenta nel tempo man mano che le estrazioni si focalizzano verso minerali con minori tenori metallici e ci si avvia ad estrarre da depositi più complessi.

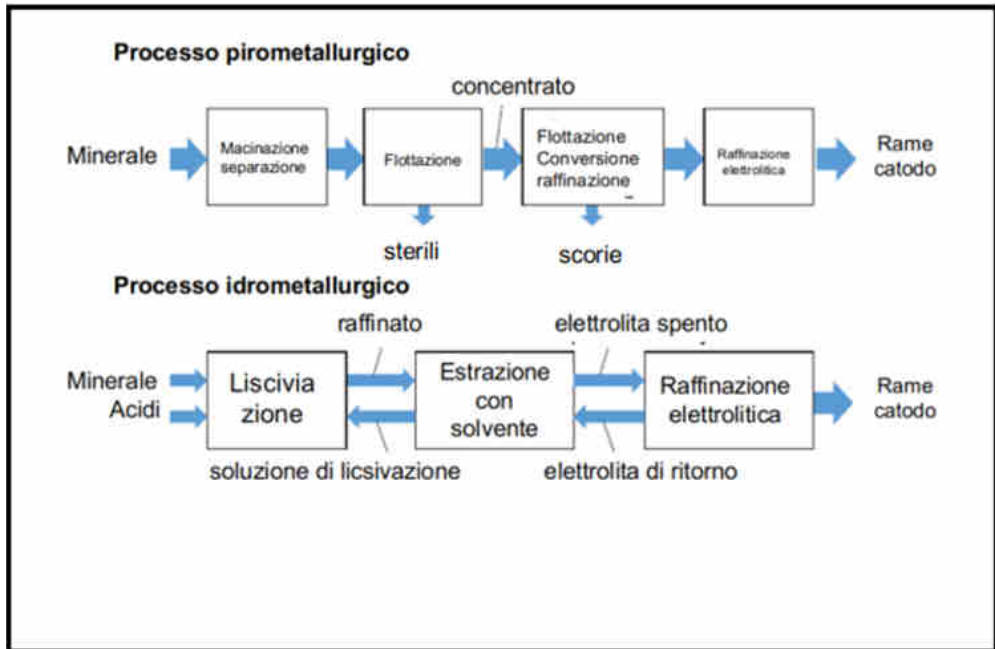
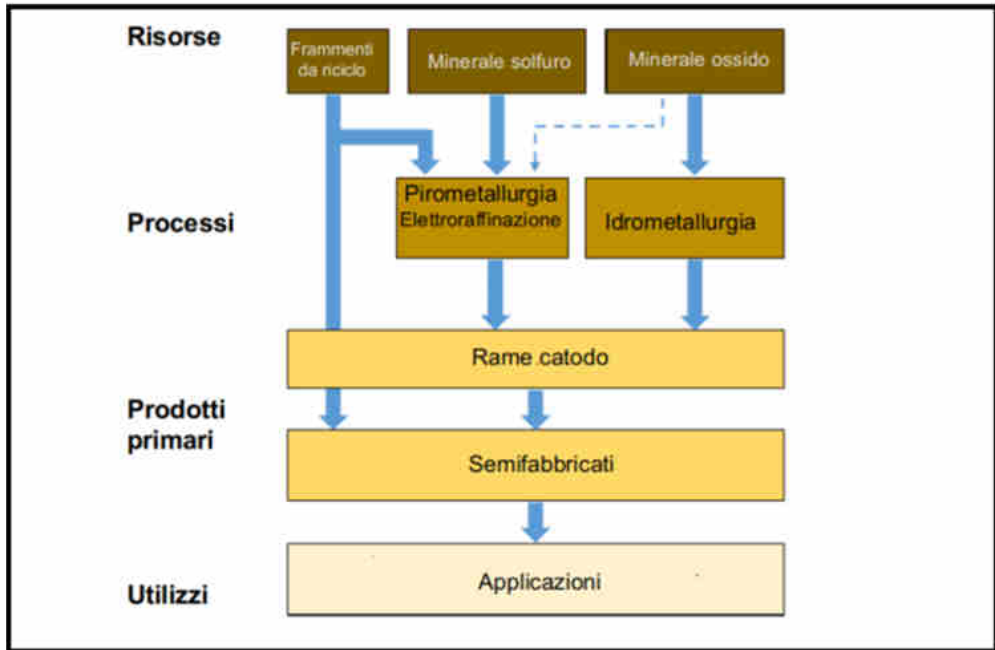
Un'analisi approfondita degli impatti ambientali dell'attività mineraria risulta essere fuori dallo scopo del presente documento. Si rimanda al documento *"Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles"*⁽¹⁹⁾ delle Nazioni Unite e alla referenza 20 per eventuali approfondimenti. L'attività mineraria è pure spesso connessa a forti fattori di ingiustizia sociale. L'organizzazione *Transition Mineral Tracker* tiene traccia delle irregolarità correlate all'estrazione dei minerali nel mondo da parte delle società di estrazione.⁽²⁰⁾

Nel suo *report* di febbraio 2021 l'organizzazione registra 103 compagnie, di cui ben 51 soggette a denunce per abusi nei diritti umani. Nel report sono registrate 276 denunce, di cui 125 relative agli impatti sulle comunità, 119 agli impatti ambientali, 68 agli abusi di *governance* e trasparenza, 67 agli effetti sui lavoratori, 36 alla sicurezza e alle zone di conflitto e 12 alla pandemia. A fianco delle organizzazioni minerarie registrate (e per questo visibili e almeno sulla carta più controllabili), infine, sono da considerare le cosiddette "miniere artigianali", condotte più o meno abusivamente e al di fuori da ogni seppur minima capacità di controllo.





Schema rappresentativo del ciclo del rame, dal minerale all'utilizzo finale



La pirometallurgia comporta il trattamento del metallo concentrato ad alte temperature, al fine di eliminare i suoi costituenti minerali associati, utilizzando combustibili fossili.

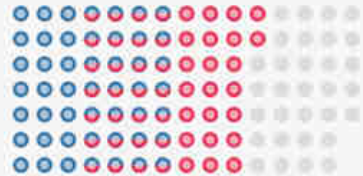


Transition Mineral Tracker Allegations

NUMBER OF ALLEGATIONS BY CATEGORY



103 companies researched
 49 have a human rights policy
 51 have human rights abuse allegations



There are 276 allegations recorded in the tracker. One allegation may include multiple human rights impacts.

302 COMMUNITY IMPACTS



229 ENVIRONMENTAL IMPACTS



39 SECURITY & CONFLICT ZONES



120 IMPACTS ON WORKERS



89 GOVERNANCE & TRANSPARENCY



17 COVID-19 PANDEMIC





Una nota in conclusione: l'energia, il sistema e l'ambiente

La transizione tecnologica verso la sostenibilità della produzione e del consumo di energia ha bisogno, come visto, di una ingentissima quantità di materiali. La prima conseguenza diretta sarà una intensificazione delle estrazioni minerarie, con la parallela ricerca di nuovi siti di approvvigionamento, che diverranno economicamente produttivi a sempre minori tenori di minerali e a maggior difficoltà di estrazione. All'orizzonte, l'attualmente pionieristica estrazione sottomarina. E' ragionevole pensare che questa intensificazione mineraria si avvierà in maniera tumultuosa parallelamente alla crescita delle installazioni per poi procedere in maniera parzialmente più moderata con il consolidamento quantitativo dei processi di riciclo dei materiali riguardanti le prime installazioni, cosa che non potrà che avvenire a fine vita degli impianti, almeno venti se non trenta anni dopo il loro avvio.

Concettualmente si tende a non dare peso agli impatti ambientali dell'uso dei minerali, o a confinarli nelle specifiche zone di estrazione, relegandoli a fenomeni di cattiva gestione locale o di sfruttamento esasperato. Del resto, nella visione del mondo consolidata, i metalli, che sono i minerali di nostro maggiore interesse, si possono riciclare più e più volte. In qualche modo siamo portati a considerare i materiali che dovremo utilizzare "sostenibili" in quanto riciclabili. Tuttavia questo non è sempre vero e anche per i materiali può sussistere un problema di sostenibilità. Se correliamo la sostenibilità al livello di entropia che è necessario contrastare per rendere il materiale utilizzabile per i nostri obiettivi, abbiamo che più è elevata l'entropia del materiale di parten-

(lo stato di "dispersione" del materiale) e più sarà elevata l'energia necessaria a contrastarla (a contrastare lo stato di dispersione"). Da questo punto di vista, sostanzialmente chimico-fisico, potremmo correlare la sostenibilità alla quantità di energia necessaria per portare il materiale dal suo stato di origine a quello di utilizzo. Considerando un materiale proveniente da riciclo, questo sarà "sostenibile" se l'energia necessaria alla sua raccolta a fine ciclo vita del dispositivo che lo utilizza, sommata a quella necessaria ai trattamenti richiesti per renderlo adeguato al suo nuovo utilizzo come materia prima, sarà minore di quella richiesta dalla raccolta del minerale in miniera e dai trattamenti necessari per renderlo atto al suo primo utilizzo. In questa condizione, dal punto di vista dello specifico materiale ci sarà sostenibilità. Tuttavia, in questa concettualizzazione, concentriamo l'attenzione semplicemente sull'energia necessaria per le manipolazioni dirette del materiale in oggetto, prendendone gli effetti positivi e scaricando sull'ambiente gli output di processo.

Ma questa è una concettualizzazione del tutto analoga a quella propria della termodinamica classica, nella sua modellazione della correlazione tra calore e lavoro. La "macchina termica" utilizza calore ad alta temperatura, con il quale produce lavoro (che noi utilizziamo) e disperde il calore degradato (a bassa temperatura) nell'ambiente. E' l'impianto concettuale che razionalizza la modalità propria dell'utilizzo dei combustibili fossili, gli stessi combustibili che dalla macchina di Watt al motore a combustione interna hanno creato il mondo che conosciamo.

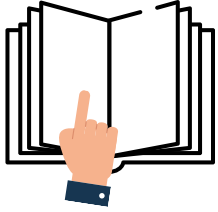


La *“scienza del calore”* vede, razionalizza ed ottimizza i risultati positivi correlati al calore, ma trascura la chimica delle operazioni correlate alla sua produzione, nonché gli effetti dell'utilizzo di quel calore per produrre lavoro, li lascia "altrove". La materialità sottostante è considerata certamente necessaria ma è relegata ad un ambiente esterno, *“serbatoio infinito”* sia per l'alimentazione che per gli scarichi.

E' evidente che questo è un limite di impostazione, in quanto l'ambiente esterno è tutt'altro che un *“infinito fisicamente ininfluenza”*, ma è esso stesso, per quanto grande, un *“sistema fisicamente rilevante”* e non può essere disconnesso da quanto viene posto sotto esame. In altre parole, la nostra azione modifica l'ambiente esterno e la modifica è comunque tale da essere rilevante. Il pianeta non è un esterno infinito ma il luogo in cui ci troviamo ad operare ed è esso stesso un sistema chiuso. La *“macchina elettrica”* con cui ci aviamo sperabilmente a sostituire la *“macchina termica”* è solo una parte del puzzle con cui dovremo fare i conti per affrontare la questione ecologica. Se non riusciamo a tenere insieme il tutto, utilizzando gli effetti positivi ed utili delle fonti rinnovabili e contemporaneamente minimizzando, ma sarebbe meglio dire (per quanto possibile) annullando, gli impatti verso l'“esterno-pianeta”, fatto di territori e ambiente, suoli ed acque, rischiamo di ripetere l'errore: immaginare l'esistenza di un esterno serbatoio infinito, in ultima analisi scarica dei nostri rifiuti, mentre in realtà viviamo in un sistema chiuso, con un contenuto entropico sempre maggiore. L'elettrificazione massiva dei consumi, necessaria alla transizione, eviterà emissioni di gigatonnellate di CO₂, ma dovrà anche evitare che il mondo si ritrovi con acqua

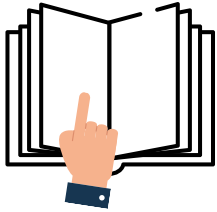
e terreni avvelenati, dati gli enormi impatti negativi che la ricerca e l'estrazione mineraria potrebbe comportare sia verso i luoghi di impiantazione che verso i sistemi idrici, sistemi direttamente necessari alla vita. Per non dire del degrado generalizzato che nelle ipotesi peggiori si prospetta per la biodiversità e in generale per tutti gli ecosistemi.

Ed è difficile che questo possa avvenire lasciando che le potenzialità positive delle tecnologie rinnovabili e della transizione energetica siano governate dalle usuali dinamiche estrattiviste ed espansive tipiche del mondo in cui viviamo.



Note & Riferimenti

1. Elaborazione da Zepf V., Reller A., Ashfield M. e Simmons J., BP: *Materials critical to the energy industry*. Seconda edizione, 2014.
2. Rielaborazione da European Commission, *“Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study”*, 2020.
3. In rosso le materie prime già considerate come critiche dalla Comunità Europea.
4. S. Carrara, P. Alves Dias, B. Plazzotta and C. Pavel, *Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system*, EUR 30095 EN, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2020.
5. Con il termine stabilizzazione della rete si intende la capacità della rete di erogare energia in maniera stabile in funzione della richiesta. Per un sistema ad alto tasso di fonti rinnovabili il maggior fattore di criticità è l'insufficienza della produzione ad un determinato momento. Le batterie possono intervenire nella stabilizzazione della rete fornendo l'energia da esse precedentemente accumulata alla stessa. Si noti che in un sistema pressochè full electric anche le batterie dedicate all'autotrazione possono concorrere alla stabilizzazione della rete.
6. Si stima che gli accumuli stazionari pesino per il 20% del totale della capacità di accumulo.
7. Attualmente la capacità delle batterie per l'autotrasporto totalmente elettrico va da 20 kWh per una piccola utilitaria a oltre 100 kWh per macchine più grandi.
8. IEA, *“The role of critical minerals in clean energy transitions”*, World Energy Outlook Special Report, 2021.
9. Le differenti *“colorazioni”* dell'idrogeno. (*Idrogeno grigio*: ottenuto da idrocarburi attraverso processi chimici. La sua produzione emette rilevanti quantità di anidride carbonica (CO₂). *Idrogeno blu*: anch'esso ottenuto da idrocarburi, ma con cattura della CO₂ emessa. La CO₂ catturata, a sua volta, può venire sequestrata e reimpressa nei depositi vuoti di idrocarburi (tecnologia Carbon Capture and Storage - CCS), mineralizzata per reazione con opportuni sali (tecnologia Carbon capture Utilization and Storage - CCUS) o utilizzata come chemical per altri processi (CCU). *Idrogeno verde*: ottenuto da fonte rinnovabile, tipicamente da elettrolisi dell'acqua con corrente prodotta da fotovoltaico od eolico. *Idrogeno viola*: ottenuto anch'esso da elettrolisi dell'acqua, ma con corrente prodotta da energia nucleare.)
10. Si definiscono riserve i depositi di minerali già identificati e sfruttabili in maniera economicamente competitiva con le tecnologie oggi disponibili; sono definite risorse i depositi indicati come probabili ma sfruttabili a costi attualmente non competitivi o che ancora non sono stati identificati con certezza.
11. T. Watari, B. C. McLellan, S. Ogata and T. Tezuka, *“Analysis of Potential for Critical Metal Resource Constraints in the International Energy Agency's Long-Term Low-Carbon Energy Scenarios”*, Minerals 2018,8, 156.



Note & Riferimenti

12. T.E.Graedel, J.Allwood, J.P.Birat, B.K.Reck, S.F.Sibley, G.Sonnemann, M.Buchert, C.Hagelüken, *Recycling Rates of Metals – A Status Report, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel*, UNEP (2011).
13. Ad esempio i depositi di nichel sono diffusi anche sul fondo dell'oceano. Estraendoli rilascia anidride solforosa, che acidifica la pioggia e causa problemi respiratori nell'uomo.
14. Quasi due terzi dei depositi conosciuti si trovano nella Repubblica Democratica del Congo, uno stato estremamente povero e dilaniato dalla guerra dell'Africa centrale con un governo instabile e inefficace. L'estrazione di cobalto nella RDC si basa in larga misura sulla manodopera umana a basso costo, bambini compresi.
15. Il rame, ad esempio, attualmente viene estratto a partire da una presenza del minerale nell'estratto pari all'1%. Questo significa che per ogni tonnellata di minerale di rame si debbono estrarre 100 tonnellate di inerti, che dovranno essere accantonati dopo il primo trattamento estrattivo.
16. Per l'estrazione delle terre rare si stima un consumo complessivo di circa 90 m³/kg.
17. La produzione di acciaio, ad esempio, rappresenta il 30% delle emissioni industriali globali di anidride carbonica (CO₂).
18. P. Nuss, M. J. Eckelman, Life cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101298>.
19. <https://www.resourcepanel.org/reports/environmental-risks-and-challenges-anthropogenic-metals-flows-and-cycles>.
20. <https://trackers.business-humanrights.org/transition-minerals/>

