

## Allegato 1

### La transizione energetica

*Sarà su questa strada che risolveremo la crisi ecologica?*

Il passaggio del sistema energetico dalle tecnologie fossili alle tecnologie rinnovabili, parziale al 2030 e ‘pieno’ al 2050, orientato cioè a un saldo di zero emissioni climalteranti, è parte di un cambiamento assolutamente necessario. Il recente raggiungimento di 415 parti per milione di CO<sub>2</sub> nell’atmosfera è un dato che non si può osservare senza restarne allarmati e offesi. Tuttavia c’è un secondo dato oggi trascurato: la transizione comporterà l’utilizzo di una grande quantità di risorse materiali, con ampio utilizzo di specie chimiche, in particolare metalli, differenti da quelli tradizionalmente utilizzati fino ad oggi nel modello energetico fossile; e la misura del fenomeno è tale da dover essere considerata rilevante a scala planetaria. In figura 1.1 è rappresentata una tabella delle specie utilizzate in funzione dello sviluppo delle tecnologie. Come ben visibile in figura, per ogni incremento tecnologico nelle capacità di produzione e di utilizzo dell’energia esiste un incremento parallelo del numero di elementi chimici utilizzati.

In figura 1.2 sono rappresentati i flussi di materia necessari all’implementazione delle tecnologie necessarie alla transizione. I materiali richiesti intersecano tutte le tecnologie in maniera pervasiva con quantità in gioco che già oggi lasciano intravedere rischi nell’approvvigionamento, correlati sia alle riserve e alle risorse<sup>21</sup> disponibili che a problematiche di tipo geopolitico.

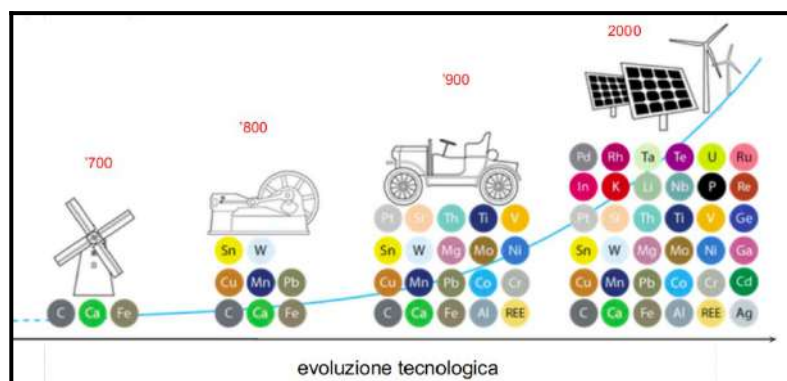
Oltre alle specie di “nuovo” utilizzo, le tecnologie a basse emissioni di carbonio risultano essere anche a molto più alta intensità di utilizzo di metalli “tradizionali” rispetto alle tecnologie correnti. Un’auto elettrica

---

21 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.

contiene in genere 80 kg di rame, quattro volte di più di un'auto a benzina o diesel, le centrali eoliche o fotovoltaiche contengono più rame di quelle fossili. È quindi del tutto logico aspettarsi che la domanda di materie prime aumenti esponenzialmente, alimentando un'altrettanta esponenziale crescita in ricerca e produzione mineraria, specie nelle fasi di avvio e maggiore espansione delle tecnologie, durante le quali minore è la possibilità di avvantaggiarsi delle economie pure offerte dal riciclo.

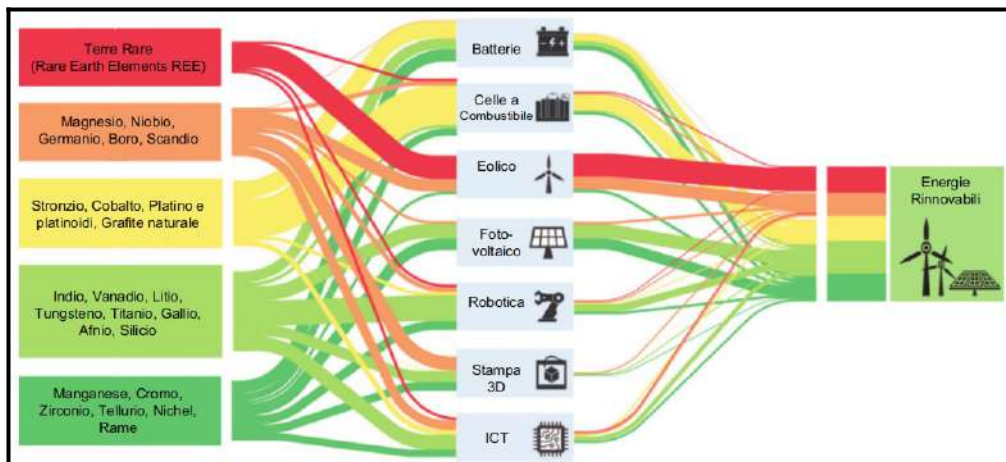
Nel seguito è riportata una visualizzazione delle principali tecnologie necessarie alla transizione energetica con particolare attenzione alla stima dei materiali necessari, mettendo in evidenza l'incremento atteso della domanda e le capacità del pianeta di rispondere al fabbisogno richiesto. Saranno pure evidenziati gli impatti ambientali e sociali che una espansione tumultuosa e non regolata delle attività di reperimento delle risorse inevitabilmente potrà far ricadere sull'ecosistema terrestre.



**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	Gadolino	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	Fluoro	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	Piattino	Cf	Californio
K	Potassio	Y	Ittrio	Pr	Praseodimio	Au	Oro	Es	Einsteinio
Ca	Calcio	Zr	Zirconio	Nd	Neodimio	Hg	Mercurio	Fm	Fermio

**Figura 1.1.** Alto: Elementi chimici ed evoluzione delle tecnologie<sup>22</sup>. Basso: simboli e denominazione degli elementi. In rosso le Terre Rare (Rare Earth Elements, REE).



**Figura 1.2.** Flussi di materia nelle tecnologie della transizione. Non sono considerati i materiali strutturali e i conduttori di uso generale, quali acciaio, rame ed alluminio<sup>23</sup>.

22 V. Zepf, A. Reller, C. Rennie, M. Ashfield & J. Simmons, *Materials critical to the energy industry. An introduction*, BP (2014), 2nd edition.

23 Rielaborazione da European Commission, “Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study”, 2020.

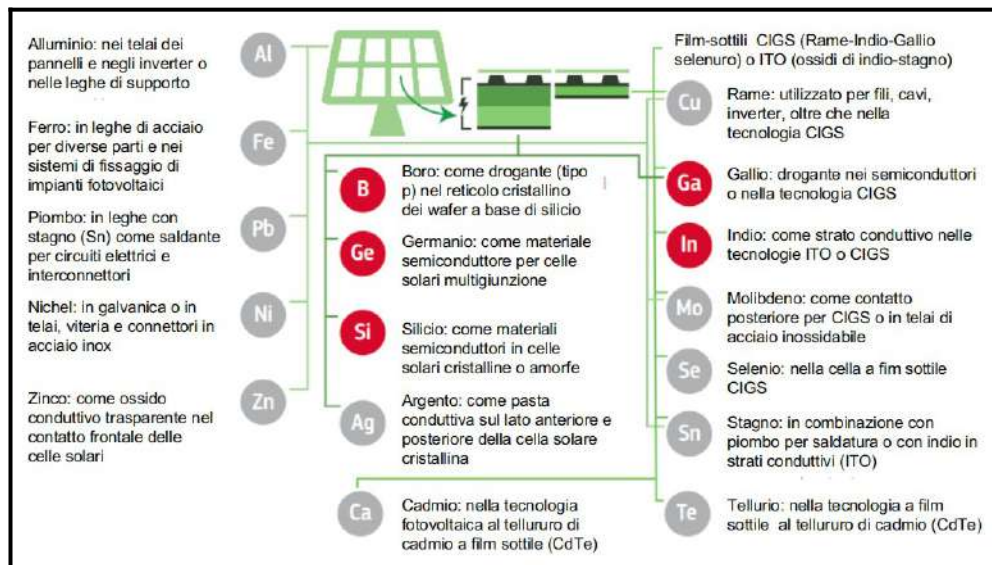
## **Nota metodologica**

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 emissioni climalteranti al 2030 e del 100% al 2050 (rispetto al 1990), si suppone un raddoppio della energia elettrica utilizzata nei consumi finali mondiali al 2050, con una produzione da fonti rinnovabili di circa l'85%. In tale scenario, nel settore trasporti, che nelle economie avanzate attualmente pesa per circa il 30% dei consumi, si suppone una completa transizione verso tecnologie elettriche con alimentazione da batterie o da idrogeno + celle a combustibile.

## **Le principali tecnologie di produzione**

### ***Il solare fotovoltaico***

Sebbene i pannelli solari siano prevalentemente fatti di silicio cristallino, acciaio e alluminio costituiscono le strutture di supporto, e il rame è necessario ed ampiamente utilizzato per connessioni e cablaggio. In figura 1.3 è riportata la rappresentazione schematica dei materiali utilizzati in un pannello fotovoltaico, nelle differenti tecnologie oggi possibili.



**Figura 1.3. Materiali e loro utilizzo nella tecnologia fotovoltaica.** <sup>23,24</sup>

Calcestruzzo, plastica, vetro, sono pure necessari e diffusi 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. Insieme all'indio, al gallio e al selenio, il rame è anche un componente funzionale della tecnologia CIGS (vedi figura 1.3) che insieme al silicio amorfo e al tellururo di cadmio (CdTe) fa parte della famiglia dei film sottili.

Per il rame viene valutata la necessità di 7-10 milioni di tonnellate di rame in più rispetto al consumo attuale per soddisfare la domanda di energia solare fino al 2030 (anche se questo dipende dal tipo di tecnologia solare che si rivelerà dominante). Tutte le modalità fotovoltaiche diverse dal silicio cristallino vedrebbero in parallelo un incremento considerevole degli altri metalli definiti in figura 1.3.

Le intensità dei materiali costituenti il dispositivo fotovoltaico e le richieste annuali stimate che ne derivano al 2030 e al 2050 sono state riportate in un lavoro pubblicato dal Joint Research Center della Comunità Europea<sup>25</sup>. Le Tabelle I e II riassumono i risultati dello studio, opportunamente elaborati ai fini del presente lavoro.

<sup>24</sup> In rosso le materie prime già considerate come critiche dalla Comunità Europea.

<sup>25</sup> 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.

Tabella I

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		
	Alluminio		7.5		
	Rame		4.6		
c-Si	Silicio	t/GW	4	3.5	3
	Argento		20	11	5
CdTe	Cadmio		85	60	35
	Tellurio		95	70	40
CIGS	Rame		24	17.5	15
	Indio		27	17	10
	Gallio		7	4.5	2.5
	Selenio		60	40	20
a-Si	Silicio		150	130	110
	Germanio		48	32	20

La transizione per le installazioni fotovoltaiche aumenta enormemente le necessità annuali dei materiali. Considerando il solo obiettivo intermedio del 2030, il dato mondiale per i materiali strutturali sale a oltre 100 milioni di tonnellate/anno di richiesta, per il silicio, siamo a oltre 1,5 milioni di tonnellate, l'argento sta a circa 5000 tonnellate, mentre selenio, tellurio e cadmio si collocano tra 1000 e 1650 tonnellate/anno. Gadolinio, germanio ed indio sono a 120, 225 e 450 tonnellate anno.



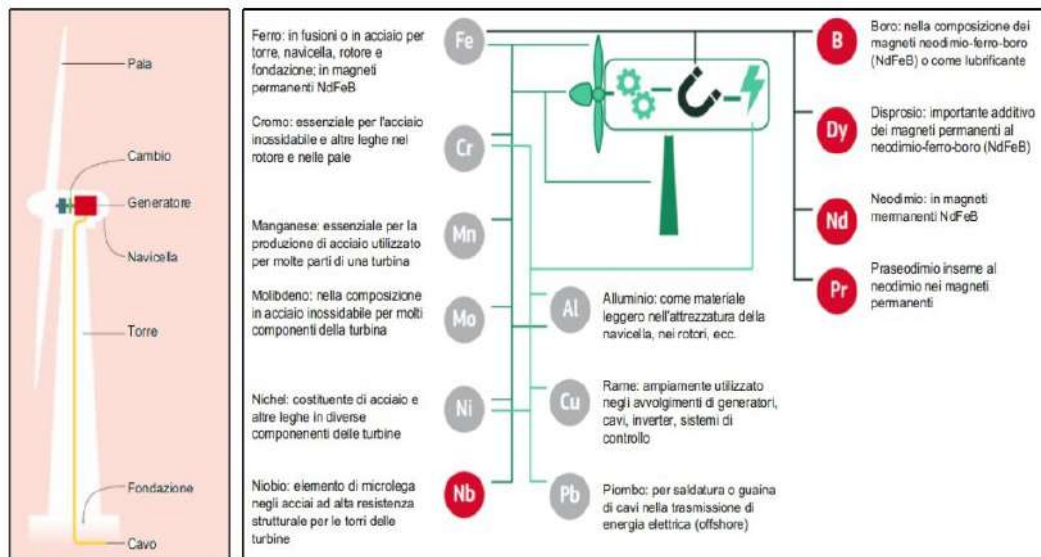
**Tabella II**

<b>Consumo di materiali attuale e stimato per la generazione fotovoltaica.</b>										
<b>Materiale</b>	<b>Stima situazione europea</b>			<b>Stima situazione mondiale</b>						
	<b>Domanda Attuale (2018)</b>	<b>Incremento fabbisogno annuale stimato</b>		<b>Domanda Attuale*</b>	<b>Incremento fabbisogno annuale stimato</b>					
	<b>quantità (t)</b>	<b>% al 2030</b>	<b>% al 2050</b>	<b>quantità (t)</b>	<b>% al 2030</b>	<b>% al 2050</b>				
<b>Calcestruzzo</b>	494 000			6071 000						
<b>Acciaio</b>	552 100			6786 000						
<b>Plastica</b>	69 700	850	2 100	857 000	520	690				
<b>Vetro</b>	377 700			4643 000						
<b>Alluminio</b>	61 000			750 000						
<b>Rame</b>	37 800			464 300						
<b>Argento</b>	155			400			400	1 910	260	150
<b>Cadmio</b>	16.3			1 300			3 600	201	820	1 200
<b>Gallio</b>	1.1	1 400	3 800	14	860	1 260				
<b>Germanio</b>	1.2	2 500	8 500	15	1 500	2 800				
<b>Indio</b>	4.3	1 300	4 000	53	850	1 300				
<b>Selenio</b>	9.5	1 500	3 700	117	900	1 180				
<b>Silicio</b>	31 000	700	1 200	381 600	420	400				
<b>Tellurio</b>	18.2	1 400	3 800	224	850	1 220				

### ***L'eolico***

Le turbine eoliche richiedono 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 diventeranno più potenti, il numero necessario diminuirà, e con esso il fabbisogno di acciaio, destinato comunque ad essere e restare consistente. La domanda di altri metalli dipende dal tipo di turbina eolica che viene adottata. Esistono sostanzialmente due tipi di turbine eoliche: turbine a ingranaggi, che utilizzano ingranaggi per convertire la velocità di rotazione relativamente bassa della turbina in una velocità molto più elevata per il generatore e turbine a trasmissione diretta, che utilizzano un generatore a bassa velocità. Sia le turbine a trasmissione diretta che quelle a ingranaggi utilizzano cavi in rame nel generatore, ma la maggior parte delle turbine a trasmissione diretta ha anche magneti permanenti, contenenti terre rare. In figura 1.4 è

riportata la rappresentazione di una generica pala eolica, con i dettagli relativi ai materiali ed al loro utilizzo per la tecnologia.



**Figura 1.4.** Sinistra: schema di una generica pala eolica. Destra: materiali e loro utilizzo nella tecnologia eolica.<sup>23,24</sup>

A differenza di quanto visto per il fotovoltaico, anche a parità di scelte tecnologiche, 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 ha una ampia variabilità nelle intensità dei materiali usati, che vengono a dipendere anche dalle scelte ingegneristiche della ditta costruttrice, oltre che dai vincoli fisici e tecnologici sottostanti (alcuni approfondimenti descrittivi sono riportati nell'apposita scheda). In tabella III sono date le intensità dei materiali per l'eolico, così come risultanti in ref.<sup>25</sup> unitamente alle proiezioni sulle necessità annuali future, la cui elaborazione è riportata in Tabella IV come ottenuta dai valori mediani risultanti da tabella III.



Su base mondiale, l'incremento previsto per le installazioni eoliche lascia prevedere un incremento del consumo annuale del 650 % dei materiali strutturali e conduttivi al 2030, dato che diventa il 750 % al 2050 su base mondiale. Per quanto riguarda i materiali funzionali l'incremento è del 1000 % e 1500 % per il Boro (dovuto ai magneti permanenti NdFeB), rispettivamente al 2030 e al 2050, con valori leggermente inferiori ma dello stesso ordine di grandezza per le terre rare Disprosio, Neodimio, Praseodimio, Terbio.

**Tabella III**

<b>Intensità dei materiali per la generazione eolica</b>		
<b>Materiale</b>	<b>t/GW</b>	
	<b>Min</b>	<b>Max</b>
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	

**Tabella IV**

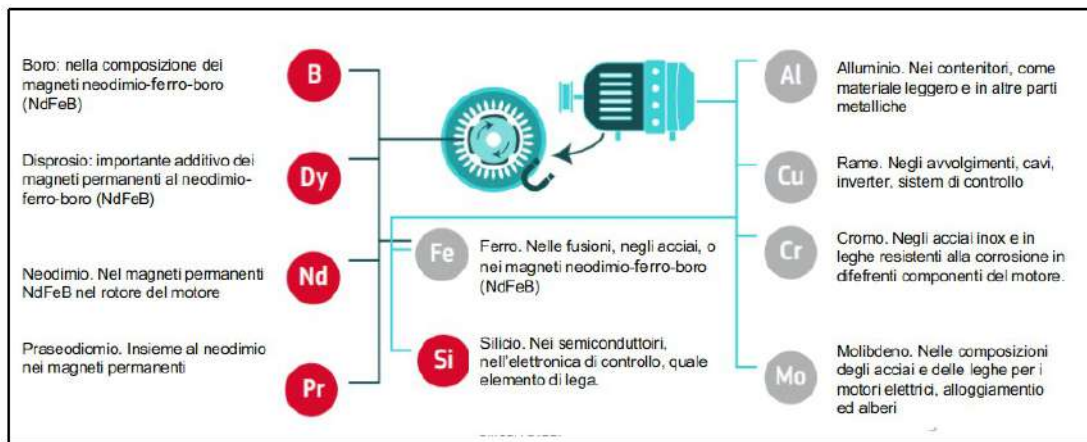
<b>Consumo attuale e incrementi stimati per i materiali necessari nelle installazioni eoliche in sede europea e nel mondo</b>						
	Materiale	Domanda attuale (2018)			Incremento fabbisogno annuale stimato	
		Onshore	Offshore	Totale	% al 2030	% al 2050
		quantità (t)				
Stima situazione europea	Calcestruzzo	2 980 000	1 098 000	4 078 000		
	Acciaio	961 000	442 000	1 403 000		
	Plastica	38 000	17 000	55 000		
	Vetro	65 000	31 000	96 000		
	Alluminip	10 000	3 000	13 000		
	Cromo	4 000	2 000	6 000		
	Rame	20 000	9 000	29 000		
	Ferro	159 000	77 000	236 000		
	Manganese	6 400	3 000	9 400		
	Molibdeno	900	400	1 300		
	Nichel	3 200	1 100	4 300		
	Zinco	45 000	21 000	66 000	500	1 150
	Boro	5	20	25		
	Disprosio	40	50	90		
	Neodimio	300	600	900		
	Praseodimio	50	100	150		
	Terbio	10	20	30	600	1 500
Stima situazione mondiale	Calcestruzzo	16 172 000	1 380 000	17 552 000		
	Acciaio	5 398 000	526 000	5 924 000		
	Plastica	216 000	21 000	237 000		
	Vetro	371 000	36 000	407 000		
	Alluminio	57 000	4 000	61 000		
	Cromo	23 000	2 000	25 000		
	Rame	90 000	11 000	101 000		
	Ferro	890 000	90 000	980 000		
	Manganese	36 900	3 600	40 500		
	Molibdeno	4 900	500	5 400		
	Nichel	18 300	1 400	19 700		
	Zinco	259 000	25 000	284 000	650	750
	Boro	60	20	80	1 000	1 500
	Disprosio	260	50	310	850	1 150
	Neodimio	2 300	500	2 800	900	1 300
	Praseodimio	360	90	450	950	1 380
	Terbio	100	20	120	850	1 180

### Intensità dei materiali e tecnologie eoliche

- Calcestruzzo. Esistono diversi requisiti di massa per le turbine eoliche onshore e offshore. La stima inferiore è per turbine utilizzate prevalentemente offshore; la stima più alta è per turbine utilizzate principalmente in terraferma.
- Acciaio. I modelli di turbine esistenti utilizzano tra 107 e 132 t di acciaio per MW di capacità installata.
- Polimeri. I valori sono praticamente identici tra i diversi tipi di turbina.
- Compositi. L'utilizzo è costante indipendentemente dal tipo di turbina.
- Alluminio. Le stime inferiori si applicano alle turbine a trasmissione diretta dove 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. Il boro viene 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. Un contenuto di cromo più elevato è correlato all'uso di acciai altolegati.
- Rame. 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 utilizzato nei magneti permanenti del generatore a turbina, ma anche in magneti per il fissaggio di infissi interni all'interno della torre, anche se in piccole quantità. La stima più bassa è per alta e media velocità con cambio; la stima più alta è per le turbine a trasmissione diretta.
- Ghisa. La ghisa viene utilizzata nella fondazione della navicella, negli alberi principali nel cambio, nel generatore e mozzo della lama. Sono disponibili diversi gradi di fusione. 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 esistono circa 8 miliardi di motori elettrici in uso nell'UE, utilizzati per una vasta gamma di applicazioni, dai prodotti elettronici di piccole dimensioni alle biciclette elettriche, ai motori di grandi dimensioni che si trovano nelle trasmissioni elettriche dei veicoli e nei trasporti pesanti. Si prevede che il numero di motori crescerà in modo significativo in futuro, 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 NdFeB, o leghe che possono contenere altre terre rare oltre al neodimio, come praseodimio e disprosio. In alternativa ai motori sincroni si possono utilizzare motori a induzione adottati da diversi produttori di veicoli elettrici. Questi non contengono materiali magnetici permanenti e funzionano invece inducendo correnti elettriche nei conduttori del rotore del motore. Tali motori contengono quantità elevate di rame. In futuro, si prevede che la tecnologia dei magneti NdFeB dominerà il mercato. In figura 1.5 è riportata una rappresentazione di un motore elettrico, con evidenza dei materiali necessari al suo funzionamento.



**Figura 1.5.** *Materiali necessari al funzionamento di un moderno motore elettrico.*<sup>23,24</sup>

La richiesta di terre rare per i motori nel solo mercato europeo è attualmente di 200, 400 e 4 000 tonnellate anno rispettivamente per disprosio, praseodimio e neodimio. Nel 2050, il dato è atteso incrementare del 600%

per il disprosio, mentre si prevede 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 corrente. La tecnologia delle batterie al litio permette di accumulare relativamente grandi quantità di corrente, rendendo possibili applicazioni che vanno dalla stabilizzazione della rete elettrica (con batterie che entrano in funzione in assenza di produzione da rinnovabili) all'autotrasporto leggero. 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<sup>26</sup>. Sebbene la durata delle batterie stia migliorando, i tempi di ricarica sono ancora lunghi, rendendo ad oggi difficili i viaggi a lunga distanza, con forti criticità per l'industria dei trasporti pesanti, che tende a orientarsi verso le tecnologie dell'idrogeno. In figura 1.6 è riportata una rappresentazione di una batteria agli ioni di litio, dove si evincono i materiali utilizzati per il suo funzionamento. Accanto alle batterie per autotrazione sono da considerare, seppure in misura significativamente meno rilevante rispetto alla mobilità<sup>27</sup>, le batterie per accumulo di energia ai fini della stabilizzazione della rete<sup>28</sup>. Sebbene le chimiche siano in linea principio simili a quelle utilizzate nell'automotive, gli accumuli stazionari tendono a privilegiare i sistemi detti litio-ferro-fosfato, a causa della loro maggiore stabilità chimica, a dispetto del maggior peso delle installazioni.

L'International Energy Agency stima<sup>29</sup>, nello scenario più ambizioso, che la domanda di batterie da parte dei veicoli elettrici crescerà di quasi 40 volte tra il 2020 (per 160 GWh di energia accumulata) e il 2040 (per 6 200 GWh). Corrispondentemente, secondo questa stessa ipotesi, la domanda complessiva di minerali cresce di 30 volte tra il 2020 e il 2040, da 400 000

---

26 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.

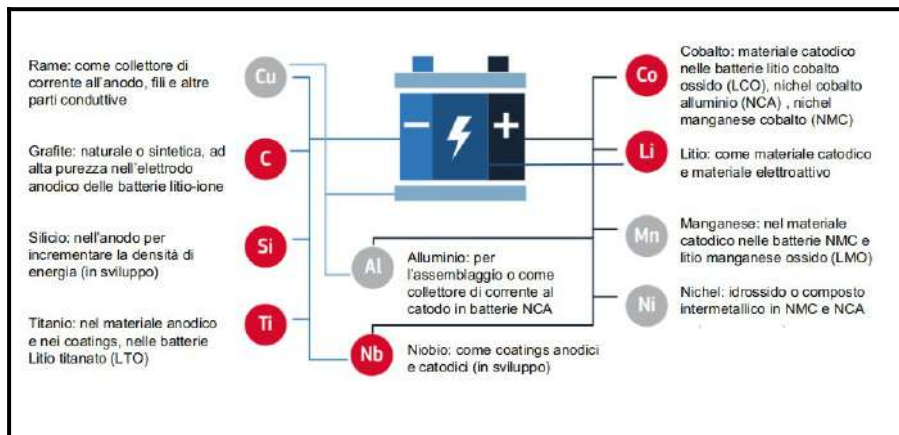
27 Si stima che gli accumuli stazionari pesino per il 20% del totale della capacità di accumulo. Il restante 80% è dedicato all'autotrasporto.

28 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 in un determinato momento. Le batterie possono intervenire nella stabilizzazione della rete fornendo alla stessa energia precedentemente accumulata. Si noti che in un sistema pressoché full electric anche le batterie dedicate all'autotrazione possono concorrere alla stabilizzazione della rete.

29 IEA, *The role of critical minerals in clean energy transitions*, World Energy Outlook Special Report, 2021.

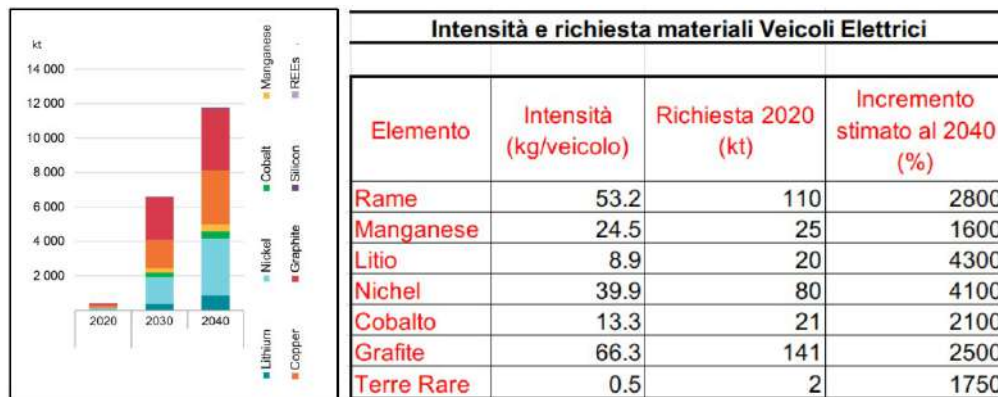


tonnellate a 11 800 000 tonnellate. La domanda di nichel cresce di 41 volte, mentre il cobalto aumenta ‘solo’ di 21 volte, poiché le chimiche del catodo si spostano verso soluzioni a basso contenuto di tale elemento. La domanda di litio cresce di 43 volte, mentre il rame cresce di 28 volte. La domanda 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 1.6.** Rappresentazione di una batteria agli ioni di litio<sup>23,24</sup>

Il consumo attuale e la crescita della domanda annuale al 2040 nello scenario IEA di piena decarbonizzazione è riportato in figura 1.7.



**Figura 1.7.** Stima del consumo attuale e della crescita annuale prevista al 2030 e al 2040 per i materiali costituenti le tecnologie delle batterie. A destra sono riportati i dati numerici stimati ad oggi e al 2040 (Rielaborazione da <sup>29</sup>).

### ***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 l'elettricità massicciamente 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<sup>30</sup>, prodotto da energia sostenibile, 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 viene prodotto da idrocarburi, con emissione di CO<sub>2</sub>. L'elettrolisi dell'acqua, che scinde la molecola in idrogeno e ossigeno grazie all'immissione di una corrente appropriata in un dispositivo elettrochimico detto elettrolizzatore, quando è alimentata con energia elettrica 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

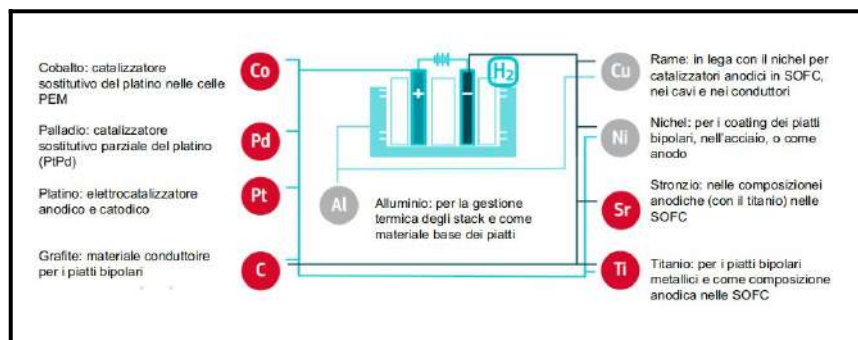
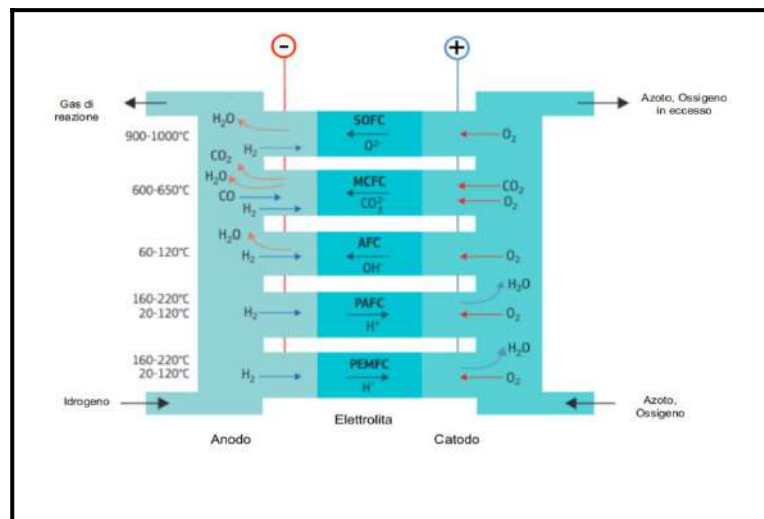
---

30 Le differenti "colorazioni" dell'idrogeno:

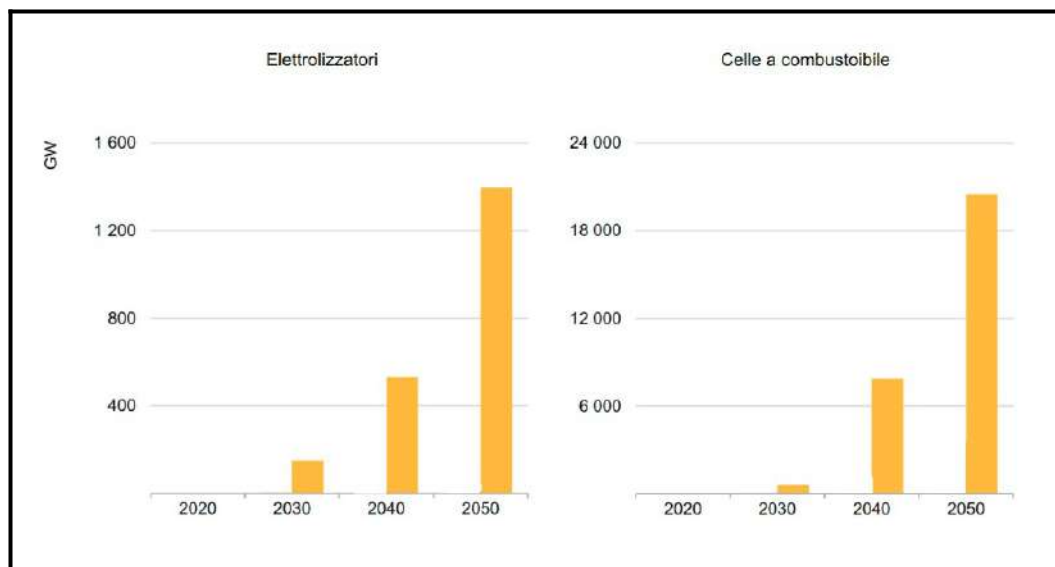
- *grigio* = ottenuto da idrocarburi attraverso processi chimici. La sua produzione emette rilevanti quantità di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>);
- *blu* = anch'esso ottenuto da idrocarburi, ma con cattura della CO<sub>2</sub> emessa. La CO<sub>2</sub> catturata, a sua volta, può essere sequestrata 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);
- *verde* = ottenuto da fonte rinnovabile, tipicamente da elettrolisi dell'acqua con corrente prodotta da fotovoltaico od eolico;
- *viola* = ottenuto anch'esso da elettrolisi dell'acqua, ma con corrente prodotta da energia nucleare.

produce acqua e si chiude il ciclo di materia. Esistono differenti tecnologie per le celle a combustibile, con diverse chimiche dei materiali costituenti e operanti a diverse temperature di esercizio. La figura 1.8, alto, riporta lo schema generale per le diverse tecnologie di cella a combustibile, mentre la stessa figura, in basso riporta lo schema rappresentativo dei materiali utilizzati in una cella a combustibile.

Concettualmente una cella a combustibile ed un elettrolizzatore sono dispositivi molto simili, essendo la chimica alla base del loro funzionamento sostanzialmente uguale. Questo fa sì che, nei fatti, gli apparati condividano molti dei materiali necessari. Le strategie di decarbonizzazione in corso lasciano prevedere un consistente incremento nella potenza installata sia degli elettrolizzatori che delle celle a combustibile (vedi figura 1.9). I primi da 150 GW previsti nel 2030 arriverebbero a 1 400 GW installati nel 2050, mentre per le seconde si prevede un incremento a 20 000 GW installati nel 2050.



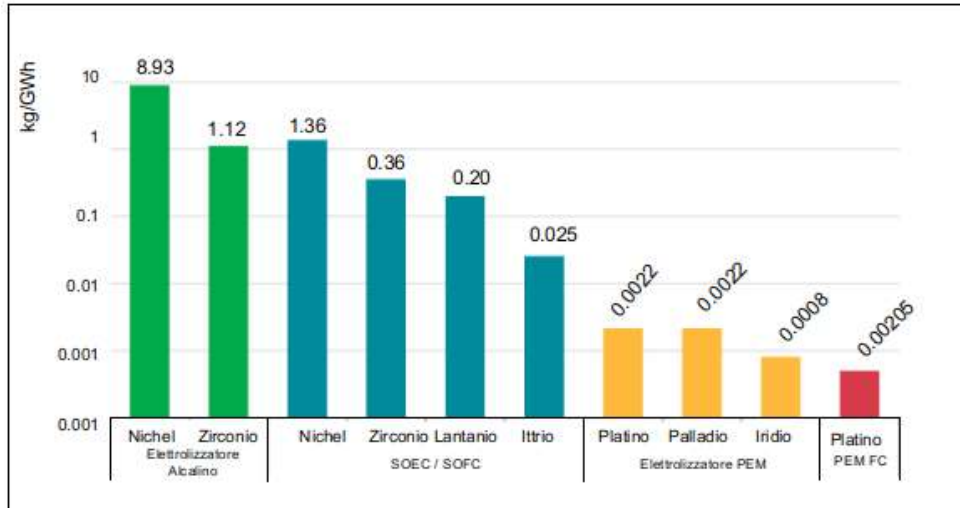
**Figura 1.8.** Alto: schema generale per diverse tecnologie di celle a combustibile (fuel cell, FC). L'elettrolita determina la chimica ionica del sistema e la tecnologia. Dal basso: Membrana Elettrolita Polimerico (PEM FC), Acido Fosforico (PA FC) Alcalina (A FC) Carbonati fusi (MC FC) Ossidi Solidi (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<sup>23,24</sup>.



**Figura 1.9.** Incremento stimato nella potenza installata degli elettrolizzatori e delle celle a combustibile<sup>29</sup>.

Per quanto riguarda le intensità dei materiali necessari allo sviluppo delle tecnologie dell'idrogeno si può fare riferimento a quanto riportato in figura 1.10, 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 fortemente consolidato. In relazione all'automotive, settore importante per la sua ampia diffusione, sebbene attualmente il mercato si stia orientando verso gli accumuli elettrici diretti in batterie, è da aspettarsi che almeno in specifici settori si assista in

tempi medi ad un incremento non trascurabile nell'utilizzo dell'idrogeno e delle celle a combustibile<sup>31</sup>, con relative conseguenze sul consumo di materiali.



**Figura 1.10.** 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<sup>29</sup>.

### **Le materie prime, le riserve e le risorse**

Le grandi quantità di materiali necessari alla transizione energetica fanno sorgere il problema della effettiva sostenibilità della loro richiesta rispetto alle disponibilità presenti nel pianeta. Facendo riferimento alle definizioni di riserve e risorse citate in ref<sup>2</sup>, abbiamo oggi riserve sufficienti dei materiali necessari? Se le riserve non sono sufficienti, l'entità stimata delle risorse è sufficiente a rispondere alla richiesta crescente? Utilizzando i valori noti delle riserve e la stima delle risorse disponibili, in uno scenario di trasformazione del sistema elettrico ambizioso (sotto i 2°C di aumento al 2050) sono state valutate le possibilità di esaurimento delle materie prime necessarie alla transizione a tecnologie attuali<sup>32</sup>. La figura 1.11 riporta il rapporto stimato tra l'incremento della domanda cumulativa di materiali e le

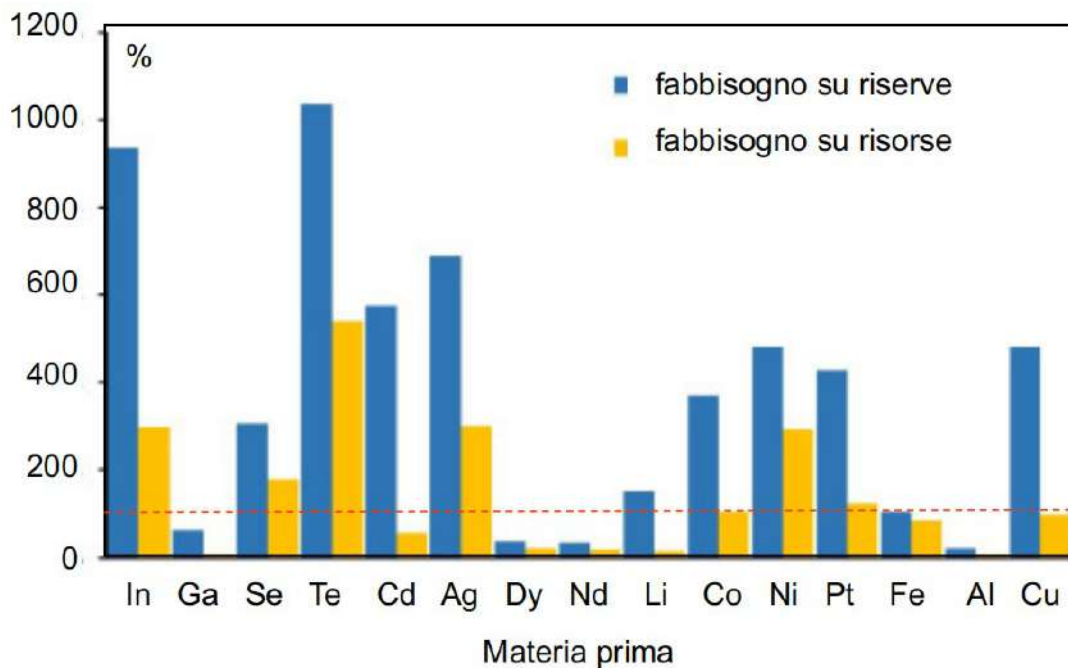
31 Con forte prevalenza delle tecnologie PEM.

32 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.



riserve e le risorse oggi note, i cui dati quantitativi sono riportati in Tabella V, insieme ad una valutazione di massima del possibile anno di esaurimento delle stesse.

L'incremento della quantità dei materiali necessario alla transizione energetica è tale da non poter essere soddisfatto per molti dei metalli richiesti. È da sottolineare che per alcuni dei metalli indicati (ferro, alluminio, rame ecc., che pure hanno potenzialità consistenti di riutilizzo e riciclo) avverrà contemporaneamente un incremento della domanda dovuta ad attività “tradizionali”, anche in conseguenza dello sviluppo economico dei paesi attualmente meno sviluppati, e questo potrà rendere la situazione ancor più critica di quanto non appaia nella sola correlazione con la transizione energetica.



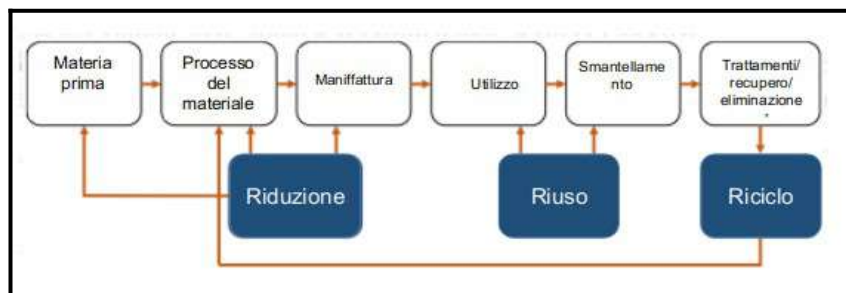
**Figura 1.11.** Incremento cumulativo stimato al 2060 del fabbisogno di materiali di interesse energetico rapportati all'entità nota delle riserve e all'entità stimata delle risorse. (Rielaborazione da <sup>32</sup>).

Tabella V

Entità delle riserve e delle risorse, e loro criticità				
Materiale	Riserva		Risorsa	
	Quantità (kt)	Criticità (anno)	Quantità (kt)	Criticità (anno)
Indio	15	2 030	47	2 040
Gallio	110	-	1 000	-
Selenio	100	2 040	171	2 050
Tellurio	25	2 030	48	2 040
Cadmio	500	2 030	600	-
Argento	570	2 030	1 308	2 040
Disprozio	1 100	-	1 980	-
Neodimio	12 800	-	23 040	-
Litio	14 000	2 050	39 500	-
Cobalto	7 100	2 040	145 000	-
Nichel	79 000	2 035	130 000	2 040
Platino	6	2 035	20	2 055
Alluminio	28 000 000	-	55 000	-
Rame	720 000	2 030	3 500 000	2 060

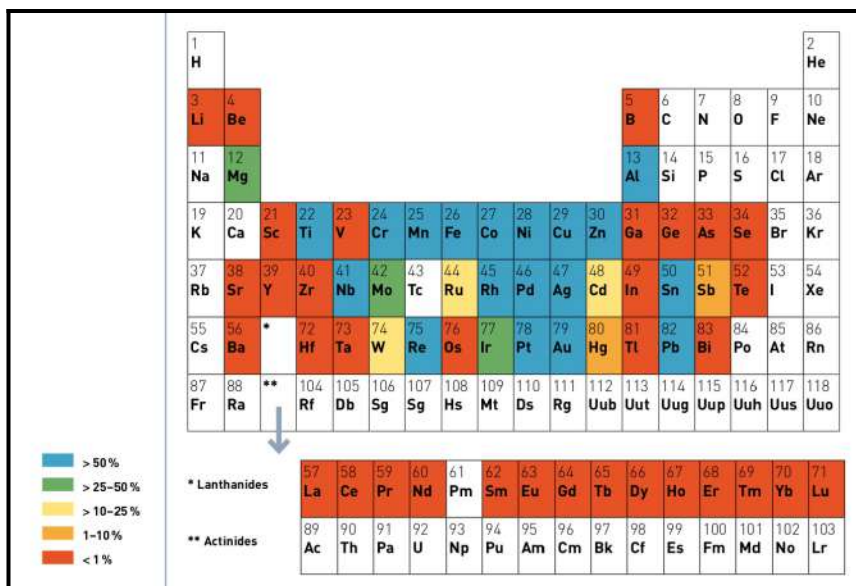
La situazione potrebbe migliorare considerevolmente inserendo nel computo sia gli effetti delle innovazioni tecnologiche, dalle quali è lecito aspettarsi contrazioni più o meno rilevanti dell'intensità dei materiali (e che però, seppure sommariamente, sono già state prese in esame nei lavori considerati), che gli effetti di processi di riutilizzo e riciclo a fine ciclo vita, secondo i principi della cosiddetta economia circolare, schematizzati in figura 1.12. 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 richiesta primaria che può ridursi di percentuali comprese tra il 20 e il 70%. Tuttavia, permangono almeno 2 criticità al momento difficilmente superabili: 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, essendo correlato a processi consolidati per i quali sono anche facilmente prevedibili miglioramenti legati alla 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

anni e raggiungere i 30, periodo nel quale tuttavia si prevede una persistente crescita delle installazioni, che dovranno necessariamente ricorrere a materie di prima estrazione. Per le batterie, in linea di principio, la situazione potrebbe essere più favorevole, prevedendosi una vita media notevolmente inferiore. Tuttavia qui intervengono le criticità tipiche di alcuni materiali con proprietà funzionali specifiche, spesso presenti in forma complessa, o in quantità minime. Per molti di questi materiali i processi di ri-estrazione, seppure possibili, possono diventare, essi stessi, fattori 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 pressoché monopolizzato da 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, le quali, per diversi motivi, si prevede possano permanere per metalli quali indio, argento, tellurio, nichel, platino e litio<sup>33</sup>.



**Figura 1.12.** Diagramma di flusso di processo dei materiali negli stadi di vita delle tecnologie e opportunità di riduzione, riutilizzo e riciclo. (Rielaborazione da <sup>32</sup>).

<sup>33</sup> Per il litio il problema appare di natura prevalentemente economica. L'elemento è presente in grande quantità nelle acque marine, ma l'estrazione dalle stesse non è economicamente attrattiva, e si preferisce l'approvvigionamento da miniere contenenti sali di litio.



**Figura 1.13.** Tabella periodica degli elementi con indicazione del grado di riciclo<sup>34</sup>. Molti dei materiali di interesse nella transizione energetica necessitano di incrementi sostanziali nelle frazioni riciclate.

Il grado attuale di riciclo degli elementi è riportato in Figura 1.13. Per molti dei materiali necessari alla transizione la capacità attuale di riciclo risulta inferiore all'1%.

### **Dal petrolio ai metalli. Nuove tecnologie, vecchi problemi**

Come abbiamo visto, la transizione del sistema energetico porta con sé una grande richiesta di materiali che, specie nelle fasi iniziali, di introduzione massiva delle tecnologie, sarà pressoché totalmente demandata all'azione mineraria. L'estrazione e la purificazione di minerali è una attività fortemente inquinante e richiede notevoli quantità di energia, con effetti significativi sullo stato del pianeta, che possono, essi stessi, trasformarsi in un ulteriore (e grave) problema per l'ecosistema, come pure alimentare percorsi di ingiustizia sociale. Come già detto, ma è opportuno ripetere, un

34 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).

contributo all'abbattimento delle necessità di materiali da prima estrazione potrà venire dal riciclo, con l'implementazione di tecniche di economia circolare e produzione di elevate quantità di materiali riciclati. Tuttavia queste potranno dare un contributo maggiore per alcuni materiali rispetto ad altri, e solo una volta a regime, quando che le installazioni 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 (in Tabella VI sono schematicamente riportate le maggiori criticità).

Le criticità sono tali che è entrata nell'orizzonte delle possibilità la raccolta di minerali in siti marini<sup>35</sup>, costosa ma appetibile 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 nel caso più noto del minerale di Cobalto in Congo<sup>36</sup>.

---

35 Ad esempio depositi di nichel sono diffusi sul fondo dell'oceano. Estraeandoli si rilascia anidride solforosa, che acidifica la pioggia e causa problemi respiratori nell'uomo. Una visione generale delle possibilità di estrazione marina si può trovare in: [https://www.usgs.gov/centers/pcmssc/science/global-marine-mineral-resources?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/centers/pcmssc/science/global-marine-mineral-resources?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects) (consultato in data 01/07/2021).

36 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.

**TABELLA VII**

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

In generale 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 di 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<sup>37</sup>. Le sostanze presenti all'interno del materiale dissotterrato e le pareti vuote degli scavi, esposte a vento, pioggia e aria, favoriscono reazioni chimiche, liscivazione e diffusione dell'inquinamento, drenando polveri e agenti chimici. Quando non effettuato correttamente, cioè in modo da garantire l'integrità strutturale degli accatastamenti, il contenimento a lungo termine dei mucchi degli scarti può portare al collasso dei minerali "sterili" con gravi impatti sulle comunità e sugli ecosistemi.

<sup>37</sup> 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.



Le attività minerarie e di lavorazione nei siti minerari, inoltre, hanno un elevato fabbisogno idrico<sup>38</sup>. L'acqua dolce utilizzata è acqua di alta qualità, potenzialmente adatta al consumo umano, il cui utilizzo entra quindi 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 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 estratto, 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, le differenti fasi della lavorazione sono spesso basate sull'uso diretto di combustibili fossili, sia come riducenti chimici che indirettamente per il calore e/o l'elettricità<sup>39</sup>. L'intensità energetica dell'estrazione e dell'arricchimento aumenta nel tempo man mano che le estrazioni passano a minerali con minori tenori metallici e ci si avvia a estrarre da depositi più complessi. In figura 1.14 viene riportata l'impronta carbonica dell'estrazione di minerali<sup>40</sup> mentre in figura 15 viene riportato uno schema esemplificativo della raffinazione del rame (da minerale o da riciclo)<sup>40</sup>.

---

38 Per l'estrazione delle terre rare si stima un consumo complessivo di circa 90 m<sup>3</sup>/kg.

39 La produzione di acciaio, ad esempio, rappresenta il 30% delle emissioni industriali globali di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>).

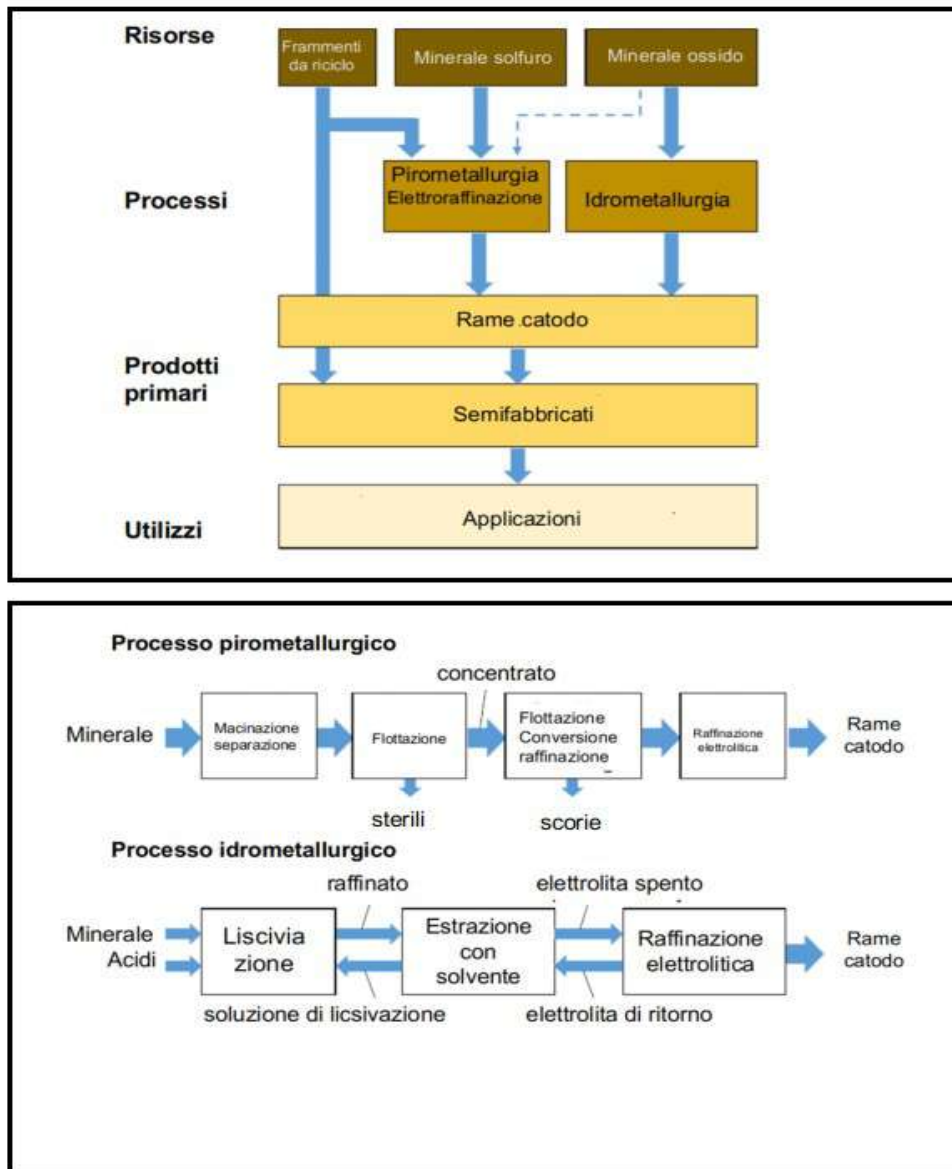
40 P. Nuss and M. J. Eckelman, *Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis*, PLoS One 2014, 9(7), e101298.

**(A) Global Warming Potential (kg CO<sub>2</sub>-eq/kg)**

Lowest  Highest

H																	He	0.9
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
7.1	122											1.5						
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
												8.2						
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
	1.0	5,710	8.1	33.1	2.4	1.0	1.5	8.3	6.5	2.8	3.1	205	170	0.3	3.6			
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
	3.2	15.1	1.1	12.5	5.7		2,110	35,100	3,880	196	3.0	102	17.1	12.9	21.9			
Cs	Ba	La-Lu*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
	0.2		131	260	12.6	450	4,560	8,860	12,500	12,500	12.1	376	1.3	58.9				
Fr	Ra	Ac-Lr**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt										
*Group of Lanthanide			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
			11.0	12.9	19.2	17.6		59.1	395	46.6	297	59.6	226	48.7	649	125	896	
**Group of Actinide			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	
				74.9		90.7												

**Figura 1.14.** Rappresentazione in tabella periodica degli elementi del potenziale climalterante nell'operazione di estrazione degli elementi<sup>20</sup>.



**Figura 1.15.** In alto: schema rappresentativo del ciclo del rame, dal minerale all'utilizzo finale. Come si vede, in questo caso, il processo di riciclo può condividere molti degli step necessari alla raffinazione del prodotto ottenuto dal minerale. In basso: schematizzazione dei processi piro- e idrometallurgici di estrazione e raffinazione del rame<sup>41</sup>.

41 La pirometallurgia comporta il trattamento del metallo concentrato ad alte temperature, al fine di eliminare i suoi costituenti minerali associati, utilizzando combustibili fossili o elettricità per alimentare i forni. L'idrometallurgia consiste nel trattare minerali metallici o concentrati in soluzione liquida per separare i metalli dal loro minerale

Data la sua centralità nella produzione delle batterie, che abbiamo visto saranno sempre più al centro dei sistemi di mobilità, vale la pena approfondire il ciclo del litio a partire dai suoi sali minerali. La fase iniziale inizia con la perforazione, atta a portare in superficie le salamoie contenenti sali di litio, con la raccolta delle stesse in stagni di evaporazione. Il contenuto in litio è circa lo 0,15%. Si procede poi con il pompaggio della salamoia attraverso una cascata di stagni in cui le impurità (principalmente boro, magnesio e calcio) e relativi sottoprodotti precipitano per evaporazione solare ed aggiunte di opportuni additivi chimici. Al termine di questo stadio, la salamoia viene trasportata verso gli impianti industriali dove viene sottoposta ai successivi processi atti ad ottenere i prodotti carbonato e idrossido di litio. I trattamenti consistono in rimozione delle impurità, sedimentazione, filtraggio, pressatura, riscaldamento, precipitazione, ispessimento ed essiccamento. Dopo la rimozione iniziale delle impurità, la miscela rimanente progredisce attraverso un ulteriore processo di sedimentazione, filtrazione e pressatura. Sedimentazione e filtrazione avvengono per gravità. Dopo il riscaldamento e la precipitazione del carbonato di litio la soluzione risultante deve subire ancora un processo di addensamento, che prevede l'utilizzo di macchinari con camere di combustione che operano a temperature di circa 1000° C. Qui si intuiscono facilmente gli impatti ambientali diretti dovuti ai processi estrattivi e di trattamento del minerale realizzati in loco. A questi si aggiungono la trasformazione dei terreni causata dagli stagni di evaporazione e gli impatti sull'aria e sull'acqua, correlati a stoccaggio e smaltimento dei rifiuti di miniera.

Per una visione più ampia degli impatti ambientali dell'attività mineraria, si rimanda al documento “Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles”<sup>42</sup> delle Nazioni Unite ed al lavoro riportato nella referenza 20.

A fianco dei fattori di inquinamento quasi sempre coesistono in parallelo forti fattori di ingiustizia sociale. L'organizzazione Transition Mineral Tracker<sup>43</sup> tiene traccia delle irregolarità correlate all'estrazione dei minerali nel mondo da parte delle società di estrazione. Nel suo report annuale

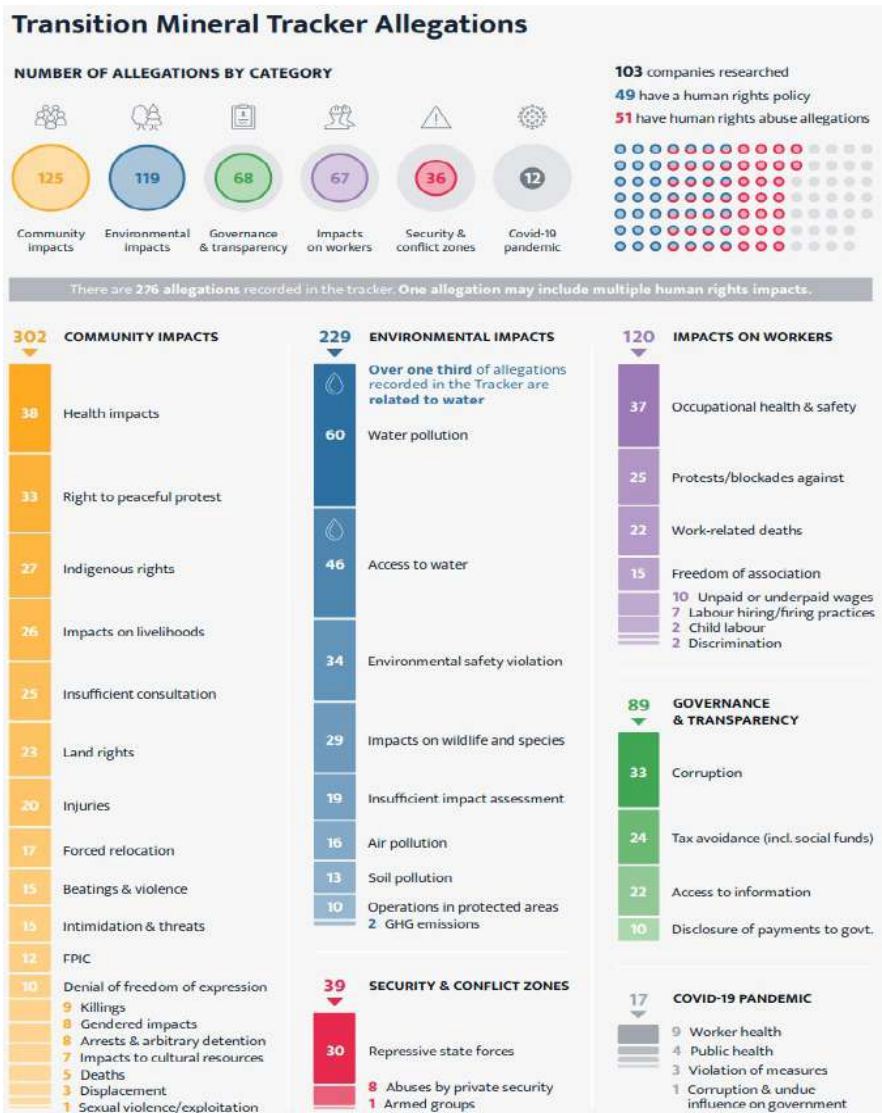
---

associato. Sebbene nell'idrometallurgia di solito non siano richieste alte temperature, il trattamento può avvenire ad alte pressioni che richiedono energia, nonché la fornitura di agenti liquidi.

42 <https://www.resourcepanel.org/reports/environmental-risks-and-challenges-anthropogenic-metals-flows-and-cycles>.

43 <https://trackers.business-humanrights.org/transition-minerals/>.

“Global analysis of human rights policies & practices”, aggiornato a febbraio 2021, l’organizzazione registra 103 compagnie, di cui ben 51 delle quali hanno denunce di abusi in materia di 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. In figura 1.16 sono riportate le denunce registrate dall’organizzazione. A fianco delle organizzazioni minerarie registrate (e per questo visibili), infine, è da sottolineare la presenza delle cosiddette “miniere artigianali”, condotte più o meno abusivamente e al di fuori da ogni seppur minima capacità di controllo.



**Figura 1.16.** Denunce verso compagnie di raccolta di minerali raccolte dall'organizzazione Transition Mineral Tracker.



### ***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 ingente 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<sup>44</sup>. È ragionevole pensare che questa intensificazione mineraria si avvierà in maniera tumultuosa parallelamente alla crescita delle installazioni per poi procedere in maniera via via più moderata con il consolidamento quantitativo dei processi di riciclo dei materiali riguardanti le prime installazioni: ma questo 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 materiali di nostro 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: anche per i materiali esistono problemi di sostenibilità. In questa sede, la sostenibilità può essere opportunamente correlata al livello di entropia che è necessario contrastare e abbattere per rendere il materiale utilizzabile o riutilizzabile per gli obiettivi antropici. Più è elevata l'entropia del materiale di partenza (lo stato di "dispersione" del materiale) 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 (sia esso minerale o da riciclo) allo stato di utilizzo. Il materiale sarà considerato "sostenibile" se l'energia necessaria alla sua raccolta ed ai trattamenti necessari per il suo secondo utilizzo sarà minore di quella richiesta dalla raccolta in miniera e ai trattamenti del suo primo utilizzo. In questa condizione, dal punto di vista dello specifico materiale ci sarà sostenibilità. Tuttavia, in questa concettualizzazione, l'attenzione si

---

44 Via via che diverrà più costosa l'estrazione da risorse terrestri, è verosimile attendersi un impegno maggiore nell'attualmente pionieristica estrazione sottomarina.

concentra soltanto sull'energia necessaria alle manipolazioni dirette del materiale in oggetto, Questa è una concettualizzazione del tutto analoga a quella proposta dalla termodinamica classica, nella sua modellazione della correzione 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. È 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 (e i danni) che conosciamo. La “scienza del calore” vede e razionalizza le positività correlate al calore, ma trascura la chimica delle operazioni correlate alla sua produzione e gli effetti dell'utilizzo di quel calore per produrre lavoro. La materialità sottostante è considerata certamente necessaria ma è relegata sia nell'approvvigionamento che negli effetti dei residui ad un ambiente esterno, “serbatoio infinito” sia per l'alimentazione che per gli scarichi.

È evidente che questo è un limite meccanicista, in quanto l'ambiente esterno, impropriamente considerato infinito, è esso stesso parte finita, e in quanto tale da considerare pienamente negli effetti della sua interazione con il sistema che di esso si avvale. In altre parole, la nostra azione modifica l'ambiente, in maniera tanto più rilevante, quanto più tale azione avviene in maniera ripetuta e massiva. Il pianeta non è un esterno infinito ma il luogo in cui operano le macchine che mettiamo all'opera (i “sistemi”) ed in cui noi stessi ci troviamo ad operare. Ed è un sistema chiuso. La “macchina elettrica” con cui ci avviamo 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 e necessari delle fonti rinnovabili e contemporaneamente minimizzando (ma sarebbe meglio dire un impossibile annullando) gli impatti verso l'”ambiente esterno”, che è fatto di territori, suoli, acque e persone, rischiamo di ripetere l'errore già fatto a suo tempo: considerare l'esistenza di un esterno serbatoio infinito, in ultima analisi fonte dei nostri approvvigionamenti e scarica dei nostri rifiuti. Viceversa l'ambiente, il mondo, è il sistema chiuso in cui noi viviamo, il cui contenuto entropico inevitabilmente incrementa con una velocità che dipende fortemente dalla nostra azione. L'elettrificazione massiva dei consumi, necessaria alla transizione, eviterà emissioni di gigatonnellate di CO<sub>2</sub> ed è

buona cosa, 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 direttamente necessari alla vita. Trascurando il degrado generalizzato che si prospetta per la biodiversità, e in generale per tutti gli ecosistemi.

Rimane difficile oggi pensare che le innegabili potenzialità positive rappresentate dalle tecnologie rinnovabili possano esprimersi pienamente lasciando che la transizione energetica rimanga semplicemente un passaggio funzionale alle dinamiche espansive tipiche del mondo in cui stiamo vivendo.