



MATERIALI CRITICI PER L'ENERGIA NELLA TRANSIZIONE ENERGETICA

Le fonti di energia rinnovabile e i vettori energetici per la distribuzione agli utilizzi finali, richiedono l'impiego di alcuni materiali e metalli che, a causa della loro disponibilità, localizzazione geografica e mercato, possono creare criticità soprattutto per i Paesi europei. Nello svolgimento seguente verranno analizzati i passaggi che coinvolgono l'utilizzo di materiali critici e i motivi alla base della criticità.

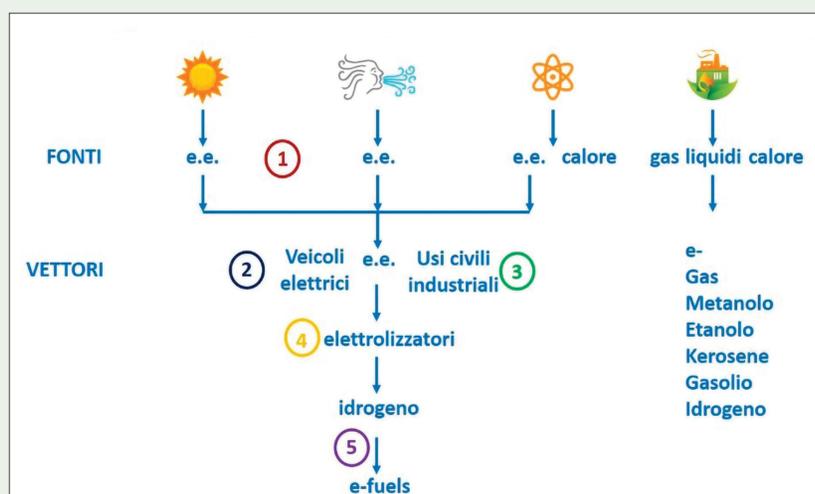


Fig. 1 - Fonti rinnovabili e vettori energetici

Introduzione

In questo articolo viene riportata una sintesi della posizione presentata da AIDIC, al Convegno Linceo su "Materie critiche per l'energia" organizzato da SCI e AIDIC e ospitato dall'Accademia dei Lincei il 22-23 maggio 2025.

La sostituzione delle fonti fossili con fonti rinnovabili, richiede cambiamenti ampi non solo legati alle tecnologie necessarie per produrre energie rinnovabili, ma anche alla scelta dei vettori energetici e delle tecnologie connesse, alle filiere di approvvigionamento dei materiali necessari, ai sistemi di accumulo e di distribuzione dell'energia.

Riguardo ai materiali critici (CRM), dal 2024 la Comunità Europea ha varato un documento, il regolamento (UE) 2024/1252 del Parlamento Europeo e del Consiglio,

dell'11 aprile 2024 CRMA (**Critical Raw Material Act**), che istituisce un quadro per garantire un approvvigionamento sicuro e sostenibile di materie prime critiche. Torneremo più avanti sui contenuti del CRMA.

Se consideriamo le principali fonti di approvvigionamento di energie rinnovabili e i principali vettori energetici per trasferire l'energia alle destinazioni di utilizzo, possiamo individuare i principali snodi che richiedono l'utilizzo di CRM.

La Fig. 1 riporta una visione schematica della situazione. Per gli scopi di questa presentazione, prenderemo in considerazione solo i CRM utilizzati nei punti 1-5 della figura, escludendo argomenti relativi a nucleare e biomasse.

Come si evince dalla figura, la richiesta di materiali critici si posiziona a livello delle fonti e riguarda i materiali necessari per la costruzione dei pannelli fotovoltaici, delle turbine eoliche e dei sistemi di accumulo di energia. Da queste fonti si produce energia elettrica che può essere usata direttamente per i sistemi di trasporto o per l'alimentazione di apparec-

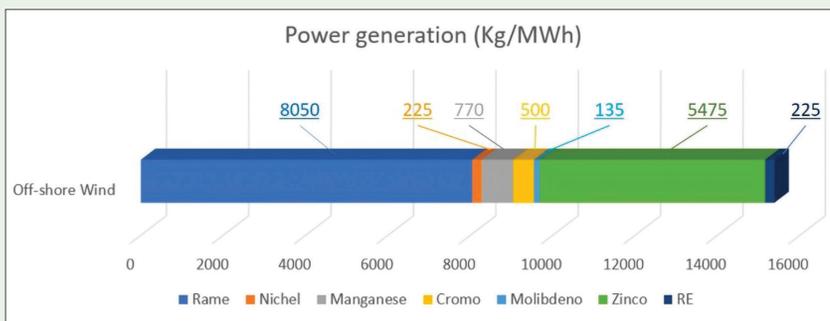


Fig. 2 - Materiali critici nel Wind Off-shore

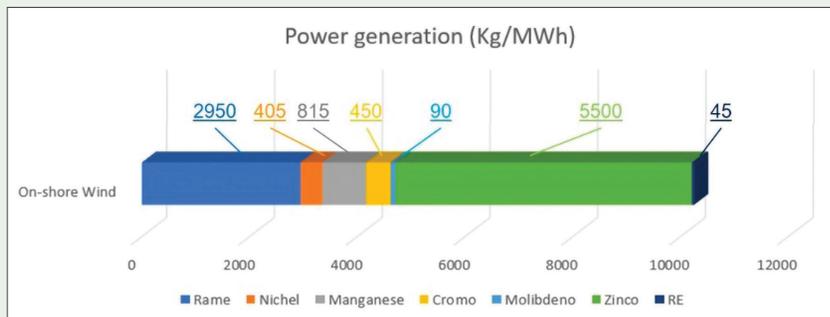


Fig. 3 - Materiali critici nel Wind On-shore



Fig. 4 - Materiali critici nel solare PV

chiature utilizzate a fini civili e industriali. L'energia elettrica può essere trasformata in idrogeno principalmente attraverso l'elettrolisi dell'acqua. Infine l'idrogeno rinnovabile può essere utilizzato per produrre i cosiddetti e-fuels, cioè miscele di idrocarburi o metanolo.

I materiali critici per eolico e fotovoltaico

Secondo un rapporto del **National Renewable Energy Laboratory**, a seconda della marca e del modello, le turbine eoliche sono prevalentemente realizzate in acciaio (66-79% della massa totale della turbina), fibra di vetro, resina o plastica (11-16%), ferro o ghisa (5-17%), rame (1%) e alluminio (0-2%). Metalli critici sono però impiegati nei magneti permanenti utilizzati nella generazione di energia elettrica [1].

Il metallo principale utilizzato nei magneti di una turbina eolica è il neodimio, spesso in combinazione con ferro e boro (NdFeB). Questi magneti sono noti per la loro elevata forza magnetica e sono essenziali per un'efficiente generazione di elettricità nei generatori di turbine eoliche. Anche altri metalli delle terre rare come il disprosio e il terbio vengono utilizzati per migliorare la forza del magnete e la stabilità alle alte temperature. Il samario cobalto (SmCo) è un altro tipo di magnete a base di terre rare a volte utilizzato nelle turbine eoliche, in particolare in ambienti estremi dove la resistenza alla corrosione è fondamentale [2-4].

Nella Fig. 2 è riportata la quantità media di materiali critici utilizzata nel wind off-shore, derivata dal report IEA **"The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions"** del maggio 2021.

Dalla stessa fonte, per il Wind On-shore, si ricava una composizione analoga di materiali critici ma con rapporti diversi.

Il fotovoltaico ha un contenuto di CRM limitato a rame e silicio. Quest'ultimo è critico perché nonostante l'abbondanza della materia prima, la produzione del grade PV, richiede una lavorazione molto gravosa per i consumi energetici e l'impatto ambientale. Altri CRM utilizzati in misura minore per i pannelli sono Al e In, Ga, Te Cd questi ultimi usati nella produzione di celle solari a film sottile (CdTe o CIGS).

Prendendo ancora come riferimento il report della IEA **"The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions"** già citato prima si può ricavare la Fig. 4.

I materiali critici per lo stoccaggio energetico, il trasporto e gli usi civili e industriali

Le più importanti fonti energetiche rinnovabili producono energia in modo discontinuo, quindi in un futuro in cui que-

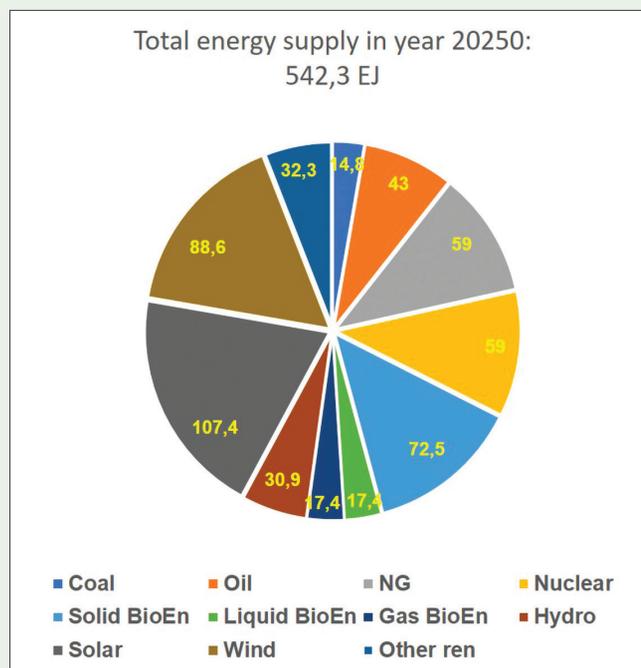


Fig. 5 - Fornitura totale e per fonte di energia al 2050

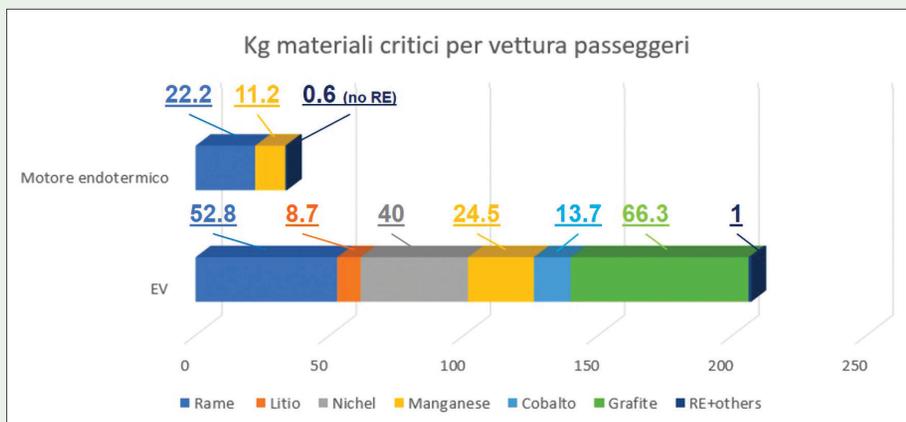


Fig. 6 - Kg CRM per veicolo elettrico e per veicolo con motore endotermico

ste fonti assicureranno una grande apporto alla domanda di energia sarà necessario rendere disponibili delle tecnologie di stoccaggio efficaci. Tra le tecnologie di stoccaggio disponibili o allo studio si possono citare le batterie agli ioni di litio, le batterie a flusso, il pompaggio idroelettrico, l'idrogeno verde, i volani energetici, i super-capacitori, l'aria compressa, il ciclo Rankine organico (ORC). Tra queste, le batterie al litio sembrano essere le più interessanti per questa applicazione. Per cercare di capire quale potrebbe essere la

convenzionale ed EV.

La tipologia di batterie al litio si è ampliata soprattutto negli ultimi due decenni e oggi sul mercato si possono trovare diverse soluzioni.

Nella Tab. 1 è riportata una sintesi dei tipi e delle proprietà dei più comuni tipi di batterie (con esclusione delle batterie al piombo-acido).

Le batterie LiFeP sembrano particolarmente interessanti poiché hanno un contenuto limitato di metalli critici. I maggiori

batterie al litio già si stanno espandendo in molte applicazioni che vanno dai trasporti agli usi civili e industriali (cellulari, strumenti, apparecchiature per usi vari in diversi settori). Consideriamo il caso dei trasporti. Facendo ancora riferimento al report IEA "The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions" possiamo cercare di quantificare quanti materiali critici servono per una vettura elettrica "full electric" (EV).

La Fig. 6 riporta un confronto ponderale tra materiali critici per vettura

"Net zero 2050".

La Fig. 5 riporta una rielaborazione desunta da questo report.

Il contributo di eolico e fotovoltaico dovrebbe essere di 196 EJ cioè circa $5,4 \times 10^{10}$ TWh. Se assumiamo che a causa della discontinuità della fornitura, questa possa essere assicurata per 12 ore al giorno, dovremmo immaginare una capacità di accumulo di ca. $2,7 \times 10^{10}$ TWh. Per confronto possiamo vedere che dal sito **DOE Global Energy Storage Database** nel 2023 la capacità installata di accumulo è stata di 0,87 TWh, realizzata per oltre il 90% con il pompaggio di acqua a monte di centrali idroelettriche. Appare chiaro che la quantità di batterie al litio richieste per lo stoccaggio di energia rinnovabile nelle ipotesi del **NetZero 2050** dovrà essere enorme. Oltre allo stoccaggio energetico, le

Alcune tipologia di batterie utilizzabili per il trasporto e lo stoccaggio

Tipo	Batterie senza Litio		Batterie a base di Litio			
	NiCd	NiH	LCO	NCA	NMC	LiFeP
Contenuto medio metalli %	40 Fe, 22 Ni, 15 Cd, 1 Co	33 Ni, Fe 30, 10 REE, 3 Co, 1 Mn, 22 Zn	22.8 Co, 2.7 Li, 0.2 Ni, 8 Cu	8.6 Ni, 1.6 Co, 1.3 Li, 3.25 Al, 5 Cu, 27.1 inox	3.9 Co/Ni, 3.6 Mn, 1.4 Li, 1.3 Cu, 0.14 Al, 21.3 inox	0.76 Li, 6.1 Fe, 3 P, 3.8 Cu, 1.3 Al, 30.6 inox
Elettrolita	KOH (30% in H ₂ O)	KOH (30% in H ₂ O)	LIPF6 in solventi organici	LIPF6 in solventi organici	LIPF6 in solventi organici	LIPF6 in solventi organici
Applicazioni	Emergenza industriale, aeronautica	Autoveicoli ibridi (64%), portatili (36%)	Portatili	Veicoli elettrici	Veicoli elettrici	Trasporto pesante e passeggeri
Caratteristiche	Tossicità del Cd	Riciclabili con NiCd	Elevata densità energ. potenza e durata limitate, instabilità termica	Elevata densità energetica e potenza	Elevata densità energetica e potenza	Bassa densità energetica, elevata potenza
Riciclabilità	Pirometallurgia	Pirometallurgia	Idrometallurgia	Idrometallurgia	Idrometallurgia	Idrometallurgia

Legenda Batterie: NiCd (nichel-cadmio), NiH (nichel metallo idruro), LCo (Litio-cobalto ossido), NCA (nichel-cobalto-alluminio), NMC (nichel-manganese-cobalto) LiFeP (lito-ferrp-fosfato).

Tab. 1

Alcuni modelli di auto elettriche presenti sul mercato

Modello	BMW i3	VW e-UP	Nissan Leaf	Mitsubishi MiEV	Tesla S	Opel Ampera	Ford Mondeo
Tipo di trazione	EV	EV	EV	EV	EV	EREV	HEV
Costruttore batterie	Samsung SDI	Samsung SDI	AESC	GS Yuasa	Panasonic/Sanyo	LG-Chem	Panasonic/Sanyo
Autonomia in elettrico Km	190	160	175	160	400	40-80	34
Peso Batterie Kg	230	230	300	200	600	198	240

Tab. 2 (tratta da [5])

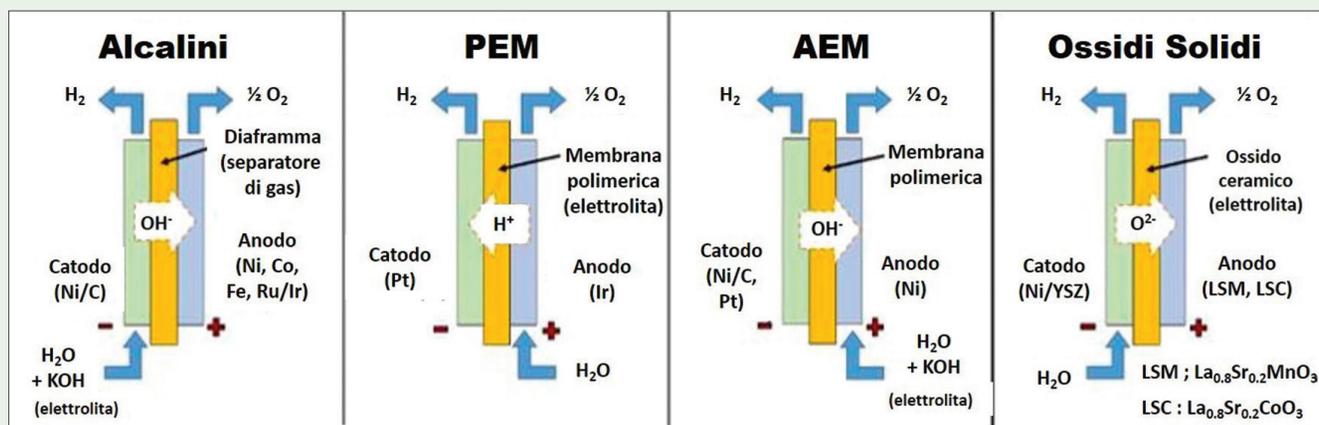


Fig. 7 - Tipologie di elettrolizzatori e CRM impiegati

produttori di queste batterie sono due aziende cinesi CATL e BYD e tra i primi 10 produttori mondiali, 6 sono cinesi.

Questa disponibilità di batterie ha interessato anche i costruttori di veicoli elettrici, che hanno adottato sistemi diversi per gli EV (Veicoli elettrici puri), gli EREV (Extended Range Electric Vehicle: veicoli elettrici in cui un motore endotermico a regime costante alimenta una batteria elettrica che muove il veicolo) e gli HEV (Hybrid Electric Vehicle: veicoli dotati di motore endotermico e motore elettrico che agiscono sulla trazione).

Una panoramica delle soluzioni adottate dalle varie case automobilistiche è riportata nella Tab. 2, dalla quale si vede che il peso delle batterie è in molti casi superiore a quanto riportato nel report IEA.

I materiali critici per elettrolizzatori e catalizzatori

Una delle prospettive evocate da più parti per la transizione energetica è la possibilità di utilizzare l'elettricità rinnovabile per produrre idrogeno da acqua. Viene definito H₂ verde quello prodotto direttamente dalle rinnovabili e H₂ blu quello prodotto da fossili con cattura e stoccaggio geologico della CO₂ prodotta. L'H₂ rinnovabile poi può essere usato direttamente come vettore elettrico gassoso oppure convertito in vettori energetici liquidi (e-fuels) mediante il processo di Fischer-Tropsch per produrre miscele di paraffine o il processo di sintesi di metanolo.

Per ottenere idrogeno dall'acqua sono necessari gli elettrolizzatori, cioè dei dispositivi elettrochimici che scindono l'acqua liberando idrogeno gassoso al catodo e ossigeno gassoso all'anodo. I principali tipi di elettrolizzatori utilizzano elettrodi contenenti CRM, come evidenziato nella Fig. 7.

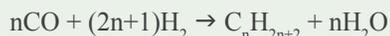
Le tecnologie attualmente disponibili, hanno ancora un importante problema legato all'efficienza della conversione. Per produrre 1 kg di H₂ servono ca 50-55 kWh di energia, mentre l'energia ottenuta da 1 kg di H₂ è di circa 39 kWh

(PCS). Ferve l'attività di ricerca volta a ridurre i consumi energetici degli elettrolizzatori e alcuni risultati in via di industrializzazione sembrano essere arrivati all'obiettivo di un consumo compreso tra 39 e 42 kWh in funzione delle condizioni applicate [6, 7].

Una volta ottenuto l'H₂ può essere utilizzato in forma gassosa o convertito in prodotti liquidi. L'utilizzo diretto dell'idrogeno gassoso come vettore energetico ha un grosso inconveniente legato alla bassa densità per unità di volume. Infatti se l'H₂ ha un'altissima densità energetica per unità di peso, essendo un gas rarefatto ha una bassa densità energetica per unità di volume e, quindi, deve essere compresso ad alta pressione per gli utilizzi più comuni. Per questo motivo e per le sue conseguenze alcuni autori hanno sollevato dubbi sulla possibilità di un uso pervasivo dell'idrogeno gassoso [8].

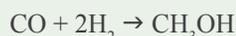
La conversione dell'idrogeno a prodotti liquidi utilizzabili come vettori energetici si può realizzare mediante reazione dell'H₂ con CO o con CO₂.

Nel processo di Fischer-Tropsch la reazione principale è la seguente:

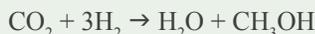


Il prodotto è costituito da una miscela di paraffine lineari che, in stadi successivi, possono essere sottoposti a processi di cracking e isomerizzazione. Da questa sequenza di reazioni è possibile ottenere benzine, cherosene (jet-fuel) e gasoli di alta qualità. I catalizzatori utilizzati in questi processi sono costituiti da supporti ceramici sui quali sono dispersi diversi metalli come: Co, Ru, Fe o Pt, Pd nei processi di cracking/isomerizzazione.

Una altra via per ottenere un vettore liquido da idrogeno è la sintesi del metanolo:



e in presenza di CO₂:



Per questa reazione il catalizzatore più utilizzato è costituito da rame, ossido di zinco e allumina.

È difficile avere proiezioni su quanto sarà diffusa la produzione di idrogeno e di e-fuels da elettricità rinnovabile, quindi non si possono fare ipotesi su quale potrebbe essere la richiesta di CRM per queste applicazioni.

Conclusioni

Prima di passare ad alcuni commenti conclusivi serve fare un'altra considerazione sulla disponibilità dei principali CRM che sono stati considerati in questa presentazione. La IEA ha redatto un rapporto sulla produzione e sul processamento dei CRM nel 2023, "**Critical Minerals Market Review 2023**", da cui emergono alcuni fatti preoccupanti. La produzione mineraria e il processing di molti CRM è confinata in poche aree geografiche e la Cina è il principale attore in entrambe le filiere sia direttamente che attraverso il controllo di assets delocalizzati. Questo è il risultato di una politica lungimirante e sviluppata nel corso degli ultimi tre decenni, ma la concentrazione di importanti assets strategici nel controllo di una singola o di poche nazioni può costituire un problema.

Come citato nell'introduzione, a fronte di una situazione in parte evidenziata nei precedenti paragrafi, l'Unione Europea nel 2024 ha emesso il "**Critical Raw Material Act**" una legge sulle materie prime critiche volta a garantire l'accesso dell'UE a un approvvigionamento sicuro, resiliente e sostenibile. Definisce un elenco di CRM e materie prime strategiche (SRM), stabilisce parametri di riferimento per le capacità nazionali e mira a diversificare le catene di approvvigionamento. In sintesi, il CRMA:

- elenca 34 CRM, di cui 17 identificati come strategici (SRM), in base alla loro importanza economica, al rischio di approvvigionamento e alla rilevanza per i settori della transizione verde e digitale, della difesa e dell'aerospazio;
- fissa degli obiettivi sui consumi che l'UE deve raggiungere entro il 2030;
- mira a rafforzare la catena del valore delle materie prime dell'UE, dall'esplorazione alla lavorazione e al riciclo, attraverso misure quali la semplificazione delle procedure di autorizzazione e la promozione degli investimenti.

A fronte di quanto esposto, AIDIC ritiene importante sottolineare i cinque punti riportati nel seguito:

1) Aumentare l'impegno per la raccolta e il recupero dei materiali critici e per la ricerca e sviluppo delle tecnologie per il loro riciclo, rendendole sempre più economiche e

competitive sui mercati internazionali;

- 2) Incrementare lo studio e lo sviluppo di tecnologie europee per lo sviluppo delle batterie con contenuti minori di metalli o con metalli a minore criticità (es. LiFePO₄);
- 3) Incrementare l'attività di ricerca di nuove riserve minerarie dei materiali critici nella EU o al di fuori della EU, tramite adeguati accordi con i Paesi produttori, e investire nelle tecnologie di raffinazione degli stessi;
- 4) Investire nelle tecnologie di elettrolisi che consentano di ridurre a livelli accettabili il consumo energetico e il consumo di acqua per la produzione di idrogeno e abilitare anche l'idrogeno blue, ovvero da gas con la cattura della CO₂. L'idrogeno rappresenta un vettore energetico utile per la decarbonizzazione soprattutto dell'industria cosiddetta HTA (Hard to Abate);
- 5) Promuovere l'utilizzo di motorizzazioni ibride per il trasporto che ottimizzino l'uso del motore endotermico con carburanti rinnovabili (da biomasse e in futuro anche e-fuel) per ridurre la dipendenza dal solo vettore elettrico nei trasporti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Gentilini, M. Colledani, P. Melià, XII Convegno della Rete Italiana LCA, Messina, 2018, 367, https://re.public.polimi.it/retrieve/e0c31c0e-e1e7-4599-e053-1705fe0aef77/Gentilini_et_al_2018.pdf
- [2] Epicenter, Harvard University, 18/11/2022, <https://epicenter.wcfia.harvard.edu/blog/wind-power-politics-and-magnets#:~:text=Two%20magnet%20types%20are%20particularly,properties%20if%20they%20become%20overheated>
- [3] R. Lacal-Arántegui, *Journal of Cleaner Production*, 2015, **87**, 275.
- [4] S. Verma, A.R. Paul, N. Haque, *Minerals*, 2022, **12**, 647, DOI: <https://doi.org/10.3390/min12050647>
- [5] T. Elwert, D. Goldmann *et al.*, *Recycling*, 2016, **1**(1), 25, DOI: <https://doi.org/10.3390/recycling1010025>
- [6] A. Hodges, A.L. Hoang *et al.*, *Nature Communication*, 2022, **13**, 1304. <https://www.energiitalia.news/news/idrogeno/idrogeno-un-sistema-di-elettrolisi-australiano-dallefficienza-del-95/31945/#:~:text=Ma%20il%20vero%20punto%20di,a%20dei%20risultati%20cos%20C3%AC%20importanti?>
- [7] U. Bossel, B. Eliasson, G. Taylor, *Cogeneration and Competitive Power Journal*, 2009, **18**(3), 29, DOI: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15453660309509023>; https://afd.energy.gov/files/pdfs/hyd_economy_bossel_eliasson.pdf