

L'ADEGUAMENTO DELLE INFRASTRUTTURE ENERGETICHE PER L'INDUSTRIA 5.0

**Reti intelligenti, decentralizzazione produttiva,
approvvigionamento di materie prime e sfide
autorizzative**

Paper a cura dei Professional Fellows WEC Italia e della rete OIMCE -
Osservatorio Italiano Materie prime Critiche Energia

Luglio 2026



L'ADEGUAMENTO DELLE INFRASTRUTTURE ENERGETICHE PER L'INDUSTRIA 5.0: RETI INTELLIGENTI, DECENTRALIZZAZIONE PRODUTTIVA, APPROVVIGIONAMENTO DI MATERIE PRIME E SFIDE AUTORIZZATIVE

INDICE

INTRODUZIONE

a cura di Gabriella De Maio e Giuseppe Montesano **3**

CAPITOLO 1. RUOLO E DIGITALIZZAZIONE DEL SISTEMA ELETTRICO: RIFLESSI SULLE MATERIE PRIME CRITICHE **5**

a cura di Edoardo Lubin e Bruno Cova **5**

- 1.1 Premessa 5
- 1.2 Decarbonizzazione delle attività umane e ruolo delle reti elettriche 5
- 1.3 Evoluzione dei sistemi elettrici e impatti sui materiali 8
- 1.3.1. Le reti intelligenti e l'elettronica avanzata (sensori, attuatori, batterie, inverter, sistemi di accumulo) 9
- 1.4 I componenti e l'utilizzo di materie prime critiche 10
- 1.4.1 Materiali critici nei principali componenti delle smart grid 11
- 1.4.2 Il caso del rame: materiale strategico e potenziale collo di bottiglia 11
- 1.5 Domanda crescente di materie prime critiche per sensoristica, manutenzione predittiva e gestione dinamica delle reti e possibili soluzioni 13
- 1.6 Osservazioni conclusive 15

CAPITOLO 2. SISTEMI DI ACCUMULO

a cura di Angelica Agosta, Giuseppe Bellussi, Pietro R. Rabassi **17**

- 2.1 L'integrazione di rinnovabili e la necessità di uso massivo di batterie di accumulo 17
- 2.1.1 Crescita attesa della capacità di accumulo 19
- 2.1.2 L'emergere delle batterie elettrochimiche come tecnologia dominante 21
- 2.2 Dipendenza da materie prime critiche e rischio di approvvigionamento 22
- 2.2.1 Le materie prime critiche che influenzano la transizione verde 23
- 2.2.2 Rischio di approvvigionamento 24
- 2.3 Sistemi di accumulo termico 25
- 2.3.1 Tecnologie e applicazioni degli accumuli termici 26
- 2.3.2 Contributo alla flessibilità di rete 26
- 2.3.3 Ruolo degli accumuli termici distribuiti 27
- 2.4 Strategie di diversificazione tecnologica e circolarità 28
- 2.4.1 Circolarità e recupero 29
- 2.4.2 Diversificazione tecnologica 29
- 2.4.3 Raccomandazioni 30

CAPITOLO 3. PRODUZIONE LOCALE VS. DIPENDENZA GLOBALE

a cura di Tommaso Ferrucci, Sofia Nunzi, Renato di Belardino **31**

- 3.1 Il paradigma dell'Industria 5.0 spinge per una decentralizzazione produttiva e per la resilienza 31
- 3.2 Le tecnologie energetiche necessarie restano centralizzate nella produzione di componentistica, spesso in Asia 33
- 3.3 Serve un piano industriale europeo per localizzare almeno parte della filiera delle tecnologie strategiche 35

CAPITOLO 4. IL RUOLO DETERMINANTE DELLE MATERIE PRIME CRITICHE NELL'AMBITO DELLA MASSIMA DIFFUSIONE DELLE ENERGIE RINNOVABILI. ARCHITETTURA E LOGICA D'INTERVENTO DEL CONTESTO NORMATIVO EUROPEO E NAZIONALE

a cura di Lorenzo Piscitelli	39
4.1. Introduzione	39
4.2. Il quadro "a monte": la ricerca e l'estrazione di materie prime critiche	41
4.2.1 Il Critical Raw Materials Act	41
4.2.2. Il DL 84/2024	43
4.2.2.1. Il punto unico di contatto e i profili autorizzativi	44
4.2.2.2. Il programma nazionale di esplorazione	44
4.3. Il contesto "a valle": la massima diffusione delle energie rinnovabili	45
4.3.1. Brevi cenni introduttivi	45
4.3.2. Il Testo Unico Rinnovabili	46
4.3.3. Le aree idonee all'installazione di impianti rinnovabili	47
4.3.4. Le infrastrutture di rete: il fenomeno della saturazione virtuale e la necessità di nuovi investimenti	49
4.4. Conclusioni	51
CAPITOLO 5. STRATEGIE DI CIRCOLARITÀ E RECUPERO DEI CRM NELLE RETI	54
a cura di Giuseppe Di Florio	54
5.1 Introduzione	55
5.2 I Critical Raw Materials nelle reti elettriche	56
5.3 Economia circolare applicata alle infrastrutture di rete	57
5.4 Recupero e riciclo dei CRM nei componenti di rete	59
5.5 Accumuli elettrochimici e circolarità	66
5.6 Il potenziale della circolarità per Industria 5.0 e le infrastrutture energetiche	67
5.7 Sfide aperte e prospettive future	69
5.8 Conclusioni	70
Bibliografia	72
Il programma Professional Fellows WEC Italia	74
L'Osservatorio Italiano Materie Prime Critiche Energia (OIMCE)	74
Gli autori	74
Contatti	78

INTRODUZIONE

a cura di Gabriella De Maio e Giuseppe Montesano

Questa pubblicazione, di taglio allo stesso tempo divulgativo e rigoroso, è un'iniziativa della rete dei Professional Fellows di WEC Italia con la collaborazione dell'Osservatorio Italiano Materie prime Critiche per l'Energia (OIMCE).

Il lavoro si concentra su alcuni aspetti tecnologici e giuridico-amministrativi dello sviluppo e della gestione delle reti elettriche. Queste sono componenti fondamentali di una transizione del settore energetico verso la decarbonizzazione che persegue allo stesso tempo sicurezza energetica e competitività economica. Questa scelta non intende in alcun modo sminuire l'importanza di altri temi di rilievo della transizione energetica, quali il ruolo del gas, lo sviluppo di tecnologie come quelle nucleari e dell'idrogeno, le politiche per l'efficienza energetica che potranno essere oggetto di analoghi studi a cura di WEC Italia.

In questa prospettiva, l'adeguamento delle infrastrutture energetiche non costituisce soltanto una questione tecnica o industriale, ma rappresenta anche un tema di governance della trasformazione energetica. La capacità delle reti di accompagnare la crescita delle fonti rinnovabili, l'elettrificazione dei consumi, lo sviluppo dei sistemi di accumulo in un contesto di crescente domanda di materie prime critiche dipende, infatti, anche dalla qualità del quadro regolatorio, dalla coerenza delle politiche pubbliche e dall'efficienza dei procedimenti autorizzativi. La sfida è quella di rendere possibile l'innovazione senza indebolire le esigenze di sicurezza, sostenibilità, tutela dei territori e certezza degli investimenti.

La pubblicazione è costruita come raccolta di contributi autonomi, fruibili anche separatamente, ma collegati da un filo conduttore comune: la trasformazione delle reti energetiche nel contesto dell'Industria 5.0. Il percorso prende avvio dalla configurazione delle reti e dalla loro digitalizzazione, per poi esaminare il ruolo dei sistemi di accumulo, la struttura delle filiere industriali delle tecnologie chiave in una prospettiva di autonomia strategica, gli aspetti procedurali e autorizzativi e, infine, il potenziale delle strategie di circolarità per l'uso efficiente e il recupero dei materiali.

Il capitolo 1 descrive come le reti elettriche devono affrontare sfide come il notevole incremento della capacità di generazione da fonti rinnovabili, con le loro caratteristiche di variabilità, in un contesto di maggiore elettrificazione e di attesa forte crescita dei consumi elettrici dovuta, tra l'altro, alla sostituzione di tecnologie termiche con tecnologie elettriche e al previsto sviluppo dei centri di elaborazione dati necessari per applicazioni quali l'intelligenza artificiale. Le reti intelligenti richiedono elettronica avanzata, sensori, attuatori, batterie, inverter, sistemi di accumulo. Questi componenti utilizzano terre rare, litio, cobalto, rame, e altri materiali inclusi nella lista europea delle materie prime critiche.

Il capitolo 2 evidenzia che l'adeguamento delle reti elettriche deve includere una strategia per l'approvvigionamento sicuro e sostenibile dei sistemi di accumulo, sia elettrici che termici. Occorre investire in innovazione e alternative tecnologiche alle batterie

elettrochimiche al litio attualmente dominanti, prevedendo incentivi e semplificazioni autorizzative.

Il capitolo 3 affronta la tensione tra la crescente dimensione locale, distribuita e partecipativa del sistema energetico europeo e la persistente dipendenza da catene globali del valore per le tecnologie che rendono possibile tale trasformazione. La diffusione di reti intelligenti, sistemi di accumulo, impianti rinnovabili e infrastrutture digitali richiede infatti componenti, materiali e competenze industriali spesso concentrati in pochi Paesi e in segmenti produttivi ad alta intensità tecnologica. In questa prospettiva, il capitolo evidenzia la necessità di superare una logica fondata esclusivamente sull'efficienza globale, valorizzando resilienza, autonomia strategica aperta - cioè continuando a promuovere libero scambio e cooperazione internazionale - e capacità europea di presidiare almeno alcuni nodi essenziali delle filiere energetiche.

Il capitolo 4 analizza il ruolo determinante delle materie prime critiche nella diffusione delle energie rinnovabili e nell'adeguamento delle infrastrutture energetiche, soffermandosi sull'evoluzione del quadro normativo europeo e nazionale. L'analisi prende avvio dal Critical Raw Materials Act dell'Unione Europea e dal relativo recepimento nazionale, per poi esaminare i profili autorizzativi e regolatori connessi alla ricerca, estrazione, trasformazione e riciclo delle materie prime critiche. Il capitolo si concentra inoltre sul versante "a valle" della catena del valore, approfondendo la disciplina degli impianti rinnovabili, il Testo Unico Rinnovabili, le aree idonee, le zone di accelerazione e le criticità legate alla connessione e all'adeguamento della rete elettrica.

Il capitolo 5 evidenzia come le logiche di economia circolare possono integrarsi con l'adeguamento delle infrastrutture 5.0. Il passaggio da modelli lineari di utilizzo delle risorse a paradigmi di economia circolare è un elemento imprescindibile per garantire la sostenibilità di lungo periodo dei sistemi energetici e produttivi. Oltre all'ecodesign, ossia lo sviluppo di reti, apparecchiature e componenti progettati per agevolare il disassemblaggio e il recupero delle materie prime critiche, sono aspetti cruciali il rafforzamento delle infrastrutture di raccolta e trattamento, lo sviluppo di tecnologie avanzate di riciclo e l'incentivazione dell'utilizzo di materie prime seconde.

Nel loro insieme, i contributi restituiscono l'immagine di una trasformazione energetica che non può essere affrontata attraverso prospettive isolate. L'adeguamento delle infrastrutture energetiche richiede infatti una lettura integrata, in grado di coniugare innovazione tecnologica, sicurezza degli approvvigionamenti, autonomia industriale, semplificazione amministrativa, tutela dei territori e circolarità delle risorse. La sfida dell'Industria 5.0, applicata al settore energetico, consiste proprio nel costruire sistemi più intelligenti, resilienti e sostenibili, nei quali la decarbonizzazione non sia soltanto un obiettivo ambientale, ma anche un'occasione di rafforzamento della competitività, della sicurezza e della capacità di governo della trasformazione.

Buona lettura!

CAPITOLO 1. RUOLO E DIGITALIZZAZIONE DEL SISTEMA ELETTRICO: RIFLESSI SULLE MATERIE PRIME CRITICHE

a cura di Edoardo Lubin e Bruno Cova

1.1 Premessa

La transizione del settore energetico verso la decarbonizzazione pone sempre più in evidenza il ruolo cruciale delle reti elettriche, il cui sviluppo e gestione “intelligente” è essenziale per l'evoluzione del settore elettrico verso la completa decarbonizzazione. Le reti elettriche devono affrontare sfide come il notevole incremento della capacità di generazione da fonti rinnovabili non programmabili con le loro caratteristiche di variabilità e l'attesa di forte crescita dei consumi elettrici dovuta, tra l'altro, alla sostituzione di tecnologie termiche con tecnologie elettriche e al previsto sviluppo dei centri di elaborazione dati necessari per applicazioni quali l'Intelligenza Artificiale (IA).

È quindi importante ottimizzare lo sviluppo delle reti sia in termini di “hardware”, ossia costruzione di nuove linee, stazioni, sistemi di accumulo elettrochimico, che “software”, adottando una digitalizzazione basata anche sull'IA. Entrambe le direttrici di sviluppo richiedono un uso crescente di materie prime strategiche e critiche, con la conseguente necessità di implementare misure che consentano di mitigare le vulnerabilità legate all'importazione di materiali e componenti da paesi extra-Unione Europea (UE).

Dopo una presentazione generale riguardo le esigenze di sviluppo delle reti in Europa e nel mondo, questo capitolo illustra l'associazione tra le tecnologie e le materie prime critiche, fornendo spunti per possibili soluzioni che permettano di ridurre la dipendenza dalle importazioni, nonché le misure di policy varate dall'UE.

1.2 Decarbonizzazione delle attività umane e ruolo delle reti elettriche

Con l'obiettivo di mitigare il cambiamento climatico in atto, vari governi hanno adottato strategie per ridurre le emissioni di gas ad effetto serra (GHG) fino ad annullarle. L'UE è stata la precorritrice di questo processo virtuoso, avendo da tempo fissato l'obiettivo di raggiungere lo “*zero net-emission*” al 2050. Tale processo è stato successivamente intrapreso da altre *major economies*, in particolare la Cina, che ha fissato un simile obiettivo al 2060. Anche i Paesi del Golfo, che hanno finora giocato un ruolo fondamentale nella produzione di combustibili fossili, hanno stabilito sfidanti obiettivi di decarbonizzazione; ad esempio, l'Arabia Saudita ha varato la “*Saudi Green Initiative*” che mira all'azzeramento delle emissioni climalteranti per il 2060.

Queste politiche di decarbonizzazione si basano da un lato su una produzione energetica sempre più da fonti rinnovabili (RES), prevalentemente solare ed eolico, e dall'altro su una elettrificazione sempre più spinta degli usi finali: “*deep electrification*”. In questo contesto, è già in corso l'elettrificazione dei trasporti stradali mediante la diffusione di veicoli elettrici con i relativi impatti in particolare sulle reti di distribuzione. È invece ancora all'inizio la decarbonizzazione dei settori “*hard-to-abate*” mediante la loro elettrificazione diretta

oppure indiretta tramite l'uso di idrogeno prodotto tramite elettrolizzatori alimentati da energia rinnovabile.

È quindi evidente che il settore elettrico è pivotale e sarà il primo a conseguire la completa decarbonizzazione. Ad esempio, l'UE ha fissato un obiettivo intermedio di riduzione delle emissioni di gas serra al 2030 di -55% rispetto al 1990 con una copertura degli usi finali di energia di almeno il 42,5% da RES. Ciò implica per il settore elettrico una produzione da RES di poco meno del 70%. A fine 2025 la produzione elettrica da RES è stata del 48%¹. È pertanto chiaro quanto accelerato debba essere lo sviluppo di generazione da fonti rinnovabili, soprattutto in considerazione del successivo obiettivo stabilito dalla UE per il 2040 che riguarda una riduzione delle emissioni del 90% rispetto al 1990. Ciò significa che entro la fine del prossimo decennio il sistema elettrico europeo dovrà conseguire la piena decarbonizzazione per compensare altri settori che stanno avendo più difficoltà a ridurre le emissioni, in primis quello dei trasporti.

Di conseguenza si pone il problema di valutare con il dovuto anticipo gli impatti di questa evoluzione, o meglio rivoluzione verde, sul sistema elettrico. Lo studio “*2024 Monitoring Report*” di ACER² sottolinea la necessità di più che raddoppiare l'attuale livello di investimenti sulle reti. In dipendenza dalle varie stime, si tratterà di investire ogni anno tra i 75 e i 100 miliardi di € fino al 2050. È importante rilevare che 2/3 di questi investimenti sono necessari per le reti di distribuzione.

In questo quadro, il caso italiano rappresenta un esempio particolarmente avanzato di evoluzione ingegneristica delle reti orientata non solo all'espansione, ma anche all'aumento della capacità di trasporto a parità di infrastruttura. Il Piano di Sviluppo di Terna introduce infatti il paradigma *Hypergrid*, basato sulla realizzazione di dorsali ad alta capacità, in larga parte in corrente continua (HVDC), integrate con la rete esistente e progettate per incrementare significativamente la capacità di scambio tra le diverse aree del Paese. Tali interventi consentono, tra l'altro, di raddoppiare la capacità di trasporto lungo le direttrici Sud-Nord, minimizzando al contempo l'impatto territoriale grazie all'uso di collegamenti ad alta efficienza e a maggiore densità di potenza trasportata.

Accanto alle nuove dorsali, una componente rilevante dell'innovazione riguarda il *revamping* e il potenziamento delle linee esistenti mediante soluzioni avanzate di ingegneria delle infrastrutture. In questo ambito si inserisce lo sviluppo di configurazioni innovative come le linee a “5 fasi”, che attraverso una diversa geometria dei conduttori e una duplicazione parziale delle fasi consentono di aumentare la capacità di trasporto e migliorare le prestazioni elettromagnetiche senza necessità di nuovi corridoi infrastrutturali.

Questo insieme di soluzioni – nuove dorsali HVDC, potenziamento delle linee in corrente alternata (AC) esistenti e innovazioni nella configurazione dei sostegni – riflette un approccio sistemico orientato a massimizzare la capacità trasmissiva per unità di infrastruttura, riducendo il fabbisogno di nuove opere e ottimizzando l'uso del territorio. Tale strategia si inserisce pienamente nel più ampio paradigma europeo di sviluppo

¹ Ember, “European Electricity Review 2026”, January 2026

² Agenzia UE per la cooperazione dei regolatori nazionali

efficiente delle reti, in cui l'aumento della capacità non deriva esclusivamente da nuova costruzione, ma da un'evoluzione tecnologica profonda dell'architettura di rete.

Un tale impegno in termini di investimento non può prescindere da un'azione politica che favorisca gli investimenti nelle reti. E infatti lo scorso 10 dicembre la Commissione Europea (CE) ha proposto lo *“European Grids Package”*³ e la correlata iniziativa *“Energy Highways”*. Tra le varie misure, la Commissione propone di aumentare di 5 volte il budget per CEF (Connecting Europe Facility) Energy da 5,84 miliardi a 29,91 miliardi di € nell'ambito del *“2028-2034 Multi-annual Financial Framework”*⁴. I costi dell'“inazione”, ossia di insufficienti investimenti nello sviluppo delle reti sono evidenti: la CE ha stimato costi di congestione sulle reti nel 2022 pari a 5,2 miliardi di €, costi che potrebbero salire a 26 miliardi di € al 2030 senza adeguati sviluppi delle reti. Oltre a ciò, come ulteriore effetto avverso, gli operatori del sistema di trasmissione (TSO) dovrebbero tagliare crescenti quantità di produzione da fonti rinnovabili non programmabili. Sempre la CE stima che si arriverebbe ad un taglio di produzione RES fino a 310 TWh/anno al 2040. Va rilevato che gli operatori di rete europei stanno reagendo positivamente accelerando già da qualche anno i piani di investimento sulle reti. Basti pensare che, con riferimento alla rete di trasmissione in Italia, il piano decennale di sviluppo di Terna è passato da 6,7 miliardi nel 2015 a oltre 23 miliardi di € nel 2025.

Questo trend relativo alla necessità di investimenti crescenti sulle reti elettriche è comune a livello mondiale. Una recente analisi della Energy Transitions Commission (ETC)⁵ stima che al 2050 la penetrazione di elettricità nel mondo rispetto agli usi finali di energia si attesterà tra 55% e 70% rispetto all'attuale 20%. Ciò comporterà una crescita del consumo di elettricità dagli attuali ~ 28.000 TWh a circa 60.000-70.000 TWh. Per realizzare la necessaria espansione delle reti, gli investimenti annuali nelle reti di trasmissione e distribuzione devono aumentare fino a 800 miliardi di dollari all'anno, con una crescita di oltre 2,5 volte rispetto ai livelli attuali (~300 miliardi di dollari all'anno). Complessivamente, ciò equivarrebbe a oltre 22,5 trilioni di dollari tra il 2022 e il 2050.

La sfida riguardo l'esigenza di assicurare crescenti investimenti sulle reti è enorme, ma la buona notizia è che vi è consapevolezza a livello mondiale: basti ricordare l'esito della COP 29 tenutasi a Baku nel novembre 2024. I primi due punti del resoconto della COP 29⁶ riportano:

- a) il lancio della *“Global Energy Storage and Grids Pledge”* con l'impegno di:
 - o costruire o rinnovare 25 milioni di chilometri di reti a livello globale entro il 2030, riconoscendo la necessità di aggiungere o rinnovare altri 65 milioni di chilometri entro il 2040
 - o fissare un obiettivo collettivo di installare 1.500 GW di accumulo di energia a livello globale entro il 2030, ovvero più di sei volte la capacità del 2022.

³ EC, *“European Grids Package”*, COM(2025) 1005 final, Dec. 2025

⁴ EC, *“A dynamic EU Budget for the priorities of the future - The Multiannual Financial Framework 2028-2034”*, COM(2025) 570 final, July 2025

⁵ ETC, *“Building grids faster: the backbone of the energy transition”*, September 2024, Version 1.0

⁶ COP29, *“Summary of Global Climate Action at COP 29”*, November 2024

b) il lancio della “*Green Energy Pledge: Green Energy Zones and Corridors*” che si focalizza su:

- o promuovere il collegamento di zone e corridoi di energia verde alle comunità più bisognose attraverso lo sviluppo di reti elettriche interconnesse intraregionali e interregionali più ampie.

È quindi evidente il consenso a livello globale dell'importanza dello sviluppo delle reti di trasmissione e distribuzione (T&D), delle interconnessioni tra paesi, nonché dei sistemi di accumulo.

1.3 Evoluzione dei sistemi elettrici e impatti sui materiali

La transizione energetica globale sopra richiamata con la correlata esigenza di sviluppo dei sistemi elettrici sta ridefinendo in profondità gli equilibri geopolitici, industriali e tecnologici del sistema internazionale, soprattutto per quanto riguarda l'utilizzo di materiali⁷. Al centro di questa trasformazione si colloca il settore delle terre rare e, più in generale, delle materie prime critiche, che costituiscono l'ossatura fisica delle tecnologie necessarie alla decarbonizzazione, alla digitalizzazione e alla sicurezza energetica. Le terre rare – un gruppo di 17 elementi chimici fondamentali per magneti permanenti ad alte prestazioni, elettronica avanzata, sensori e attuatori – rappresentano oggi uno dei principali colli di bottiglia strategici della transizione, in quanto combinano una domanda in rapida crescita con una filiera altamente concentrata e geopoliticamente fragile.

Negli ultimi due decenni, la Cina ha costruito una posizione di quasi-monopolio lungo l'intera catena del valore delle terre rare, controllando non solo una quota maggioritaria dell'estrazione, ma soprattutto le fasi più critiche e ad alto valore aggiunto della raffinazione, della separazione e della produzione di componenti avanzati (come magneti al neodimio-ferro-boro). Questa posizione dominante è stata progressivamente trasformata in uno strumento di leva geopolitica, come dimostrano le restrizioni selettive all'export, le politiche industriali e l'integrazione tra strategia industriale, sicurezza nazionale e politica estera. A fronte di tale posizionamento politico, Stati Uniti, UE, Giappone e altri attori industrializzati hanno reagito avviando strategie di “de-risking” e diversificazione delle supply chain, investendo in nuove miniere, riciclo, sostituzione tecnologica e alleanze con Paesi ricchi di risorse (Australia, Canada, Africa subsahariana, America Latina)⁸. Tuttavia, la riconfigurazione delle filiere è lenta, costosa e complessa, e nel medio periodo la dipendenza strutturale da pochi fornitori rimane elevata.

Questo quadro geopolitico si intreccia in modo diretto con le trasformazioni profonde richieste dai sistemi energetici. Le sfide poste dalla transizione energetica impongono una riconfigurazione radicale dell'infrastruttura elettrica. Le reti, storicamente progettate per un flusso unidirezionale e per grandi centrali programmabili, devono maggiormente evolvere verso le smart grid: sistemi cyber-fisici bidirezionali, digitalizzati e fortemente

⁷ International Energy Agency, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, Paris, 2021.

⁸ European Commission, *Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability*, Brussels, 2020.

automatizzati, capaci di garantire stabilità, flessibilità e resilienza in un contesto di elevata variabilità e complessità⁹. Questa trasformazione infrastrutturale si fonda su tre pilastri tecnologici ad alta intensità di materie prime critiche, spesso legate direttamente o indirettamente alle terre rare.

Il primo è l'elettronica di potenza avanzata (inverter, convertitori, sistemi di controllo), che consente l'interfacciamento bidirezionale tra rinnovabili, accumulo e rete, permettendo il controllo di flussi, frequenza e tensione. Pur basandosi su semiconduttori wide-bandgap come carburo di silicio e nitruro di gallio, la sua integrazione con motori e attuatori ad alte prestazioni rafforza la domanda di magneti permanenti a base di terre rare, essenziali per efficienza e affidabilità.

Il secondo pilastro è rappresentato dai sistemi di accumulo elettrochimico, in particolare le batterie, che operano come risorse di flessibilità per stabilizzare la rete, gestire i picchi e fornire servizi avanzati. Il loro funzionamento è abilitato da sistemi di gestione digitali (BMS) basati su sensoristica ed elettronica sofisticata. Le terre rare, pur non centrali nelle celle, risultano rilevanti nei sottosistemi di supporto e nei dispositivi di controllo.

Il terzo pilastro è la sensoristica distribuita con attuatori intelligenti, che costituisce l'infrastruttura "IoT" (*Internet of Things*) della rete elettrica. Sensori e attuatori permettono monitoraggio in tempo reale, automazione del controllo (isolamento dei guasti, riconfigurazione delle linee, gestione dei carichi) e abilitano applicazioni come intelligenza artificiale, digital twin e manutenzione predittiva. Anche in questo ambito, l'uso di materiali avanzati rende le terre rare componenti critici.

Nel complesso, la transizione verso sistemi energetici decarbonizzati e digitali assume una forte dimensione geopolitica: il controllo delle filiere delle terre rare diventa un fattore strategico per la sicurezza energetica e industriale, influenzando la capacità degli Stati di sviluppare reti intelligenti e sostenere l'elettrificazione dell'economia¹⁰.

1.3.1. Le reti intelligenti e l'elettronica avanzata (sensori, attuatori, batterie, inverter, sistemi di accumulo)

La trasformazione dei sistemi elettrici, guidata dalla transizione energetica e dalla crescente elettrificazione, richiede un ripensamento profondo delle reti. L'aumento delle fonti rinnovabili non programmabili e dei consumi elettrici (mobilità, industria, data center) rende obsoleto il modello tradizionale unidirezionale, imponendo lo sviluppo di smart grid digitalizzate, capaci di gestire flussi bidirezionali, garantire stabilità in condizioni variabili e migliorare la resilienza.

Questa evoluzione è resa possibile dall'integrazione di tecnologie elettroniche avanzate. Un ruolo centrale è svolto dall'elettronica di potenza (inverter, convertitori, sistemi di

⁹ International Energy Agency, *Electricity Grids and Secure Energy Transitions*, Paris, 2023.

¹⁰ International Energy Agency, *Energy and AI* (News release, 10 Apr 2025).

controllo), che consente di rendere gestibile e regolabile l'energia da fonti rinnovabili. L'adozione di semiconduttori innovativi, come carburo di silicio e nitruro di gallio, aumenta efficienza, compattezza e flessibilità operativa dei dispositivi.

Un aspetto cruciale riguarda la differenziazione tra reti di trasmissione (TSO) e distribuzione (DSO). Le prime si concentrano su stabilità, controllo della frequenza e coordinamento su larga scala, richiedendo sistemi avanzati di monitoraggio e controllo in tempo reale. Le seconde sono orientate alla gestione della generazione distribuita, alla flessibilità della domanda e all'interazione con gli utenti, con una maggiore diffusione di sensori, contatori intelligenti e automazione locale. Questa differenza si riflette anche nei fabbisogni tecnologici: le reti di trasmissione sono più “power- ed electronics-intensive”, mentre quelle di distribuzione sono più “sensor- e microelectronics-intensive”.

Accanto all'elettronica di potenza, assumono un ruolo strategico i sistemi di accumulo elettrochimico. Le batterie non sono più solo strumenti di stoccaggio, ma risorse di flessibilità che contribuiscono alla stabilità della rete e alla fornitura di servizi ancillari. Ciò è reso possibile da sistemi di gestione (BMS – *Battery Management Systems*) avanzati, che integrano sensoristica diffusa e algoritmi di controllo, rendendo le batterie vere e proprie infrastrutture digitali.

Infine, la sensoristica distribuita e gli attuatori intelligenti costituiscono il “sistema nervoso” delle smart grid. Sensori diffusi permettono monitoraggio continuo e funzioni avanzate come isolamento dei guasti, riconfigurazione dinamica e gestione adattiva dei carichi. L'integrazione con piattaforme digitali abilita inoltre l'uso di intelligenza artificiale, digital twin e manutenzione predittiva.

Nel complesso, la convergenza tra elettronica di potenza, accumulo e sensoristica rappresenta la base delle reti elettriche del futuro: sistemi cyber-fisici in grado di integrare generazione distribuita e nuovi profili di domanda, mantenendo elevati standard di sicurezza, affidabilità e qualità del servizio.

1.4 I componenti e l'utilizzo di materie prime critiche

La profonda trasformazione tecnologica delle reti elettriche e, più in generale, dell'intero sistema energetico comporta un aumento senza precedenti della domanda di materie prime critiche (Critical Raw Materials – CRM). La transizione verso un sistema energetico decarbonizzato, elettrificato e digitalizzato è infatti intrinsecamente material-intensive: ogni componente chiave delle smart grid, della generazione rinnovabile, dei sistemi di accumulo e delle infrastrutture digitali dipende da specifici materiali strategici, la cui disponibilità, sostenibilità ambientale ed equilibrio geopolitico diventano fattori determinanti per il successo della transizione.

In questo contesto, l'UE ha individuato un insieme di materiali ritenuti essenziali per la competitività industriale, la sicurezza economica e la resilienza strategica, formalizzati nella Lista Europea delle Materie Prime Critiche e recentemente rafforzati dal “*Critical Raw*

Materials Act” (CRMA). Tra questi, assumono un ruolo centrale: litio, cobalto, nichel, rame, alluminio, gallio, germanio e numerosi elementi delle terre rare.

1.4.1 Materiali critici nei principali componenti delle smart grid

Sistemi di accumulo elettrochimico. Le batterie agli ioni di litio rappresentano oggi la tecnologia dominante per l’accumulo stazionario e per la mobilità elettrica. Esse richiedono ingenti quantità di litio, cobalto, nichel, manganese e grafite, materiali che presentano catene di approvvigionamento concentrate e vulnerabili¹¹. La crescente diffusione di accumuli di rete, necessaria per garantire flessibilità, regolazione di frequenza e integrazione delle rinnovabili, comporterà un incremento significativo della domanda globale di tali materiali. Parallelamente, si stanno sviluppando tecnologie alternative (lito-ferro-fosfato -LFP-, sodio-ione, batterie allo stato solido), che potranno mitigare parzialmente la dipendenza da cobalto e nichel, ma che nel medio periodo non elimineranno il fabbisogno complessivo di materie prime critiche.

Elettronica di potenza e microelettronica. Abbiamo visto come inverter, convertitori e sistemi di controllo avanzati fanno ampio uso di semiconduttori wide-bandgap, in particolare carburo di silicio e nitruro di gallio, che richiedono gallio e germanio¹², materiali classificati come critici dall’UE. A questi si aggiunge l’uso massiccio di rame, argento e metalli nobili per circuiti di potenza, interconnessioni e dissipazione termica. L’espansione delle reti intelligenti, delle sottostazioni digitali e dei sistemi di controllo distribuito comporterà un incremento strutturale della domanda di questi materiali, con effetti diretti sui costi e sulla sicurezza delle forniture¹³.

Infrastrutture di rete. Le reti di trasmissione e distribuzione sono estremamente material-intensive, in particolare per quanto riguarda il rame e l’alluminio utilizzati in cavi, trasformatori, sbarre, avvolgimenti e componenti elettromeccanici. La necessità di espandere, rinnovare e potenziare le reti T&D a livello globale, come sopra richiamato, si traduce in un fabbisogno senza precedenti di tali metalli. Il rame, in particolare, rappresenta uno dei principali colli di bottiglia potenziali della transizione.

Generazione rinnovabile e azionamenti elettrici. Le turbine eoliche, i motori ad alta efficienza, i generatori e numerosi attuatori impiegano magneti permanenti ad alte prestazioni, basati su terre rare quali neodimio, disprosio e praseodimio. Questi elementi consentono di ottenere elevate densità di potenza, maggiore efficienza e minori ingombri, ma rafforzano la dipendenza da filiere fortemente concentrate, in cui la Cina detiene una posizione dominante.

¹¹ World Bank, *Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*, Washington D.C., 2020.

¹² European Commission, *Critical Raw Materials Act*, COM(2023)160 final.

¹³ International Electrotechnical Commission, *IEC 61850 – Communication Networks and Systems for Power Utility Automation*.

1.4.2 Il caso del rame: materiale strategico e potenziale collo di bottiglia

Se da un lato la digitalizzazione delle reti elettriche permette un risparmio nell'uso di materie prime critiche, quali il rame e l'alluminio, d'altra parte la necessità di aumentare le capacità di trasporto delle reti T&D richiederà inevitabilmente un sempre maggiore utilizzo di tali materiali che potrà essere mitigato, ma non completamente annullato.

Tra tutti i materiali coinvolti, il rame assume una centralità assoluta per lo sviluppo delle infrastrutture elettriche e digitali. Le reti elettriche, i sistemi di accumulo, le infrastrutture per la ricarica dei veicoli elettrici e i data center sono fortemente *copper-intensive*. Secondo stime recenti, i data center richiedono tra le 27 e le 33 tonnellate di rame per ogni MW di potenza installata, e la domanda legata a questo settore è prevista crescere di sei volte entro il 2050¹⁴.

I segnali di tensione sul mercato del rame sono già evidenti: il prezzo ha recentemente superato i 13.000 USD/t (febb. 2026) al London Metal Exchange, raggiungendo livelli storicamente elevati, si attesta attualmente a 12.000 USD/t (marzo 2026). Le analisi della International Energy Agency (IEA) indicano che, già entro il 2035, la produzione dalle miniere esistenti e pianificate potrebbe coprire solo circa il 70% della domanda globale, aprendo uno scenario strutturale di deficit¹⁵.

A ciò si aggiungono criticità nella fase di raffinazione: secondo Wood Mackenzie, già nel 2026 si potrebbe registrare un deficit di capacità di raffinazione superiore alle 300.000 tonnellate annue. Sebbene le risorse minerarie siano distribuite in vari Paesi (Cile, Perù, Repubblica Democratica del Congo), la Cina controlla circa il 50% della capacità mondiale di raffinazione, rafforzando una dipendenza strategica analoga a quella osservata per le terre rare.

Questo quadro evidenzia come il rame, pur non essendo tradizionalmente considerato una materia prima critica, rappresenti in realtà una delle principali vulnerabilità strutturali della transizione energetica e digitale¹⁶.

Nel complesso, le terre rare costituiscono uno snodo strategico della competizione geopolitica globale. Negli ultimi due decenni, la Cina ha costruito una posizione di quasi monopolio lungo l'intera catena del valore: dall'estrazione alla raffinazione, fino alla produzione di componenti avanzati come i magneti permanenti al neodimio-ferro-boro. Questa posizione dominante consente di esercitare una leva geopolitica significativa, come dimostrato da precedenti restrizioni all'export e da politiche industriali selettive¹⁷.

Per l'Unione Europea, tale concentrazione rappresenta un fattore di rischio sistemico, in quanto espone settori strategici – energia, mobilità elettrica, difesa, ICT – a potenziali shock di offerta. In questa direzione, il CRMA mira a ridurre questa dipendenza fissando obiettivi ambiziosi: almeno il 10% dell'estrazione, il 40% della raffinazione e il 25% del riciclo delle CRM dovrebbero avvenire all'interno dell'UE entro il 2030. Tuttavia, il

¹⁴ World Bank, *Minerals for Climate Action*, 2020.

¹⁵ Benchmark Mineral Intelligence, *Copper price hits record \$13,000/t as rally continues*, 2026.

¹⁶ London Metal Exchange, *Copper Official Prices*, 2024.

¹⁷ U.S. Geological Survey, *Mineral Commodity Summaries – Rare Earths*, Washington D.C., 2024.

raggiungimento di tali traguardi richiede un'accelerazione senza precedenti negli investimenti minerari, industriali e tecnologici¹⁸.

1.5 Domanda crescente di materie prime critiche per sensoristica, manutenzione predittiva e gestione dinamica delle reti e possibili soluzioni

Nel contesto delle smart grid delineato nei paragrafi precedenti, la progressiva digitalizzazione delle reti elettriche e l'adozione di architetture avanzate di controllo, automazione e comunicazione stanno determinando un aumento strutturale e irreversibile della domanda di materie prime critiche. L'evoluzione delle reti da infrastrutture prevalentemente elettromeccaniche a sistemi cyber-fisici complessi comporta infatti una crescita esponenziale del numero di componenti elettronici, dispositivi intelligenti e sistemi di elaborazione distribuita lungo l'intera catena del valore elettrico, dalla generazione alla trasmissione e distribuzione fino agli usi finali¹⁹.

In questo, la diffusione capillare della sensoristica rappresenta uno degli elementi cardine di questa trasformazione. Sensori di corrente, tensione, temperatura, vibrazione, umidità e qualità dell'energia vengono installati in modo pervasivo su linee, cabine, trasformatori, impianti di generazione e dispositivi lato utente, consentendo il monitoraggio in tempo reale delle condizioni operative della rete con elevata risoluzione temporale e spaziale. Tale infrastruttura digitale richiede microprocessori, semiconduttori avanzati, materiali magnetici, leghe speciali e componenti miniaturizzati, spesso basati su elementi rari o a disponibilità geopoliticamente concentrata²⁰. Un esempio emblematico è rappresentato dalle sottostazioni digitali, fondate su architetture di comunicazione ethernet e protocolli standardizzati come IEC 61850, che consentono una drastica riduzione della caviatura in rame e degli ingombri fisici, ma al contempo aumentano in modo significativo il contenuto di elettronica avanzata, microprocessori, moduli di comunicazione e dispositivi intelligenti, con conseguente crescita della domanda di gallio, germanio, terre rare e rame ad alta purezza²¹.

Un ulteriore ambito in cui la digitalizzazione incide in modo rilevante sulla domanda di CRM è rappresentato dalla manutenzione predittiva. L'integrazione di sensoristica avanzata, sistemi di monitoraggio continuo, algoritmi di IA e modelli di *digital twin* consente di anticipare i fenomeni di degrado, ridurre i guasti improvvisi, ottimizzare la pianificazione degli interventi e prolungare la vita utile delle infrastrutture. I benefici operativi sono significativi in termini di affidabilità del servizio, riduzione dei costi e sicurezza del personale. Tuttavia, tali vantaggi sono accompagnati da un incremento sostanziale della densità di componenti elettronici distribuiti sul territorio, determinando un aumento strutturale della domanda di microelettronica e delle relative materie prime critiche²².

¹⁸ European Commission, *Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability*, 2020.

¹⁹ International Energy Agency, *Electricity Grids and Secure Energy Transitions*, 2023.

²⁰ World Bank, *Minerals for Climate Action*, 2020.

²¹ International Electrotechnical Commission, *IEC 61850 – Communication Networks and Systems for Power Utility Automation*.

²² International Energy Agency, *Electricity Grids and Secure Energy Transitions*, 2023.

La crescente digitalizzazione delle reti introduce, inoltre, una nuova dimensione di vulnerabilità sistemica legata alla cybersecurity. Le smart grid, in quanto sistemi cyber-fisici complessi e fortemente interconnessi, risultano esposte a rischi crescenti di attacchi informatici, sabotaggi digitali e interferenze sui sistemi di controllo, con potenziali impatti diretti sulla continuità del servizio elettrico e sulla sicurezza delle infrastrutture critiche. La necessità di garantire elevati livelli di sicurezza informatica non si traduce esclusivamente in soluzioni software, ma richiede un rafforzamento della sicurezza hardware dei dispositivi di rete. Sensori, attuatori, inverter, contatori intelligenti e sistemi di controllo devono integrare microprocessori dedicati, moduli di crittografia, *secure elements* e sistemi di autenticazione hardware, aumentando ulteriormente la complessità dei dispositivi e la domanda di materiali critici impiegati nei semiconduttori. In questo quadro, la cybersecurity diventa un ulteriore fattore di interdipendenza tra transizione energetica, digitalizzazione e geopolitica dei materiali, rafforzando il ruolo strategico delle filiere della microelettronica.

Parallelamente, la gestione dinamica delle reti, resa possibile dalla digitalizzazione, consente di aumentare significativamente la capacità effettiva delle infrastrutture esistenti, riducendo la necessità di nuove opere civili e il consumo di materiali tradizionali²³. Tra le principali soluzioni si annoverano:

- Dynamic Line Rating (DLR): utilizzo di limiti dinamici di portata delle linee basati su misure in tempo reale di temperatura, vento e irraggiamento, che permettono di aumentare la capacità di trasporto anche del 20–30% senza nuovi conduttori.
- Wide Area Monitoring and Control (WAMC): sistemi di monitoraggio sincrono su larga scala, basati su PMU (Phasor Measurement Units), che consentono un controllo avanzato della stabilità di rete.
- Contatori intelligenti di seconda generazione (2G): strumenti chiave per l'interazione tra utenti, DSO e TSO, che permettono la partecipazione attiva dei consumatori alla flessibilità di sistema.

Soluzioni come queste sopra citate permettono di migliorare l'efficienza e la flessibilità del sistema elettrico, favorendo un approccio “*no-new grid*”, ovvero una strategia di sviluppo di impianti che evita (o minimizza drasticamente) la costruzione di nuove infrastrutture di rete elettrica. Tuttavia, anche in questo caso, la riduzione dell'uso complessivo di rame e alluminio è compensata da un aumento significativo della microelettronica e della sensoristica, con un conseguente incremento della domanda di CRM²⁴.

È chiaro, dunque, come si configuri un trade-off strutturale tra la riduzione dei materiali convenzionali ad alto volume e l'aumento della dipendenza da materiali rari e strategici. Questo equilibrio dinamico impone una visione sistemica della transizione energetica, nella quale l'innovazione tecnologica sia accompagnata da politiche industriali orientate alla diversificazione delle catene di approvvigionamento, investimenti in ricerca su

²³ International Energy Agency, *Electricity Grids and Secure Energy Transitions*, 2023.

²⁴ European Commission, *Critical Raw Materials Resilience*, 2020.

materiali alternativi, rafforzamento delle filiere europee della microelettronica e sviluppo di strategie efficaci di economia circolare²⁵.

In tale prospettiva, il riciclo e il riutilizzo delle materie prime critiche diventano elementi imprescindibili per garantire sostenibilità ambientale e resilienza strategica. Le infrastrutture e i componenti delle smart grid dovranno essere progettati secondo principi di *circular-by-design*, favorendo il disassemblaggio, il recupero selettivo dei materiali e la tracciabilità lungo l'intero ciclo di vita. Misure quali l'etichettatura digitale dei componenti, la standardizzazione dei formati, la progettazione modulare e lo sviluppo di processi di riciclo a basse emissioni consentono di ridurre la pressione sulle risorse primarie e di aumentare la sicurezza degli approvvigionamenti.

Nel complesso, l'integrazione tra smart grid, digitalizzazione avanzata e gestione sostenibile delle materie prime critiche emerge come uno dei pilastri strategici per la realizzazione di una transizione energetica realmente resiliente, competitiva e ambientalmente sostenibile²⁶²⁷.

1.6 Osservazioni conclusive

Nel quadro delineato, emerge con chiarezza come il ruolo delle reti elettriche sia destinato a diventare sempre più centrale nel processo di decarbonizzazione, non solo del settore elettrico in senso stretto, ma dell'intero sistema energetico ed economico, attraverso dinamiche di elettrificazione profonda ("*deep electrification*") che interessano industria, trasporti, residenziale e servizi. Le reti rappresentano l'infrastruttura abilitante di questa trasformazione, ma al contempo ne incorporano e amplificano le complessità tecnologiche, materiali e geopolitiche.

L'evoluzione verso reti sempre più digitalizzate, intelligenti e interconnesse rende inevitabile un aumento strutturale della domanda di materie prime critiche, sia per i materiali tradizionali in massicce quantità, come rame e alluminio, sia per un insieme più ampio di elementi utilizzati nella sensoristica, nella microelettronica, nell'elettronica di potenza e nei sistemi di controllo avanzati. In questo contesto, la mitigazione dell'impatto materiale della transizione non può basarsi su una singola leva, ma richiede l'adozione simultanea di una molteplicità di soluzioni. Tra queste, la digitalizzazione delle reti e il ricorso a modelli avanzati di economia circolare emergono come strumenti particolarmente promettenti, in grado di migliorare l'efficienza complessiva del sistema, ridurre il fabbisogno di nuove infrastrutture fisiche e ottimizzare l'utilizzo delle risorse esistenti.

Tuttavia, è importante riconoscere che tali strategie, pur necessarie, non sono sufficienti ad annullare completamente le vulnerabilità associate alle catene di approvvigionamento delle materie prime critiche. Anche in scenari caratterizzati da un'ampia diffusione di soluzioni "*no-new grid*", da una gestione dinamica delle reti e da un elevato tasso di riciclo, permane una dipendenza significativa da materiali la cui estrazione e trasformazione

²⁵ International Energy Agency, *Electricity Grids and Secure Energy Transitions*, 2023.

²⁶ European Commission, *Critical Raw Materials Act*, COM(2023)160 final.

²⁷ International Energy Agency, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, 2021.

risultano fortemente concentrate a livello geografico e soggette a rischi geopolitici, economici e ambientali. Questo vale non solo per rame e alluminio, ma anche per un ampio spettro di elementi critici impiegati nei sensori, nei semiconduttori e nei dispositivi di sicurezza hardware che costituiscono l'ossatura delle smart grid.

Tale approccio trova una declinazione concreta nel contesto italiano, dove la pianificazione della rete di trasmissione si sta progressivamente orientando verso modelli di sviluppo che privilegiano l'efficienza territoriale e la razionalizzazione delle connessioni. Le richieste di connessione alla rete elettrica nazionale da parte dei data center continuano a crescere a ritmi eccezionali. Dopo aver raggiunto circa 30 GW a fine 2024, le richieste hanno superato i 50 GW nel corso del 2025 e risultano prossime ai 90 GW secondo le più recenti elaborazioni disponibili (maggio 2026), confermando il ruolo dei data center come nuovo driver della domanda elettrica e delle esigenze di sviluppo infrastrutturale della rete. Tale dinamica introduce una nuova forma di pressione sul territorio, non più legata esclusivamente alla generazione distribuita, ma anche alla concentrazione spaziale di grandi carichi elettrici. Per rispondere a questa sfida, stanno emergendo strumenti di pianificazione innovativi, quali l'individuazione di micro-zone e l'evoluzione delle procedure di connessione, finalizzati a concentrare la domanda in aree idonee dal punto di vista infrastrutturale e a ridurre la necessità di estensioni puntuali della rete.

In questo contesto, l'approccio *Hypergrid* assume anche una valenza di policy, oltre che tecnologica: l'obiettivo non è solo aumentare la capacità di trasporto, ma farlo minimizzando l'occupazione di suolo e gli impatti autorizzativi, attraverso il potenziamento degli asset esistenti, l'utilizzo di tecnologie ad alta capacità e una pianificazione integrata tra rete e domanda. Ne deriva un modello di sviluppo in cui l'efficienza infrastrutturale, la gestione delle connessioni e la sostenibilità territoriale diventano elementi centrali tanto quanto l'espansione fisica della rete.

In tale scenario, il supporto politico e regolatorio assume un ruolo determinante nel ridurre le vulnerabilità lungo l'intera catena del valore dei materiali critici, che comprende l'estrazione, il processamento del minerale, la produzione dei componenti, l'assemblaggio dei dispositivi e la gestione del fine vita. Le politiche pubbliche non possono limitarsi a incentivare l'espansione dell'offerta mineraria, ma devono promuovere un approccio integrato che combini sicurezza degli approvvigionamenti, competitività industriale e sostenibilità ambientale.

In questo senso, il Critical Raw Materials Act rappresenta un riferimento strategico di primaria importanza, in quanto riconosce esplicitamente la dimensione sistemica del problema e la necessità di rafforzare l'autonomia strategica europea nel campo delle materie prime. Tuttavia, il raggiungimento degli obiettivi fissati per il 2030 appare strettamente condizionato dalla capacità dell'UE di tradurre tali indirizzi in azioni concrete e coordinate, superando la frammentazione tra politiche energetiche, industriali, tecnologiche e di sicurezza delle infrastrutture critiche.

Senza un rafforzamento sistemico di queste dimensioni, il rischio è che la transizione energetica europea, pur tecnologicamente avanzata e ambiziosa dal punto di vista climatico, rimanga esposta a vulnerabilità materiali e geopolitiche difficilmente sostenibili

nel lungo periodo. In ultima analisi, la resilienza delle reti elettriche e delle smart grid non dipenderà solo dalla loro capacità di integrare fonti rinnovabili e garantire flessibilità operativa, ma anche dalla solidità delle catene di approvvigionamento che ne rendono possibile la realizzazione e l'evoluzione nel tempo.

CAPITOLO 2. SISTEMI DI ACCUMULO

a cura di Angelica Agosta, Giuseppe Bellussi, Pietro R. Rabassi

2.1 L'integrazione di rinnovabili e la necessità di uso massivo di batterie di accumulo

L'Europa ha la necessità di diversificare le proprie fonti energetiche al fine di ottimizzare le tre variabili dell'*energy trilemma*: sicurezza dell'approvvigionamento, competitività economica e sostenibilità ambientale. In questo contesto, negli ultimi anni, il mercato elettrico europeo sta attraversando una fase di transizione strutturale, dal lato sia della domanda sia dell'offerta.

Questa trasformazione è il risultato di eventi di grande portata. Le tensioni geopolitiche — dalla crisi energetica del 2022 (legata all'invasione dell'Ucraina da parte della Russia) alla recente crisi in Medio Oriente (chiusura dello stretto di Hormuz) — assieme alla presa di coscienza del cambiamento climatico hanno costretto l'Europa a ripensare profondamente il proprio sistema energetico. Da queste pressioni sono scaturite due risposte concrete: modificare le fonti energetiche che utilizziamo attraverso una modifica del mix di generazione elettrica e trasformare il modo in cui consumiamo l'energia, aumentando progressivamente l'elettrificazione.

I Paesi europei, come molti altri, hanno storicamente basato il proprio sistema elettrico sulla dipendenza dai combustibili fossili: prima il carbone, poi il gas naturale. Questa costruzione ha creato una dipendenza strutturale che oggi pone problemi dal punto di vista ambientale, economico e dell'approvvigionamento. È in questo contesto che, negli ultimi anni, l'Europa ha sviluppato le energie rinnovabili per ovviare a questo problema, diversificare le fonti e ridurre la propria dipendenza da fornitori non europei. I risultati sono tangibili: la quota di energia rinnovabile nel consumo europeo di elettricità ha superato il 50% nel 2025, rispetto al 33% del 2015 ([Wood Mackenzie](#)).

Parallelamente, anche la struttura della domanda di elettricità si sta evolvendo, trainata, tra gli altri fattori, dall'adozione di veicoli elettrici, dalla digitalizzazione, dall'aumento della presenza di data center, dall'elettrificazione dei processi industriali e dalla diffusione delle pompe di calore. Tuttavia, la crescita dei consumi elettrici nei principali mercati europei rimane contenuta, con l'Europa che non ha ancora recuperato i livelli pre-pandemia (Nel 2018, la domanda di elettricità in Europa era di 2.917,5 TWh, mentre nel 2025 era di soli

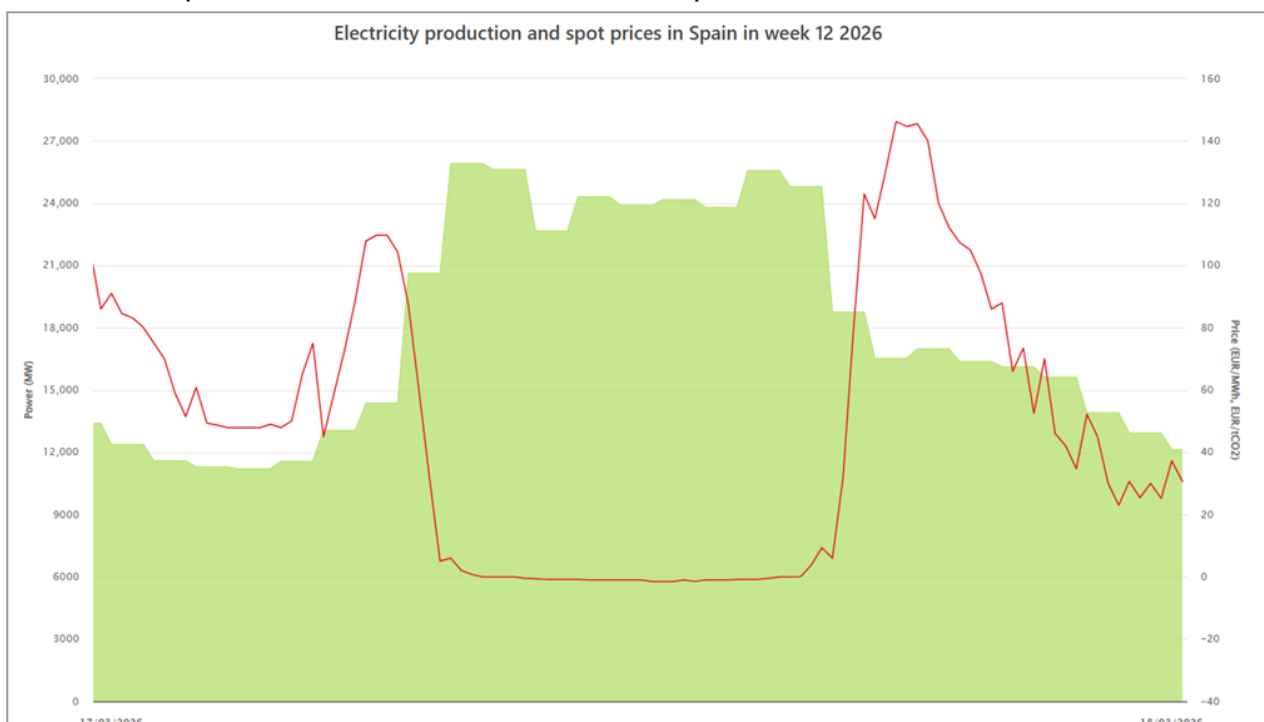
2.774,6 TWh, fonte, Ember 2026), nonostante l'Agenzia Internazionale dell'Energia abbia annunciato che nel 2025 è iniziata l'Era dell'Elettricità a livello mondiale.

Questo scenario genera un crescente disequilibrio tra domanda e offerta. Le energie rinnovabili sono per natura intermittenti e difficilmente modulabili: tendono a produrre nelle ore di minor consumo e tendono a non generare elettricità proprio durante i picchi di domanda. Ciò crea due sfide sistemiche:

- **Situazioni di surplus energetico**, di conseguenza, **con prezzi negativi in aumento**: i prezzi negativi si generano quando la produzione rinnovabile intermittente è fortemente concentrata nelle ore di bassa domanda e non può essere rapidamente ridotta o accumulata. Nel 2024, l'Europa ha registrato un record di ore con prezzi negativi dell'elettricità, passando dallo 0,2% delle ore totali nel 2022 al 3,4% nel 2024. Un fenomeno che mette a rischio la sostenibilità economica degli impianti rinnovabili.
- **Situazioni di insufficienza di fornitura con prezzi quindi elevati nelle ore di punta**: in assenza di sufficiente generazione rinnovabile durante i picchi, il gas naturale (che attualmente è la fonte con il costo di generazione elettrica più elevato) rimane la fonte marginale di riferimento, mantenendo i prezzi elevati nelle fasce orarie in cui la domanda supera l'offerta.

Il sistema elettrico necessita dunque di un'elevata flessibilità: in sua assenza, gli squilibri tra generazione e consumo si traducono in congestioni della rete, riduzioni forzate della produzione e inefficienze che compromettono tanto la stabilità del sistema quanto la redditività degli impianti.

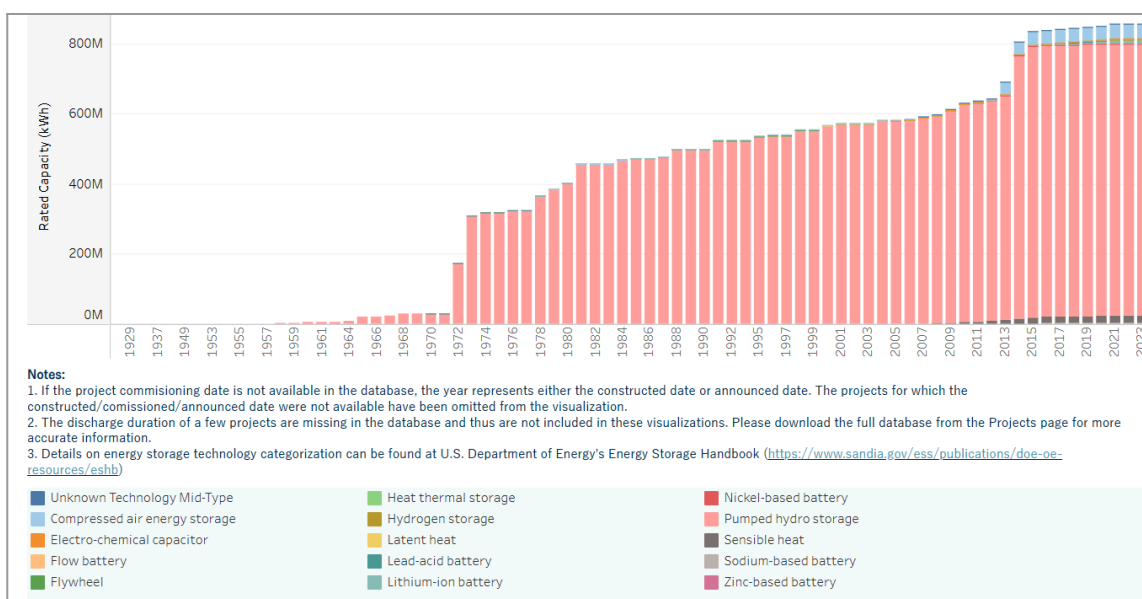
Tra le soluzioni disponibili, i sistemi di accumulo a batteria (BESS) occupano un ruolo centrale e sempre più strutturale. La loro funzione va ben oltre il semplice "spostare energia nel tempo": immagazzinando l'eccesso di produzione durante i picchi in cui l'offerta supera la domanda e reimmettendola in rete nei momenti di maggiore domanda, i BESS contribuiscono alla regolazione della frequenza, alla gestione della tensione, alla riduzione dei picchi di carico e alla resilienza complessiva del sistema.



2.1.1 Crescita attesa della capacità di accumulo

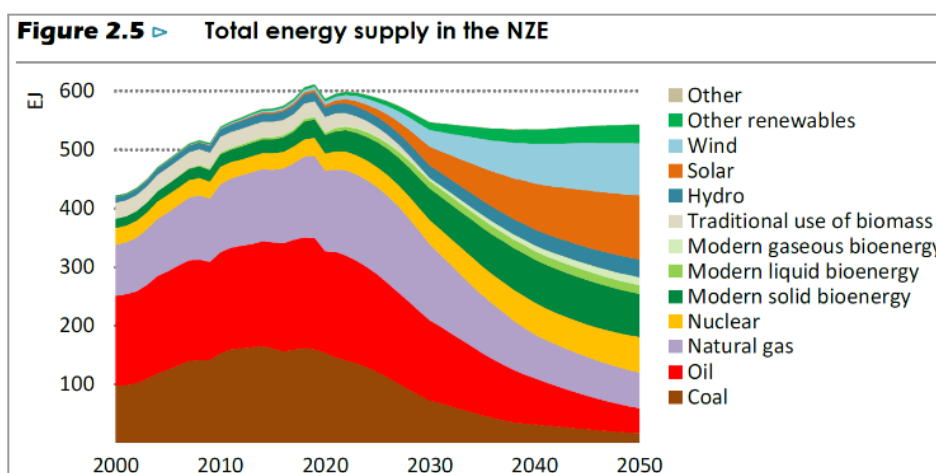
Come precisato nel paragrafo precedente, la produzione di energia elettrica da solare fotovoltaico ed eolico avviene in modo discontinuo; per “stimare” questo fenomeno di discontinuità, prudentemente, le considerazioni che seguono si basano sull’assunzione che il loro contributo avvenga solo per 12 ore al giorno.

Per stimare la capacità di accumulo necessaria a mitigare i fenomeni di congestione della rete è stato fatto riferimento ai dati pubblicati sull’Energy Storage Database del US Department of Energy (<https://sandia.gov/ess-ssl/gesdb/public/statistics.html>).



Secondo questi dati, nel 2023 a livello mondiale risultavano installati sistemi di stoccaggio con una capacità pari a circa 0,81 TWh. Come si evince dal diagramma sopra riportato, la maggior parte degli impianti di stoccaggio erano realizzati con il “pumped hydro storage”, cioè il pompaggio a monte delle acque degli impianti idroelettrici.

Per comprendere quale potrà essere la richiesta di stoccaggio energetico in un sistema sostenibile di produzione di energia, possiamo fare ancora riferimento a dati pubblicati dalla IEA, iniziando con il prendere a riferimento quanto riportato nel grafico che segue (<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>):



Altro riferimento è quanto riportato nel rapporto NetZero By 2050 della IEA (<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>) in merito al contributo delle energie rinnovabili discontinue (Solare ed Eolico) al 2050, che risulta pari a 203,3 EJ corrispondenti a $5,6 \cdot 10^4$ TWh.

Supponendo che il fabbisogno di stoccaggio sia pari al 50% di tale contributo, ne deriva un fabbisogno di stoccaggio pari a $2,8 \cdot 10^4$ TWh.

Quindi tra il 2023 e il 2050 la capacità di accumulo dovrà incrementarsi da 0,81 TWh a $2,8 \cdot 10^4$ TWh.

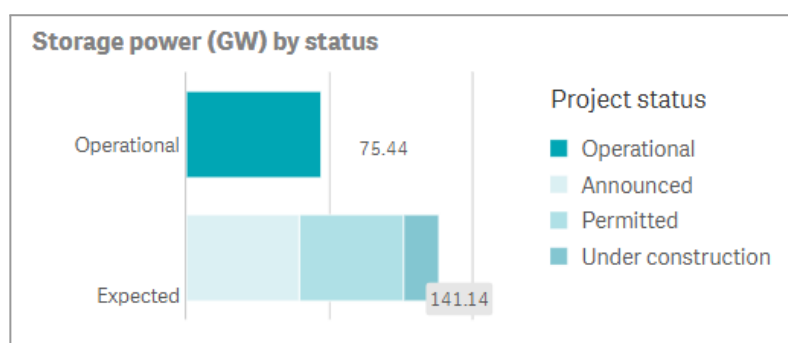
È evidente che questo massiccio incremento di capacità di stoccaggio non potrà più essere principalmente soddisfatto dal pompaggio a monte delle acque degli impianti idroelettrici ma dovrà avvalersi di altri mezzi, tra i quali potrà essere predominante l'utilizzo di batterie elettriche.

L'analisi sino a qui condotta è relativa al fabbisogno di capacità di accumulo espressa in termini di energia (TWh), ovvero alla quantità di energia che si prevede dovrà essere complessivamente immagazzinata.

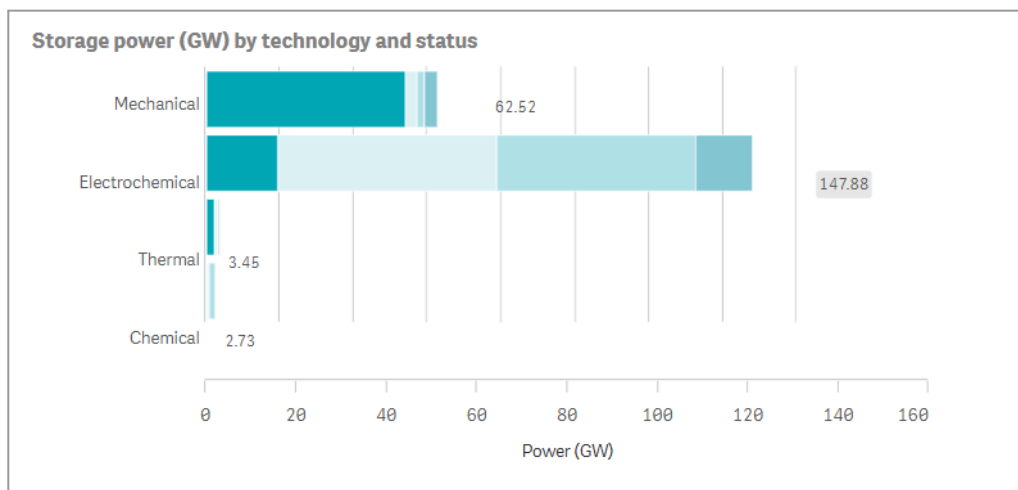
Una seconda dimensione della capacità di stoccaggio è quella espressa in termini di potenza (GW), ovvero la dimensione che “quantifica” la rapidità con cui l'energia può essere accumulata o rilasciata. Il rapporto tra energia immagazzinata e potenza installata determina la “durata” del sistema di accumulo, parametro essenziale per definire quali servizi di rete il sistema può fornire.

A parità di energia accumulata, sistemi con potenza elevata offrono servizi di rete più rapidi e modulabili, mentre sistemi con potenza ridotta rilasciano la stessa energia in tempi più lunghi. Per questo motivo, nelle analisi di pianificazione viene fatta distinzione tra la capacità energetica (TWh), rilevante per coprire periodi prolungati di bassa produzione rinnovabile, e la potenza installata (GW), fondamentale per garantire flessibilità, regolazione e risposta dinamica della rete. La crescita della capacità di stoccaggio prevista al 2050 riguarda principalmente l'energia accumulabile, ma implica inevitabilmente anche un incremento della potenza installata, che deve essere dimensionata in funzione dei servizi richiesti dal sistema elettrico.

Al fine di dare evidenza dell'incremento della capacità di accumulo attesa nel breve periodo in termini di potenza, si evidenzia che il data base European Energy Storage Inventory organizzato e gestito dal Centro di Ricerca Congiunta (JRC) dell'Unione Europea (<https://ses.jrc.ec.europa.eu/storage-inventory>) mostra che, al 10/04/2026, risultano già autorizzati e in fase di costruzione sistemi di stoccaggio per una capacità quasi uguale a quella dei sistemi di accumulo già in esercizio:



Per quanto riguarda la tecnologia, dal data base European Energy Storage Inventory si evince la prevalenza dei sistemi di accumulo elettrolitici per i quali è prevista una crescita nel breve periodo, in termini di potenza, pari a circa 7,5 volte rispetto a quella attualmente in esercizio con una netta inversione di tendenza rispetto all'utilizzo dei pompaggi meccanici:



2.1.2 L'emergere delle batterie elettrochimiche come tecnologia dominante

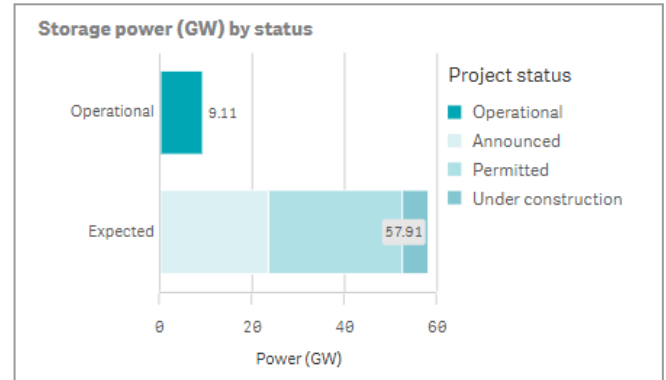
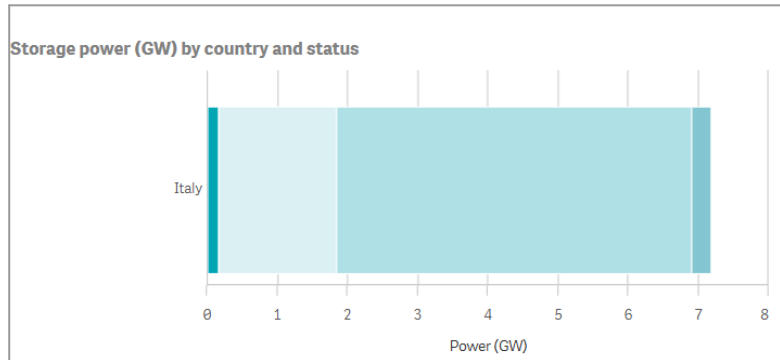
Le batterie al litio sono emerse come tecnologia dominante perché combinano, in un unico sistema elettrochimico, tre proprietà difficilmente ottenibili insieme: elevata densità energetica, alta efficienza di conversione e stabilità ciclica.

Il punto di partenza è la natura dello ione Li^+ , che possiede il più piccolo raggio ionico tra i cationi metallici e una massa molto bassa. Questo conferisce al litio una mobilità ionica superiore negli elettroliti organici, riducendo la resistenza interna della cella e permettendo sia alte potenze sia tempi di carica e scarica più rapidi. Inoltre, il litio, grazie alle sue caratteristiche chimico-fisiche consente di realizzare batterie con densità energetiche nettamente superiori rispetto ad altre, mantenendo al contempo un buon equilibrio tra sicurezza, costo e durata.

Questa convergenza di fattori rende il litio la soluzione elettrochimica più interessante per applicazioni che vanno dall'elettronica portatile ai veicoli elettrici fino ai sistemi di accumulo stazionario.

Guardando all'Europa, il data base European Energy Storage Inventory (<https://ses.jrc.ec.europa.eu/storage-inventory>) mostra che, al 10/04/2026, risultano già autorizzati e in fase di costruzione sistemi di stoccaggio elettrolitici al litio per una capacità, in termini di potenza, di 5 volte superiore rispetto a quella dei sistemi di accumulo già in esercizio (grafico a destra).

Focalizzando l'attenzione sull'Italia, il medesimo data base mostra che risultano già autorizzati e in fase di costruzione sistemi di stoccaggio elettrolitici al litio per una capacità, in termini di potenza, di 7 volte superiore rispetto a quella dei sistemi di accumulo già in esercizio (grafico a sinistra).



2.2 Dipendenza da materie prime critiche e rischio di approvvigionamento

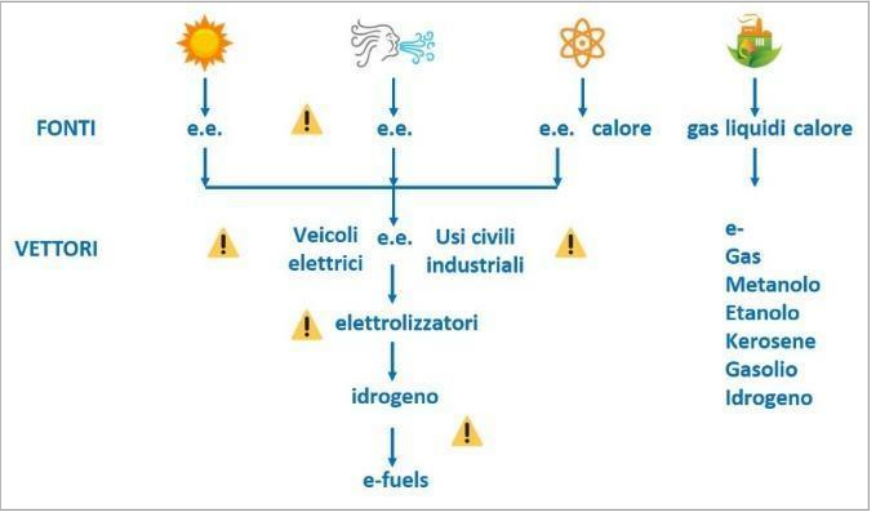
La diffusione delle fonti rinnovabili, unitamente alla capacità di accumulo ad essa connessa, soprattutto in visione prospettica, ha evidenziato la criticità di dipendenza da alcune materie necessarie; criticità sostanzialmente riconducibile alla loro disponibilità e al controllo che poche Nazioni possono esercitare su questa disponibilità.

Per risultare proattiva rispetto a tale criticità, l'Unione Europea ha definito un regolamento europeo, il Critical Raw Materials Act (CRMA - Regolamento UE 2024/1252), in vigore dal 2024, che mira a garantire un approvvigionamento sicuro, diversificato, sostenibile e a prezzi accessibili di materie prime critiche (come litio, terre rare, cobalto). Il CRMA è fondamentale per ridurre la dipendenza strategica dell'UE da singoli paesi terzi (es. Cina) e supportare in sicurezza la transizione ecologica e digitale.

Nello specifico, il CRMA individua 34 materie prime critiche. Di queste, 17 sono considerate strategiche perché ritenute importanti per le transizioni verdi e digitali, nonché per l'industria della difesa e dello spazio. In questo capitolo concentreremo l'attenzione su quelle che interessano il mondo dell'energia, con particolare focus sulla situazione italiana.

2.2.1 Le materie prime critiche che influenzano la transizione verde

Per definire quali sono gli snodi tecnologici che possono richiedere CRMA e quali sono i CRMA di maggiore interesse, si è fatto riferimento allo schema riportato di seguito (G. Bellussi, La Chimica e l'Industria [ANNO IX] N° 4, Luglio/Agosto 2025):



Iniziamo concentrando l'attenzione sulle batterie elettriche più utilizzate sino ad oggi: batterie al piombo in ambiente acido per acido solforico. Questa soluzione deriva dal fatto che la conducibilità ionica in un mezzo dipende fortemente dallo ione che trasporta la carica e quanto minore è il suo raggio ionico tanto maggiore è la sua mobilità. Lo ione con il raggio ionico più piccolo è H^+ , che è il trasportatore di carica nelle batterie al piombo. Lo ione litio è il più piccolo dopo l'idrogeno e per questo è stato scelto per le nuove batterie elettriche.

Per capire meglio lo stato dell'arte in questo settore, possiamo ricorrere alla tabella seguente:

Tipo	NiCd	NiMH	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_2O)	KOH (30% in H_2O)	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

Le batterie NiCd sono state proibite in Europa a causa della pericolosità del cadmio per la salute umana, oggi sono in vigore deroghe straordinarie per la loro applicazione in ambito aeronautico e della sicurezza industriale.

Per le altre tipologie di batterie nella tabella sono indicate le rispettive tipologie di applicazione.

Riguardo all'utilizzo di materiali critici, le più efficienti sono le batterie al litio-ferro-fosfato che non contengono metalli particolarmente critici quali cobalto o nichel. Queste sono già utilizzate per l'accumulo energetico e per il trasporto pesante. L'aggiunta di piccole quantità di metalli come il manganese, ne migliora le proprietà anche per applicazioni nel trasporto passeggeri.

Guardando ai sistemi di produzione di energia da fonte rinnovabile, nel caso delle biomasse, i principali materiali critici impiegati sono i componenti dei catalizzatori.

Per quanto riguarda invece il solare fotovoltaico, i principali materiali usati per questa tecnologia sono rame e silicio FV grade, a cui si possono aggiungere in quantità molto minori argento, indio, cadmio, selenio, tellurio e germanio. La composizione media dei materiali è 41.2 % Cu, 58 % Si, 0.8 % altro (<https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>).

Infine, guardando all'eolico si evidenzia che gli aerogeneratori, si avvalgono dell'utilizzo di magneti permanenti, magneti che sono utilizzati anche per altre applicazioni industriali e civili. Le principali materie prime critiche per queste tecnologie sono: per l'offshore wind 15.38 t/MW di metalli di cui: 8 Cu, 0.22 Ni, 0.76 Mn, 0.54 Cr, 0.1 Mo, 5.49 Zn, 0.27 RE; per l'onshore wind 10.16 t/MW di metalli di cui: 2.88 Cu, 0.39 Ni, 0.73 Mn, 0.51 Cr, 0.11 Mo, 5.51 Zn, 0.03 RE (<https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>).

Per completare la sintesi sulle materie prime critiche, si citano anche gli elettrolizzatori da impiegare per la produzione di idrogeno mediante elettrolisi dell'acqua e i catalizzatori eterogenei necessari per la produzione di vettori energetici liquidi per la trasformazione di biomasse o per la reazione tra idrogeno e CO₂ (e-fuels).

Sintetizzando quanto analizzato, le materie prime critiche che impattano sugli snodi evidenziati nello schema sono 10: litio, vanadio, manganese, cobalto, nichel, rame, molibdeno, RE (terre rare), silicio e grafite con il fosforo che potrebbe diventare l'undicesima a seguito di nuove evoluzioni tecnologiche.

2.2.2 *Rischio di approvvigionamento*

Dal punto di vista della sicurezza di approvvigionamento delle materie critiche individuate nel paragrafo precedente, si evidenzia come l'Europa, e nello specifico ancor di più l'Italia,

non risulti indipendente sia sotto il profilo della loro disponibilità che dal punto di vista della loro estrazione e della successiva fase di raffinazione.

Tuttavia, con particolare riferimento alle materie critiche impiegate nelle batterie LiFeP, interessate da un maggiore sviluppo e diffusione, non essendo presenti cobalto e nichel (tra le materie più critiche in assoluto), l'unica criticità è riferita all'approvvigionamento del litio.

Il litio, pur non essendo un elemento raro in senso geologico, perché è relativamente diffuso nella crosta terrestre, presenta la criticità che solo una piccola parte delle risorse è presente in giacimenti economicamente sfruttabili e questi giacimenti sono concentrati in poche aree.

Inoltre, solo pochissimi Stati sono dotati di impianti di raffinazione, tra i quali la Cina che domina la filiera con una percentuale di capacità di raffinazione tra il 70%-80%. Questo significa che anche quando il litio è estratto altrove, deve comunque transitare dagli impianti cinesi per diventare un materiale utilizzabile dall'industria delle batterie.

Il continente che possiede una capacità di raffinazione interessante (comunque di gran lunga inferiore a quella della Cina) è l'Australia che si attesta a valori tra il 10% e il 15%. Tuttavia, l'Australia ha avviato una strategia di non esportazione per ridurre il proprio rischio di approvvigionamento.

In Europa i giacimenti con estrazione attiva di litio sono limitatissimi e la capacità di raffinazione è presente solo in Finlandia con una limitatissima capacità di produzione.

La ricerca si sta orientando nella direzione di ridurre l'utilizzo di materiali critici e al riguardo si citano le ricerche nel settore degli accumuli, ad esempio, delle batterie al sodio (che comunque ha un raggio ionico maggiore di quello del litio), delle batterie allo stato solido o delle batterie a flusso. Tuttavia, in attesa che la ricerca produca i risultati attesi il rischio di approvvigionamento sussiste.

2.3 Sistemi di accumulo termico

I sistemi di accumulo termico, sia di tipo sensibile che di tipo latente, rappresentano una tecnologia matura e consolidata che può contribuire in modo significativo alla stabilizzazione del sistema energetico, riducendo al contempo la dipendenza da materie prime critiche. Sebbene storicamente considerati strumenti destinati esclusivamente allo stoccaggio di energia termica, tali sistemi possono svolgere un ruolo rilevante anche nella flessibilità del sistema elettrico, grazie alla loro capacità di assorbire energia elettrica (in via diretta o indiretta) nei momenti di surplus e di restituirla sotto forma di calore utile in momenti successivi.

Dal punto di vista fisico, gli accumuli termici presentano elevata stabilità, perdite contenute e possibilità di operare in un ampio intervallo di temperature (da 40°C a 1000°C a seconda

della tecnologia). L'utilizzo di materiali abbondanti come sabbia silicea, sali fusi, materiali ceramici o a cambiamento di fase (*Phase Change Materials* – PCM) consente di evitare completamente l'impiego di litio, nichel, cobalto, grafite o terre rare, rendendo questi sistemi particolarmente interessanti in un contesto di crescente pressione sulle filiere critiche.

2.3.1 *Tecnologie e applicazioni degli accumuli termici*

Gli accumuli termici citati nel paragrafo precedente, si basano sulla capacità di taluni materiali, abbondanti in natura e non critici, di immagazzinare energia sotto forma di calore sensibile o calore latente. Le principali tecnologie oggi disponibili sono le seguenti:

Accumuli sensibili: gli accumuli c.d. sensibili sfruttano la capacità termica di materiali granulari come sabbia silicea, materiali ceramici o roccia vulcanica, che possono essere riscaldati fino a 500–1000°C, di assorbire il calore generato da resistenze elettriche e di conservarlo per un tempo significativo e con perdite contenute. Questi sistemi sono particolarmente adatti per alimentare processi industriali ad alta temperatura (processi alimentari, essiccazione, metallurgia leggera).

Accumuli latenti o a cambiamento di fase (PCM): gli accumuli c.d. latenti sfruttano la capacità di specifici materiali (paraffine, acidi grassi, sali idrati o altre sostanze note come PCM) di immagazzinare energia termica sotto forma di calore latente di transizione di fase. A differenza degli accumuli sensibili, nei quali l'energia è immagazzinata per variazione di temperatura, nei PCM l'energia viene accumulata durante il passaggio di fase (da solido a liquido) a temperatura pressoché costante. In fase di carica, il fluido termovettore cede calore al PCM fino a raggiungere la temperatura di transizione; a quel punto il materiale inizia a fondere, assorbendo una quantità significativa di energia senza ulteriori aumenti di temperatura. In fase di scarica, il fluido da riscaldare induce la solidificazione del PCM; il materiale rilascia il calore latente precedentemente immagazzinato, nuovamente a temperatura quasi costante, garantendo un profilo termico stabile e controllato. La possibilità di selezionare PCM con temperature di transizione comprese tra 20°C e oltre 150°C rende questi sistemi adatti a molteplici applicazioni: climatizzazione, riscaldamento degli edifici, processi industriali a media temperatura.

2.3.2 *Contributo alla flessibilità di rete*

Il contributo degli accumuli termici alla flessibilità e stabilità della rete elettrica avviene attraverso due principali meccanismi:

- **Accumuli *electrical power to heat*:** possono essere alimentati da energia elettrica nei momenti di *over-generation* (tipicamente nelle ore diurne con elevata produzione fotovoltaica) convertendo l'energia elettrica in calore per effetto Joule (ovvero tramite resistenze elettriche). L'energia termica immagazzinata viene poi ceduta ai sistemi di teleriscaldamento nelle ore di maggiore fabbisogno (serali o

mattutine), o a processi industriali. Questo meccanismo consente di ridurre i picchi di produzione da fonte rinnovabile fotovoltaica perché consente di “spostare” i picchi di produzione nei momenti di maggiore richiesta.

- **Accumuli *heat to heat*:** accoppiati a pompe di calore, possono essere “caricati” durante le ore diurne, quando l’energia elettrica è abbondante e magari a basso costo, e rilasciare calore nelle ore di picco della domanda (durante le ore serali o mattutine). Oltre a favorire la gestione dei surplus fotovoltaici come avviene con i sistemi *electrical power to heat*, questa tipologia di accumuli consente di ridurre la potenza installata delle pompe di calore, diminuendo l’impatto sulla rete elettrica e migliorando la programmabilità dei carichi.

In Europa sono già presenti esempi applicativi che dimostrano l’efficacia degli accumuli termici come strumenti di flessibilità elettrica.

In Finlandia, il sistema di Polar Night Energy (a sabbia silicea riscaldata fino a 600°C) utilizza energia elettrica rinnovabile per accumulare calore (anche per diversi giorni) che viene poi rilasciato alla rete locale di teleriscaldamento. Nei Paesi Bassi e in Austria, sistemi basati su materiali ceramici e sabbia ad alta temperatura sono utilizzati per fornire calore di processo a 300–500°C in settori come essiccazione, pastorizzazione e trattamento termico, prodotto mediante l’utilizzo di energia elettrica rinnovabile nei momenti di surplus.

Il sistema ETES (Electro-Thermal Energy Storage) di Siemens Gamesa utilizza roccia vulcanica riscaldata fino a 750°C per immagazzinare calore prodotto da energia elettrica rinnovabile, per alimentare successivamente una turbina a vapore per la “rielettrificazione” dell’energia elettrica. Questo sistema fornisce un interessante contributo di “mitigazione” dei picchi di domanda e offerta che interessano la rete elettrica.

Questi esempi mostrano come l’accumulo termico, pur non restituendo energia elettrica in modo diretto come le batterie, possa svolgere un ruolo complementare e scientificamente fondato nella gestione della flessibilità. La sua integrazione in una pianificazione energetica multi-tecnologica consente di ridurre la necessità di sovradimensionare gli accumuli elettrochimici, migliorare l’autoconsumo locale, stabilizzare la rete e diminuire l’esposizione dell’Europa ai rischi di approvvigionamento delle materie prime critiche.

2.3.3 *Ruolo degli accumuli termici distribuiti*

La crescente penetrazione delle fonti rinnovabili non programmabili, anche per superare i temi legati alle materie prime critiche, richiede un cambio di paradigma, ovvero un approccio alla pianificazione energetica che superi la tradizionale distinzione tra vettori elettrici e vettori termici. Gli accumuli termici possono, infatti, assumere un ruolo strategico nella progettazione di sistemi energetici integrati, in cui diverse tecnologie di accumulo operano in modo coordinato per garantire stabilità, efficienza e sicurezza di

approvvigionamento, perché permettono di gestire in modo coordinato produzione rinnovabile, domanda elettrica e fabbisogni termici.

La loro particolare efficacia deriva dalla possibilità di essere installati vicino ai punti di consumo, dall'uso di materiali non critici e dalla capacità di modulare nel tempo l'assorbimento e il rilascio di energia, trasformando il calore in un vettore di flessibilità stabile e programmabile.

Attraverso i meccanismi illustrati nel paragrafo 2.3.2, nei contesti caratterizzati da fotovoltaico diffuso, l'accumulo termico distribuito svolge il ruolo di riallineamento tra produzione e consumo. Le pompe di calore possono funzionare quando l'energia elettrica prodotta da fotovoltaico è abbondante, caricando l'accumulo e riducendo la potenza richiesta nelle ore critiche di fabbisogno termico e assenza di produzione fotovoltaica. Questo assetto integrato contribuisce anche a stabilizzare la tensione nelle reti di bassa tensione, ridurre le correnti inverse verso la rete e migliorare l'autoconsumo locale.

Analogamente, in ambito industriale, gli accumuli permettono di convertire energia elettrica rinnovabile in calore di processo o vapore, riducendo l'uso di combustibili fossili e contribuendo alla decarbonizzazione dei settori a elevata intensità termica. La possibilità di immagazzinare calore a temperature elevate consente di svincolare la produzione di calore dai profili di disponibilità dell'energia elettrica, offrendo un ulteriore contributo alla flessibilità del sistema.

Nel complesso, l'integrazione degli accumuli termici nella pianificazione energetica consente di sviluppare un modello realmente multi-vettore, capace di sostenere l'elettrificazione dei consumi, valorizzare la generazione rinnovabile distribuita e ridurre la dipendenza da tecnologie basate su materie prime critiche. La loro diffusione rappresenta quindi una leva concreta per costruire un sistema energetico più stabile, resiliente e sostenibile.

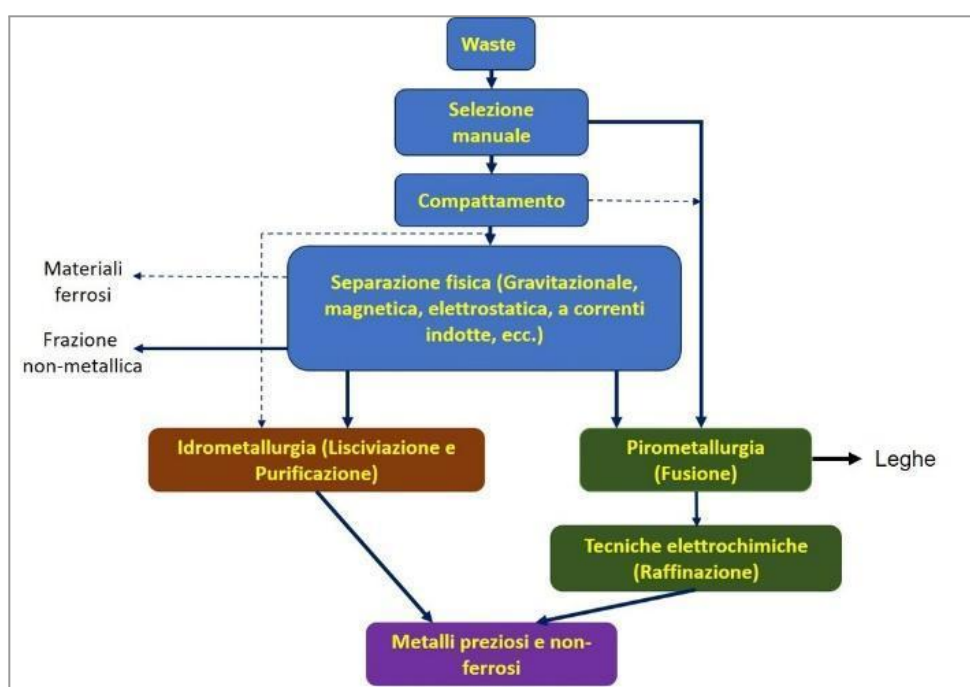
2.4 Strategie di diversificazione tecnologica e circolarità

Come illustrato nei paragrafi precedenti, l'Europa è povera di metalli critici: non dispone di giacimenti estrattivi in esercizio né di impianti di raffinazione in grado di soddisfare la domanda attuale e, ancor meno, quella attesa nei prossimi decenni.

La crescente domanda di sistemi di accumulo elettrico e tecnologie per la transizione energetica rende quindi indispensabile adottare strategie che riducano la pressione sulle filiere critiche, migliorino la resilienza del sistema e rafforzino l'autonomia strategica. In questo scenario, diventano fondamentali due direttrici: ridurre la dipendenza attraverso l'innovazione e la diversificazione tecnologica e massimizzare il recupero dei materiali critici attraverso modelli circolari.

2.4.1 Circolarità e recupero

Il riciclo delle materie prime critiche rappresenta una leva fondamentale per ridurre la dipendenza dalle importazioni di materie critiche, ma le operazioni di recupero sono onerose sia per motivi economici che di impatto ambientale. Senza entrare troppo nei dettagli tecnici, nello schema a destra sono state sintetizzate le operazioni necessarie per il recupero dei materiali critici per dare evidenza della numerosità e della complessità delle operazioni necessarie.



Tra i fattori che maggiormente incidono sulla attuabilità e la profittabilità del recupero ci sono la composizione degli scarti e il volume disponibile, il tipo di tecnologia da impiegare, la logistica di raccolta dei materiali esauriti e i pretrattamenti necessari, il valore di mercato dei materiali recuperati, il contesto normativo, gli investimenti e i costi operativi necessari, i fattori di scala e l'integrazione delle filiere, la maturità tecnologica e le prospettive delle tecnologie disponibili in termini di R&D, il design del prodotto in funzione del recupero (ad esempio per i pannelli fotovoltaici e per le batterie al litio).

Nonostante le difficoltà, l'Europa sta sviluppando una rete crescente di impianti di riciclo avanzato, con alcuni esempi particolarmente significativi. Tuttavia, la filiera del riciclo è ancora insufficiente rispetto alla domanda prevista.

2.4.2 Diversificazione tecnologica

La diversificazione tecnologica rappresenta una seconda direttrice fondamentale per ridurre la dipendenza da materie prime critiche. Essa si articola lungo due assi

complementari: l'evoluzione delle batterie elettrochimiche e l'integrazione degli accumuli termici.

Le batterie al litio-ferro-fosfato (LFP) costituiscono una delle soluzioni più promettenti per ridurre l'uso di materiali critici, poiché non richiedono cobalto né nichel. La loro diffusione è già significativa nei sistemi di accumulo stazionario e nel trasporto pesante, e ulteriori miglioramenti (ad esempio, LFP-Mn) ne stanno ampliando l'impiego anche nel trasporto passeggeri. Parallelamente, tecnologie alternative come le batterie al sodio, le batterie allo stato solido o le batterie a flusso redox stanno emergendo come soluzioni potenzialmente competitive per applicazioni stazionarie, grazie all'uso di materiali abbondanti e facilmente reperibili.

Accanto alle batterie, gli accumuli termici rappresentano una tecnologia strategica per ridurre la pressione sulle filiere critiche. Utilizzano materiali comuni (sabbia, sali fusi, materiali ceramici, PCM) e possono fornire servizi di flessibilità alla rete elettrica come illustrato nel paragrafo 2.3.

2.4.3 *Raccomandazioni*

Dall'analisi emergono alcune raccomandazioni chiave per rafforzare l'autonomia strategica europea:

- Potenziare la filiera del riciclo, sviluppando tecnologie più efficienti e ampliando la capacità industriale.
- Promuovere batterie a basso contenuto di materiali critici, in particolare LFP e tecnologie emergenti come sodio-ione e sistemi a flusso.
- Integrare gli accumuli termici nei piani di flessibilità, riconoscendone il ruolo nella stabilizzazione della rete e nella riduzione della domanda elettrica di picco.
- Sostenere progetti dimostrativi e industriali basati su accumuli a sabbia, sali fusi e PCM, soprattutto nei distretti industriali e nelle aree ad alta penetrazione di rinnovabili.
- Incentivare la progettazione multi-vettore nei nuovi insediamenti e nelle comunità energetiche, includendo accumuli termici distribuiti.
- Investire nella ricerca su materiali termici avanzati e sistemi ad alta temperatura per processi industriali hard-to-abate.
- Integrare gli accumuli termici nei mercati della flessibilità, riconoscendo il valore dei servizi di *peak-shaving*, *load-shifting* e assorbimento dei surplus rinnovabili.

CAPITOLO 3. PRODUZIONE LOCALE VS. DIPENDENZA GLOBALE

a cura di Tommaso Ferrucci, Sofia Nunzi, Renato di Belardino

La transizione energetica europea contiene una tensione strutturale: da un lato, il sistema energetico si sta facendo più distribuito, territoriale e partecipativo; dall'altro, molte delle tecnologie che rendono possibile questa trasformazione dipendono da catene del valore globali, concentrate in pochi Paesi e in pochi segmenti industriali ad alta intensità di capitale e conoscenza. Il tema della produzione locale, quindi, non può essere letto come semplice rilocalizzazione dell'assemblaggio finale, ma come capacità di presidiare i nodi strategici della filiera: materie prime critiche, raffinazione, componenti avanzati, sistemi di accumulo, elettronica di potenza, semiconduttori, infrastrutture digitali e competenze industriali. In questa prospettiva, questo capitolo ricostruisce il passaggio dal paradigma dell'efficienza globale a quello della resilienza, analizza la centralizzazione industriale delle tecnologie energetiche e propone la necessità di un piano industriale europeo selettivo per ridurre le vulnerabilità più critiche senza chiudere l'Europa ai mercati globali.

3.1 Il paradigma dell'Industria 5.0 spinge per una decentralizzazione produttiva e per la resilienza

Per oltre trent'anni, l'organizzazione della produzione industriale è stata guidata soprattutto dalla massimizzazione dell'efficienza: produrre dove i costi erano più bassi, frammentare le filiere su scala globale, ridurre le scorte, specializzare territori e imprese in singole fasi del processo produttivo. Questo modello ha sostenuto la riduzione dei costi e l'espansione del commercio internazionale, ma ha anche generato dipendenze profonde e spesso poco visibili. La crisi pandemica, le tensioni geopolitiche, l'aumento dei costi energetici e le interruzioni logistiche hanno mostrato che un sistema molto efficiente può diventare fragile quando viene sottoposto a shock esterni.

In questo contesto, il paradigma dell'Industria 5.0 assume un significato politico e industriale più ampio rispetto alla sola evoluzione tecnologica dell'Industria 4.0. La Commissione europea descrive l'Industria 5.0 come un approccio che mette ricerca e innovazione al servizio di un'industria sostenibile, centrata sulla persona e resiliente.¹ L'obiettivo non è quindi automatizzare di più o produrre più velocemente, ma costruire sistemi produttivi capaci di reggere crisi, adattarsi a contesti mutevoli e contribuire alla stabilità economica e sociale dei territori.

Il passaggio è rilevante perché modifica il baricentro della politica industriale europea. La competitività non può essere misurata soltanto in termini di prezzo, produttività o capacità di esportazione, ma deve includere sicurezza degli approvvigionamenti, autonomia tecnologica, controllo delle competenze critiche e capacità di mantenere operative le infrastrutture essenziali. Dopo la pandemia, l'Unione europea ha aggiornato la propria strategia industriale ponendo maggiore attenzione alla resilienza del mercato unico, alla comprensione delle dipendenze strategiche e al concetto di autonomia strategica aperta.²

La resilienza, in questa prospettiva, non riguarda solo il settore energetico. L'energia è certamente uno degli ambiti più esposti, perché condiziona l'intero sistema economico, ma la resilienza industriale comprende anche infrastrutture fisiche, capacità manifatturiere, competenze tecniche, logistica, cybersicurezza, servizi digitali e sistemi di controllo. Un sistema energetico decarbonizzato non può funzionare senza reti elettriche intelligenti, sistemi di accumulo, inverter, sensori, piattaforme di gestione, data center, software, componentistica elettronica e manutenzione specializzata.

In questo quadro, anche le comunità energetiche rappresentano un esempio concreto del passaggio da un modello energetico centralizzato a uno più distribuito e partecipativo. Cittadini, imprese, enti locali e altri soggetti del territorio possono organizzarsi per produrre, condividere e consumare energia rinnovabile, contribuendo non solo alla decarbonizzazione, ma anche alla sicurezza e alla resilienza locale del sistema energetico.³ Tuttavia, questa maggiore prossimità nell'uso dell'energia non elimina il problema della dipendenza tecnologica: anche i modelli energetici più distribuiti hanno bisogno di componenti, infrastrutture digitali e filiere industriali complesse.

La decentralizzazione produttiva non va quindi interpretata come un ritorno all'autarchia o come l'idea irrealistica di produrre tutto localmente. Significa piuttosto costruire un sistema meno esposto a colli di bottiglia concentrati in pochi Paesi, in poche imprese o in poche infrastrutture. Significa diversificare, introdurre ridondanze dove necessario, mantenere capacità industriali minime su tecnologie considerate critiche, rafforzare riparabilità e aggiornabilità degli impianti, e sviluppare competenze diffuse nei territori.

Nel settore energetico questa logica è particolarmente evidente. La transizione verso fonti rinnovabili, elettrificazione dei consumi e maggiore efficienza richiede un'infrastruttura più distribuita rispetto al passato: non più soltanto grandi centrali che immettono energia in una rete passiva, ma milioni di punti di produzione, consumo, accumulo e gestione intelligente. Impianti fotovoltaici, comunità energetiche, pompe di calore, veicoli elettrici, batterie, sistemi di *demand response*, microreti e piattaforme digitali diventano elementi ordinari del sistema energetico.

Le smart grid assumono quindi un ruolo abilitante: consentono di integrare risorse distribuite, gestire flussi bidirezionali, prevenire congestioni, migliorare la flessibilità complessiva del sistema elettrico e rendere più efficiente l'utilizzo delle infrastrutture esistenti.⁴ Accanto alle reti intelligenti, diventano strategiche anche le tecnologie di generazione e accumulo, come fotovoltaico, eolico, batterie, elettrolizzatori, pompe di calore, tecnologie per l'idrogeno, sistemi di controllo e conversione di potenza.

Il punto centrale, tuttavia, è che la decentralizzazione dell'uso dell'energia non coincide automaticamente con la decentralizzazione della produzione industriale delle tecnologie che la rendono possibile. Un territorio può installare impianti rinnovabili, sviluppare comunità energetiche e digitalizzare la rete, ma restare dipendente da filiere globali per pannelli, batterie, semiconduttori, inverter, componenti elettronici e materie prime raffinate. Qui emerge la tensione di fondo del capitolo: mentre il modello energetico europeo diventa sempre più locale, flessibile e partecipativo, molte delle tecnologie necessarie restano prodotte attraverso catene del valore globali, concentrate e difficili da sostituire.

3.2 Le tecnologie energetiche necessarie restano centralizzate nella produzione di componentistica, spesso in Asia

La transizione energetica europea viene spesso descritta come un processo di diffusione territoriale di impianti, reti intelligenti, sistemi di accumulo e tecnologie digitali. Dal punto di vista industriale, però, il baricentro economico resta collocato molto più a monte: non nell'installazione finale, ma nei segmenti della filiera che determinano costo industriale, tempi di fornitura, accesso ai materiali, qualità tecnologica e capacità di scala.

La catena del valore delle tecnologie energetiche può essere ricondotta a cinque passaggi principali: estrazione delle materie prime, raffinazione, trasformazione industriale, manifattura tecnologica e assemblaggio finale. I segmenti più strategici sono quelli intermedi e ad alta intensità di capitale e know-how: raffinazione, chimica dei materiali, celle elettrochimiche, elettronica di potenza, semiconduttori e magneti permanenti. È in questi nodi che si concentrano brevetti, economie di scala, integrazione verticale, capacità negoziale e margini industriali.

Il caso del fotovoltaico è esemplare. Secondo l'IEA, la Cina detiene oltre l'80% della capacità manifatturiera globale nelle principali fasi produttive dei pannelli solari, dal polisilicio ai lingotti, dai wafer alle celle fino ai moduli. Dal 2011, inoltre, Pechino ha investito oltre 50 miliardi di dollari in nuova capacità produttiva nel solare, circa dieci volte l'Europa, consolidando un vantaggio che non riguarda soltanto il prezzo finale, ma il presidio complessivo della filiera.⁵

Questa concentrazione si riflette direttamente sui costi. Il costo di produzione del fotovoltaico in Cina è sensibilmente inferiore rispetto all'Europa grazie alla scala produttiva, all'integrazione della supply chain e alla disponibilità locale di input intermedi. Uno schema analogo emerge nella filiera delle batterie: nel 2025 i battery pack cinesi risultavano circa il 35% meno costosi di quelli europei e il 30% meno costosi di quelli statunitensi, segnalando un vantaggio industriale ormai strutturale.⁶

Il tema non riguarda soltanto solare e batterie, ma l'intera filiera dei minerali critici. L'IEA evidenzia che la concentrazione geografica della raffinazione è aumentata nella maggior parte dei minerali strategici e che il processing resta spesso esposto a pochi hub industriali. In termini economici, questo significa dipendenza da fornitori esterni proprio nei passaggi che fissano il costo base, influenzano il capitale circolante industriale e aumentano il rischio di interruzioni in caso di shock geopolitici, restrizioni all'export o tensioni logistiche.⁷

Negli ultimi due decenni i segmenti a maggior valore aggiunto delle tecnologie energetiche si sono concentrati progressivamente in Asia, con una netta centralità della Cina e, in alcune filiere strategiche, di altri hub dell'Asia orientale. Questa leadership non dipende soltanto dalla disponibilità di materie prime, ma soprattutto dal controllo delle fasi industriali che determinano margini, vantaggio competitivo e capacità di orientare la supply chain.

La Cina rappresenta oggi il principale punto di riferimento in numerosi snodi industriali della transizione energetica. Secondo l'IEA, è il raffinatore dominante per 19 dei 20 minerali strategici analizzati, con una quota media di circa il 70% della capacità globale; in comparti come grafite e terre rare, le quote superano il 90%.⁷ Questo dato conferma che il vero baricentro industriale non coincide con l'estrazione, spesso distribuita tra più Paesi, ma con la capacità di trasformare i materiali in input utilizzabili nelle batterie, nelle reti, nell'elettronica e nelle tecnologie rinnovabili.

Lo stesso schema emerge nella filiera delle batterie. Una quota molto rilevante della produzione globale è localizzata in Cina, mentre diversi passaggi della catena manifatturiera restano concentrati nello stesso Paese o in altri poli asiatici. A ciò si aggiunge il ruolo di operatori cinesi, coreani e giapponesi nella produzione di celle agli ioni di litio. Questo assetto consente di combinare prossimità tra raffinazione e manifattura, tempi di risposta rapidi, integrazione verticale e una struttura dei costi difficilmente replicabile in Europa nel breve periodo.

Accanto alla Cina, altri poli asiatici mantengono un presidio decisivo nei semiconduttori e nell'elettronica avanzata. Taiwan continua a occupare una posizione dominante nella produzione *foundry*, con TSMC al 67,6% del mercato globale nel primo trimestre 2025 secondo TrendForce; Corea del Sud e Giappone conservano ruoli rilevanti nelle batterie, nei materiali e nella componentistica ad alta specializzazione.⁸ La centralità asiatica riguarda quindi l'intero ecosistema tecnologico necessario alla transizione, inclusi inverter, sensoristica, automazione industriale e infrastrutture digitali.

Il vantaggio asiatico non è soltanto quantitativo, ma sistemico. La concentrazione geografica ha favorito la formazione di ecosistemi industriali nei quali si combinano scala produttiva, politiche industriali coerenti, competenze specialistiche, integrazione verticale e tempi di investimento più rapidi. L'Europa, al contrario, ha mantenuto una maggiore focalizzazione sulle attività a valle, sull'integrazione impiantistica e sulla regolazione del mercato energetico, indebolendo progressivamente il presidio diretto di alcune componenti industriali decisive.

Per l'industria europea, la conseguenza è duplice: da un lato aumenta la dipendenza da fornitori esterni nei segmenti che determinano costo, disponibilità e tempi di consegna; dall'altro si trasferisce fuori dall'Unione una quota rilevante del valore aggiunto industriale. In presenza di restrizioni all'export, shock logistici, tensioni geopolitiche o politiche industriali aggressive da parte di economie extra-UE, il rischio non è soltanto un rallentamento della transizione energetica, ma anche un aumento strutturale dei costi e una riduzione del margine di autonomia strategica europea.

La sovranità industriale si gioca dunque sul controllo dei nodi strategici della filiera più che sull'assemblaggio finale. Assemblare il prodotto finale può generare presenza industriale e occupazione, ma non basta a garantire autonomia strategica né a proteggere l'economia europea da shock di costo, colli di bottiglia e dipendenze esterne. Il vero potere industriale si concentra nei passaggi che determinano prezzo, disponibilità, innovazione e tempi di fornitura.

Per l'Europa, la questione non è più soltanto installare più capacità rinnovabile o digitalizzare le reti, ma ricostruire capacità industriale nei passaggi a monte e intermedi. In caso contrario, il continente rischia di sostituire la storica dipendenza dagli idrocarburi con una nuova dipendenza tecnologico-industriale, più complessa da gestire perché incide contemporaneamente su costi di investimento, costi operativi, tempi di realizzazione e competitività manifatturiera.

Il rischio è già misurabile. Secondo l'IEA, uno shock duraturo nell'offerta di minerali per batterie potrebbe aumentare del 40-50% il prezzo medio globale dei battery pack; in uno scenario di forte tensione sulla grafite, l'incremento dei costi potrebbe arrivare intorno al 45%.⁹ La vulnerabilità dei nodi strategici della filiera si trasferisce quindi rapidamente sui costi finali della transizione, comprimendo margini, rallentando investimenti e aumentando l'esposizione industriale europea.

Il messaggio di fondo è che produzione locale e dipendenza globale non sono due fenomeni separati, ma le due facce della stessa trasformazione. I sistemi energetici possono diventare più distribuiti, partecipativi e territoriali; tuttavia, la loro sicurezza dipenderà dalla capacità europea di governare almeno una parte delle filiere tecnologiche che li abilitano. Per questo, la competitività europea si giocherà sempre più sulla capacità di costruire una presenza selettiva ma credibile nei segmenti ad alto valore aggiunto, dove si decide la reale tenuta industriale della transizione energetica.

3.3 Serve un piano industriale europeo per localizzare almeno parte della filiera delle tecnologie strategiche

La crescente dipendenza europea da filiere globali per la produzione di tecnologie energetiche strategiche rende necessario un piano industriale coordinato a livello europeo. L'obiettivo non è perseguire un'autarchia produttiva, né replicare integralmente in Europa ogni fase della catena del valore, ma costruire una autonomia strategica aperta: un modello capace di ridurre le vulnerabilità sistemiche senza rinunciare all'integrazione nei mercati globali e alle partnership internazionali.

Il rationale di una strategia industriale europea si fonda su tre esigenze interconnesse. La prima è la sicurezza dell'approvvigionamento: la forte concentrazione geografica delle attività di estrazione, raffinazione, trasformazione e manifattura espone l'Unione europea a rischi geopolitici, restrizioni commerciali e interruzioni della supply chain. La seconda è la competitività industriale: il controllo delle tecnologie chiave, tra cui batterie, semiconduttori, inverter, sistemi di accumulo, componenti di rete e piattaforme digitali, è determinante per mantenere una base produttiva avanzata in Europa. La terza riguarda la sostenibilità ambientale e sociale: una maggiore localizzazione o diversificazione della produzione consente un miglior controllo sugli standard ESG e una maggiore trasparenza lungo l'intero ciclo di vita dei prodotti.

In questo quadro, le politiche europee già esistenti costituiscono una base importante, ma richiedono maggiore integrazione. Il Net-Zero Industry Act mira a rafforzare la capacità manifatturiera europea delle tecnologie net-zero, con l'obiettivo che la capacità produttiva dell'Unione si avvicini o raggiunga almeno il 40% del fabbisogno annuo di deployment

entro il 2030.¹⁰ Il Critical Raw Materials Act, invece, punta a garantire un approvvigionamento sicuro e sostenibile di materie prime critiche e a ridurre la dipendenza da fornitori concentrati in singoli Paesi.¹¹ Questi strumenti vanno letti insieme alle politiche energetiche, digitali, commerciali e della concorrenza.

Il coordinamento tra strumenti regolatori e finanziari è decisivo. Le procedure autorizzative più rapide possono ridurre i tempi di realizzazione degli impianti produttivi; gli strumenti di investimento europei e nazionali possono sostenere ricerca, innovazione e scale-up industriale; gli aiuti di Stato, se ben mirati, possono colmare fallimenti di mercato in settori ad alta intensità di capitale; i progetti IPCEI possono favorire investimenti transfrontalieri in ambiti strategici, in particolare quando sono necessari ecosistemi industriali europei e non soltanto iniziative nazionali isolate.¹²

Accanto agli strumenti finanziari, anche procurement pubblico, standardizzazione e criteri di sostenibilità possono orientare la domanda verso tecnologie più resilienti, tracciabili e compatibili con gli obiettivi europei. La politica industriale non può infatti limitarsi a sostenere l'offerta: deve contribuire anche a creare mercati guida per tecnologie prodotte, assemblate, riparate o riciclate in Europa, favorendo economie di scala e riducendo il rischio per gli investitori privati. In questo senso, la domanda pubblica e regolata può diventare una leva di sviluppo industriale, non soltanto uno strumento amministrativo.

La definizione di un piano industriale efficace richiede tuttavia un approccio selettivo e realistico. Non tutte le fasi della filiera possono essere rilocalizzate in Europa in modo economicamente sostenibile, ambientalmente accettabile o temporalmente compatibile con gli obiettivi di decarbonizzazione. È quindi necessario identificare i segmenti su cui concentrare risorse e strumenti sulla base di criteri chiari: criticità per il sistema energetico, grado di concentrazione geografica, rischio di interruzione, tempi di implementazione, fabbisogni di capitale, disponibilità di competenze, potenziale di scalabilità e coerenza con gli obiettivi ambientali.

In termini operativi, la priorità dovrebbe andare ai nodi che generano maggiore valore strategico o che possono bloccare l'intero sistema in caso di crisi: raffinazione e trasformazione di alcune materie prime critiche, materiali attivi per batterie, componenti per accumulo, elettronica di potenza, inverter, semiconduttori per reti e automazione, sensori, sistemi di controllo, piattaforme digitali e tecnologie per la cybersicurezza delle infrastrutture energetiche. La localizzazione europea non deve necessariamente coprire il 100% del fabbisogno, ma deve essere sufficiente a ridurre la vulnerabilità sistemica e ad aumentare il potere negoziale dell'Unione.

Un ulteriore elemento riguarda il capitale umano. La rilocalizzazione industriale richiede non solo investimenti finanziari, ma anche competenze specializzate, capacità di innovazione, scuole tecniche, università, centri di ricerca, standard professionali e reti di imprese. L'approccio dell'Industria 5.0 offre un quadro coerente per integrare questi aspetti: la resilienza non si costruisce solo con impianti produttivi, ma anche con lavoratori qualificati, territori capaci di assorbire innovazione, filiere riparabili e aggiornabili, e sistemi produttivi in grado di adattarsi a shock tecnologici, economici e geopolitici.

La costruzione di una filiera europea delle tecnologie strategiche non implica una chiusura rispetto ai mercati globali. Al contrario, richiede una riorganizzazione più equilibrata delle interdipendenze: diversificare le fonti di approvvigionamento, rafforzare partnership con Paesi terzi affidabili, sostenere accordi commerciali coerenti con standard ambientali e sociali, sviluppare capacità interne nei segmenti critici e promuovere circolarità, recupero e riciclo dove economicamente e tecnicamente possibile. L'autonomia strategica aperta non coincide con l'autosufficienza, ma con la capacità di non essere bloccati da un singolo fornitore, un singolo Paese o un singolo collo di bottiglia.

In conclusione, un piano industriale europeo per le tecnologie energetiche strategiche rappresenta una priorità economica, geopolitica e sistemica. La sfida consiste nel trovare un equilibrio tra apertura e autonomia, efficienza e resilienza, mercato e politica industriale. Solo attraverso un approccio integrato, capace di combinare strumenti regolatori, finanziari, commerciali, industriali e formativi, l'Unione europea potrà sostenere la transizione energetica senza trasferire all'esterno una quota eccessiva del suo valore economico e della sua sicurezza strategica. La produzione locale, in questa prospettiva, non è un fine in sé, ma una condizione per rendere più solida, competitiva e governabile la transizione energetica europea.

Note bibliografiche

1. European Commission. (2021a). Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. Directorate-General for Research and Innovation.
2. European Commission. (2021b). Updating the 2020 Industrial Strategy: towards a stronger Single Market for Europe's recovery.
3. International Energy Agency. (n.d.). Energy communities in the EU. Policies Database.
4. European Commission, Joint Research Centre. (2024). Clean Energy Technology Observatory: Smart Grids in the European Union - 2024 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets.
5. International Energy Agency. (2022). Solar PV Global Supply Chains.
6. International Energy Agency. (2026). Global battery markets are growing strongly - and so are the supply risks.
7. International Energy Agency. (2025). Global Critical Minerals Outlook 2025.
8. Focus Taiwan / TrendForce. (2025). TSMC market share rises to 67.6% in Q1: TrendForce.
9. International Energy Agency. (2025). Global Critical Minerals Outlook 2025; International Energy Agency. (2024). Growing geopolitical tensions underscore the need for stronger action on critical minerals security.
10. European Commission. (2024). Net-Zero Industry Act.
11. European Commission. (n.d.). European Critical Raw Materials Act.
12. European Commission. (n.d.). Important Projects of Common European Interest (IPCEI).

Riferimenti bibliografici essenziali

- European Commission. (2021a). Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. Directorate-General for Research and Innovation. [Link](#)
- European Commission. (2021b). Updating the 2020 Industrial Strategy: towards a stronger Single Market for Europe's recovery. [Link](#)
- European Commission. (2024). Net-Zero Industry Act. [Link](#)
- European Commission. (n.d.). European Critical Raw Materials Act. [Link](#)
- European Commission. (n.d.). Important Projects of Common European Interest (IPCEI). [Link](#)
- European Commission, Joint Research Centre. (2024). Clean Energy Technology Observatory: Smart Grids in the European Union - 2024 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets. [Link](#)
- International Energy Agency. (2022). Solar PV Global Supply Chains. [Link](#)
- International Energy Agency. (2025). Global Critical Minerals Outlook 2025. [Link](#)
- International Energy Agency. (2026). Global battery markets are growing strongly - and so are the supply risks. [Link](#)
- International Energy Agency. (n.d.). Energy communities in the EU. [Link](#)
- Focus Taiwan / TrendForce. (2025). TSMC market share rises to 67.6% in Q1: TrendForce. [Link](#)

CAPITOLO 4. IL RUOLO DETERMINANTE DELLE MATERIE PRIME CRITICHE NELL'AMBITO DELLA MASSIMA DIFFUSIONE DELLE ENERGIE RINNOVABILI. ARCHITETTURA E LOGICA D'INTERVENTO DEL CONTESTO NORMATIVO EUROPEO E NAZIONALE

a cura di Lorenzo Piscitelli

4.1. Introduzione

La crescente domanda globale di materie prime critiche, alimentata non solo dal settore energetico ma anche dal comparto digitale e industriale, accentua le pressioni sulle catene del valore, imponendo interventi regolatori volti a rafforzare l'autonomia strategica, promuovere il riciclo e incentivare lo sviluppo di filiere interne.

Ne deriva un riposizionamento delle politiche pubbliche, sempre più orientate a integrare sicurezza energetica e sicurezza delle risorse, in una prospettiva sistemica che supera la tradizionale distinzione tra politica industriale ed energetica.

Parallelamente, tuttavia, la disponibilità materiale di tali risorse non è di per sé sufficiente a garantire il raggiungimento dei (particolarmente ambiziosi) obiettivi di decarbonizzazione prefissati a livello europeo in materia di energia e di clima e in base ai quali dovremmo raggiungere un sostanziale azzeramento delle emissioni nette entro il 2050.

È da tale prospettiva che emerge con crescente evidenza il ruolo delle materie prime critiche quale fattore abilitante, e al contempo potenziale vincolo, dello sviluppo delle tecnologie energetiche rinnovabili e delle reti necessarie alla loro integrazione.

Componenti essenziali per lo sviluppo di asset rinnovabili – quali litio, cobalto, terre rare e rame – risultano, infatti, caratterizzati da una forte concentrazione geografica delle fonti di approvvigionamento e da elevati rischi geopolitici e di mercato, rendendo la sicurezza delle forniture un tema centrale nell'agenda energetica europea e nazionale.

In buona sostanza, ad oggi l'UE dipende quasi totalmente dalle importazioni, e ciò la rende vulnerabile a significativi rischi di approvvigionamento²⁸.

Nell'ottica di ridurre la propria dipendenza dai Paesi terzi (su tutti la Cina) l'UE ha adottato il Regolamento 2024/1252, anche noto come *Critical Raw Materials Act* (il “**CRMA**” o il “**Regolamento**”), con cui è stato introdotto per la prima volta un quadro normativo comune europeo volto a garantire un accesso sicuro, sostenibile e resiliente alle materie prime considerate critiche.

²⁸ Sulla base delle informazioni tratte dalla Relazione Speciale della Corte dei Conti Europea 04/2026 “*Materie prime critiche per la transizione energetica – una politica non certo solida come una roccia*” l'UE acquista il 97% del magnesio dalla Cina; le terre rare pesanti, necessarie per i magneti permanenti usati nelle turbine eoliche e nei veicoli elettrici, vengono raffinate solo in Cina; il 63% del cobalto mondiale proviene dalla Repubblica Democratica del Congo, e il 60% di quest'ultimo è raffinato in Cina.

Nello specifico, il CRMA individua un elenco (soggetto a riesame periodico, al fine di tener conto dell'evoluzione tecnologica, industriale e geopolitica) di 34 materie prime critiche²⁹ e un sottoinsieme di 17 materie prime strategiche³⁰ (e.g., nichel, litio, magnesio, terre rare ecc.), caratterizzate da una domanda prevista in forte crescita, da processi produttivi complessi e da un rischio particolarmente elevato di interruzioni dell'approvvigionamento.

L'importanza strategica è determinata in base alla rilevanza di una materia prima sia per le transizioni verde e digitale sia per le applicazioni di difesa e aerospaziali, conformemente ai seguenti criteri: (a) la quantità di tecnologie strategiche che impiegano una materia prima come fattore produttivo; (b) la quantità di una materia prima necessaria per la fabbricazione di tecnologie strategiche rilevanti; (c) la domanda di tecnologie strategiche rilevanti prevista a livello mondiale.

Il Regolamento stabilisce obiettivi vincolanti al 2030, tra cui:

- o lo sviluppo di capacità interne di estrazione;
- o il potenziamento nella trasformazione interna delle materie prime critiche;
- o il rafforzamento del riciclo interno e dell'uso efficiente delle risorse;
- o la diversificazione delle fonti di approvvigionamento.

Il CRMA è stato recepito in ambito nazionale per effetto del Decreto Legge n. 84 del 25 giugno 2024, convertito, con modificazioni, dalla Legge n. 155 dell'8 agosto 2024 (il "**DL 84/2024**") e volto a definire - nelle more di una disciplina organica del settore - misure urgenti finalizzate all'attuazione di un sistema di governo per l'approvvigionamento sicuro e sostenibile delle materie prime critiche.

In particolare, il DL 84/2024 disciplina il riconoscimento dei progetti strategici di estrazione, trasformazione e riciclo di materie prime sul territorio nazionale, prevedendo tempi definiti per la relativa valutazione ed autorizzazione.

Quanto sopra, considerato che nel sottosuolo italiano sono presenti almeno 15 delle 34 materie prime critiche necessarie per la transizione energetica e 3000 siti da cui poter estrarre tali risorse, in particolare: litio, cobalto, barite, berillio, nichel e tungsteno, rame e zinco³¹.

²⁹ Cfr. Allegato II del CRMA, "a) antimonio; b) arsenico; c) bauxite/allumina/alluminio; d) barite; e) berillio; f) bismuto; g) boro; h) cobalto; i) carbon coke; j) rame; k) feldspato; l) fluorite; m) gallio; n) germanio; o) afnio; p) elio; q) elementi delle terre rare pesanti; r) elementi delle terre rare leggere; s) litio; t) magnesio; u) manganese; v) grafite; w) nichel - grado batteria; x) niobio; y) fosforite; z) fosforo; a-bis) metalli del gruppo del platino; a-ter) scandio; a-quater) silicio metallico; a-quinquies) stronzio; a-sexies) tantalio; a-septies) titanio metallico; a-octies) tungsteno; a-nonies) vanadio".

³⁰ Cfr. Allegato I del CRMA, "a) bauxite/allumina/alluminio; b) bismuto; c) boro — grado metallurgico; d) cobalto; e) rame; f) gallio; g) germanio; h) litio — grado batteria; i) magnesio metallico; j) manganese — grado batteria; k) grafite — grado batteria; l) nichel — grado batteria; m) metalli del gruppo del platino; n) elementi delle terre rare per magneti permanenti (Nd, Pr, Tb, Dy, Gd, Sm, e Ce); o) silicio metallico; p) titanio metallico; q) tungsteno".

³¹ Dato tratto dalla relazione illustrativa al DL 84/2024.

In tale contesto, il presente capitolo si propone di approfondire il ruolo determinante dei profili autorizzativi e regolatori correlati a vario titolo alla realizzazione e adeguamento delle infrastrutture energetiche europee e nazionali partendo dal contesto normativo in materia di ricerca, estrazione e riciclo di materie prime critiche sino alle principali e più recenti disposizioni volte a regolare la costruzione ed esercizio di impianti alimentati da fonti energetiche rinnovabili.

Il perimetro d'analisi è rappresentato, dunque, dall'intera "catena di montaggio" con l'obiettivo di soffermarsi sullo stato dell'arte, sulle prossime evoluzioni nonché sui principali nodi che occorre sciogliere ai fini del puntuale raggiungimento degli ambiziosi traguardi stabiliti a livello europeo e nazionale in termini di decarbonizzazione e sicurezza energetica.

4.2. Il quadro "a monte": la ricerca e l'estrazione di materie prime critiche

4.2.1 Il Critical Raw Materials Act

Il CRMA introduce un sistema normativo articolato che combina obiettivi quantitativi vincolanti con strumenti procedurali di semplificazione amministrativa, al fine di garantire un approvvigionamento sicuro, resiliente e sostenibile di materie prime critiche.

In tale prospettiva, un elemento centrale è rappresentato dai parametri di riferimento fissati per il 2030 che costituiscono il presupposto sostanziale dell'intero impianto regolatorio.

In particolare, il Regolamento mira a garantire che, entro il 2030, l'UE si avvicini o raggiunga i seguenti parametri di riferimento³²:

- (i) capacità estrattiva³³ idonea a coprire almeno il 10% del consumo annuo di materie prime strategiche dell'Unione;
- (ii) capacità di trasformazione³⁴ idonea a coprire almeno il 40% del consumo annuo di materie prime strategiche dell'Unione;
- (iii) capacità di riciclo³⁵ idonea a coprire almeno il 25% del consumo annuo di materie prime strategiche dell'Unione;

³² Cfr. Art. 5, Par. 1, CRMA.

³³ Ai sensi dell'art. 2, num. 4) del CRMA per "estrazione" si intende "l'estrazione di minerali di interesse economico, minerali e prodotti vegetali dalla loro fonte originaria come prodotto principale o sottoprodotto, compresa l'estrazione da mineralizzazioni nel sottosuolo, da minerali nell'acqua e sott'acqua, e dalle salamoie e dagli alberi".

³⁴ Ai sensi dell'art. 2, num. 8 del CRMA per "trasformazione" si intendono "tutti i processi fisici, chimici e biologici coinvolti nella trasformazione di una materia prima da minerali di interesse economico, minerali, prodotti vegetali o rifiuti in metalli puri, leghe o altre forme economicamente utilizzabili, compresi, l'arricchimento, la separazione, la fusione e la raffinazione, ad esclusione della lavorazione dei metalli e dell'ulteriore trasformazione in beni intermedi e finali".

³⁵ Ai sensi dell'art. 2, num. 10 del CRMA per "riciclaggio" si intende "qualsiasi operazione di recupero attraverso cui i materiali di rifiuto sono ritrattati per ottenere prodotti, materiali o sostanze da utilizzare per la loro funzione originaria o per altri fini. Include il ritrattamento di materiale organico ma non il recupero di energia né il ritrattamento per ottenere materiali da utilizzare quali combustibili o in operazioni di riempimento".

- (iv) diversificazione delle importazioni di materie prime strategiche al fine di garantire che nessun paese terzo copra più del 65% del consumo annuo dell'Unione di una determinata materia prima strategica.

Sul piano della qualità regolatoria, la Corte dei conti europea ha rilevato che tali parametri risultano privi di adeguata giustificazione pubblica, che non è esplicitato il nesso con gli obiettivi sulle fonti rinnovabili e che manca una metodologia per ponderare il contributo dei singoli materiali³⁶.

Ciò nondimeno, tali benchmark, pur non configurandosi formalmente come obblighi individuali per gli Stati membri, assumono una rilevanza normativa significativa, in quanto orientano l'azione amministrativa e, soprattutto, giustificano l'introduzione di regimi autorizzativi accelerati.

La disciplina dei procedimenti autorizzativi rappresenta, infatti, uno degli strumenti principali attraverso cui il regolamento mira a conseguire gli obiettivi indicati. Nel segno, la nozione di “procedura di rilascio delle autorizzazioni” viene definita in termini ampi, includendo tutte le autorizzazioni necessarie alla realizzazione e gestione dei progetti relativi alle materie prime critiche, quali licenze edilizie, autorizzazioni ambientali, autorizzazioni relative all'uso di sostanze chimiche e connessioni alle infrastrutture³⁷.

La procedura si estende dall'accertamento della completezza della domanda fino alla decisione finale (“decisione globale”), evidenziando la volontà di configurare un iter amministrativo unitario e coordinato; elemento qualificante di tale assetto è il principio del *one stop shop*, che si traduce nell'istituzione, da parte degli Stati membri, di un punto di contatto unico responsabile del coordinamento dell'intero procedimento autorizzativo³⁸.

Quanto sopra nell'ottica di superare la frammentazione delle competenze tra diverse autorità amministrative, concentrando in un'unica interfaccia istituzionale il rapporto con il promotore del progetto.

Tali procedimenti autorizzativi semplificati e coordinati si applicano con riguardo ai “progetti relativi alle materie prime critiche” definiti dal Regolamento in modo ampio come qualsiasi progetto operante nell'estrazione, trasformazione o riciclo di materie prime critiche.

In merito, il CRMA introduce, inoltre, la categoria dei “progetti di interesse strategico” i quali sono considerati di interesse pubblico prevalente e godono di iter autorizzativi particolarmente accelerati.

Più nel dettaglio, i termini massimi della procedura autorizzativa per tali progetti sono fissati in 27 mesi per i progetti estrattivi e 15 mesi per quelli di sola trasformazione o riciclo mentre per i progetti già in iter prima del riconoscimento o per espansioni di impianti già

³⁶ Cfr. Relazione Speciale della Corte dei Conti Europea 04/2026 “*Materie prime critiche per la transizione energetica – una politica non certo solida come una roccia*”.

³⁷ Per la relativa definizione di “*procedura di rilascio delle autorizzazioni*” si veda l'art. 2, num. 18 del CRMA.

³⁸ Cfr. Art. 9 del CRMA.

autorizzati, tali termini scendono rispettivamente a 24 e 12 mesi dalla data di riconoscimento³⁹.

Il riconoscimento dello status di “progetto di interesse strategico” è rimesso alla Commissione Europea su istanza del promotore e richiede la sussistenza di specifici criteri cumulativi; segnatamente i progetti in questione: (a) devono contribuire in modo significativo alla sicurezza dell’approvvigionamento dell’Unione di materie prime strategiche; (b) devono o dovranno essere (in tempi ragionevoli) caratterizzati da un certo grado di fattibilità tecnica ed avere una produzione stimata attendibile; (c) devono poter essere attuati secondo specifici standard di sostenibilità ambientale e sociale⁴⁰.

Con riguardo, inoltre, all’ambito territoriale, i progetti di interesse strategico situati nell’Unione devono apportare benefici transfrontalieri, mentre quelli localizzati in Paesi terzi — segnatamente mercati emergenti o in via di sviluppo — devono essere reciprocamente vantaggiosi e generare valore aggiunto nel Paese ospitante.

Nel complesso, il sistema delineato dal Regolamento evidenzia, quindi, una chiara evoluzione verso modelli amministrativi improntati alla centralizzazione funzionale, alla certezza dei tempi e all’integrazione tra politiche industriali e ambientali. In altri termini, le procedure autorizzative non sono più concepite e declinate come meri strumenti di controllo, ma come leve strategiche per il raggiungimento degli obiettivi di autonomia e resilienza nel settore dell’approvvigionamento delle materie prime critiche.

4.2.2. Il DL 84/2024

Nel solco delle direttrici tracciate dal CRMA, il legislatore italiano è intervenuto con il DL 84/2024, introducendo un primo quadro organico – seppur dichiaratamente transitorio – volto a rafforzare la sicurezza e la sostenibilità dell’approvvigionamento nazionale di materie prime critiche e strategiche.

Il provvedimento si colloca esplicitamente “nelle more di una disciplina organica del settore”, configurandosi dunque come intervento emergenziale ma al contempo strutturante, volto a dare attuazione a livello interno agli obiettivi del CRMA.

In particolare, esso mira a costruire un sistema di governance nazionale capace di sostenere lo sviluppo di progetti strategici lungo l’intera catena del valore (estrazione, trasformazione, riciclo), riducendo al contempo i rischi di approvvigionamento derivanti dalla forte dipendenza dall’estero.

³⁹ Cfr. Art. 10 del CRMA.

⁴⁰ Cfr. Art. 6 del CRMA.

4.2.2.1. Il punto unico di contatto e i profili autorizzativi

Uno degli elementi più rilevanti del decreto è rappresentato dalla ridefinizione dell'assetto delle competenze amministrative, con un marcato processo di centralizzazione in capo allo Stato.

In coerenza con quanto disposto dal CRMA, il modello delineato dal legislatore italiano si fonda sull'istituzione di un punto unico nazionale di contatto, distinto a seconda della fase della filiera (estrazione, trasformazione, riciclo), cui è attribuita la funzione di coordinamento dell'intero procedimento autorizzativo.

In particolare, per i progetti di estrazione e riciclo tale funzione è attribuita alla direzione competente del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica ("**MASE**"), mentre per le attività di trasformazione è coinvolta l'Unità di missione per l'attrazione degli investimenti presso il Ministero delle Imprese e del Made in Italy ("**MIMIT**").

Il punto unico di contatto opera come sportello procedimentale accentrato, ricevendo l'istanza, verificandone la completezza, coordinando l'acquisizione dei pareri delle amministrazioni coinvolte e interfacciandosi con il proponente.

In tale contesto, il relativo punto unico di contatto dovrebbe altresì verificare che siano rispettati i termini di durata massima dei procedimenti autorizzativi disposti dal DL 84/2024, pari a diciotto mesi per i progetti di estrazione e dieci mesi per i progetti di riciclo e trasformazione⁴¹.

Sempre con riferimento ai profili *permitting*, ulteriori elementi di semplificazione sono rappresentati dalle disposizioni in materia di attività di ricerca ed estrazione, in particolare:

- o tali attività sono considerate di pubblica utilità, indifferibili ed urgenti con la conseguenza che le aree interessate dai relativi lavori possono essere soggette ad esproprio ai sensi del DPR 327/2001;
- o per le attività di ricerca, laddove non eccedano la durata di due anni, non è richiesta la verifica di assoggettabilità a valutazione di impatto ambientale ("**VIA**") ai sensi degli art. 19 e ss. del D.Lgs 152/2006, con notevoli risparmi in termini di tempi e costi per i promotori delle relative iniziative.

4.2.2.2. Il programma nazionale di esplorazione

Un ulteriore asse portante del DL 84/2024 è rappresentato dall'introduzione di strumenti di pianificazione e conoscenza delle risorse minerarie, tra i quali assume particolare rilievo il Programma nazionale di esplorazione delle materie prime critiche⁴².

Ai sensi dell'art. 10, il programma è elaborato dall'ISPRA e si configura come uno strumento di pianificazione strategica volto a:

⁴¹ Cfr. Art. 3, 4 e 5 del DL 84/2024.

⁴² Cfr. Art. 10 del DL 84/2024.

- individuare le aree del territorio nazionale potenzialmente interessate dalla presenza di materie prime critiche;
- programmare le attività di esplorazione e indagine geologica;
- migliorare la disponibilità e l'accessibilità dei dati relativi alle risorse minerarie.

Tale previsione risponde a un'esigenza di fondo evidenziata anche a livello europeo, ossia la necessità di disporre di una base informativa solida e aggiornata sulle risorse disponibili, quale presupposto per qualsiasi politica di approvvigionamento. In assenza di dati geologici adeguati, infatti, risulta difficoltosa sia la pianificazione degli interventi pubblici sia la valutazione di fattibilità economica dei progetti da parte degli operatori privati.

Nel contesto italiano, l'introduzione del programma assume, inoltre, una valenza particolarmente significativa attesa l'attuale limitata attività estrattiva e una conoscenza non sempre aggiornata del potenziale minerario nazionale. Il programma mira, pertanto, a identificare le aree più promettenti dal punto di vista minerario, focalizzando l'interesse sulle materie prime critiche/strategiche definite dalla UE, in molti casi mai o poco ricercate in Italia, ma anche su altri materiali di specifico interesse per l'industria nazionale.

Su queste aree, se sussistono le condizioni economiche, sociali ed ambientali, potranno successivamente essere rilasciati permessi di ricerca operativa a compagnie minerarie nazionali ed estere, finalizzati al rilascio di concessioni per la coltivazione mineraria che deve essere condotta secondo specifici criteri di sostenibilità ambientale, sociale ed economica.

In questa prospettiva, il programma nazionale di esplorazione non si limita a svolgere una funzione conoscitiva, ma si configura come uno strumento abilitante per lo sviluppo di una politica mineraria più attiva, potenzialmente in grado di valorizzare risorse finora non sfruttate o sottoutilizzate.

La prima versione del programma è stata approvata dall'ISPRA il 1° luglio 2025 identificando 14 progetti di ricerca distribuiti su tutto il territorio nazionale e prevedendo, in una prima fase, indagini non invasive, tra cui l'analisi di immagini telerilevate e lo svolgimento di rilievi geologici, geochimici e geofisici, anche mediante l'impiego di sensori aviotrasportati.

4.3. Il contesto “a valle”: la massima diffusione delle energie rinnovabili

4.3.1. Brevi cenni introduttivi

Nel quadro delle politiche volte a rafforzare l'autonomia strategica nazionale ed europea in materia di approvvigionamento di materie prime critiche, assume un rilievo centrale il segmento “a valle” della catena del valore, rappresentato dalla diffusione delle fonti rinnovabili.

Come anticipato, la promozione delle energie rinnovabili è, infatti, strettamente interconnessa alla disponibilità di materie prime critiche – quali litio, terre rare e cobalto –

indispensabili per la costruzione ed esercizio di tali infrastrutture energetiche ivi incluse le relative opere di connessione.

In tale scenario, sulla scorta di quanto previsto dal Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (“**PNIEC**”) entro il 2030, l'Italia dovrebbe dotarsi di una capacità rinnovabile installata pari a circa 131 GW; tuttavia, ad oggi siamo ancora lontani da tale traguardo prescritto dalla pianificazione nazionale, mancano infatti circa 50 GW e, alla luce dei recenti ritmi di potenza rinnovabile installata, pari a circa 6/7 GW annui, è verosimile che bisognerà rimodulare al ribasso tali obiettivi o quantomeno estendere le tempistiche funzionali al loro raggiungimento.

Come si illustrerà nei paragrafi che seguono la realizzazione di tale obiettivo non dipende unicamente dalla disponibilità di tecnologie mature o dalla sostenibilità economica degli investimenti. Al contrario, l'esperienza degli ultimi anni ha dimostrato come i principali fattori limitanti siano di natura sistemica e, in particolare, riconducibili a due ambiti fondamentali: i procedimenti autorizzativi e le modalità di accesso e connessione alla rete elettrica.

4.3.2. Il Testo Unico Rinnovabili

Nel quadro delle misure poste a presidio dell'obiettivo di semplificazione, un ruolo di assoluta centralità è riconosciuto al Decreto Legislativo n. 190 del 25 novembre 2024 (anche noto come “**Testo Unico Rinnovabili**” o “**TU FER**”), entrato in vigore il 30 dicembre 2024 e mirato a razionalizzare in un unico *corpus* normativo la disciplina dei procedimenti amministrativi necessari per la costruzione, l'esercizio e la modifica degli impianti di produzione di energia da fonti rinnovabili nonché dei sistemi di accumulo.

Il TU FER muove da un principio fondante di portata sistematica: gli interventi di realizzazione di impianti rinnovabili sono qualificati *ex lege* quali interventi di interesse pubblico prevalente. Tale qualificazione si traduce in una regola di ponderazione orientata, in sede di bilanciamento tra gli interessi sottostanti, in favore della transizione energetica⁴³.

La riforma si fonda su una logica di semplificazione che, tuttavia, non si esaurisce nella mera riduzione degli adempimenti formali, ma si traduce in una ridefinizione complessiva dei procedimenti. In particolare, il legislatore ha operato una riconduzione delle diverse fattispecie autorizzative a modelli tipizzati, limitando la proliferazione di regimi differenziati che aveva caratterizzato la disciplina previgente.

Il cuore del provvedimento è rappresentato dalla nuova architettura dei procedimenti amministrativi che prevede attualmente i seguenti tre distinti regimi procedurali⁴⁴:

- (i) attività libera: non richiede alcun atto amministrativo di assenso e trova applicazione, tra l'altro, agli impianti fotovoltaici integrati su coperture esistenti fino a 12 MW, agli impianti agrivoltaici fino a 5 MW purché sia conservata la continuità dell'attività agricola, agli impianti idroelettrici su condotte esistenti fino a 500 kW;

⁴³ Cfr. Art. 3, TU Rinnovabili.

⁴⁴ Cfr. Art. 6 e ss., TU Rinnovabili.

- (ii) Procedura Abilitativa Semplificata (“PAS”): si perfeziona per silenzio-assenso decorsi 30 giorni dalla presentazione del progetto al Comune territorialmente competente, termine elevato a 45 o 60 giorni in presenza, rispettivamente, di atti di assenso comunali ulteriori (paesaggistici, idrogeologici, sanitari) o di atti di assenso di altre amministrazioni acquisiti in conferenza di servizi. È ammessa una sola sospensione per integrazioni documentali per un termine ulteriore non superiore a 30 giorni;
- (iii) autorizzazione unica (di natura statale o regionale): prevista per gli impianti di taglia maggiore, deve concludersi entro 120 giorni dalla prima riunione della conferenza di servizi, sospendibili sino a 90 giorni per la VIA. La determinazione conclusiva costituisce il provvedimento autorizzatorio unico ed include la VIA o la verifica di assoggettabilità (ove occorrente) e gli atti di assenso comunque denominati.

La perimetrazione dei tre regimi è dunque effettuata in funzione della tipologia, della potenza e della collocazione dell'impianto, secondo un criterio di proporzionalità che tende a riservare l'autorizzazione unica – ontologicamente più complessa – ai progetti di maggiore impatto, allocando invece sui regimi semplificati gli interventi minori o realizzati in contesti già antropizzati.

4.3.3. Le aree idonee all'installazione di impianti rinnovabili

Un ulteriore pilastro del TU FER è rappresentato dall'identificazione delle aree idonee alla costruzione ed esercizio di impianti alimentati da fonti rinnovabili.

In particolare, mediante l'art. 11-*bis*⁴⁵, sono state recentemente individuate, in via diretta, le aree idonee *ex lege* all'installazione di impianti rinnovabili, includendovi - tra gli altri - i siti già destinati a impianti della stessa fonte (in caso di rifacimento o potenziamento), i siti oggetto di bonifica, le cave e miniere cessate, le discariche, i sedimi di titolarità dei gestori ferroviari ed autostradali e gli aeroporti, oltre ad alcune aree dedicate esclusivamente alla tecnologia fotovoltaica (aree industriali, commerciali e logistiche, aree agricole entro 350 metri da stabilimenti industriali, aree adiacenti alla rete autostradale entro 300 metri, edifici e relative pertinenze ecc.).

Meritevole di menzione è, inoltre, l'art. 11-*bis*, comma 2, che limita la realizzazione di impianti fotovoltaici con moduli collocati a terra in aree agricole alle sole fattispecie ivi tassativamente elencate (rifacimenti senza incremento di area, cave e discariche, sedimi di titolarità di gestori ferroviari ed autostradali ecc.) con alcune deroghe riservate agli impianti a servizio di comunità energetiche rinnovabili, ai progetti finanziati dal PNRR (c.d. “agrivoltaici avanzati”), nonché agli agrivoltaici i cui moduli siano “adeguatamente” elevati da terra.

⁴⁵ Tale disposizione è stata introdotta dal Decreto-Legge 21 novembre 2025, n. 175 (cd. “DL Transizione 5.0”), convertito con modificazioni dalla Legge 15 gennaio 2026, n. 4, all'esito della pronuncia di illegittimità del precedente DM “Aree idonee” ad opera del TAR Lazio, Sez. II-quater, Sent. n. 9155 del 14 maggio 2025 (TAR Lazio, sent. n. 9155/2025) e di alcune leggi regionali “moratorie” (Corte Costituzionale, Sent. n. 28/2025 sulla L.R. Sardegna n. 20/2024).

La disposizione, pertanto, non vieta in assoluto la realizzazione di impianti fotovoltaici in aree agricole bensì la subordina a specifiche condizioni di compatibilità con la prosecuzione dell'attività agricola, in coerenza con i principi sottostanti al concetto di consumo di suolo "controllato".

Ne emerge un quadro in cui il legislatore nazionale ha inteso codificare un equilibrio tra spinta acceleratoria e tutela dei valori paesaggistico-agricoli, demandando al contempo a Regioni e Province autonome - entro 120 e 180 giorni dall'entrata in vigore della disposizione - il compito di individuare, con propria legge, le ulteriori aree idonee, nel rispetto di specifici limiti vincolanti (e.g., la quota di aree idonee in zona agricola deve attestarsi tra lo 0,8% e il 3% della SAU regionale; le fasce di rispetto da beni vincolati ai sensi del Codice dei beni culturali sono fissate in 3 km per gli impianti eolici e 500 metri per quelli fotovoltaici ecc.).

Per gli impianti integralmente ricadenti in aree idonee è previsto un regime semplificato che riquifica il parere paesaggistico (da vincolante a obbligatorio non vincolante) ed abbatte di un terzo i termini dell'autorizzazione unica: misura, quest'ultima, di portata sistemica perché incide direttamente sul "tempo medio" delle decisioni e, di conseguenza, sulla bancabilità dei progetti.

Sempre nell'ambito dell'identificazione delle aree idonee, le Regioni e le Province sono chiamate ad individuare specifiche "zone di accelerazione", introdotte per effetto della Direttiva UE 2023/2413 (anche nota come "**RED III**") e recepite in ambito nazionale dall'art. 12 del TU FER.

Come osservato per le aree idonee, anche con riguardo alle zone di accelerazione la normativa primaria stabilisce specifici principi e criteri da osservare in sede di attuazione regionale, prevedendo che sia data priorità alle seguenti aree: superfici artificiali/edificate, infrastrutture di trasporto e zone immediatamente circostanti, parcheggi, siti di smaltimento dei rifiuti, siti industriali e aree industriali attrezzate, miniere, corpi idrici interni artificiali, laghi o bacini artificiali e, se del caso, siti di trattamento delle acque reflue urbane, ivi inclusi i terreni degradati non utilizzabili per attività agricole.

I progetti inclusi nelle zone di accelerazione beneficiano di ulteriori misure di semplificazione avanzata, tra cui l'esenzione dalla valutazione di impatto ambientale, laddove il proponente abbia attuato misure di mitigazione dell'impatto ambientale eventualmente prescritte nel contesto della valutazione ambientale strategica svolta a livello territoriale.

In coerenza con quanto previsto dalla RED III le Regioni avrebbero dovuto individuare tale categoria zonale entro il 21 febbraio 2026, tuttavia, ad oggi, attesi anche i ritardi che hanno interessato ed interessano l'identificazione delle aree idonee, nessun ente locale ha ancora proceduto a disciplinare le proprie zone di accelerazione.

In merito, è cruciale che si addivenga quanto prima ad una regolamentazione territoriale chiara, precisa ed univoca; difatti, per i progetti ricadenti su tale categoria di aree o zone la discrezionalità esercitabile dagli enti locali in sede autorizzativa risulta (teoricamente)

fortemente limitata (in quanto la valutazione circa la compatibilità territoriale di tali iniziative è da ritenersi già svolta a monte nel contesto della normativa primaria) con notevoli effetti positivi sulla *green economy* in termini di certezza degli investimenti dedicati allo sviluppo di energie rinnovabili.

4.3.4. Le infrastrutture di rete: il fenomeno della saturazione virtuale e la necessità di nuovi investimenti

La transizione energetica non dipende esclusivamente dalla disponibilità di tecnologie rinnovabili ma presuppone altresì la capacità del sistema infrastrutturale di assorbire, trasportare e distribuire l'energia prodotta.

In questa prospettiva, la rete elettrica assume una funzione essenziale di fattore abilitante della decarbonizzazione, poiché la progressiva elettrificazione dei consumi e l'incremento della generazione da fonti rinnovabili determinano un profondo mutamento delle esigenze di pianificazione e gestione del sistema elettrico.

Occorre, in primo luogo, distinguere il tema della connessione degli impianti da quello, più ampio, dello sviluppo e dell'adeguamento delle infrastrutture di rete.

Il primo riguarda la possibilità per i singoli impianti alimentati da fonti rinnovabili di ottenere accesso alla rete di trasmissione o distribuzione in condizioni di effettiva capacità disponibile.

Il fenomeno della saturazione “virtuale” della rete elettrica costituisce, ad oggi, uno dei principali colli di bottiglia per l'effettivo dispiegamento delle fonti energetiche rinnovabili sul territorio nazionale.

Nel Piano di sviluppo della Rete di Trasmissione Nazionale 2025 pubblicato da Terna (il “**Piano di Sviluppo**”) nel dicembre 2024 sono state censite richieste di connessione per circa 349 GW di capacità rinnovabile, di cui ben l'82% correlato ad iniziative bloccate negli stadi preliminari del processo autorizzativo⁴⁶.

Il fenomeno è riconducibile, sul piano tecnico, al criterio sequenziale impiegato nell'allocazione delle Soluzioni Tecniche Minime Generali (“**STMG**”): ogni nuova richiesta è valutata tenendo conto delle precedenti già rilasciate, indipendentemente dalla loro effettiva concretizzazione.

Ne consegue che la capacità di rete risulta formalmente “occupata” anche da progetti che non raggiungono mai la fase autorizzativa, generando una distorsione strutturale delle priorità di investimento sulla rete.

Per fronteggiare tale situazione il Decreto Legge n. 21 del 20 febbraio 2026 (anche noto come “**DL Bollette**”), ha introdotto una sostanziale riforma dell'iter di connessione alla rete degli impianti rinnovabili, prevedendo, in buona sostanza, che:

⁴⁶ Sul punto, si veda Terna S.p.A., Documento di descrizione degli scenari e Piano di sviluppo della Rete di Trasmissione Nazionale, dicembre 2024; Banca d'Italia, Working Paper n. 908, febbraio 2025.

- l'ARERA aggiorni le condizioni tecniche, economiche e procedurali delle connessioni introducendo procedure di allocazione “trasparenti e non discriminatorie” e, soprattutto, riservando l'assegnazione definitiva della capacità di rete ai soli soggetti già titolari di un titolo abilitativo (principalmente, PAS o autorizzazione unica);
- dalla pubblicazione della nuova disciplina ad opera dell'ARERA, perdano efficacia le STMG già rilasciate ma non validate dal gestore di rete.

Le novità del DL 21/2026, pur lasciando aperti taluni profili di dettaglio, introducono per la prima volta nel sistema un meccanismo di “stress test” delle prenotazioni che premia la maturità progettuale anziché la mera tempistica di presentazione dell'istanza. È, in altre parole, un riallineamento della regolazione di rete rispetto alla fisiologia del procedimento autorizzativo.

Diverso, ancorché strettamente connesso, è il tema dell'adeguamento infrastrutturale della rete elettrica nazionale.

L'incremento della capacità rinnovabile previsto dagli obiettivi europei e nazionali richiede infatti un significativo potenziamento della capacità di trasporto, delle interconnessioni e delle dorsali energetiche, necessario per gestire una produzione caratterizzata da forte dispersione territoriale e da crescente concentrazione geografica nelle aree del Mezzogiorno e delle isole, a fronte di una domanda prevalentemente localizzata nel Centro-Nord, rendendo necessario un forte incremento della capacità di trasporto e di scambio interzonale.

Il Piano di Sviluppo prevede, infatti, un raddoppio della capacità di scambio tra zone di mercato, da circa 16 GW attuali a oltre 35 GW al 2040, con un primo incremento di +6,8 GW già al 2030.

In tale contesto il medesimo Piano di Sviluppo mobilita tra il 2025 e il 2034 oltre 23 miliardi di euro di investimenti, destinati a salire a circa 40 miliardi oltre il 2034. Gli interventi riguardano, in particolare: (i) l'integrazione delle connessioni FER e degli accumuli; (ii) le dorsali interzonali e l'incremento della capacità di trasporto; (iii) le interconnessioni internazionali; (iv) la sicurezza e resilienza della rete; (v) la digitalizzazione e massimizzazione degli asset esistenti.

In buona sostanza se gli impianti FER vengono autorizzati e, dunque, realizzati più rapidamente delle infrastrutture di trasmissione – o viceversa – si genera un disallineamento che produce congestioni e ritardi.

D'altro canto, la stessa Terna nel Piano di Sviluppo evidenzia che saranno necessarie nuove opere per integrare circa 43 GW di FER sulla rete ad alta tensione, oltre a 71,5 GWh di accumuli direttamente connessi alla RTN, mentre si aggiungono nuove pressioni di domanda che è destinata ad aumentare da 306 TWh a 362 TWh, anche in ragione dell'elettrificazione dei consumi, della mobilità elettrica, degli accumuli e dei data center.

Tuttavia, proprio sul terreno dello sviluppo infrastrutturale emergono significativi ed ulteriori colli di bottiglia autorizzativi.

La realizzazione di nuove opere di rete – elettrodotti, stazioni elettriche, interconnessioni e dorsali – è, infatti, frequentemente caratterizzata da procedure complesse, frammentate e temporalmente lunghe, nelle quali si intrecciano competenze statali, regionali e locali, esigenze di tutela ambientale e paesaggistica e dinamiche oppostive territoriali.

Ebbene, il rischio è che il disallineamento temporale tra autorizzazione degli impianti di produzione e realizzazione delle opere di rete produca un effetto di *infrastructure lag*, in cui la capacità di generazione rinnovabile cresce più rapidamente della capacità del sistema di assorbirla e trasportarla.

4.4. Conclusioni

Il quadro normativo descritto nei paragrafi precedenti restituisce l'immagine di un legislatore - europeo e nazionale - consapevole della centralità sistemica delle infrastrutture energetiche e delle materie prime critiche per il conseguimento degli obiettivi di decarbonizzazione al 2030.

Le innovazioni tracciate dal CRMA, dal DL 84/2024, dal Testo Unico Rinnovabili (con i correttivi succedutisi nel biennio 2025-2026) e dal DL Bollette disegnano un'architettura sistematicamente coerente, articolata sull'intera "catena di montaggio" della transizione energetica: dall'esplorazione mineraria passando per la gestione della capacità di rete fino all'autorizzazione degli impianti.

Cionondimeno, sul piano dell'effettività, le misure introdotte rappresentano, purtroppo, un mero impulso e non un cambio di paradigma.

Quanto sopra non per debolezza intrinseca delle norme bensì perché il vero collo di bottiglia della transizione si è progressivamente spostato dal piano dei regimi sostanziali a quello, strutturalmente più ostico, della macchina amministrativa chiamata ad attuarli.

In altre parole, per un tangibile cambio di passo nella corsa alla transizione energetica è innanzitutto cruciale implementare una concreta transizione burocratica.

Con riferimento al Testo Unico Rinnovabili, senza voler trascurare le pur apprezzabili ambizioni di riordino normativo del legislatore, il percorso verso l'effettiva omogeneità della disciplina procedimentale sull'intero territorio nazionale appare sfortunatamente ancora lungo ed irto di ostacoli, con inevitabili riflessi negativi sulle strategie di investimento degli operatori di mercato derivanti dalla permanenza di plurimi con i d'ombra che caratterizzano e, verosimilmente, continueranno a caratterizzare le declinazioni regionali del contesto normativo nazionale.

Una eccessiva discrezionalità rischia di alimentare, come oramai ampiamente noto ai player di mercato, la sindrome NIMBY dando origine alla surrettizia previsione da parte degli enti locali di criteri ostativi all'insediamento di impianti rinnovabili che rendono

gravosi, se non addirittura del tutto privi di convenienza economica, gli investimenti in tale settore.

Il TU FER disciplina, mutuandolo dalla Direttiva RED III, il concetto di “interesse pubblico prevalente” delle fonti rinnovabili ma, diversamente da quanto accade di sovente, appare spingersi ben oltre il dettato eurounitario, introducendo plurime deroghe che paiono svuotare di significato tale “prevalenza”. Nello specifico, ai sensi dell’art. 3 del TU FER, le fonti rinnovabili sono considerate di interesse prevalente salvo: (1) giudizio negativo di compatibilità ambientale; (2) prove evidenti che tali progetti abbiano effetti negativi significativi: (a) sull’ambiente; (b) sulla tutela della biodiversità; (c) sul paesaggio; (d) sul patrimonio culturale; e (e) sul settore agricolo, con particolare riferimento alla valorizzazione delle tradizioni agroalimentari.

È di tutta evidenza che introdurre un concetto generico e di dubbia valenza giuridica quale quello di “prove evidenti di effetti negativi” applicandolo, inoltre, ad una considerevole moltitudine di aree, ivi incluse financo le tradizioni agroalimentari locali, da un lato sminuisce interamente la ratio della normativa europea (i.e. conferire assoluta preminenza alla transizione energetica rispetto agli altri interessi tipicamente in gioco nell’ambito di iniziative di sviluppo di impianti rinnovabili) e, dall’altro, conferisce ulteriore discrezionalità di valutazione alle regioni e agli enti locali.

Considerazioni simili se non analoghe valgono per il versante delle materie prime critiche.

Sul punto, va osservato come i target del CRMA non siano vincolanti, riguardino solo le materie prime strategiche e presentino delle lacune metodologiche negli elenchi e nelle proiezioni di domanda.

Quattro materie prime strategiche (litio, magnesio, gallio e terre rare) risultano, peraltro, già oltre la soglia del 65% di concentrazione delle importazioni; per il boro, in fase estrattiva, oltre il 65% proviene da un solo Paese terzo.

Parimenti, la dipendenza dell’UE dalla Cina (100% delle terre rare pesanti, 97% del magnesio), dalla Turchia (98% del borato), dalla Repubblica Democratica del Congo (63% del cobalto mondiale) e dal Sud Africa (71% del platino UE) non risulta - allo stato - significativamente intaccata dagli strumenti normativi sin qui adottati.

Sul piano nazionale, seppur il DL 84/2024 e il programma nazionale di esplorazione abbiano completato il perimetro formale dell’architettura di governance, permane, tuttavia, una sostanza ancora largamente da costruire: il settore minerario italiano è fermo da circa quarant’anni, le informazioni sul potenziale del sottosuolo sono in larga parte ipotetiche e i progetti onshore strategici hanno una scala economica per ora di nicchia.

Come noto le attività estrattive richiedono il rispetto di specifici regimi amministrativi che consistono, in buona sostanza nel rilascio di un apposito permesso ai fini della ricerca delle risorse (c.d. permesso di ricerca) avente una durata massima di quattro anni e prorogabile per non oltre un biennio e, in caso di positiva individuazione di materie prime critiche, nell’ottenimento di una valutazione di impatto ambientale preordinata al rilascio di una concessione per la coltivazione delle risorse.

Si tratta di procedimenti sovente contrassegnati da una considerevole complessità e frammentarietà. Basti infatti pensare che quelli sopra citati sono unicamente i titoli abilitativi di natura principale a cui sono da aggiungersi i pareri e i nulla osta “ancillari” da ottenere nel contesto dei singoli procedimenti, tra cui i pareri e le autorizzazioni della Soprintendenza e degli enti locali che, anche su impulso dei c.d. “Comitati del No”, si rivelano, come ampiamente osservato in relazione ad altri settori, ostativi o ritardano considerevolmente il “via libera” alla realizzazione dei progetti in questione.

In tale contesto, sarebbe innanzitutto auspicabile un alleggerimento dei tempi ed oneri burocratici a carico degli investitori mediante la riduzione del margine di discrezionalità esercitabile in sede di rilascio della concessione nell’eventualità di esito positivo delle perforazioni assentite con il permesso di ricerca.

Ancora, in coerenza con quanto disposto dal recente Testo Unico Rinnovabili, potrebbe essere di particolare importanza l’identificazione di aree idonee o zone di accelerazione con l’obiettivo di fornire a priori ai soggetti interessati una mappatura delle aree potenzialmente ascrivibili ad attività di ricerca nell’ottica di salvaguardare i considerevoli investimenti correlati alle perforazioni funzionali all’identificazione di materie prime critiche.

In altre parole, il rilascio del permesso di ricerca dovrebbe automaticamente (e ragionevolmente) preludere al rilascio della conseguente concessione fornendo un parametro di certezza in ordine ai tempi ed esiti dei relativi procedimenti al fine di non rendere vani i notevoli investimenti sostenuti dagli operatori già in sede di ricerca.

Difatti, la fase di pre-sviluppo dei progetti è caratterizzata da alti rischi, dovuti non solo alla complessità e durata delle procedure di autorizzazione, ma anche alla disponibilità di dati affidabili. Questa incertezza comporta un elevato costo del capitale e richiede programmazioni e mappature più continue e strutturate rispetto a quelle attuali che si sostanziano essenzialmente nel programma nazionale dell’ISPRA.

A tal proposito, al fine di supportare le attività di ricerca è fondamentale prevedere, oltre a meccanismi di incentivazione che garantiscano la certezza dei ricavi a lungo termine, anche misure di mitigazione del rischio nella fase iniziale di sviluppo del progetto.

In questa direzione diversi Paesi europei, con riferimento ad altre aree (su tutte la geotermia) stanno implementando incentivi e misure di de-risking. È il caso della Francia, che ha istituito un fondo di garanzia per tutelare le operazioni di perforazione dei pozzi esplorativi e supportare gli sviluppatori in caso di insuccesso.

In poche parole, in difetto di un investimento pubblico-privato sull’esplorazione mineraria, sulla formazione delle competenze geo-minerarie e sull’accettabilità sociale dei progetti estrattivi v’è il rischio concreto che l’obiettivo di sostituire, anche solo parzialmente, le importazioni con produzione interna resterà sostanzialmente fuori portata entro il 2030.

In definitiva, la sfida del prossimo orizzonte temporale è di natura non più primariamente normativa, bensì organizzativa, culturale ed infrastrutturale. In altri termini, è cruciale che, per una volta, si metta da parte il regno delle astrazioni e che i costumi non mutino più lentamente delle leggi.

CAPITOLO 5. STRATEGIE DI CIRCOLARITÀ E RECUPERO DEI CRM NELLE RETI

a cura di Giuseppe Di Florio

Abbreviazioni

APS: Announced Pledges Scenario

CMUR: Circular Material Use Rate (rapporto tra il materiale recuperato da prodotti a fine vita e rimesso nell'economia e l'utilizzo totale di quel materiale nell'economia)

CRM: Critical Raw Material

EoL-CR: End-of-Life Collection Rate (rapporto tra la quantità di materiale raccolto arrivato a fine vita e il totale del materiale arrivato a fine vita)

EoL-RR: End-of-Life Recycling Rate (per uno specifico materiale, rapporto tra il quantitativo recuperato dai prodotti a fine vita e il totale contenuto nei prodotti a fine vita)

EPR: Extended Producer Responsibility

HREE: Heavy Rare Earth Element

LFP: litio-ferro-fosfato

LREE: Light Rare Earth Element

NMC: nichel-manganese-cobalto

NZE: Net Zero Emissions

RIR: Recycled Input Rate (rapporto tra produzione di un materiale da fonti secondarie e produzione totale di quel materiale)

RMIS: Raw Materials Information System

5.1 Introduzione

Attualmente, il mondo consuma quasi 100 miliardi di tonnellate di materiali all'anno [Carrington D., 2020]. Il consumo di materiali è triplicato dal 1970 e si prevede che raddoppierà nuovamente entro il 2050, aumentando la pressione sugli ecosistemi e sulle risorse naturali [Carrington D., 2020, UNPD, 2025]. Questa traiettoria evidenzia l'importanza di passare a modelli di economia circolare, in cui le risorse vengono riutilizzate, riciclate e mantenute in circolazione. Senza uno sforzo significativo per aumentare la circolarità delle nostre risorse, il consumo di materiali continuerà a impoverire le risorse naturali, favorire la perdita di biodiversità e contribuire al cambiamento climatico. La domanda di minerali critici, essenziali per le tecnologie moderne e per la transizione verde, è prevista in crescita negli anni a venire [Mukherjee S., *et al.* 2025]. In risposta a questo scenario, il passaggio dalle infrastrutture energetiche basate sul paradigma lineare “*take–make–dispose*” verso modelli circolari rappresenta un'evoluzione strategica, capace di ridurre la dipendenza da risorse vergini, contenere gli impatti ambientali e migliorare la resilienza dei sistemi produttivi [UNDP, 2025]. L'economia circolare, centrata su riuso, rigenerazione e massimizzazione del valore dei materiali, si integra pienamente con i principi dell'Industria 5.0: sostenibilità, resilienza, approccio sistemico e centralità della persona. Secondo la visione della Commissione europea, Industria 5.0 amplia il paradigma di Industria 4.0 ponendo al centro il benessere umano e il rispetto dei limiti planetari, promuovendo al contempo modelli produttivi più inclusivi ed efficienti nell'uso delle risorse [EU, 2021]. L'integrazione tra economia circolare e Industria 5.0 consente, dunque, di affrontare simultaneamente la sfida del consumo materiale e quella della transizione energetica, trasformando le infrastrutture in sistemi intelligenti, adattivi e sostenibili che contribuiscono in modo decisivo alla competitività industriale e alla sicurezza delle catene del valore [EU, 2021]. L'urgenza di un rafforzamento delle misure di circolarità, e di una loro adozione su una scala decisamente maggiore, è racchiusa in un dato: nel 2025 solo il 6.9% dell'economia mondiale era circolare [Circle Economy, 2025]. Questa metrica si riferisce alla percentuale di materie seconde rispetto al totale di input di materiali nell'economia globale. Il dato è rilevante non solo perché mette in luce come per un generico kg di prodotto meno di un decimo provenga da materiali riciclati, ma perché questo indicatore è diminuito negli ultimi anni: era 9.1% nel 2018, 8.6% nel 2020, 7.2% nel 2023 [Circle Economy, 2023] ed è ulteriormente diminuito a 6.9% nel 2025. La ragione di tale decrescita è da imputare quasi totalmente all'aumento della domanda di materiali ed al conseguente aumento dell'estrazione di risorse vergini. Infatti, basti pensare che la totalità delle materie prime estratte nel 2016 era di 89,9 Gton (miliardi di tonnellate), per diventare 101,4 Gton nel 2021 e restare stabilmente oltre le 100 Gton negli anni successivi [Circle Economy, 2025]. Il problema deve essere affrontato tenendo in considerazione che la domanda di risorse subirà un'ulteriore accelerazione, dovuta alla transizione energetica. La gran parte delle *clean technologies* contiene un elevato quantitativo di materie prime critiche, che spingerà la domanda verso l'alto. Inoltre, l'adozione di tali tecnologie sarà accompagnata da una riconfigurazione delle infrastrutture e delle reti energetiche, con un consumo aggiuntivo di *Critical Raw Materials* (CRM) e metalli di rilevanza tecnica. Le osservazioni precedenti dimostrano con estrema evidenza,

che per aumentare il contenuto di circolarità nelle nostre economie sarà necessario utilizzare strategie e metodi dal forte impatto, che garantiscano una ben più larga quota di riuso e riciclo connessa ai prodotti in uso o a fine vita. Le azioni da intraprendere possono essere riassunte in quattro pilastri (Figura 1), che si collocano in punti differenti nello schema di produzione circolare: 1) Usare meno; 2) Usare più a lungo; 3) Produzione efficiente; 4) Riciclo;

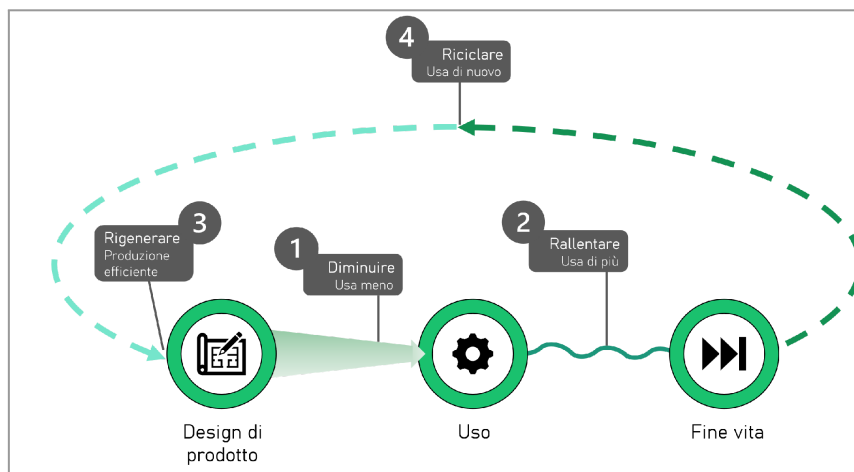


Figura 1: Rappresentazione di un *closed-loop* di *supply chain*, con le quattro azioni per raggiungere gli obiettivi di circolarità. Adattato da “The Circularity Gap Report 2023”, [Circle Economy, 2023].

5.2 I Critical Raw Materials nelle reti elettriche

Le reti energetiche sono fortemente dipendenti da una vasta gamma di materie prime critiche (CRM), utilizzate sia per le proprietà elettriche sia per quelle meccaniche e magnetiche. Tra i materiali principali spiccano rame e alluminio, che costituiscono la base dei conduttori elettrici: il rame è utilizzato per la sua elevata conducibilità in cavi (circa 27 kg/m), trasformatori e apparecchiature di distribuzione, mentre l'alluminio è largamente impiegato nelle linee aeree grazie al minor peso e costo. Nelle linee di trasmissione aeree in AC a 400 kV, tra cavi e torri, il contenuto di alluminio è di circa 5 kg/m per un circuito singolo, oltre a circa 100 kg/m di acciaio galvanizzato [Nohl *et al.*, 2025]. In termini quantitativi, le infrastrutture di rete richiedono quantità estremamente elevate di questi metalli: scenari di espansione globale delle reti elettriche, associate alla crescita di installazioni di solare fotovoltaico ed eolico, indicano una domanda cumulata fino a 27–81 milioni di tonnellate di rame e 11–31 milioni di tonnellate di alluminio entro il 2050, oltre a 20–67 milioni di tonnellate di acciaio, con i cavi come componente più intensivo di materiali [Chen *et al.*, 2023]. Queste cifre evidenziano come il rame, tra i metalli base, potrebbe essere quello maggiormente sotto pressione in seguito alla crescente domanda. Infatti, nel 2024 la produzione mondiale annua di rame si è attestata intorno a 27,5 milioni di tonnellate [International Copper Study Group, 2025], mentre la produzione di alluminio nel 2024 è stata di circa 74 milioni di tonnellate [International Aluminium Institute]. Quindi, per l'espansione di rete dal 2020 al 2050, una domanda attesa media di 1,8 milioni di

tonnellate annue di rame corrisponde a circa 6,5% dell'attuale produzione globale annua, mentre una domanda media di 0,7 milioni di tonnellate di alluminio è pari a circa 1% della produzione attuale. Questo dato mostra lo stress a cui potrebbe essere sottoposta specialmente la produzione di rame negli anni a seguire (un risultato simile si ottiene, per motivi diversi, per il nichel, sebbene con volumi complessivi minori). Anche in Europa, la modernizzazione della rete potrebbe assorbire entro il 2030 una quota significativa della produzione disponibile, pari a circa 15,7% del consumo attuale di rame solo per il settore elettrico [Nohl *et al.*, 2025]. Inoltre, secondo calcoli del JRC [Nohl *et al.*, 2025], l'espansione della rete elettrica porterà in Europa una domanda cumulata nel periodo 2025-2030 di 0,653 milioni di tonnellate di rame e 0,24 milioni di tonnellate di alluminio, oltre a 1,145 milioni di tonnellate di acciaio. Il fabbisogno italiano di materie prime strategiche nel 2020 era rappresentato per circa il 44% dal rame, utilizzato in maniera significativa in ognuna delle tecnologie chiave prese in considerazione dallo studio Ambrosetti [TEHA Group, 2023]: 1) energie rinnovabili, 2) mobilità elettrica, 3) digitale, 4) difesa e aerospazio - bisogna, comunque, tenere presente che il citato studio Ambrosetti non considera l'alluminio tra i CRM. In Italia è attesa una crescita della domanda di rame al 2040 di un fattore di 4,7 volte i livelli del 2020, mentre per il nichel questo fattore è di 6,6 volte [TEHA Group, 2023]. La digitalizzazione delle reti elettriche, che accompagnerà l'espansione delle reti, si avvale di data server ed elettronica, anche esse ad alto contenuto di CRM. Queste sono le tecnologie a maggiore utilizzo di chips, in un contesto in cui l'Europa dipende dalla Cina [TEHA Group, 2023]. I circuiti stampati rappresentano circa il 4%-7% del totale dei rifiuti elettronici [Gonzalez Baez A. *et al.*, 2022] e questo valore è probabilmente destinato ad aumentare con la crescita di server, data center e sensoristica avanzata. Il contenuto preciso di CRM dipende dai prodotti elettronici, ma in media il rame rappresenta tra il 10% e il 20% della massa [Akcil A. *et al.*, 2015] – circa il doppio considerando i soli metalli [Wang H. *et al.*, 2017] – l'alluminio tra l'1% e il 10% e a seguire il silicio, il nichel e diversi metalli preziosi (Ag, Au e Pd) [Akcil A. *et al.*, 2015]. Il rame, in particolare, rappresenta il 70% delle materie prime strategiche contenute nei data storage e server, seguito da nichel (12%), manganese (10%) e silicio (6%) [TEHA Group, 2023]. La domanda di rame in Europa al 2030 per data storage e server è prevista raddoppiare. Collegata alla crescita nell'utilizzo dell'intelligenza artificiale, la IEA prevede che al 2030 la domanda di rame per data center di IA possa addirittura raggiungere circa l'1%-2% della domanda globale [IEA a, 2024]. Nel complesso, i CRM nelle reti energetiche non si limitano a pochi elementi, ma comprendono un mix di metalli base (rame, alluminio, acciaio), materiali critici per l'elettronica (silicio, gallio, germanio), litio, altri metalli di transizione e terre rare per applicazioni avanzate.

5.3 Economia circolare applicata alle infrastrutture di rete

In un'economia circolare, i paradigmi di crescita e protezione ambientale coesistono, per cui l'economia industriale è intenzionalmente e programmaticamente riparativa e rigenerativa [Gaustad *et al.*, 2018]. Le azioni intraprese dalle imprese per mitigare i rischi relativi all'approvvigionamento di CRM sono diverse e, come riportato da [Gaustad *et al.*,

2018] in un sondaggio, la strategia maggiormente adottata dalle aziende è l'aumento dell'efficienza nell'uso delle risorse, con circa il 75% dei partecipanti ad indicare tale misura. Le strategie di circolarità possono essere riassunte in cinque famiglie: 1) riciclo/riuso/*remanufacturing*, 2) raccolta, 3) adozione principi lean, 4) dematerializzazione e 5) diversificazione [Gaustad *et al.*, 2018]. Ognuna di queste tende ad allungare la vita utile di un prodotto/materiale, aumentare l'utilizzo di materie prime seconde, tramite riciclo e *remanufacturing*, o diminuire la *materials intensity*, aumentando l'efficienza o eliminando gli scarti. Il prolungamento della vita utile dei materiali attraverso riuso, *remanufacturing* e riciclo permette di utilizzare un prodotto per un secondo ciclo di vita (*second life*) senza modificarne significativamente la struttura. Un esempio concreto è quello delle batterie dei veicoli elettrici, che, una volta ridotta la loro capacità per uso automobilistico (circa 70% della capacità originale), possono essere riutilizzate per sistemi di accumulo energetico stazionario. Il *remanufacturing*, invece, consiste nel ricostruire prodotti a fine vita mantenendo la loro funzione originaria. Infine, il riciclo consente di recuperare i materiali da prodotti complessi, creando una fonte secondaria di approvvigionamento. Per agevolare e massimizzare la raccolta, le aziende possono implementare programmi di ritiro o modelli di responsabilità estesa del produttore. Nel settore fotovoltaico è significativo l'esempio di First Solar, che ha offerto servizi di raccolta e riciclo dei pannelli fotovoltaici, ciò al fine di recuperare materiali critici come il tellurio. Tuttavia, per la raccolta e il riciclo bisogna tenere presente alcune considerazioni generali, che spesso rappresentano sfide operative: in diversi componenti per reti, generazione o accumulo di energia la quantità di materiale critico nei singoli prodotti è spesso minima, richiedendo la raccolta di enormi volumi per ottenere quantità rilevanti di risorsa. Per dare evidenza concreta del problema, è significativa l'analisi effettuata sugli *e-waste*: nel 2022, su un totale di circa 31 milioni di tonnellate di metalli contenuti in rifiuti elettronici, a livello globale, i tre elementi a cui corrispondeva il valore di mercato maggiore erano il rame (circa 22%), l'oro (circa 19,5%) e il nichel (circa 16,5%) [IEA b, 2025]. Tuttavia, in termini di massa, il quantitativo era di circa 2 milioni di tonnellate di rame (6,5% dei 31 milioni totali), 270 tonnellate di oro (circa 0,0009%) e 0,52 milioni di tonnellate di nichel (circa 1,7%) [IEA b, 2025]. Sebbene la composizione di componenti per le reti energetiche e le *clean technologies* possa differire sensibilmente da un generico rifiuto elettronico, gli ordini di grandezza rappresentati non se ne discostano significativamente. Un ulteriore vantaggio del riciclo è che consente una significativa riduzione di emissioni di CO₂ rispetto all'estrazione, prevenendo le necessità di nuove attività minerarie ed evitando così i conseguenti impatti ambientali. Ad esempio, la footprint del riciclo dell'alluminio rispetto alla sua estrazione è inferiore del 96%, quella del rame dell'85% e del disprosio del 79% [TEHA Group, 2023]. Coerentemente, anche il risparmio energetico è intorno al 95% per l'alluminio e 85% per il rame [Akcil *et al.*, 2015]. La terza strategia riguarda l'adozione dei principi lean, ovvero tecniche di produzione basate su efficienza, riduzione degli sprechi e miglioramento continuo. Applicare il lean manufacturing consente di ridurre il consumo di materiali, migliorare i rendimenti e minimizzare gli scarti lungo tutta la catena produttiva. Ad esempio, aziende del settore minerario come Rio Tinto e Votorantim Group hanno utilizzato strumenti lean per migliorare i tassi di estrazione e ridurre gli sprechi, con benefici sia economici che ambientali [Gaustad *et al.*, 2018]. Tuttavia, il modello *just-in-time*, tipico del lean, può aumentare la vulnerabilità alle interruzioni della supply

chain se non è bilanciato con strategie di resilienza [Gaustad *et al.*, 2018]. L'efficientamento dei processi e la riduzione degli sprechi è un tema che investe anche la ricerca applicata e da cui arrivano soluzioni innovative; lo *additive manufacturing*, ad esempio, permette di minimizzare l'uso di materiali e la produzione di scarti di lavorazione. Recentemente, nella letteratura scientifica sono riportati gli sforzi per adottare questo nuovo paradigma produttivo anche alle terre rare e alla produzione di magneti permanenti [Wang *et al.*, 2022]. La strategia della dematerializzazione consiste nel ridurre la quantità di materiali necessari per offrire un determinato servizio. Questo può avvenire, oltre che attraverso un cambiamento verso modelli basati sui servizi e innovazioni progettuali, tramite digitalizzazione delle infrastrutture energetiche, sensoristica distribuita e smart grids. Chiaramente, in un settore quale quello delle reti energetiche, il concetto di dematerializzazione incontra dei limiti fisici, oltre i quali non può andare. Perciò, c'è da aspettarsi che la più recente rivoluzione digitale e l'intelligenza artificiale, da un lato possano portare un contributo di riduzione dell'utilizzo di materie prime nelle reti e dall'altro aumentarne la domanda per le infrastrutture preposte al proprio funzionamento (per esempio, *data center*, sensoristica avanzata et cetera). Infine, la diversificazione delle fonti di approvvigionamento implica l'uso di più fornitori, preferibilmente da fonti geografiche diverse e, ove possibile, materiali alternativi. La diversificazione consente di aumentare la resilienza del sistema produttivo, riducendo la dipendenza da singoli paesi o fornitori che potrebbero causare interruzioni nella catena di approvvigionamento. Le aziende che adottano strategie di diversificazione sono generalmente più capaci di affrontare crisi e variazioni del mercato.

5.4 Recupero e riciclo dei CRM nei componenti di rete

Data la produzione e l'offerta geograficamente concentrate di diversi minerali essenziali, il riciclo di rifiuti e rottami dall'alto contenuto di CRM può rappresentare un modo significativo per molti paesi, compresi i paesi in via di sviluppo, di ridurre la dipendenza dalle fonti primarie [Mukherjee S., *et al.* 2025]. Sebbene il riciclo e il recupero di questi materiali da prodotti a fine vita, come batterie e rifiuti elettronici, presenti significativi vantaggi ambientali ed economici, esso non è omogeneo per i diversi metalli di rilevanza tecnologica (Figura 2). Metalli quali l'alluminio e il rame storicamente presentano delle filiere di recupero e riciclo che garantiscono un elevato livello di RIR (*Recycled Input Rate*). Al contrario, il potenziale di recupero di metalli quali il litio, il cobalto e il nichel – se si esclude l'uso diretto di scrap – è ancora ampiamente sottoutilizzato. Ciò evidenzia la sfida posta per aumentare il livello di reinserimento di materiali da fonti secondarie nei circuiti produttivi. Ad esempio, alluminio, rame e cobalto possono raggiungere tassi di riciclo prossimi al 100% con le tecnologie esistenti. Tuttavia, i tassi di riciclo per minerali come il litio e le terre rare rimangono vicini all'1-3%, anche in Paesi tecnologicamente avanzati e nella stessa Comunità Europea [RMIS, Mukherjee S., *et al.* 2025]. Processi di riciclo avanzati, come l'idrometallurgia e la biolisciviazione, permettono non solo di recuperare materiali preziosi ma anche generare domanda per manodopera qualificata e competenze tecniche [Mukherjee S., *et al.* 2025]. Adottando pratiche di economia

circolare, investendo e promuovendo le industrie locali, il riciclo da rifiuti e scarti di minerali critici può ridurre l'impatto ambientale, diversificare l'economia e garantire che la transizione energetica sia, al contempo, sostenibile ed inclusiva.

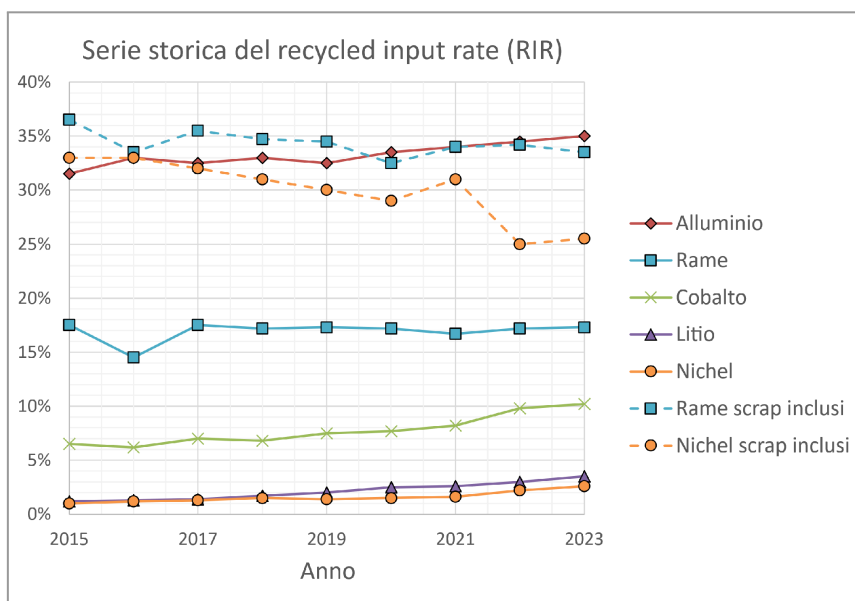


Figura 2: Andamento del recycled input rate (RIR) negli anni 2015-2023 di cinque metalli di rilevanza per le reti e le tecnologie per la transizione energetica. Rielaborato da [IEA b, 2025]

Il commercio di rifiuti e scarti contenenti CRM avviene per una varietà di ragioni e di fattori strutturali, dipendendo da capacità produttiva, vincoli normativi e redditività delle esportazioni verso Paesi con costi di lavorazione più bassi e minori ostacoli normativi. In molti casi, il riciclo non è economicamente sostenibile a causa degli elevati costi energetici, limitata capacità installata o linee di riciclo altamente specializzate, che non possono gestire in modo efficiente materiali misti o di bassa qualità [Mukherjee S., *et al.* 2025]. Anche in Europa, dove le politiche ambientali sono forti nel sostenere le pratiche di economia circolare, le barriere istituzionali possono scoraggiare il recupero e riciclo domestico. La classificazione del rottame come “rifiuto” introduce obblighi di adempimento che aumentano i costi e la complessità. Sebbene un aumento del riciclo contribuisca a soddisfare, almeno parzialmente, il fabbisogno complessivo di minerali critici, ciò non comporterà necessariamente una diminuzione della domanda netta di CRM. Poiché la transizione energetica accelera il fabbisogno di infrastrutture ad alto contenuto di CRM, si prevede che la domanda globale di minerali critici crescerà oltre quanto potrà essere fornito attraverso il riciclo. Inoltre, anche la digitalizzazione dell'economia e le tecnologie digitali rappresentano un'ulteriore fonte di domanda di CRM. Infatti, secondo alcune stime, con le infrastrutture e le tecnologie attuali, il riciclo potrà soddisfare solo il 20% della domanda totale di minerali da oggi al 2050, ma va considerato che parte di questo impatto limitato deriva dal ritmo accelerato della transizione energetica [Mukherjee S., *et al.* 2025]. L'impatto del riciclo dovrebbe diventare consistente a partire dal 2040, quando un quantitativo significativo di impianti ed installazioni di tecnologie per la transizione saranno

arrivate a fine vita. Un ragguardevole esempio è rappresentato dai pannelli fotovoltaici. Proiezioni IEA [IEA b, 2025], seguendo lo storico di crescita delle installazioni di solare PV, prevedono che il contenuto di CRM negli impianti ad energia solare crescerà fino al 2030, per poi avere una flessione (Figura 3). Al contempo, il contenuto di CRM da pannelli arrivati a fine vita e disponibili per il riciclo aumenterà esponenzialmente a partire dai primi anni del prossimo decennio, fino ad arrivare al 2050 ad avere un valore prossimo a quello delle nuove installazioni (Figura 3).

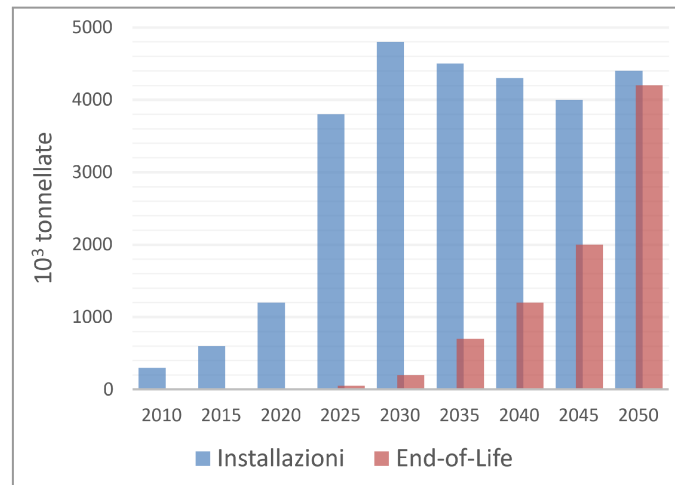


Figura 3: Evoluzione al 2050 del contenuto totale di CRM negli impianti fotovoltaici e nei pannelli PV arrivati a fine vita. Elaborato da dati [IEA b, 2025]

Sul piano nazionale, le produzioni industriali italiane che coinvolgono CRM impattano sul 32% del PIL, dato del 2023, per un valore economico pari a 690 miliardi di Euro. Per generare tale prodotto interno, l'import italiano di CRM nel 2022 può essere valutato in 38 miliardi di Euro, tra materie prime, minerali grezzi e semilavorati. Di questi circa il 10% riguarda materie prime e minerali grezzi (circa 4 miliardi di Euro), dove si è registrato negli ultimi anni un forte aumento soprattutto di rame, alluminio/bauxite e nichel. La cifra di 4 miliardi di import di materie prime e minerali grezzi è prevista in crescita negli anni a seguire, fino ad arrivare a +340% nel 2040 [TEHA Group, 2024]. In un'ottica circolare, il recupero da depositi abbandonati e il riciclo da riserve in uso o a fine vita può alleviare la crescente domanda di CRM, ma l'Italia si trova molto indietro rispetto alle proprie potenzialità. Emblematico è il caso della raccolta dei RAEE. L'Italia risulta essere il terzultimo Paese dell'EU in termini di percentuali di RAEE raccolti (30% rispetto al 46% di media EU). Inoltre, tale dato è inferiore alla metà del target (30% vs 65%), cosa che ha comportato nel luglio 2024 l'apertura di una procedura di infrazione da parte della Comunità Europea. La mancata valorizzazione comporta una perdita economica in Italia di circa 1,6 miliardi di Euro l'anno [TEHA Group, 2024]. Questa dinamica si innesta in un periodo storico in cui la produzione di RAEE è in forte aumento (+44% tra il 2019 e il 2023), ma la filiera di recupero non riesce a seguire tale andamento di crescita (-9,5% nello stesso periodo). Rafforzare le filiere di raccolta e trattamento dei RAEE e incentivare l'utilizzo di materie prime seconde nelle produzioni industriali è di estrema utilità anche

nell'ottica di preparare il tessuto economico italiano al flusso di materiali a fine vita, che investirà il Paese nei prossimi anni.

Esistono diverse tecnologie e processi per il riciclo dei CRM. I processi di raccolta, separazione e riciclo influenzano tanto le prestazioni di recupero dei CRM quanto la fattibilità economica, determinando ricadute sull'intera catena del valore del riciclo. Esistono sia processi consolidati ed ampiamente utilizzati sia processi emergenti e innovativi. Le principali tecnologie di separazione e riciclo possono essere elencate in queste categorie:

- **Idrometallurgia** – È un processo molto competitivo per il valore limitato di energia richiesta. Essa prevede processi di lisciviazione chimica e purificazione, atti a precipitare diversi metalli. L'idrometallurgia può essere utilizzata per produrre materiali ad elevato grado di purezza, ad esempio carbonato di litio o solfati di nichel di grado batteria, tali da poter essere utilizzati per la produzione di batterie [IEA b 2025].
- **Pirometallurgia** – Il processo prevede la fusione del materiale in un forno ad alta temperatura, con recupero di una frazione dei metalli sotto forma di lega metallica e la parte restante sotto forma di ossidi (scorie). È molto efficace per metalli quali alluminio e rame, ma particolarmente dispendiosa dal punto di vista della richiesta energetica. Al contempo, richiede meno pretrattamento rispetto all'idrometallurgia. È spesso utilizzata in combinazione con l'idrometallurgia, ad esempio nel trattamento di batterie, per aumentare il grado di riciclo nel processo complessivo.
- **Biolisciviazione** – Alternativa a basso costo e bassa energia ai metodi tradizionali. Risulta efficace per metalli quali il rame, il nichel e l'oro. Per molti aspetti è ancora allo stadio emergente.
- **Riciclo diretto** – Il riciclo diretto è un processo di riciclo emergente con tassi di recupero molto elevati, poiché non scompone il materiale nei suoi metalli costituenti, ma ne preserva la struttura cristallina. È un metodo di ricondizionamento di componenti, ad esempio elettrodi di batterie, che quindi non richiede particolari trattamenti chimico-fisici. Allo stato attuale di sviluppo, lo svantaggio è che il metodo è poco flessibile a trattare matrici molto diverse. Un ecodesign dei prodotti favorirebbe la crescita di tale sistema di recupero.
- **Riciclo modulare** – è un sistema di delocalizzazione delle infrastrutture di riciclo. Processare i rifiuti, almeno parzialmente, in prossimità a dove sono generati permette di ridurre trasporti ed emissioni.
- **Recupero a basse temperature** – si intende tutta una serie di tecniche dall'alto potenziale di recupero, ma che comportano un avanzato livello tecnico.

- Tecnologie avanzate di cernita – sono una gamma di tecniche, scientificamente avanzate, che permettono di aumentare l'efficacia di smistamento dei rifiuti e, quindi, la purezza dei materiali in ingresso ai trattamenti di recupero.

Nel seguito, viene presentata una panoramica di sei CRM di particolare interesse per la transizione e le infrastrutture energetiche. Tale prospetto restituisce le principali applicazioni, gli approvvigionamenti, i tassi di riciclo all'interno dell'EU e le specificità per ogni CRM analizzato e di cui vengono presentati i risultati in Figura 4.

Focus su alluminio: L'alluminio è un metallo leggero, buon conduttore di calore ed elettricità. L'alluminio è completamente riciclabile e, in teoria, riutilizzabile un numero infinito di volte. La combinazione delle sue proprietà e caratteristiche lo ha reso il secondo metallo più utilizzato dalle società moderne. L'EU importa più del 60% della sua domanda d'alluminio [RMIS]. Ciò, oltre al rischio economico dovuto alla dipendenza da pochi fornitori, rappresenta un problema ambientale, essendo la produzione di alluminio altamente energivora. Il riciclo può rappresentare una riduzione, in termini di CO₂eq, fino al 93% [Coelho, 2025]. Purtroppo, il *Circular Material Use Rate* (CMUR) – indicatore che misura il quantitativo di materiale arrivato a fine-vita e reimmesso nell'economia; i.e. indicatore assimilabile al quantitativo di produzione primaria evitata – si ferma al 43%, mentre l'*End-of-life Recycling Rate* (EoL-RR) e l'*End-of-life Collection Rate* (EoL-CR) si attestano al 65% e 80% [RMIS]. Ciò dimostra la capacità teorica europea di espandere le proprie potenzialità di circolarità per tale materiale strategico, con la conseguente riduzione sia dei rischi collegati alla catena del valore sia dei danni ambientali: un reale incremento della quota di riciclo può comportare un risparmio di CO₂eq fino a 7.4 milioni di tonnellate [Coelho, 2025]. Rafforzare le infrastrutture di riciclo, diminuire gli export di rottami di alluminio ed espandere le capacità produttive interne, sono tutte strategie volte al conseguimento di tali obiettivi.

Focus su litio: Il litio è il metallo più leggero presente in natura. Inoltre, il litio ha un'eccellente conduttività elettrica e il più alto potenziale elettrochimico tra tutti i metalli. Queste sue caratteristiche hanno determinato che la sua applicazione principale ricadesse nella produzione di batterie ricaricabili. Con l'elettrificazione del settore della mobilità e la penetrazione delle energie rinnovabili in rapida accelerazione, la domanda di batterie agli ioni di litio, e quindi l'utilizzo complessivo del litio, è in rapido aumento. La dipendenza dell'UE dalle importazioni è pressoché totale: 81% per la materia prima e praticamente il 100% per i prodotti raffinati [Coelho, 2025]. Inoltre, i tassi di riciclo attuali si attestano non oltre l'1%. Si può ipotizzare che con l'aumento della penetrazione delle batterie a ioni litio, anche per lo storage di rete, la grande disponibilità di materia prima seconda abbia un impulso sulla crescita del tasso di riciclo. Infatti, già attualmente l'*End-of-life Collection Rate* (EoL-CR) è oltre il 50% (53% secondo gli ultimi dati JRC [Coelho, 2025]), che però ancora non si trasforma in un elevato livello di materia seconda nei prodotti contenenti litio, determinato da indicatori tipo *End-of-life Recycling Rate* (EoL-RR) o simili (Figura 4). Proiezioni stimano che nel medio termine è possibile soddisfare fino al 5-8% del fabbisogno di litio per batterie tramite *scaling-up* dei processi di riciclo [Coelho, 2025]. Riciclo e un'aumentata produzione interna possono portare ad un abbattimento delle emissioni di 0,5-1 milioni di tonnellate di CO₂eq.

Focus su nichel: Tradizionalmente, il nichel è ampiamente utilizzato nella produzione di vari acciai e leghe metalliche (superalloys). Comunque, in anni recenti la domanda di nichel sta crescendo fortemente, in quanto esso è molto utilizzato in alcune tipologie di batterie agli ioni litio. Sebbene il 75% circa della domanda di nichel raffinato/processato sia acquisito dall'EU tramite import, in cui figurano la Russia e l'Indonesia tra i maggiori esportatori, la Comunità Europea possiede nella Finlandia un produttore in grado di fornire circa il 38% della domanda interna di materia prima [RMIS]. La volontà politica comunitaria di espandere la capacità di raffinazione interna alla EU potrebbe portare, nel caso del nichel, a coprire larga parte della domanda di prodotti raffinati grazie ad un Paese membro. Inoltre, la Finlandia si pone l'obiettivo di una produzione *carbon-neutral* al 2039, con ovvi vantaggi ambientali rispetto ad avvalersi di forniture esterne [Coelho, 2025]. Dal lato del riciclo e dell'utilizzo di materia prima seconda, il CMUR del nichel si attesta al 45% (Figura 4) - valori simili spettano ad indicatori analoghi (42% per EoL-RR) – il che denota discrete performance di riciclo e riutilizzo [RMIS]. D'altro canto, altri indicatori dimostrano come ci siano ulteriori margini di miglioramento: l'EoL-CR è al 73% [RMIS], indice della possibilità di incrementare il valore di materiale riciclato reimmesso nel ciclo produttivo. Anche a causa della forte crescita della domanda, quindi, il quantitativo di materia prima seconda all'interno di prodotti di nichel si mantiene ancora piuttosto basso.

Focus su terre rare: Gli elementi del gruppo delle terre rare neodimio (Nd), praseodimio (Pr), disprosio (Dy) e terbio (Tb) sono utilizzati per realizzare magneti permanenti, i quali sono introdotti in diverse tecnologie per l'energia, in particolare motori per veicoli elettrici e turbine eoliche. L'EU risulta completamente esposta rispetto a queste materie prime critiche, sia per quanto riguarda le HREE che le LREE. Infatti, la dipendenza è totale (pari quasi al 100%) dalle importazioni estere e ampiamente concentrate verso un unico fornitore, la Cina [Coelho, 2025]. Al contempo, il recupero e riciclo delle risorse è minimo, non superando l'1%. Storicamente, il riciclo delle terre rare dai magneti permanenti di prodotti a fine vita è stato limitato per ragioni diverse, sia economiche che tecnologiche: in molte apparecchiature elettroniche, i magneti sono piccoli e incorporati in matrici complesse. Tuttavia, la transizione energetica sta rendendo il riciclo delle terre rare dei magneti più fattibile rispetto al passato, grazie al loro crescente utilizzo in applicazioni di grandi dimensioni come le turbine eoliche. Da notare che gli obiettivi energetici della Cina prevedono di coprire il 17% del fabbisogno elettrico al 2050 con energia eolica, mentre gli USA avevano definito lo stesso target al 35% [Li et al., 2020]. In prospettiva, i magneti permanenti presenti in motori elettrici e turbine eoliche rappresenteranno la prima fonte di terre rare secondarie. Ciò è estremamente importante, considerando che alcune analisi descrivono una crescita della domanda cumulata al 2050 di terre rare per la produzione di impianti eolici in un range di 11-26 volte i livelli del lustro 2011-2015 [Li et al., 2020]. Oggi, a livello globale, la frazione di materia prima seconda rispetto all'input totale è al 14% [RMIS]. Il recupero di terre rare da magneti e rifiuti elettronici presenti sul territorio europeo può, perciò, rappresentare un parametro per diminuire la domanda e l'esposizione rispetto ai pochi fornitori.

Focus su rame: Il rame è un materiale che racchiude diverse caratteristiche tecniche, quali l'elevata conducibilità elettrica, la durata, la duttilità e la resistenza alla corrosione, che lo rendono indispensabile in molteplici tecnologie energetiche (veicoli elettrici, batterie,

energia solare fotovoltaica, energia eolica e reti elettriche). Sebbene esso compaia nella lista EU dei CRM, la dipendenza dalle importazioni non è particolarmente critica, specialmente per i prodotti di raffinazione e semilavorati (17% [RMIS]). Per confronto, il tasso di import di materia prima è intorno al 48%, ma i Paesi fornitori sono diversificati, escludendo il rischio di una forte concentrazione. La capacità di raffinazione europea su scala globale è del 9,5%. La capacità di recupero del rame (82% EoL-CR [RMIS]) e di riutilizzo come materia prima seconda (53% EoL-RR [RMIS]) è tra quelle maggiormente sviluppate tra i metalli di rilevanza tecnologica (Figura 4). La crescita annuale registrata negli ultimi dieci anni non risulta particolarmente critica (2,5% circa), se confrontata con altri elementi della tavola periodica di rilievo per le tecnologie verdi. Ciononostante, il rame è un materiale che potrebbe subire delle forti pressioni di domanda in futuro. Infatti, questa potrebbe presentare una decisa impennata nei prossimi anni, in particolar modo in conseguenza degli ampliamenti alla rete di trasmissione e distribuzione dell'elettricità. Ciò pone non solo una sfida rispetto alle capacità estrattive, ma, inoltre, nel mantenere, ampliare ed incrementare i livelli di recupero e riciclo del rame. Infatti, secondo l'IEA, la quota di rame secondario è rimasta sostanzialmente invariata dal 2015 [IEA b, 2025].

Focus su cobalto: Il cobalto è un metallo duro che mantiene la sua resistenza anche alle alte temperature, ha un alto punto di fusione ed è in grado di formare leghe con altri metalli, conferendo resistenza alle alte temperature e resistenza all'usura. La recente, forte crescita della domanda di cobalto è dovuta al mercato delle batterie agli ioni di litio, essendo il cobalto presente in diverse composizioni. Il consumo di cobalto è distribuito principalmente tra batterie, leghe a base di nichel, pigmenti e catalizzatori. L'Europa è dipendente per l'81% [RMIS] da import extra EU di materia prima. D'altro canto, ha sviluppato una discreta capacità di raffinazione, principalmente collocata in Finlandia e Belgio, che le garantisce una produzione che è pari all'8,5% della produzione globale. Il tasso di raccolta è piuttosto significativo (61% EoL-CR [RMIS]), ma la capacità di far rientrare la materia prima seconda nell'economia europea si mantiene, purtroppo, ancora bassa: CMUR 31% e EoL-RR 33% [RMIS].

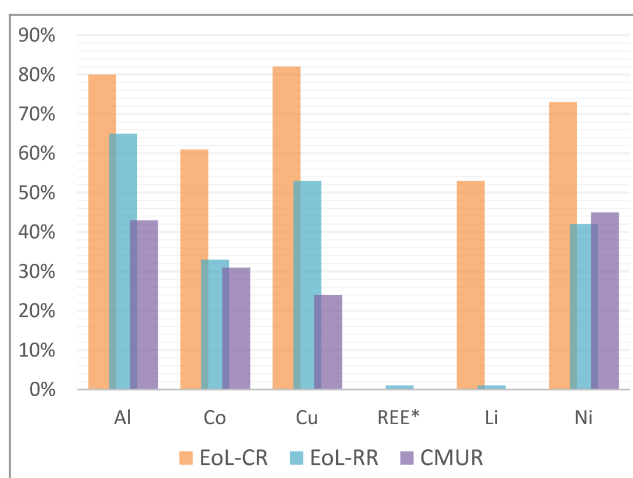


Figura 4: Indicatori di riciclo nell'EU per le sei CRM analizzate. Elaborazione da dati forniti nel *Raw Materials Information System* [RMIS]. * Per REE (rare earth elements), il dato si riferisce all'indicatore EoL-RIR.

5.5 Accumuli elettrochimici e circolarità

Implementare un'economia circolare per accumuli elettrochimici basati su batterie a ioni litio è una sfida particolarmente complessa. Le batterie agli ioni di litio, infatti, hanno spesso dimensioni e forme diverse, ma, soprattutto, possono essere di tipologie e composizioni di materiali molto diverse, il che influisce sulla separabilità dei componenti e dei materiali, sul processo di riciclo e sulla resa del riciclo. In un'ottica di circolarità, per ridurre il ciclo dei materiali, sono stati compiuti sforzi per abbattere i volumi relativi a componenti accessori. Ad esempio, per le batterie litio-ferro-fosfato (LFP), ciò ha comportato un aumento della densità energetica della batteria, riducendo di fatto la quantità di acciaio, alluminio o plastica utilizzati per l'imballaggio. Il ciclo dei materiali delle batterie può essere rallentato prolungando la durata della batteria e progettando celle che durino per molti cicli di carica e scarica. A tal riguardo sono stati fatti miglioramenti significativi in termini di stabilità all'invecchiamento delle batterie [Passerini S. et al., 2024]. Infine, il ciclo dei materiali delle batterie può essere chiuso riciclando i componenti delle batterie. Come già detto, la recuperabilità di metalli quali cobalto, alluminio, nichel, litio e rame dipende dalla tipologia di batteria e dal processo di trattamento e riciclo utilizzato. Tra le diverse tipologie di batterie, le batterie LFP hanno rapidamente ampliato la loro penetrazione nel mercato, rappresentando circa il 30-44% delle batterie per veicoli elettrici nel 2023. La composizione del catodo è rappresentata principalmente da ferro (Fe, 69%) e fosfato (PO_4 , circa 31%), risultando quindi prive di metalli critici come nichel e cobalto [Kilavuz E. 2025, IEA b 2025]. Inoltre, dal punto di vista ambientale, le batterie LFP mostrano minori impatti in varie categorie ambientali, quando confrontate con altre chimiche del catodo [Peters J. F. et al., 2017]. Tuttavia, la presenza di un minor contenuto di CRM ne determina anche una minore profittabilità economica dei processi di riciclo [IEA b, 2025]. Infatti, in comparazione con una composizione del catodo di tipo NMC811 (nichel-manganese-cobalto), il ritorno economico di una batteria equivalente LFP si riduce ad un quarto – simulazioni IEA [IEA b, 2025] prevedono un utile di circa 15 dollari a kWh per il riciclo di NMC811 e di circa 3,5 dollari a kWh per LFP. Oltre la chimica del catodo, l'utile economico dipende da diversi fattori quali il prezzo dei metalli e l'ubicazione della facility di riciclo. In base a ciò, in economie sviluppate, dove il costo del lavoro è alto, e in scenari di prezzi altamente volatili, il riciclo di batterie LFP può diventare addirittura non redditizio. Questo pone una grossa sfida nel trovare strumenti di incentivazione, che favoriscano un trade-off tra performance tecniche, ambientali, contenuto di CRM e profittabilità del riciclo per le varie tipologie di accumuli elettrochimici. La capacità di riciclo di batterie al 2023 si attestava intorno ai 2,75 milioni di tonnellate, in un mercato sostanzialmente dominato da compagnie cinesi [IEA b, 2025]. Dal punto di vista delle tecnologie di riciclo, i trattamenti idrometallurgici sono quelli largamente più utilizzati – circa 87% del totale. I processi pirometallurgici coprono circa il 3,5% della capacità totale, con la restante parte da attribuire a metodi misti idro-/piro-metallurgici. Proiezioni IEA [IEA b, 2025] prevedono un netto incremento della capacità di riciclo di accumuli elettrochimici al 2030 – circa 10,5 milioni di tonnellate – ma la suddivisione tra i diversi processi di riciclo resterà pressoché immutata (90% idrometallurgici e 2% pirometallurgici). Da attesi

miglioramenti tecnologici si prevede che il riciclo diretto debba contribuire in maniera più sostanziosa a partire dal decennio successivo. Tra le strategie di circolarità per diminuire il fabbisogno di CRM, vanno menzionati gli sforzi della ricerca per trovare sostituti e soluzioni tecnologiche a minor contenuto di CRM. Il caso prevalente riguarda lo sviluppo di batterie agli ioni sodio, dove, infatti, il litio viene sostituito dall'abbondante e non-critico sodio [Passerini S. et al., 2024].

5.6 Il potenziale della circolarità per Industria 5.0 e le infrastrutture energetiche

Il *Critical Raw Materials Act* [European Parliament, 2024] si pone come obiettivi al 2030, rispetto al consumo di ciascun CRM, che almeno il 10% provenga dall'estrazione, il 40% dalla raffinazione e il 25% dal riciclo interno all'EU, oltre a non dipendere per più del 65% da un unico Paese esportatore non-EU. Nel marzo 2025, la Commissione europea ha approvato 47 progetti strategici nell'ambito del *Critical Raw Materials Act*, selezionati per il loro potenziale di aumentare significativamente la capacità dell'UE nell'estrazione, lavorazione e riciclo. Questi includono 16 progetti per il litio, 12 per il nichel, 7 per gli elementi delle terre rare e 1 progetto integrato per l'alluminio (tramite bauxite/allumina) [Coelho, 2025]. Inoltre, la comunità europea ha una lunga tradizione di policy intese a regolare e favorire il riciclo, la circolarità e la sostenibilità. A partire dal Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) del 2005, che richiede la raccolta separata e pone dei target al recupero e riciclo dei WEEE, passando per il Circular Economy Action Plan e l'Eco-design Act del 2009, che stabilisce degli standard ambientali obbligatori per i prodotti venduti sui mercati dei Paesi membri. Tali misure di *closed-loop supply chain*, invece di concentrarsi solo sulle responsabilità del settore del riciclo, sottolineano anche la responsabilità che devono assumersi i produttori, per garantire che i prodotti soddisfino criteri di sostenibilità lungo tutto il loro ciclo di vita. Ad esempio, l'OCSE definisce la Responsabilità Estesa del Produttore come un approccio politico che rende i produttori responsabili dei loro prodotti lungo l'intero ciclo di vita, inclusa la fase successiva al consumo [OCSE, 2024]. Una politica di Responsabilità Estesa del Produttore è definita dal trasferimento della responsabilità — sia essa fisica, economica o entrambe — verso i produttori. Questa responsabilità può essere totale o parziale ed è accompagnata da incentivi affinché i produttori integrino considerazioni ambientali nella progettazione dei prodotti. Indipendentemente dal tipo di strumento di incentivazione della circolarità, sia esso finanziario, normativo, tecnologico o altro, l'efficacia della misura va valutata in primis rispetto al potenziale di riduzione della domanda primaria di CRM. Mukherjee *et al.* [Mukherjee S., *et al.* 2025] valutano l'impatto che può avere il riciclo nella riduzione della domanda di sei CRM (alluminio, rame, cobalto, litio, terre rare e nichel). Seppure la loro analisi si soffermi principalmente sui Paesi in via di sviluppo, alcuni dati a livello globale vengono restituiti. Relativamente alla domanda globale di importazioni, il rame è il materiale con il più alto potenziale di recupero (32%), seguito da alluminio (16%) e nichel (6%). Il potenziale di recupero da rottami e rifiuti di cobalto, terre rare e litio resta, invece, al di sotto del 5%. I risultati esposti, per i Paesi sviluppati e con essi l'Italia, pongono un tema rispetto alla consuetudine di esportare verso Paesi in via di sviluppo grandi quantità

di rifiuti e componenti elettronici arrivati a fine vita. Tale allontanamento di fonti di materie prime seconde comporta una ridotta capacità di soddisfare la domanda di CRM con risorse già presenti sul territorio nazionale. Per dare un esempio della disparità tra i flussi di rifiuti raccolti e il potenziale di recupero calcolato secondo il metodo di Mukherjee *et al.*, basti pensare che, relativamente ai rifiuti elettronici, la percentuale di raccolta in Europa e Nord America arriva a quasi il 50% - dato relativamente costante nel decennio 2012-2022 – mentre in regioni quali l'America latina, l'Africa sub-sahariana e l'Asia centromeridionale è stata del 3% o inferiore. Attualmente le principali fonti di CRM per il riciclo sono due: 1) gli scarti di produzione e 2) prodotti ad alto contenuto di CRM arrivati a fine vita e che rientrano in uno schema di recupero e riciclo. In diversi scenari ipotizzati per la transizione energetica, l'adozione di tecnologie verdi aumenterà da un lato la domanda di CRM, ma anche la disponibilità di materie seconde, sebbene con uno sfasamento temporale dovuto all'utilizzo e alla vita utile dei dispositivi installati. Un esempio ne è il contenuto di rame nei rifiuti e scarti. Infatti, a livello globale, si prevede che il quantitativo di rame recuperabile dai rifiuti di tecnologie rinnovabili passerà dai circa 0,5 milioni di tonnellate del 2023 ai 2 milioni di tonnellate nel 2050, mentre per i rifiuti di rete elettrica si passerà da circa 0,2 milioni di tonnellate del 2023 a 2,8 milioni di tonnellate nel 2050. Considerando entrambe le fonti, ovvero tecnologie rinnovabili e reti elettriche, rispetto al totale di rame contenuto in tutte le tipologie di scarti o rifiuti, la frazione recuperabile da reti e rinnovabili aumenterà dal 4,3% del 2023 a circa l'8% nel 2040 e, infine, a circa il 18% nel 2050 [IEA b, 2025]. Va precisato che in tale analisi non si considera l'effettiva capacità di riciclo rispetto alla disponibilità, per cui i quantitativi di rame effettivamente riciclato e rimesso in produzione saranno minori. I diversi scenari di policy impongono, quindi, un conseguente aumento della quota di riciclo e prescrivono politiche per incentivare schemi di circolarità delle materie prime. L'effetto di tali politiche, atte inoltre al raggiungimento di target ambientali, si può valutare stimando la riduzione della domanda primaria di CRM.

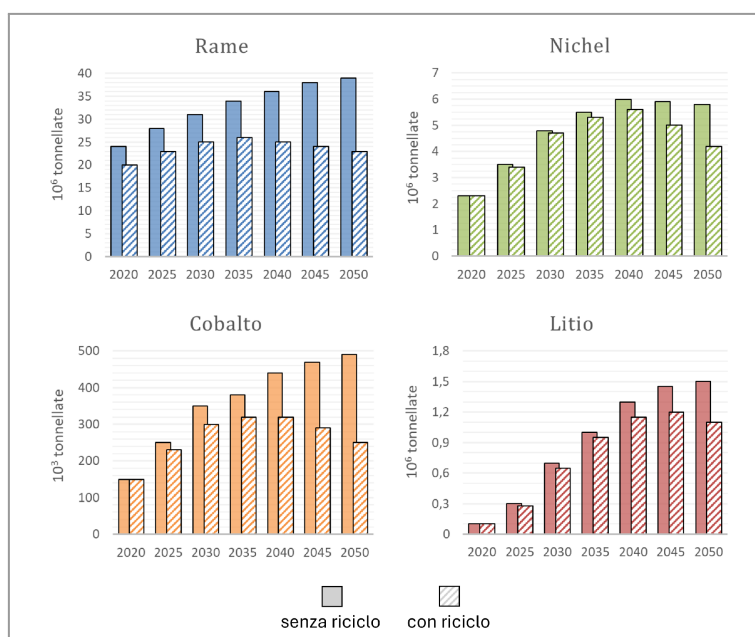


Figura 5: Domanda primaria di rame, cobalto, nichel e litio nello scenario APS, per il caso in cui strategie di riciclo vengano attuate o meno. Rielaborato da dati [IEA b, 2025]

In uno scenario *Announced Pledges Scenario* (APS), in cui si assume che i governi rispettino tutti gli impegni annunciati per ottenere i target climatici, la domanda primaria comincia a decrescere tra il 2030 e il 2040, per effetto della crescente offerta di materie prime seconde (Figura 5). Sebbene la domanda totale aumenti fino al 2050, con fattore di incremento tra due e tre (15 per il litio) rispetto ai consumi relativi al 2020, la maggiore penetrazione di tecnologie verdi e le aumentate possibilità di riciclo, quando attuate, determinano una crescita ancora più accelerata di materie prime seconde, con la conseguente riduzione della domanda primaria di CRM (Figura 5). Uno scenario APS prevede, quindi, che il contributo da fonti secondarie raggiunga al 2050 circa il 40% della domanda globale di rame, circa il 27% per il litio e il nichel e circa il 45% per il cobalto. Inoltre, stime per le terre rare portano, in questo scenario, a una quota pari a circa il 35% della domanda globale [IEA b, 2025]. Bisogna tener presente che in scenari di policy maggiormente vincolanti, come il *Net Zero Emissions* al 2050 (NZE), in cui i governi attuano tutte le misure necessarie a limitare l'aumento di temperatura a 1,5 °C, la disponibilità di CRM da fonti secondarie, la loro immissione nell'economia e il contributo del riciclo rispetto alla domanda globale di CRM cresce ulteriormente rispetto allo scenario APS. Negli scenari APS e NZE, si prevede una significativa espansione delle reti elettriche a supporto della transizione energetica. Tuttavia, data la durata di vita delle infrastrutture di rete, si prevede che entro il 2050 sarà disponibile solo una quantità parziale di rame proveniente dalla rottamazione delle reti elettriche a fine vita, mentre la stragrande maggioranza di esse raggiungerà la fine del proprio ciclo di vita dopo il 2050 [IEA b, 2025]. Per soddisfare la crescente domanda di CRM per reti energetiche e tecnologie verdi, gli investimenti minerari dovranno aumentare negli anni a venire. Lo scenario APS prevede un investimento complessivo al 2040 di circa 600 miliardi di dollari, di cui oltre il 50% (circa 53%) per il rame. Del resto, tale cifra crescerebbe a circa 800 miliardi, se non si adottassero misure di circolarità al fine di diminuire la domanda primaria di CRM [IEA b, 2025]. Sul piano nazionale, lo studio Ambrosetti [TEHA, 2023] dimostra una significativa crescita al 2040 della disponibilità per il riciclo di CRM. La stima, riferita ai settori eolico, fotovoltaico e delle batterie (non comprende il settore dell'elettronica), mostra una crescita di circa 13 volte rispetto ai livelli del 2023, passando da circa 0,1 milioni di unità nel 2023 a 1,8 milioni di unità nel 2040. L'analisi conferma, quindi, il potenziale del riciclo nel contribuire al problema dell'approvvigionamento per l'Italia. Inoltre, dall'analisi si evince che l'economia circolare ha il potenziale di raggiungere il 15% del fabbisogno nazionale entro il 2030.

5.7 Sfide aperte e prospettive future

L'essenza della sfida per la circolarità, che al contempo ne implica le opportunità ad essa collegate, può essere racchiusa nelle parole, tratte dal *Circularity Gap Report* [Circle Economy, 2023], dell'ex Primo Vicepresidente della Commissione Europea, Franz Timmermans:

“Humanity has to learn to live within planetary boundaries. When we decouple economic growth from material use, prevent and reduce waste, use recycled materials instead of

primary raw materials and boost circular business models, we can do it. By making our economy fully circular, we create new jobs, accelerate innovation, and at the same time fight the climate and biodiversity crises.”

Come visto nei paragrafi precedenti, le sfide aperte del riciclo dei CRM riguardano anzitutto i bassi tassi di raccolta e la carenza di infrastrutture, soprattutto nei Paesi emergenti, insieme alla complessità tecnologica dei materiali, all'eterogeneità dei prodotti e alla difficoltà di separazione e recupero efficiente [IEA b, 2025]. A ciò si aggiungono criticità economiche, frammentazione normativa, barriere al commercio dei rifiuti e lacune nei dati e nella tracciabilità. Persistono inoltre rischi ambientali e sociali legati a pratiche di riciclo non controllate [IEA b, 2025]. Nello specifico della EU, che sta investendo ingenti risorse sui CRM, le sfide sono legate alla frammentazione di questi fondi e al monitoraggio dei risultati. Altri aspetti riguardano le difficoltà incontrate, da un lato nel diversificare le importazioni e dall'altro nell'aumentare la capacità sia estrattiva che di processo [European Court of Auditors, 2026]. Un insieme coerente di azioni volte allo scale-up del riciclo dei CRM deve ruotare intorno alla necessità di definire strategie di lungo periodo con obiettivi chiari, strumenti operativi e meccanismi di monitoraggio, così da dare certezza agli investimenti [IEA b, 2025]. È fondamentale armonizzare le politiche su rifiuti e riciclo tra Paesi per creare mercati secondari efficienti e facilitare il commercio dei materiali riciclati. Parallelamente, è essenziale rafforzare le infrastrutture domestiche, tramite incentivi economici e obblighi normativi che stimolino sia la raccolta sia la capacità di trattamento. La catena del valore dei prodotti ad alto contenuto di CRM deve puntare su riciclo diretto, chimica “green” e integrazione design-riciclo. Un altro pilastro riguarda standard, tracciabilità e certificazioni, necessari per aumentare la fiducia nei materiali riciclati e incentivarne l'utilizzo industriale, e il sostegno all'innovazione e alla ricerca, insieme alla formazione della forza lavoro, per migliorare tecnologie e processi.

5.8 Conclusioni

La crescente domanda di materie prime critiche (CRM), trainata dalla transizione energetica, dalla digitalizzazione e dallo sviluppo delle infrastrutture di rete, pone sfide strutturali rilevanti per la sicurezza degli approvvigionamenti, la sostenibilità ambientale e la resilienza industriale. In tale contesto, il passaggio da modelli lineari di utilizzo delle risorse a paradigmi di economia circolare emerge come un elemento imprescindibile per garantire la sostenibilità di lungo periodo dei sistemi energetici e produttivi. Le strategie di circolarità rappresentano leve fondamentali per contenere la dipendenza da risorse primarie e mitigare i rischi associati alla concentrazione geografica delle filiere di approvvigionamento. L'analisi evidenzia tuttavia che, nonostante l'elevato potenziale teorico, l'attuale contributo delle materie prime seconde risulta ancora limitato, a causa di barriere tecnologiche, economiche e normative. In particolare, mentre metalli come rame e alluminio presentano filiere di riciclo mature, altri materiali strategici – quali litio, terre rare e cobalto – mostrano tassi di recupero estremamente bassi, rendendo necessario un

significativo salto tecnologico e infrastrutturale. Inoltre, la crescente complessità dei prodotti e la dispersione dei materiali in quantità ridotte ostacolano ulteriormente il recupero efficiente delle risorse a fine vita. A livello sistemico, il riciclo non potrà sostituire completamente l'approvvigionamento primario nel breve periodo, soprattutto alla luce della rapida crescita della domanda globale di CRM; tuttavia, esso potrà contribuire in modo crescente a partire dal medio-lungo termine, quando un numero significativo di tecnologie per la transizione energetica raggiungerà la fine del proprio ciclo di vita. In prospettiva, gli scenari di policy indicano che un'efficace integrazione delle strategie di circolarità potrebbe ridurre sensibilmente la domanda primaria di materiali e contenere gli investimenti necessari nello sviluppo di nuove attività estrattive. Per cogliere appieno tali opportunità è necessario un approccio integrato che combini politiche industriali, innovazione tecnologica e strumenti regolatori. Risulta fondamentale rafforzare le infrastrutture di raccolta e trattamento, promuovere l'eco-design dei prodotti, incentivare l'utilizzo di materie prime seconde e sviluppare tecnologie avanzate di riciclo. Infine, l'integrazione tra economia circolare e principi di Industria 5.0 offre una prospettiva evolutiva in cui sostenibilità, crescita e innovazione convergono nella progettazione di infrastrutture energetiche intelligenti e resilienti. La transizione verso sistemi circolari richiede pertanto un impegno coordinato, in grado di trasformare le sfide legate alle materie prime critiche in opportunità per uno sviluppo sostenibile, inclusivo e competitivo.

Bibliografia

Akcil A., Erust C., Gahan C. S., Ozgun M., Sahin M., Tuncuk A., “Precious metal recovery from waste printed circuit boards using cyanide and non-cyanide lixiviants – A review”, 2015, *Waste Management*, 45, 258-271

Carrington D., “World Consumes 100 Billion Tons of Materials Every Year, Report Finds”, 2020,
<https://e360.yale.edu/digest/world-consumes-100-billion-tons-of-materials-every-year-report-finds>

Chen Z., Kleijn R., Lin H. X., “Metal requirements for building electrical grid systems of global wind power and utility-scale solar photovoltaic until 2050”, 2023, *Environmental Science and Technology*, 57, 1080-1091

Circle Economy, “The Circularity Gap Report 2023”, 2023, Amsterdam

Circle Economy, “The Circularity Gap Report 2025”, 2025, Amsterdam

Coelho F., JRC, Science Policy Brief “Improving the Resilience of Critical Raw Materials Value Chains: The Case of Aluminium, Lithium, Nickel, and Rare Earths”, 2025, Ingoglia D. and Manfredi S. (editors), scaricabile da
<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC141906>

European Court of Auditors, special report 04/2026 “Critical raw materials for the energy transition – Not a rock-solid policy”, 2026, Publications Office of the European Union

European Parliament & Council of the European Union, 2024, Regulation (EU) 2024/1252 “Establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials”, Official Journal of the European Union.

EU, “Industry 5.0: A Transformative Vision for Europe ESIR Policy Brief No. 3”, 2021, Bruxelles

Gaustad G., Krystofik M., Bustamante M., Badami K., “Circular economy strategies for mitigating critical material supply issues”, 2018, *Resources Conservation & Recycling*, 135, 24-33

Gonzalez Baez A., Pantoja Munoz L., Garelick H., Purchase D., “Characterization of industrially pre-treated waste printed circuit boards for potential recovery of rare earth elements”, 2022, *Environmental Technology & Innovation*, 27, 102481

IEA (a), “Global Critical Minerals Outlook 2025”, 2025

IEA (b), “Recycling of Critical Minerals”, 2025

International Aluminium Institute, *Primary aluminium production*, consultabile a
<https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/>

International Copper Study Group, “The World Copper Factbook 2025”, 2025, International Copper Study Group, scaricabile a <https://icsg.org/copper-factbook/>

Kilavuz E., “Sustainable Lithium-ion battery recycling: Challenges, Innovations, and Pathways to a circular economy”, 2025, *ACS Sustainable Resource Management*, 2, 1838-1858

- Li J., Peng K., Wang P., Zhang N., Feng K., Guan D., Meng J., Wei W., Yang Q., “Critical rare-earth elements mismatch global wind-power ambitions”, 2020, *One Earth*, 3, 116-125
- Mukherjee S., *et al.* “Recycling of energy transition critical minerals from waste and scrap: accelerating the journey to a greener future”, 2025, *Frontier Technology Issues*, Department of Economic and Social Affairs, United Nations
- Nohl L., Finck R., Magnani N., Volkanovski A., “Material requirements for electricity grids”, 2025, JRC, Science for Policy Brief JRC 143190, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC143190>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2024). Extended Producer Responsibility: Basic facts and key principles. *OECD Environment Policy Papers*, No. 41. April
- Passerini S., Barelli L., Baumann M., Peters J. F., Weil M. (Editors), “Emerging Battery Technologies to Boost the Clean Energy Transition”, 2024, Springer, ISBN 978-3-031-48359-2
- Peters J. F., Baumann M., Zimmermann B., Braun J., Weil M., “The environmental impact of Li-ion batteries and the role of key parameters – A review”, 2017, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 491-506
- RMIS, <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/>
- Statista, “Mine production of lithium worldwide from 2010 to 2025” accessibile a <https://www.statista.com/statistics/606684/world-production-of-lithium/>
- TEHA Group, Iren, “Materie prime critiche e produzioni industriali italiane – Le opportunità derivanti dall’economia circolare”, 2023
- TEHA Group, “La *roadmap* italiana per le materie prime critiche”, 2024
- UNDP, “Transitioning to a circular economy: The future we cannot afford to delay”, 2025, <https://climatepromise.undp.org/news-and-stories/transitioning-circular-economy-future-we-cannot-afford-delay>
- Wang H., Zhang S., Li B., Pan D., Wu Y., Zuo T., “Recovery of waste printed circuit boards through pyrometallurgical”, 2017, *Resources, Conservation & Recycling*, 126, 209-218
- Wang H., Lamichhane T. N., Paranthaman M. P., “Review of additive manufacturing of permanent magnets for electrical machines: A prospective on wind turbine”, 2022, *Materials Today Physics*, 24, 100675.

Il programma Professional Fellows WEC Italia

Il Programma Professional Fellows di WEC Italia è una rete di professionisti dell'energia che mette in comune competenze, esperienze e sensibilità provenienti da ambiti disciplinari e professionali differenti. L'iniziativa nasce per favorire un confronto qualificato e multidisciplinare sui principali temi della transizione energetica, valorizzando il contributo di esperti con profili tecnici, scientifici, economici, giuridici, regolatori e manageriali. All'interno di questo network, i Professional Fellows sviluppano attività di ricerca, gruppi di lavoro, pubblicazioni, webinar e altre iniziative di approfondimento, coordinate da WEC Italia, contribuendo all'elaborazione di analisi e proposte sui principali temi dell'evoluzione del sistema energetico secondo un approccio multidisciplinare e multi-stakeholder.

L'Osservatorio Italiano Materie Prime Critiche Energia (OIMCE)

OIMCE – Osservatorio Italiano Materie prime Critiche Energia è un'iniziativa promossa da WEC Italia e Assorisorse per approfondire il tema dei critical raw materials, diffonderne la conoscenza e condividere proposte di politiche pubbliche sul tema.

L'Osservatorio si propone di raccogliere informazioni terze e certificate con un approccio neutrale basato su criteri scientifici e dialogare con le istituzioni italiane competenti per evidenziare i punti di attenzione identificati da attori industriali, associativi, accademici e professionisti del settore. OIMCE organizza incontri di approfondimento e condivisione, oltre al Simposio annuale di riferimento nazionale sul tema delle materie prime critiche energetiche

Gli autori

Gabriella De Maio - Coordinatrice Professional Fellows WEC Italia

Gabriella De Maio è Coordinatrice del Programma Professional Fellows e Vicepresidente di WEC Italia. Insegna Diritto dell'energia presso il Dipartimento di Giurisprudenza dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. Svolge attività di ricerca sui temi della transizione energetica ed è autrice di quattro monografie, una curatela e oltre quaranta saggi e articoli scientifici. Relatrice in numerosi convegni nazionali e internazionali, è componente dell'Osservatorio Italiano sulla Povertà Energetica, OIPE, e ha partecipato a programmi di ricerca e innovazione, tra cui il Centro Nazionale per la mobilità sostenibile, CN MOST, e il programma Network 4 Energy Sustainable Transition, PE NEST

Giuseppe Montesano - Coordinatore Osservatorio Italiano Materie prime Critiche Energia

Giuseppe Montesano è ingegnere meccanico, specializzato in energetica nel 1985. Dopo una breve esperienza nell'industria elettromeccanica, ha lavorato in Enel per 34 anni, sviluppando progetti di energie rinnovabili, definendo le strategie ambientali e di decarbonizzazione del Gruppo e gestendo tematiche regolatorie e di politiche energetiche e ambientali, in particolare con riferimento a direttive e regolamenti europei. Nel corso della sua carriera ha ricoperto diverse posizioni manageriali, tra cui Network and Tariff Regulation, Head of Environment, Head of European Regulation and Scenarios, Head of European Energy Policy e Deputy Director della Fondazione Centro Studi Enel. È stato consulente strategico di Utilitalia e attualmente coordina l'Osservatorio Italiano Materie Prime Critiche per l'Energia.

Angelica Agosta

Angelica Agosta è ingegnere meccanico e vanta 35 anni di esperienza, anche internazionale, nel settore energetico. Ha operato in ambiti che spaziano dall'oil & gas alle energie rinnovabili e all'efficienza energetica, ricoprendo ruoli decisionali in Belleli, Fiat Avio, Enron ed Enel. È stata CEO e socia di Universal Sun, tra le prime ESCo certificate italiane, fino all'acquisizione da parte di Sorgenia nel 2019. È fondatrice e CEO di ENNOVIA, società attiva nei settori geotermico e fotovoltaico, oggi interamente parte del gruppo Veos. Autrice di contributi tecnico-scientifici, è membro del Comitato scientifico di Symbola ed è promotrice della costituzione di ALEDIS APS, associazione impegnata nella promozione della parità di genere.

Giuseppe Bellussi

Giuseppe Bellussi ha conseguito la laurea in Chimica Fisica con lode e un PhD honoris causa in Ingegneria Chimica. Ha svolto gran parte della propria carriera in Eni S.p.A. Dal 2006 al 2016 ha ricoperto il ruolo di R&D Manager della Divisione Refining and Marketing e, dal 2016 fino al pensionamento nel 2019, quello di Senior Vice President responsabile del programma di ricerca e sviluppo sulla transizione energetica. Dal 2017 è fondatore e direttore della partecipazione di Eni in OGCI-Climate Investment, società di venture capital con sede a Londra che investe in tecnologie per la riduzione delle emissioni di CO₂ in diversi settori. È membro della United States Academy of Engineering, nonché Council Member di AIDIC, Italian Association of Chemical Engineering, ed EFCE, European Federation of Chemical Engineering.

Bruno Cova

Bruno Cova ha conseguito la laurea magistrale in Ingegneria Elettrotecnica presso l'Università di Pavia. Dal 1985 lavora a Milano per CESI, società specializzata in studi, servizi di consulenza, prove e certificazione di componenti elettrici. Dopo aver ricoperto per molti anni il ruolo di Direttore dell'Unità Advisory Services and Studies, è attualmente responsabile dell'area Power System Excellence. Vanta una lunga esperienza nella pianificazione delle reti di trasmissione, negli studi di fattibilità relativi alle interconnessioni dei sistemi elettrici e alla generazione da fonti rinnovabili, in particolare in Europa, nella regione del Golfo, nel Mediterraneo e in Paesi dell'America Latina e dell'Africa subsahariana. Recentemente ha condotto studi sulla mobilità elettrica, sull'idrogeno verde e sul suo impatto sui sistemi energetici. È stato per anni impegnato in associazioni internazionali quali CIGRE, IEEE e WEC, World Energy Council. Dal 2014 è membro onorario del CIGRE. È autore di oltre 70 articoli presentati a conferenze internazionali e nazionali.

Renato Di Belardino

Renato Di Belardino è un professionista del settore energetico con esperienza nella pianificazione industriale, nell'analisi economico-finanziaria e nella valutazione strategica di investimenti e portafogli energetici. Laureato in Economia presso l'Università La Sapienza di Roma, ha successivamente perfezionato la propria formazione in finanza e management presso la SDA Bocconi e in intelligenza artificiale applicata alla strategia aziendale presso il Massachusetts Institute of Technology, MIT. Nel corso della sua carriera ha maturato competenze nella definizione di scenari industriali di medio-lungo termine, nell'analisi dei mercati energetici e nel supporto ai processi decisionali in contesti complessi e internazionali.

Giuseppe Di Florio

Giuseppe Di Florio ha conseguito la laurea in Ingegneria dei Materiali presso l'Università degli Studi di Napoli, cui ha fatto seguito il conseguimento del dottorato di ricerca nel 2009. Durante gli studi ha maturato competenze nella caratterizzazione dei materiali mediante tecniche fisico-chimiche e di microscopia. Dal 2010 al 2015 è stato ricercatore presso l'Università della Ruhr e l'Università di Düsseldorf. Successivamente è stato assegnista di ricerca presso l'Università di Siena, dove la sua attività di ricerca si è concentrata sull'analisi del ciclo di vita, LCA, di materiali e tecnologie energetiche. Attualmente è ricercatore presso il Dipartimento TERIN di ENEA, dove unisce l'esperienza maturata nella scienza dei materiali alla valutazione delle prestazioni ambientali di materiali e tecnologie impiegati nei sistemi energetici.

Tommaso Ferrucci

Tommaso Ferrucci è ingegnere energetico e PhD in Energy, Systems, Land and Construction Engineering presso l'Università di Pisa. Si occupa di modellazione, ottimizzazione tecnico-economica e governance delle Comunità Energetiche Rinnovabili, con esperienza in progetti europei Horizon Europe e LIFE CET. È stato Project Manager presso Engreen e Research Fellow presso la Libera Università di Bolzano. È inoltre fondatore di Comunità Sassifraga, iniziativa culturale e territoriale dedicata alla rigenerazione delle aree interne.

Edoardo Lubin

Edoardo Lubin è Advocacy & Lobbying Senior Consultant presso Bistoncini Partners e Vicepresidente di AWARE Think Tank. Ha conseguito la laurea magistrale in Governo e Politiche presso la LUISS Guido Carli e un Master in Corporate Communication, Lobbying & Public Affairs presso la 24ORE Business School. Dal 2018 è co-fondatore e vicepresidente di AWARE, think tank impegnato nell'elaborazione di policy paper sui temi energetico-ambientali e digitali. In Bistoncini Partners dal 2021, ricopre il ruolo di Advocacy & Lobbying Senior Consultant, seguendo clienti afferenti ai settori energetico, agroalimentare e finanziario. È inoltre Professional Fellow WEC Italia presso il Comitato Italiano del World Energy Council e, dal 2025, Research Fellow presso il Policy Observatory della LUISS School of Government.

Sofia Nunzi

Sofia Nunzi è una professionista attiva nel campo delle politiche europee e della finanza pubblica, con esperienza nella progettazione e nell'implementazione di strumenti finanziari a sostegno delle priorità strategiche dell'Unione europea. Nel corso del proprio percorso professionale ha operato in contesti di ricerca, contribuendo allo sviluppo di iniziative ad alto impatto nei settori della transizione energetica, dell'innovazione e delle infrastrutture digitali.

Lorenzo Piscitelli

Lorenzo Piscitelli è avvocato presso lo Studio Legale ADVANT Nctm. Presta regolarmente assistenza e supporto legale a clienti nazionali e internazionali con riferimento a tematiche di diritto amministrativo, tra cui profili autorizzativi, urbanistici, regolamentari e ambientali, connesse a vario titolo alla costruzione e all'esercizio di impianti che producono energia da fonti rinnovabili e convenzionali, infrastrutture di rete, gas, teleriscaldamento e waste-to-energy. Ha maturato una radicata esperienza nel settore Energy, Utilities & Infrastructures e dei mercati regolamentati, sia nel contesto di operazioni straordinarie,

buy-side e sell-side, e di finanziamento o rifinanziamento, sia nell'ambito di iniziative di sviluppo. Si occupa inoltre dei profili regolatori, di contrattualistica pubblica, inclusi appalti, concessioni e partenariati pubblico-privati nelle loro diverse declinazioni, nonché degli aspetti ambientali e urbanistici connessi a vario titolo alla gestione e allo sviluppo di infrastrutture nel settore energetico e delle public utilities.

Pietro Rabassi

Pietro Rabassi è Executive Vice President per l'Europa continentale, occidentale e centrale, presso Nord Pool, parte del gruppo Euronext. Nel ruolo di General Manager per questa regione, è responsabile dell'espansione della presenza di Nord Pool in Europa e della creazione di valore per clienti e stakeholder. Ha maturato un profilo professionale internazionale nei settori business, pubblico e accademico, con particolare riferimento al settore energetico ed elettrico. È laureato presso l'Università di Harvard, dove ha svolto studi post-laurea in business e government presso la Harvard Business School e la Harvard Kennedy School, come borsista Giorgio Ruffolo / Empedocle Maffia finanziato dal Governo italiano. In precedenza ha studiato ingegneria al Politecnico di Milano, all'Alta Scuola Politecnica e all'École Polytechnique, ed economia presso l'Università degli Studi di Milano. In Nord Pool dal 2016, ricopre inoltre diversi incarichi in ambito accademico, associativo e istituzionale, tra cui Vice President of the Board of Directors dell'Harvard Club of Italy, Senior Fellow presso la Global Florence School of Regulation, membro dello Steering Committee del Franco-German Office for the Energy Transition, Professional Fellow del World Energy Council e Aspen Junior Fellow Alumni presso The Aspen Institute.

Contatti

WEC Italia - Comitato Italiano del World Energy Council

Via Ostiense 92, 00154 Roma, Italia

www.wec-italia.org; segreteria@wec-italia.org