WORKING GROUP
Competenze e Formazione

COMPETENZE E FORMAZIONE PER LA FILIERA CRM/ENERGIA

Settembre 2026

Il presente studio è stato presentato in occasione del Terzo Simposio Nazionale delle Materie Prime Critiche per l'Energia, che ha avuto luogo in Roma il 28 settembre 2026 presso il Ministero delle Imprese e del Made in Italy, promosso da OIMCE, iniziativa WEC Italia – Assorisorse.

Hanno collaborato alla redazione del presente documento: Mariachiara Zanetti (Politecnico di Torino), Rossana Bellopede (Politecnico di Torino), Fernanda Panvini (Fondazione Centro Studi Enel), Modestino Colarusso (Confindustria Energia), Alessandra Bonoli (Università di Bologna), Floriana La Marca (Università di Bologna), Silvia Serranti (Università di Roma "La Sapienza", Paolo Bevilacqua (Università di Trieste), Battista Grosso (Università di Cagliari), Francesco Di Natale (Università di Napoli Federico II), Giovanna Dino (Università di Torino), Emanuele Emani (CNG), Vittorio Desiati (Confindustria Energia), Gioia Tosti (Confindustria Energia), Matteo Giardino (Politecnico di Torino).

Sommario

PREFAZIONE E INQUADRAMENTO STRATEGICO 4
PARTE 1: LE COMPETENZE PER L'APPROVVIGIONAMENTO SOSTENIBILE E SICURO E UNA GESTIONE RESPONSABILE DELLE MPC 5
1. L'ingegneria delle materie prime e della trasformazione nell'Era del CRMA: Standard, Sfide e Opportunità 5
1.1 Obiettivi Formativi: Dalla Geologia alla "Social License to Operate" 5
1.2 Buone Pratiche Internazionali e Modelli di Sostenibilità Integrata 6
1.3 Sicurezza, Reporting e Tracciabilità: Competenze per Filiere Trasparenti 6
2. Lo Stato della Formazione Accademica e della Ricerca nelle Discipline Fondamentali 6
2.1 Benchmark Internazionale ed Europeo: Modelli di Eccellenza 6
2.2 Il Panorama Nazionale: Poli Universitari e Sinergie Interdisciplinari 7
2.3 Collegamento con il Settore Industriale: Dottorati Industriali, Ricerca Applicata e Ruolo delle Associazioni di Categoria 8
PARTE 2: LE COMPETENZE PER LA TRASFORMAZIONE INDUSTRIALE E L'INTEGRAZIONE 9
1. Tecnologie per la transizione energetica 9
1.1 Competenze e qualifiche richieste dalle imprese 9
1.2 Settore estrazione dei minerali critici 10
1.3 Settore elettrico 11
1.4 Settore produzione di veicoli elettrici e batterie 13
1.5 Scenari al 2035 14
PARTE 3: ANALISI E PROPOSTE DI MIGLIORAMENTO 15

PREFAZIONE E INQUADRAMENTO STRATEGICO

Nell'attuale contesto normativo, energetico e di approvvigionamento delle materie prime critiche (MPC), la collaborazione tra enti di formazione e industria e l'opportuno rafforzamento di sinergie è di grande importanza. La rilevanza dell'argomento è dimostrata dalle recenti normative europee (Regolamento comunitario n. 2024/1252 sulle materie prime critiche e strategiche con la sua applicazione - Decreto-Legge n. 84/2024) e dai dati elaborati dall'International Energy Agency (IEA) che, oltre a mettere in evidenza una criticità nell'approvvigionamento delle MPC legate ai fabbisogni energetici, descrivono soluzioni che implicano la padronanza di saperi e competenze trasversali e specialistiche nel settore delle materie prime e la loro trasformazione. A livello nazionale, i recenti eventi di disseminazione e divulgazione sulle MPC, oltre a sottolineare l'importanza dell'aggiornamento della legislazione mineraria, della definizione di una politica nazionale delle materie prime critiche, hanno trattato argomenti legati alla carenza di aziende specializzate nell'estrazione e trattamento del minerale o di rifiuti contenenti MPC, al fabbisogno di attività di alta formazione nel campo della geologia, della chimica e dell'ingegneria e alla valorizzazione dei rifiuti così come più recentemente l'importanza del confronto tra ricerca e imprese sull'impiego attuale e futuro delle materie prime critiche e strategiche nel sistema industriale nazionale.

In tale contesto si inserisce l'iniziativa dell'Osservatorio Italiano Materie prime Critiche Energia (OIMCE) promossa dal WEC Italia (World Energy Council Italia) e suoi associati e avviata a luglio del 2024 per approfondire il tema delle materie prime critiche, diffonderne la conoscenza e condividere proposte di politiche pubbliche sul tema. In particolare, tra le tematiche dei diversi tavoli di lavoro dell'OIMCE, una giusta importanza è stata data al tema Competenze & formazione per la filiera MPC/energia con lo scopo di mappare gap di competenze tra le necessità del settore industriale e l'offerta formativa universitaria attuale nel settore dell'approvvigionamento, trasformazione e riciclo delle materie prime critiche. Per questo motivo il presente documento si pone l'obiettivo di individuare e analizzare le competenze nel settore delle MPC per l'energia al fine di proporre soluzioni migliorative e attuative nell'ambito della formazione. Il lavoro è stato eseguito non solo con il supporto di diversi settori disciplinari accademici ma anche con la collaborazione del mondo industriale e delle associazioni di categoria. A tal fine, gli obiettivi del CRM Act sono stati presi come riferimento per analizzare la situazione della formazione universitaria a livello internazionale, europeo e nazionale (Parte 1). Per valutare il fabbisogno di manodopera nel settore energetico sono stati considerati i dati IEA (International Energy Agency) contenuti nel World Energy Employment (WEE2025), con un approfondimento sui settori seguenti: energetico, produzione di veicoli elettrici e batterie, estrazione dei minerali critici (Parte 2). Sulla base dei dati raccolti e commentati, si sono poi discusse nella Parte 3 possibili soluzioni attuative e di miglioramento.

PARTE 1: LE COMPETENZE PER L'APPROVVIGIONAMENTO SOSTENIBILE E SICURO E UNA GESTIONE RESPONSABILE DELLE MPC

1. L'ingegneria delle materie prime e della trasformazione nell'Era del CRMA: Standard, Sfide e Opportunità

Il Critical Raw Materials Act (CRMA - Regolamento comunitario n. 2024/1252) rappresenta un quadro legislativo di riferimento per garantire un approvvigionamento sostenibile, sicuro e resiliente delle materie prime critiche (MPC) e materie prime strategiche (MPS), fondamentali per la competitività industriale, la transizione verde e digitale e la sicurezza strategica dell'UE.

Gli obiettivi fissati per il 2030 per le materie prime strategiche (estrarre almeno il 10 % del proprio fabbisogno di SRM all'interno dell'UE; processare internamente almeno il 40%; riciclare almeno il 25% di tali materiali e non approvvigionarsi per più del 65% per ogni materia prima strategica da un singolo Paese extra UE) sottolineano la necessità di un approccio integrato e sistemico per la gestione (esplorazione, trasformazione e riciclo) delle materie prime, basato non solo su produzione e tecnologia, ma anche su competenze avanzate. Gli standard formativi nel tradizionale settore di ingegneria delle materie prime e della trasformazione devono dunque rispondere alle attuali necessità badandosi su nozioni innovative, criteri di multidisciplinarietà e principi di sostenibilità**.**

1.1 Obiettivi Formativi: Dalla Geologia alla "Social License to Operate"

Negli ultimi anni, il profilo professionale dell'ingegnere minerario e delle figure coinvolte nell'approvvigionamento delle MPC e MPS si è profondamente trasformato, non è infatti più sufficiente padroneggiare le tecniche di estrazione e trattamento mineralurgico delle materie prime. Sulla base degli obiettivi strategici europei definiti nel CRMA è fondamentale che la formazione comprenda, oltre a quelle già proprie dell'ingegneria mineraria e dell'ingegneria delle materie prime, quali la geologia applicata, la geofisica applicata, la valutazione delle riserve e delle risorse attraverso l'analisi di dati geospaziali (i.e. geostatistica), la modellazione dei giacimenti, i processi di trattamento fisico-meccanico di tipo mineralurgico finalizzati alla concentrazione dei minerali, altre competenze che riguardano:

- chimica, ingegneria chimica e/o ingegneria dei materiali per i processi di trattamento chimico e trasformazione;
- sfruttamento delle miniere urbane per ricavare le materie prime critiche dai rifiuti, ossia materie prime secondarie, in sostituzione delle materie prime primarie. Tale competenza è fondamentale, considerando che, nell'ambito dell'ingegneria delle materie prime, c'è stato un vero e proprio trasferimento tecnologico dal settore del trattamento e della valorizzazione delle materie prime a quello del trattamento e della valorizzazione dei rifiuti solidi. Infatti, in entrambi i casi sono solidi particolati che possono essere trattati (comminuzione, vagliatura, separazione, ecc.) con gli stessi metodi fisico-meccanici.
- valutazione e gestione dell'impatto ambientale, con approcci di mitigazione basati su metodo LCA e su valutazione del rischio;
- competenze di intelligenza artificiale (Artificial Intelligence, AI), apprendimento automatico (Machine Learning, ML) e analisi dei dati lungo tutta la catena del valore nel settore dell'energia, per applicazioni di manutenzione predittiva, per l'ispezione di qualità, l'ottimizzazione dei processi per la diagnostica e il monitoraggio delle apparecchiature, comprese le componenti robotiche;
- normativa internazionale e nazionale, soprattutto in materia di mineral reporting, sicurezza sul lavoro, autorizzazioni ambientali, Environmental, Social, Governance (ESG) report;
- scienze sociali e della comunicazione per la gestione delle controversie e stakeholder engagement ai fini del conseguimento della Social License to Operate (SLO).

Quest'ultima in particolare rappresenta una novità ai fini del conseguimento del consenso sociale e istituzionale alla realizzazione di progetti estrattivi e di trasformazione complessi e implica l'acquisizione della capacità di progettare e

condurre processi di partecipazione pubblica e dialogo con comunità locali, autorità pubbliche e organizzazioni non governative, facilitando l'accettazione delle opere.

1.2 Buone Pratiche Internazionali e Modelli di Sostenibilità Integrata

A livello scientifico internazionale, le nuove definizioni di mining sono declinate come Responsible Mining e Technospheric mining (Lim et al 2024, Trost et al 2026, IRMA and ICMM 2026) e riguardano non solo le attività di esplorazione e di sviluppo dell'attività estrattiva ma anche quelle relative alla trasformazione delle materie prime e di urban mining (sistema interconnesso di recupero dei materiali dai rifiuti urbani, prevalentemente edili e tecnologici). Le buone pratiche internazionali si basano su un modello di sostenibilità integrato su tre fronti**:** ambientale, sociale ed economico**.** Questo include:

- ottimizzazione dei processi per ridurre emissioni, consumi idrici e produzione di rifiuti;
- adozione di tecnologie pulite e digitali, come sistemi di automazione e AI per l'efficienza energetica;
- implementazione di modelli di economia circolare (es. recupero e riciclo di MPC e MPS da scarti di attività estrattiva o da rifiuti industriali, ad es.: RAEE – Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche).

L'adozione di tali pratiche non serve solo a ridurre gli impatti negativi, ma spesso si traduce in vantaggi competitivi per le imprese minerarie e di trasformazione, migliorando l'efficienza operativa e rafforzando l'accesso ai mercati globali.

1.3 Sicurezza, Reporting e Tracciabilità: Competenze per Filiere Trasparenti

La combinazione del CRMA con il regolamento sulle Batterie (Regulation (EU) 2023/1542) e il regolamento ESPR (Ecodesign for Sustainable Products Regulation - Regulation (EU) 2024/1781) che riguarda anche il passaporto digitale enfatizza la tracciabilità e la trasparenza lungo l'intera filiera delle MPC (Pimenow, 2026)**.**
I sistemi di monitoraggio ambientale e di salute e sicurezza nei cantieri di estrazione e trasformazione delle materie prime dovranno essere considerati nelle fasi di minerali reporting. In particolare, il PERC e lo JORC, con l'ultima revisione di dicembre 2025, già prevedono tali aspetti che devono essere obbligatoriamente inseriti fin dalla fase di esplorazione (PERC guide 2022, JORC update 2025).
Al sistema di reporting delle materie prime dalla fase di esplorazione, sviluppo e trasformazione è necessario aggiungere l'adozione di tecnologie digitali per seguire il percorso delle materie prime dalla miniera fino al prodotto finale.
Mediante l'implementazione di queste buone pratiche di possono raggiungere requisiti di tracciabilità e trasparenza, che rappresentano delle leve strategiche per implementare catene di approvvigionamento responsabili.

2. Lo Stato della Formazione Accademica e della Ricerca nelle Discipline Fondamentali

La formazione accademica, la ricerca applicata e le iniziative di trasferimento tecnologico costituiscono il cuore della costruzione di competenze avanzate nei settori delle MPC e MPS. Per questo motivo occorre puntare a un sistema formativo e di ricerca saldamente fondato sulle nuove declinazioni ed esigenze della nuova ingegneria delle materie prime e della trasformazione**.**

2.1 Benchmark Internazionale ed Europeo: Modelli di Eccellenza

Attualmente la qualificazione delle università nel settore delle materie prime fa riferimento al sistema QS world ranking nella categoria "Mineral and Mining Engineering". Le prime tre posizioni a livello mondiale sono occupate da Paesi con fiorente attività mineraria quali la Colorado School of Mine (Stati Uniti), University of the New South West (Australia) e la McGill University (Canada). A livello europeo invece le migliori università, dalla classifica EduRAnk risultano essere l'Università polacca (AGH, Cracovia), l'Imperial College di Londra, la Lulea University (Svezia) e l'università tecnica di Delft (Paesi Bassi). I contenuti formativi di tali università integrano gli aspetti prettamente ingegneristici, principalmente con competenze geologiche e ambientali.
Nel contesto Europeo ma anche internazionale, La Knowledge Innovation Community (KIC) EIT (European Institute of Innovation & Technology) RawMaterials rappresenta il più importante consorzio europeo nel settore delle materie prime, con l'obiettivo di mettere in relazione e favorire la collaborazione tra differenti organizzazioni. EIT RawMaterials, infatti, raccoglie oltre 300 partner provenienti da industria, università, centri di ricerca e venture capital.
La missione di EIT RawMaterials è di rafforzare la crescita e l'attrattività del settore delle materie prime in Europa, sostenendo sia progetti di innovazione tecnico-scientifica nel settore industriale che programmi accademici, che integrano formazione avanzata, imprenditorialità e innovazione per creare nuove competenze e stimolare lo sviluppo di tecnologie di filiera.

Attraverso la European Raw Materials Academy (ERMAcademy), iniziativa faro nel settore educativo lanciata in maggio 2025, EIT RawMaterials si è posta l'obiettivo di rafforzare le competenze di più 100.000 persone entro il 2030, fornendo programmi di formazione per migliorare la crescita professionale e la competitività della forza lavoro nel settore delle materie prime. La ERMAcademy offre numerosi programmi formativi accreditati, sui temi riguardanti l'intera catena di valore delle materie prime, dall'esplorazione al trattamento e lavorazione in un'ottica di sostenibilità ed economia circolare. I programmi si rivolgono non solo a studenti, ma anche a professionisti del settore e a un pubblico generale. Nei programmi si annoverano Master internazionali, che combinano conoscenze tecnico-scientifiche, gestione, imprenditorialità e attività di scambio tra istituzioni accademiche e imprese europee, corsi di specializzazione di livello intermedio e avanzato, che si rivolgono principalmente a professionisti del settore

Al momento la ERMAcademy fornisce 14 Master internazionali, con certificazione da parte dell'EIT Raw Materials, 7 Summer school per studenti di PhD, e circa 20 corsi professionalizzanti.

Recentemente, EIT RawMaterials promuove anche la European Advanced Materials Academy, con l'obiettivo di coprire anche le tematiche relative ai materiali avanzati, quali semiconduttori e compositi leggeri per biomateriali e nanotecnologie, per applicazioni tecnologiche innovative, soluzioni di energia pulita, trasformazione digitale e prodotti più sicuri e sostenibili

Nel suo complesso, l'esperienza di EIT RawMaterials dimostra che la formazione interculturale e interdisciplinare è fondamentale per affrontare le sfide globali dell'approvvigionamento sostenibile e della gestione responsabile delle MPC.

2.2 Il Panorama Nazionale: Poli Universitari e Sinergie Interdisciplinari

In Italia, il percorso formativo per conseguire la laurea in ingegneria mineraria non è più attivo dal 1990 e tali competenze sono confluite principalmente nella classe di laurea magistrale LM-35 (Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio), con percorsi o curricula specifici dedicati alle materie prime primarie e secondarie e alle risorse del sottosuolo. Alcuni Atenei storicamente legati al settore dell'Ingegneria delle Materie Prime hanno avviato corsi di Laurea incardinati nelle competenze del settore delle Georisorse e al Mining (Laurea Magistrale in Georesources and Geoenergy Engineering - Politecnico di Torino), altri hanno mantenuto attivi indirizzi specialistici in Geoengineering o risorse minerarie all'interno dei corsi di Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, anche con riferimento ai processi di recupero e riciclo delle materie prime dai rifiuti di diversa natura e provenienza (Università di Trieste, Università di Roma la Sapienza, Università di Bologna e Università di Cagliari). Le cinque università italiane nelle quali è presente il settore scientifico-disciplinare Ingegneria delle Materie Prime sono inoltre consorziate del CINIGEO (Consorzio Interuniversitario Nazionale delle Georisorse), allo scopo di promuovere e coordinare le ricerche e le altre attività scientifiche e applicative nel campo dell'Ingegneria delle Georisorse, delle Geotecnologie, dell'Ambiente, dell'Energia e dello Sviluppo Sostenibile tra Università, altri Enti di ricerca e Industrie e di favorire il loro accesso e la loro partecipazione alla gestione di laboratori nazionali e internazionali.

Obiettivo di queste cinque università, parallelamente ai percorsi formativi attuali focalizzati sulla Geoingegneria, è quello di sviluppare percorsi centrati, da un lato, sul riconoscimento e la valutazione dei giacimenti, sulle tecniche di sviluppo e coltivazione delle miniere nonché sulle tecnologie di trattamento e concentrazione dei minerali, e dall'altro, sul recupero di materie prime da fonti secondarie, integrando competenze di ingegneria, geologia, chimica, ingegneria chimica e dei materiali, ambiente e data science al fine di fornire competenze utili per la formazione dell'ingegnere minerario.

Nell'ambito della catena di valore delle materie prime, questa figura è integrata, da un lato, da figure che intervengono sui processi successivi alla valorizzazione dei minerali (come chimici dei materiali, metallurgisti ed altri, ai fini della produzione di metalli, di combustibili) e dall'altro da figure focalizzate sugli aspetti della sostenibilità ambientale della produzione.

La formazione del geologo riguarda discipline quali la giacimentologia, la mineralogia, la petrografia, la geomorfologia, la geologia strutturale, nonché la geologia applicata e ambientale, essenziali per la valutazione e la caratterizzazione dei giacimenti, oltre che per la definizione del contesto ambientale e dei processi geologici che caratterizzano il territorio. Tali competenze, fondamentali nelle fasi di progettazione, pianificazione e avanzamento delle attività, consentono una gestione efficiente e sostenibile delle georisorse, nel rispetto dell'ambiente e dei principi di tutela e valorizzazione della risorsa. Sono presenti in Italia diversi Poli Universitari che risultano maggiormente sviluppati nelle Regioni con una tradizione mineraria di lunga data, e che risultano essere delle eccellenze soprattutto nella formazione specialistica sopra evidenziata.

Con riferimento ai percorsi di laurea e laurea magistrale in ingegneria chimica, la formazione sul tema delle MPC e MPS si presenta in diverse forme. In primis, occorre rilevare che l'ingegneria chimica fornisce le competenze metodologiche

e tecniche necessarie per lo sviluppo di impianti e processi e di nuovi materiali, con ricadute dirette sullo sviluppo della filiera delle MPC/MPS e in particolare sull'industria di trasformazione e riciclo. In quest'ambito disciplinare, diversi atenei italiani hanno attivato curricula e insegnamenti orientati allo sviluppo sostenibile, all'economia circolare e alla produzione di materiali a ridotto impatto ambientale; nei corsi di laurea magistrale in ingegneria chimica sono inoltre presenti attività formative, obbligatorie o opzionali, direttamente o indirettamente connesse al recupero e alla valorizzazione delle MPC e all'integrazione delle fonti energetiche rinnovabili nelle filiere produttive. In forma più trasversale, è interessante citare un'iniziativa nazionale di alta formazione chiamata "Tecnologie per le Transizioni", che è stata elaborata da un gruppo di lavoro inter-ateneo composto dalle principali scuole di ingegneria italiane. Il progetto ha portato alla realizzazione del Minor in "Green Technology" un percorso formativo interdisciplinare, spesso erogato in parallelo alle lauree magistrali, per integrare le conoscenze ingegneristiche con competenze sistemiche su transizione energetica, economia circolare, efficienza energetica e riduzione dell'inquinamento, per rispondere alla crescente domanda di figure professionali in grado di affrontare con strumenti culturali adeguati le trasformazioni che accompagnano la Transizione Ecologica.

Nella value chain delle materie prime, infine, l'ingegnere dei materiali concentra la sua attività sulla selezione dei materiali e sulla progettazione dei processi tecnologici per ottenere manufatti finiti a partire dalle varie materie prime. Nel contesto delle materie prime critiche, la sua attività è fondamentale per le strategie di sostituzione, ovvero la ricerca di nuovi materiali che non dipendano da risorse scarse o geopoliticamente instabili, e per l'eco-design ovvero la progettazione componenti più durevoli e facili da disassemblare al fine di favorirne il riutilizzo e il riciclo.

2.3 Collegamento con il Settore Industriale: Dottorati Industriali, Ricerca Applicata e Ruolo delle Associazioni di Categoria

Il rafforzamento delle connessioni tra mondo accademico e industria è uno degli elementi chiave per garantire l'applicazione pratica delle competenze. Strumenti efficaci includono: dottorati industriali che permettono ai giovani ricercatori di collaborare direttamente con aziende; executive master che facilitano la connessione con il mondo industriale garantendo un bagaglio di competenze teoriche e applicate; progetti congiunti di ricerca applicata finanziati da fondi regionali (ad. Es. Bando METCHIN – Regione Piemonte), nazionali ed europei; collaborazioni con associazioni di categoria (ordini professionali, consorzi tecnologici) che fungono da ponte tra formazione e mercato del lavoro. Tra le tante iniziative portate avanti in questo senso è possibile citare: i dottorati in ingegneria civile e ambientale in ambito delle georisorse e materie prime su temi di recupero di MPC e MPS, l'Executive Master in Ingegneria delle Materie Prime applicata ai Minerali Industriali, il progetto MSCA Criteria sulla valorizzazione delle discariche minerarie e il trattamenti degli scarti, partecipazione ai tavoli di lavoro dell'ANIM (Associazione Nazionale Ingegneri Minerari), contratti di collaborazione e di ricerca con aziende per l'ottimizzazione di processi industriali per il trattamento e la trasformazione delle materie prime.

Nell'Area Tematica: Materie Prime ed Energia, con il contributo della Fondazione Centro Studi, il Consiglio Nazionale dei Geologi (CNG), da sempre attivo nei rapporti tra i diversi Enti, crea occasioni di confronto e dibattito pubblico sugli argomenti specifici, mediante eventi di formazione e aggiornamento. Una delle azioni principali è quella di divulgare e contribuire ai lavori, attraverso la formazione specifica professionale e post-universitaria dei tanti geologi professionisti, anche attraverso la sinergia con gli Ordini Territoriali. Si evidenzia come il CNG è parte integrante della Federazione Europea dei Geologi – FEG/EFG – che rappresenta la professione geologica in Europa e nel mondo. La FEG ha elaborato uno standard di criteri che i geologi devono possedere per poter acquisire tale titolo in particolare per il raggiungimento di un elevato livello di formazione ed esperienza, mantenuto mediante il continuo aggiornamento professionale.

Con riferimento all'ingegneria chimica, diversi progetti di ricerca applicata e contratti di collaborazione sono orientati verso i settori delle MPC e MPS, con particolare attenzione alla relativa industria di trasformazione e riciclo. Le attività di ricerca si traducono anche nel finanziamento di borse di dottorato industriale connesse a queste tematiche. Tra i percorsi di dottorato di ricerca si segnala il Dottorato Nazionale in *Materials, Sustainable Processes and Systems for Energy Transition*, che coinvolge in forma consortile numerose università italiane e istituzioni di ricerca. Il programma è finalizzato allo sviluppo di competenze avanzate nei settori dei materiali, dei processi sostenibili e dei sistemi tecnologici per la transizione energetica, includendo aspetti relativi a CRM e SRM. Anche l'AIDIC - Associazione Italiana di Ingegneria Chimica – contribuisce a promuovere la diffusione delle conoscenze tecnico-scientifiche sulle materie prime critiche, favorendo il dialogo tra mondo accademico, industria e istituzioni attraverso attività congressuali, gruppi di lavoro e iniziative scientifiche nazionali e internazionali.

PARTE 2: LE COMPETENZE PER LA TRASFORMAZIONE INDUSTRIALE E L'INTEGRAZIONE

1. Tecnologie per la transizione energetica

1.1 Competenze e qualifiche richieste dalle imprese

L'evoluzione della transizione energetica sta determinando una profonda trasformazione dei fabbisogni professionali lungo l'intera filiera dell'energia. Al fine di analizzare tali dinamiche, sono stati utilizzati i dati della International Energy Agency (IEA) contenuti nel rapporto World Energy Employment 2025 (WEE 2025), con particolare riferimento a tre comparti strategici: il settore dell'estrazione dei minerali critici, il settore elettrico, la produzione di veicoli elettrici e batterie.

L'indagine annuale condotta dalla IEA nel 2025, che ha coinvolto oltre 700 imprese operanti nei settori energetici, evidenzia un incremento delle difficoltà di reclutamento rispetto agli anni precedenti. Le principali criticità riguardano l'individuazione di lavoratori in possesso delle competenze tecniche richieste, soprattutto nei profili professionali qualificati che risultano oggi tra quelli maggiormente richiesti e più difficili da reperire sul mercato del lavoro.

La crescente domanda di competenze specialistiche ha indotto circa la metà delle imprese intervistate a rivedere le proprie strategie di assunzione. In numerosi casi, le organizzazioni hanno ridotto i requisiti inizialmente previsti o hanno scelto di investire direttamente in percorsi di formazione e aggiornamento professionale per compensare la carenza di candidati adeguatamente qualificati.

Le prospettive di sviluppo delle tecnologie energetiche a basse emissioni suggeriscono che tali tensioni sul mercato del lavoro potrebbero intensificarsi ulteriormente nei prossimi anni. L'espansione delle attività di costruzione e installazione di infrastrutture energetiche richiederà infatti un numero crescente di lavoratori tecnici e specializzati, la cui formazione richiede percorsi professionali strutturati e tempi relativamente lunghi. Parallelamente, nella maggior parte delle economie avanzate il numero di diplomati, laureati e professionisti certificati in discipline legate all'energia è rimasto stabile o ha mostrato una tendenza alla diminuzione, contribuendo ad ampliare il divario tra domanda e offerta di competenze. I gruppi professionali considerati nell'analisi seguono la classificazione internazionale ISCO (International Standard Classification of Occupations).

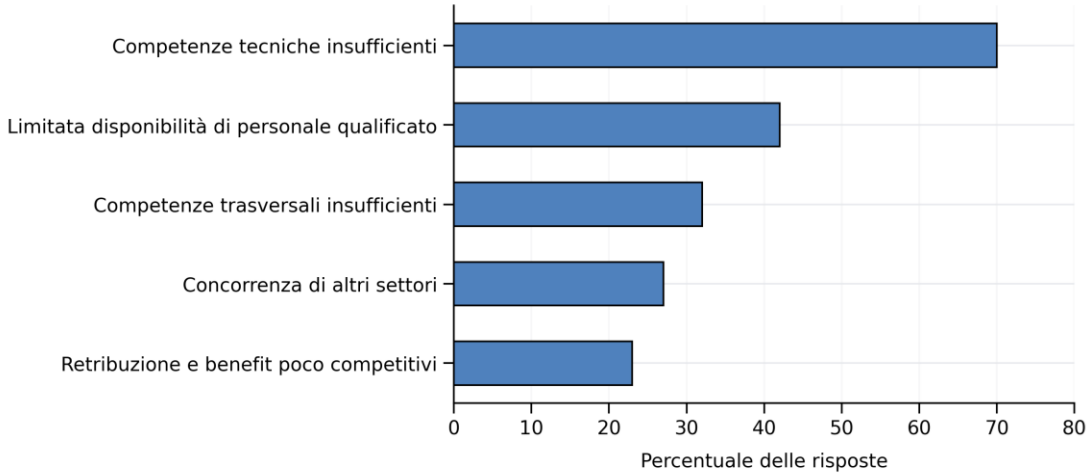
Quadro delle categorie professionali e requisiti formativi

Categoria professionale	Numero lavoratori settore energetico	Formazione richiesta	Livello di competenza	Esempi di mansioni
Dirigenti e professionisti (16%)				
Dirigenti	4.300.000 (6%)	Istruzione terziaria, laurea universitaria	Alto	Project manager per impianti solari utility-scale, responsabile esplorazione oil & gas
Professionisti e ingegneri	7.800.000 (10%)	Istruzione terziaria, laurea universitaria	Alto	Ingegnere nucleare, ingegnere elettrico
Lavoratori tecnici applicati (54%)				
Tecnici specializzati	8.600.000 (11%)	Formazione professionale avanzata	Alto	Tecnico di batterie, tecnico di sottostazione
Operai specializzati	18.900.000 (25%)	Istruzione secondaria superiore e/o istruzione e formazione professionale	Medio	Elettricisti, saldatori, idraulici, montatori di tubazioni
Operatori di impianti, macchine e assemblatori	13.900.000 (18%)	Istruzione secondaria superiore e/o istruzione e formazione professionale	Medio	Operatori di centrali elettriche, operatori di impianti di perforazione
Lavoratori dei servizi e di supporto (13%)				
Personale amministrativo	5.300.000 (7%)	Istruzione secondaria superiore e/o istruzione e formazione professionale	Medio	Assistente amministrativo, addetto alla gestione inventario
Addetti ai servizi e alle vendite	4.400.000 (6%)	Istruzione secondaria superiore e/o istruzione e formazione professionale	Medio	Addetto alle vendite, operatore del servizio clienti
Professioni non qualificate e agricole (17%)				
Lavoratori agricoli	800.000 (>1%)	Istruzione primaria o secondaria inferiore	Basso	Operatore forestale per la produzione di biomassa energetica
Professioni non qualificate	12.100.000 (16%)	Istruzione primaria o secondaria inferiore	Basso	Addetti al supporto operativo, movimentatori manuali

Le categorie professionali seguono la classificazione ISCO. Le percentuali indicate rappresentano la quota sul totale dell'occupazione nel settore energetico mondiale. *Fonte: Elaborazione da dati WEE2025, IEA*

I dati raccolti dalla IEA mostrano che l'offerta di competenze tecniche non cresce a un ritmo sufficiente per soddisfare la domanda proveniente dai settori interessati dalla transizione energetica. Tra il 2015 e il 2022, la domanda annuale di lavoratori tecnici applicati nei comparti caratterizzati da un'elevata intensità di tali professionalità, tra cui industria mineraria, manifattura, servizi pubblici ed edilizia, è aumentata del 16%. Nello stesso periodo, il numero di diplomati e laureati nelle discipline pertinenti è cresciuto soltanto del 9%, evidenziando un progressivo disallineamento tra il sistema formativo e le esigenze del mercato del lavoro.
La disponibilità di capitale umano rappresenta un fattore critico per l'attuazione delle strategie di transizione energetica. La scarsità di elettricisti, installatori di impianti fotovoltaici, tecnici delle reti elettriche, saldatori e specialisti HVAC suggerisce che le competenze richieste non riguardano esclusivamente le tecnologie emergenti, ma anche professionalità tradizionali che assumono un ruolo centrale nei processi di elettrificazione e decarbonizzazione.
La principale causa della carenza di personale nel settore energetico è la mancanza di competenze tecniche, segnalata da circa il 70% dei datori di lavoro. Seguono la limitata disponibilità di talenti qualificati (circa 43%) e l'insufficienza di competenze trasversali (circa 33%).
I risultati suggeriscono che le difficoltà di reclutamento dipendono soprattutto da un disallineamento tra le competenze richieste dalla transizione energetica e quelle disponibili sul mercato del lavoro. Al contrario, fattori economici come retribuzioni e benefit risultano meno rilevanti rispetto alle carenze di capitale umano.

Principali cause della carenza di personale nel settore energetico



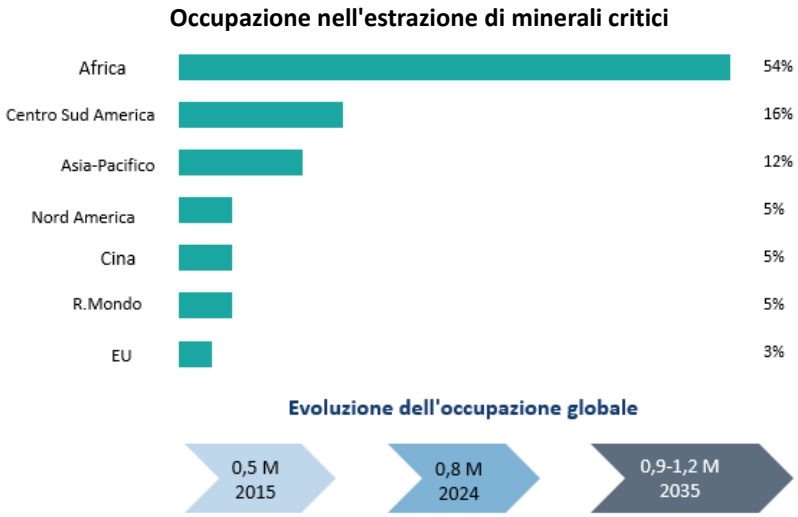
Fonte: Elaborazione da dati WEE2025, IEA

La metà delle imprese intervistate ha modificato i requisiti di assunzione a causa della mancanza di candidati qualificati, prendendo in considerazione l'ipotesi di fornire autonomamente opportunità di formazione.

1.2 Settore estrazione dei minerali critici

L'estrazione dei minerali critici rappresenta uno dei pilastri fondamentali della transizione energetica, in quanto fornisce le materie prime necessarie alla produzione di batterie, sistemi di accumulo, reti elettriche e tecnologie per le energie rinnovabili.
Nonostante il rallentamento registrato nel settore minerario a seguito della riduzione dei prezzi internazionali di alcuni metalli utilizzati nelle batterie, il numero degli occupati nel comparto ha continuato a crescere nel corso del 2024. L'occupazione complessiva nell'estrazione dei minerali critici è aumentata del 3% rispetto all'anno precedente, raggiungendo circa 770 mila lavoratori a livello mondiale.
Le dinamiche occupazionali risultano differenziate a seconda del minerale considerato. In particolare, l'occupazione nelle attività estrattive legate al litio e al rame è cresciuta rispettivamente del 9% e del 5%, mentre il comparto del cobalto ha registrato un incremento del 3%. Al contrario, il settore del nichel ha evidenziato una contrazione dell'occupazione pari al 13%, riflettendo la diminuzione della redditività di alcuni progetti minerari e la maggiore volatilità dei mercati internazionali.
Dal punto di vista geografico, l'occupazione nel settore dei minerali critici rimane fortemente concentrata nel continente africano, mentre l'Europa rappresenta soltanto il 3% della forza lavoro globale del comparto. Parallelamente, si osserva

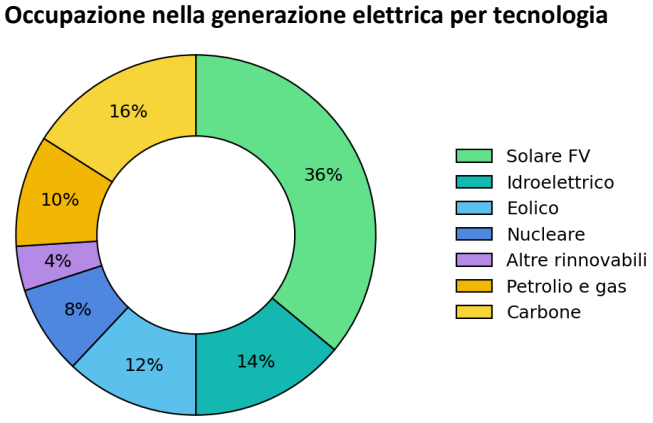
una significativa espansione dell'occupazione nell'area Asia-Pacifico, trainata dall'aumento degli investimenti lungo le filiere della transizione energetica.
Le prospettive future indicano una crescita sostenuta della domanda di lavoro, soprattutto nelle attività estrattive connesse al litio, al rame e al nichel. Diversamente, l'occupazione nel settore del cobalto potrebbe diminuire a causa dell'evoluzione delle tecnologie di accumulo e della progressiva diffusione di chimiche delle batterie meno dipendenti da tale materiale.
Secondo gli scenari elaborati dalla IEA, la forza lavoro globale nel settore dei minerali critici potrebbe raggiungere valori compresi tra 880 mila e 1,2 milioni di occupati entro il 2035. Tuttavia, le attuali pipeline di investimenti nei progetti estrattivi di litio e rame appaiono insufficienti a soddisfare integralmente la domanda prevista, con il rischio di future tensioni nell'approvvigionamento delle materie prime strategiche.



Fonte: Elaborazione da dati WEE2025, IEA

1.3 Settore elettrico

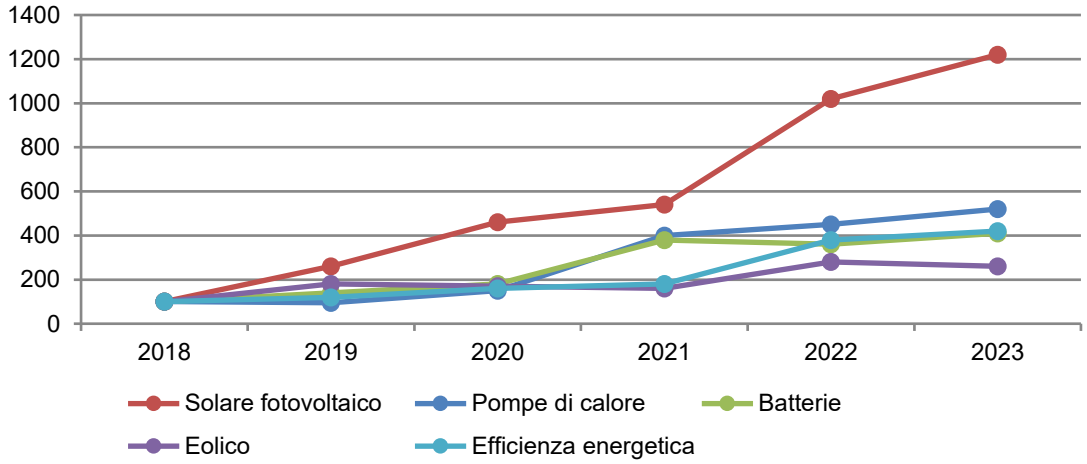
Nel 2024 il settore elettrico, comprendente le attività di generazione, trasmissione, distribuzione e stoccaggio dell'energia, si è affermato come il principale comparto occupazionale dell'industria energetica, superando i segmenti tradizionalmente legati alla fornitura di combustibili. Con 22,6 milioni di addetti, il settore rappresenta oggi il principale motore della crescita occupazionale nel sistema energetico globale.
L'espansione dell'occupazione è stata sostenuta soprattutto dagli investimenti nella realizzazione di nuovi impianti di generazione elettrica. Tra il 2019 e il 2024, il comparto ha creato oltre 5 milioni di nuovi posti di lavoro, contribuendo per il 2,4% alla crescita complessiva dell'occupazione mondiale nel medesimo periodo.
Dei 22,6 milioni di occupati registrati nel 2024, circa 14,2 milioni (65%) risultano impiegati nelle attività di generazione di energia a basse emissioni, mentre 8,5 milioni operano nelle infrastrutture di rete, comprendenti trasmissione, distribuzione e sistemi di accumulo energetico.



Fonte: Elaborazione da dati WEE2025, IEA

Il settore elettrico si distingue inoltre per un'elevata intensità di competenze specialistiche. Sia nelle attività di generazione sia nelle infrastrutture di rete, la quota di lavoratori altamente qualificati, in particolare ingegneri e tecnici, è superiore alla media dell'intero comparto energetico. Tale caratteristica riflette la crescente complessità tecnologica dei sistemi energetici e la necessità di competenze avanzate per la loro progettazione, gestione e manutenzione.
Questa tendenza emerge chiaramente anche dall'evoluzione della domanda di lavoro nelle tecnologie della transizione energetica. Tra il 2018 e il 2023, le offerte di lavoro rivolte a professionisti qualificati nei settori dell'energia eolica, del solare fotovoltaico, delle pompe di calore, dell'efficienza energetica e delle batterie sono aumentate mediamente del 40% all'anno. Tra queste tecnologie, il comparto solare ha registrato la crescita più rapida, confermandosi uno dei principali driver della domanda di competenze specialistiche.

Andamento relativo degli annunci di lavoro per tecnologia (2018=100)



Fonte: Analisi IEA, su dati Lightcast

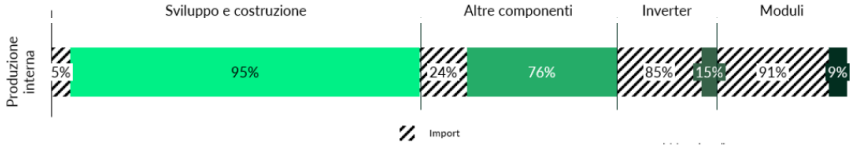
L'Italia, grazie all'elevata disponibilità della risorsa solare e alla presenza di aree favorevoli allo sviluppo dell'energia eolica sia onshore sia offshore, si configura come uno dei mercati europei più promettenti per la crescita della capacità da fonti rinnovabili. Tuttavia, l'espansione degli impianti installati non si traduce necessariamente nello sviluppo di filiere industriali nazionali solide e radicate sul territorio.
In tale contesto, l'analisi della catena del valore assume un ruolo centrale, poiché consente di distinguere le attività che generano valore aggiunto, occupazione e competenze a livello nazionale da quelle maggiormente esposte alla dipendenza da fornitori e mercati esteri.
Nel settore fotovoltaico, la catena del valore può essere articolata nelle seguenti fasi principali:

- Produzione delle componenti: comprende la realizzazione di moduli fotovoltaici, inverter e altre apparecchiature elettriche e strutturali, quali quadri, trasformatori e sistemi di supporto. A monte si colloca una filiera globale complessa che include la lavorazione del silicio, la produzione di wafer e celle fotovoltaiche e il successivo assemblaggio dei moduli.
- Sviluppo e costruzione degli impianti: include le attività di progettazione, ingegneria, ottenimento delle autorizzazioni, realizzazione delle opere civili ed elettromeccaniche e connessione alla rete elettrica. In Italia, questa fase è prevalentemente presidiata da operatori nazionali, tra cui piccole e medie imprese specializzate e società EPC (Engineering, Procurement and Construction) attive su scala regionale e nazionale.
- Asset management: comprende il monitoraggio delle prestazioni degli impianti, la gestione tecnica e amministrativa, nonché le attività volte a ottimizzare la redditività e l'efficienza operativa degli asset nel corso del loro ciclo di vita.
- Operation & Maintenance (O&M): include le attività di manutenzione ordinaria e straordinaria

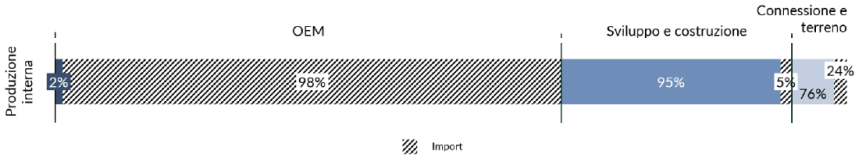
Il settore fotovoltaico è caratterizzato da una significativa dipendenza dalle importazioni di tecnologie e componenti, concentrate prevalentemente in un numero limitato di Paesi asiatici. Tale configurazione espone la filiera a rischi legati alla sicurezza degli approvvigionamenti, alla volatilità dei mercati internazionali e alla disponibilità delle materie prime strategiche.

In particolare, moduli fotovoltaici e inverter risultano quasi interamente importati, mentre la produzione nazionale copre soltanto una quota limitata della domanda interna, pari rispettivamente a circa il 9% e al 15% del fabbisogno, come mostrato nel rapporto *"Lo stato delle rinnovabili in Italia. Il ruolo di fotovoltaico ed eolico".* Nonostante tale dipendenza, il comparto industriale nazionale mantiene una presenza significativa nelle attività a maggiore specializzazione tecnologica: nel settore della componentistica operano circa 800 imprese, caratterizzate da competenze tecniche avanzate e da un elevato grado di specializzazione.
Nel caso dell'energia eolica, la dipendenza dalle importazioni risulta ancora più marcata. La principale componente di costo degli impianti, rappresentata dalle apparecchiature prodotte dagli Original Equipment Manufacturers (OEM), tra cui turbine, pale e altri componenti ad alto contenuto tecnologico, è infatti quasi totalmente fornita da operatori esteri. La capacità produttiva nazionale copre soltanto circa il 2% della domanda interna, mentre il restante 98% è soddisfatto attraverso importazioni. Tale squilibrio evidenzia la limitata presenza di una filiera manifatturiera nazionale nelle fasi a maggiore valore aggiunto e maggiore intensità tecnologica del settore eolico.
Nel settore delle componenti sono attive circa 300 imprese, con bassa specializzazione.

Produzione italiana e import per fase della filiera fotovoltaica



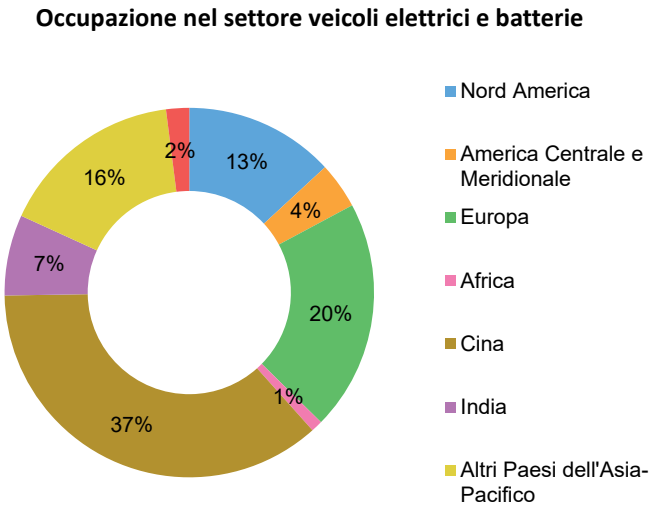
Produzione italiana e import per fase della filiera eolica



Fonte: Lo stato delle rinnovabili in Italia. Il ruolo di fotovoltaico ed eolico

1.4 Settore produzione di veicoli elettrici e batterie

Un comparto strettamente connesso alla transizione energetica è rappresentato dalla produzione di veicoli elettrici e batterie, che negli ultimi anni ha registrato una crescita particolarmente intensa sia in termini produttivi sia occupazionali. L'espansione della domanda mondiale di veicoli elettrici ha favorito una rapida crescita dell'occupazione lungo l'intera filiera produttiva. Nel 2024 il numero di addetti impiegati nella produzione di veicoli elettrici ha raggiunto i 3,1 milioni di unità, registrando un incremento del 34% rispetto all'anno precedente. Tale valore risulta quasi cinque volte superiore a quello osservato nel 2020 e oltre dieci volte più elevato rispetto ai livelli registrati nel 2015.
Parallelamente, il comparto delle batterie per veicoli elettrici ha conosciuto uno sviluppo analogo. L'occupazione ha raggiunto circa 425 mila lavoratori nel 2024, rispetto ai circa 110 mila addetti rilevati nel 2015, evidenziando il crescente ruolo strategico della produzione di sistemi di accumulo all'interno della filiera della mobilità elettrica.
La Cina ha ulteriormente consolidato la propria posizione di leadership mondiale, rafforzando il proprio vantaggio competitivo nella produzione sia di veicoli elettrici sia di batterie. Parallelamente, anche le economie avanzate hanno registrato una crescita significativa dell'occupazione nel comparto, con incrementi pari al 23% su base annua. Tuttavia, il ritmo di espansione risulta inferiore rispetto a quello osservato in Cina e nelle economie emergenti.
Al contempo, la progressiva elettrificazione del settore automobilistico sta favorendo una graduale riduzione dell'occupazione nelle attività legate ai veicoli con motore a combustione interna. Nelle economie avanzate, l'occupazione in tale comparto ha registrato una diminuzione pari all'1,5% su base annua, a testimonianza della trasformazione strutturale in atto nell'industria automotive.



Fonte: Elaborazione da dati WEE2025, IEA

1.5 Scenari al 2035

Le proiezioni elaborate dalla IEA evidenziano come la transizione energetica determinerà una profonda riconfigurazione dei mercati del lavoro nel corso del prossimo decennio. In tutti gli scenari considerati emerge una crescita dell'occupazione nel settore elettrico, sostenuta dall'espansione delle fonti rinnovabili, delle reti energetiche e delle tecnologie per l'elettrificazione dei consumi.

Per gli altri comparti, le prospettive occupazionali risultano maggiormente dipendenti dall'evoluzione delle politiche pubbliche, degli investimenti e delle traiettorie tecnologiche. In particolare, la domanda di lavoro nelle filiere dei minerali critici e della mobilità elettrica continuerà a essere influenzata dalle scelte industriali e dalle strategie di decarbonizzazione adottate a livello nazionale e internazionale.

Nel complesso, gli scenari prospettici delineano una progressiva riallocazione dell'occupazione dai comparti energetici tradizionali verso le filiere associate alle tecnologie pulite. Accanto alla crescita delle attività legate alla produzione e distribuzione di energia elettrica, si prevede una profonda trasformazione dell'industria automobilistica e una progressiva contrazione dell'occupazione nei settori energetici basati sui combustibili fossili.

Le evidenze analizzate confermano che la disponibilità di capitale umano qualificato rappresenterà uno dei principali fattori abilitanti della transizione energetica. Il rafforzamento dei percorsi formativi, dell'istruzione tecnica e professionale e dei programmi di aggiornamento delle competenze costituirà pertanto una condizione essenziale per sostenere la crescita dei nuovi settori energetici e ridurre il rischio di carenze di manodopera specializzata nel medio e lungo periodo.

In ambito italiano, la forte dipendenza dalle importazioni e la scarsa presenza di filiere attive nella produzione dei componenti principali per lo sviluppo delle energie rinnovabili limita l'impatto sull'occupazione attivata a livello locale, nel permanere di tali condizioni la creazione di valore nazionale è destinata a concentrarsi prevalentemente nei servizi e nelle attività operative.

PARTE 3: ANALISI E PROPOSTE DI MIGLIORAMENTO

In base alle indagini svolte e ai dati analizzati si evincono due principali settori di intervento:

- la necessità di promuovere nuovi corsi nei quali le competenze dell'ingegneria mineraria tradizionale vengano nuovamente impartite con l'integrazione di nuove competenze che possano formare un ingegnere in grado di valorizzare sia le materie prime primarie sia secondarie, figura professionale oggi inesistente.
- la richiesta da parte dell'industria di nuove professionalità nel campo delle materie prime e energia.

Le integrazioni alle competenze formative dovranno essere realizzate sia in base ai requisiti regolamentari europei e sia in base alle necessità derivanti dall'esperienza applicata industriale.

Se da un lato quindi la creazione di una nuova figura professionale che integri le competenze di tipo minerario per la valorizzazione delle materie prime primarie e secondarie con quelle di altri settori quali quelli di geologia, ingegneria chimica, ingegneria dei materiali, scienze umane e data science corrisponde alle richieste del CRMA e del nuovo modello di estrazione e trasformazione delle materie prime, dall'altro il contributo strutturato da parte dell'industria per definire tali programmi di formazione diventa fondamentale.

La crescente complessità delle tecnologie impiegate nelle attività estrattive, siano esse tradizionali o di urban mining, rende indispensabili team multidisciplinari e approcci improntati alla *concurrent engineering*. Tuttavia, l'eterogeneità di metodi, modelli e metriche tra ingegneria chimica, dei materiali e mineraria può costituire un ostacolo alla piena sinergia industriale. Alla luce di questo, una delle sfide principali è quindi la definizione e l'adozione di un linguaggio tecnico condiviso e di parametri chiave comuni, capaci di rendere possibile un dialogo efficace tra professionalità diverse, senza però appiattire le differenze e le specificità nelle competenze delle diverse figure. Tali aspetti potrebbero essere affrontati, in prima istanza, in corsi integrati coinvolgendo personale docente, anche proveniente dal mondo industriale, avente un background diversificato.

L'indagine sulle tecnologie per la transizione energetica (parte 2 del presente documento) ha evidenziato che vi è crescita dell'occupazione nel settore dell'estrazione dei minerali critici laddove ci sono attività minerarie e che, nel settore energetico, i datori di lavoro sono alla ricerca di nuove competenze, data la continua evoluzione delle tecniche per produrre energia pulita e la crescente integrazione dell'intelligenza artificiale e degli strumenti digitali. Per il settore elettrico il numero di offerte di lavoro per professionisti qualificati in settori chiave, tra cui eolico, solare, pompe di calore, efficienza energetica e batterie, è cresciuto a un tasso medio annuo del 40%, con il solare che ha registrato l'incremento più significativo.

Il divario tra la domanda annuale di tecnici applicati nei settori industriali e le lauree in ambito energetico è destinato ad ampliarsi al 2030 con le tendenze attuali. L'analisi della IEA suggerisce che nello scenario delle politiche dichiarate, gli attuali flussi di laureati professionali nel settore energetico dovrebbero aumentare del 43% entro il 2030 per soddisfare la domanda prevista, con requisiti ancora più elevati in uno scenario allineato alle emissioni zero nel settore energetico entro il 2050.

Laddove le aziende energetiche non saranno in grado di coprire le posizioni aperte con le qualifiche desiderate, molte compenseranno questa carenza assumendo candidati meno qualificati e aumentando la formazione sul posto di lavoro. Molti lavoratori nell'economia globale non possiedono necessariamente la formazione formale tipicamente richiesta per i ruoli che rivestono, ma hanno acquisito queste competenze nel tempo, spesso in modo informale anche se non le hanno certificate.

Si evince, dunque, l'importanza di migliorare l'allineamento tra le esigenze del settore e i programmi di studio, per garantire che l'istruzione formale aiuti i laureati ad acquisire prontamente le competenze richieste dai datori di lavoro.

In tal senso rafforzare la collaborazione tra enti di formazione e industria è importante anche perché molti programmi accademici mancano di un contributo significativo strutturato da parte dei datori di lavoro.

Tra le azioni di miglioramento proposte si prevedono:

- ✓ Tavoli di consultazione con l'industria per la formazione dei piani di studio per un diretto e sistematico coinvolgimento delle industrie stakeholder del settore delle materie prime/trasformazione/energia (piani di studio dinamici per garantire aggiornamento dei curricula in base alle esigenze del mercato);
- ✓ Corsi di specializzazione o di formazione post-laurea (I o II livello) mirati per il settore delle materie prime/ trasformazione/energia; promozione di percorsi di master innestati sulle lauree di Ingegneria e Geologia in modo da conseguire velocemente la disponibilità di figure;

- ✓ Percorsi professionalizzanti flessibili e micro-credential (ad esempio: Micro-credential e certificazioni brevi per professionisti già occupati; Programmi di reskilling e upskilling per tecnici provenienti da altri settori industriali; Percorsi modulari riconoscibili a livello europeo (European Skills Framework).
- ✓ Creazione di percorsi di laurea e laurea magistrale per la produzione di materie prime;
- ✓ Sistematizzazione di percorsi di tirocinio formativi presso aziende del settore;
- ✓ Organizzazione di Scuole di Dottorato e Summer Schools sul tema delle Critical Raw Materials, seguendo l'esperienza dell'ERMAcademy, o direttamente in collaborazione con essa.
- ✓ Dottorati industriali e centri di competenza (Attivazione di dottorati industriali cofinanziati dalle imprese nel settore delle materie prime critiche);
- ✓ Creazione di centri universitari interdisciplinari (ed eventualmente interAteneo) sulle materie prime critiche, che integrino competenze tecnico-scientifiche, ambientali e socio-giuridiche;
- ✓ Internazionalizzazione della formazione (Programmi congiunti con università europee coinvolte in filiere minerarie strategiche; Doppie lauree o percorsi Erasmus focalizzati sulle materie prime critiche; Collaborazioni con Paesi fornitori di materie prime per comprendere le dinamiche globali della supply chain)
- ✓ Living lab e impianti pilota per testare tecnologie innovative di estrazione e riciclo.

Tali azioni possono essere conseguite e implementate partendo dalla consapevolezza che la sinergia e lo scambio di competenze e esperienze tra università e industria rappresentano un valore aggiunto per il raggiungimento dell'obiettivo formativo ottimale per i futuri professionisti del settore.

Ulteriori proposte integrative sono le seguenti.
*Proposta **moduli trasversali**, che potrebbero essere presenti nei vari corsi di laurea coinvolti nella formazione di professionisti (tecnici ma anche manageriali) e declinati secondo le specifiche competenze:*

- ✓ ***Responible and sustainable mining***
- ✓ ***Economia circolare e Urban mining**;*
- ✓ ***Life Cycle Assessment (LCA)**, analisi dell'impronta ambientale, efficientamento lungo value chain;*
- ✓ ***Geopolitica e sicurezza degli approvvigionamenti** delle materie prime critiche;*
- ✓ ***Accettabilità sociale dei progetti minerari (social license to operate)**;*
- ✓ ***Quadro normativo europeo e internazionale (CRMA, ESG, due diligence, permitting); insegnamenti specifici su diritto minerario, diritto ambientale europeo, permitting e procedure autorizzative; tassonomia europea (eg. Sustainable finance)***

Si potrebbe poi investire su:

- ✓ ***Potenziamento delle competenze digitali avanzate:***
  - *Corsi su digital mining, remote sensing, GIS avanzato, modellazione 3D dei giacimenti;*
  - *applicazioni di machine learning per l'esplorazione e l'ottimizzazione dei processi sia in fase d'estrazione che di trattamento (invi compreso l'arricchimento metallurgico);*
  - *Introduzione a blockchain per la tracciabilità delle materie prime critiche lungo tutta la catena di valore;*
  - *Cyber security applicata alle infrastrutture energetiche e minerarie.*
- ✓ ***Formazione su sostenibilità ambientale e gestione del rischio:***
  - *Moduli su gestione di rifiuti estrattivi (waste rocks e tailings);*
  - *Bonifica e ripristino ambientale dei siti estrattivi;*
  - *Valutazione e gestione dei rischi ambientali e industriali;*
  - *Rischi connessi all'approvvigionamento acqua in ambienti aridi (influenza cambiamenti climatici), tema legato al circular water.*
- ✓ ***Soft skills e gestione dei conflitti territoriali:***
  - *Formazione in stakeholder engagement;*
  - *Tecniche di negoziazione e mediazione;*
  - *Comunicazione scientifica e gestione della percezione del rischio;*
  - *Elementi di etica professionale.*

ACRONIMI

CRMA: Critical Raw Material Act
CRM: Critical Raw Material
SRM: Strategic raw material
MPC: Materie Prime Critiche
MPS: Materie Prime Strategiche
ESG: Environmental, Social, Governance
SLO: Social License to Operate
QS: Quacquarelli Symonds
PERC: Pan European Reserves and Resources Reporting Committee
JORC: Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves
EIT European Institute of Innovation & Technology
CNG: Consiglio Nazionale dei Geologi
FEG/EFG: Federazione Europea dei Geologi

Bibliografia

Lim, B., Aylmore, M., & Alorro, R. D. (2024). Technospheric mining of critical and strategic metals from non-ferrous slags. *Metals*, *14*(7), 804.

Trost, J., Zitomer, D., Rodríguez, N. G., & Dunn, J. B. (2026). Life cycle inventory data for critical mineral mining: Recommendations and new US data compendium. *Environmental Science: Advances*

IRMA https://responsiblemining.net/ last access 9_01_2026

ICMM https://www.icmm.com/ last access 9_01_2026

Pimenow, S., Pimenowa, O., & Rembisz, W. (2026). Circular Economy Pathways for Critical Raw Materials: European Union Policy Instruments, Secondary Supply, and Sustainable Development Outcomes. *Sustainability*, *18*(2), 562.

PERC summary guide 2022 https://percstandard.org/wp-content/uploads/2023/01/PERC_summary_guide_230115.pdf last access 9_01_2026

JORC update 2025, https://www.jorc.org/code-update/ last access 9_01_2026

World Energy Employment 2025, International Energy Agency. https://iea.blob.core.windows.net/assets/e5b9e908-26fe-4228-8978-e4ee36c555ed/WorldEnergyEmployment2025.pdf

Lo stato delle rinnovabili in Italia. Il ruolo di fotovoltaico ed eolico. *https://www.enelfoundation.org/content/dam/enel-foundation/news/2026/renewable-energy-solar-wind-power/Lo_stato_delle_rinnovabili_in_Italia.pdf*