



MATERIE PRIME

# Il costo energetico della scarsità.

XV CONFERENZA NAZIONALE SULL'EFFICIENZA ENERGETICA

NOVEMBRE 2023





# Indice

---

- 1** Introduzione.
- 2** Il legame energia – estrazione.
- 3** La correlazione EROEI – tenore.
- 4** Sensibilità dell'EROEI al calo del tenore dei metalli.

**Questo report è curato da Giovanni Brussato.**





# Introduzione.

Se dovessimo seguire la modellistica della IEA per il raggiungimento della neutralità carbonica ed integrare maggiormente le tecnologie rinnovabili, eolico e fotovoltaico, nella generazione di energia elettrica, il necessario approvvigionamento di minerali critici per la loro costruzione richiederà una quantità di materie prime mai estratta prima dal genere umano. A conferma della centralità, nella transizione energetica, del ruolo dei metalli e delle sfide alla sicurezza energetica che comporta garantire il necessario approvvigionamento di minerali critici.

In questo quadro la nostra analisi mira a descrivere la relazione simbiotica esistente tra il settore energetico e quello estrattivo-metallurgico. Il focus, pur rimanendo concentrato sull'importanza dell'effettiva disponibilità delle risorse, pone l'accento sul progressivo declino qualitativo delle stesse e sulla stretta correlazione che il fabbisogno energetico associato all'estrazione dei metalli potrebbe avere sul bilancio energetico delle diverse tecnologie di produzione di energia elettrica definito dall'energia netta a disposizione e dal rapporto tra l'energia fornita e quella necessaria per ottenerla: l'EROEI (Energy Return on Energy Invested).

Esiste uno stretto legame tra l'energia richiesta per estrarre, elaborare e raffinare le materie prime necessarie alla costruzione di queste tecnologie e le relative strutture di trasporto, e l'energia effettivamente prodotta. Più specificatamente vi è uno stretto legame energetico con la qualità delle riserve prima ancora che con la loro quantità, con ciò intendendo che riserve con bassi tenori, anche se in quantità sufficiente, comportano un alto costo energetico per la loro estrazione ed arricchimento.

A livello globale i settori estrattivo e metallurgico richiedono circa il 10% del consumo totale di energia primaria e l'economia esige la produzione di materie prime con una crescita esponenziale. Il combinato disposto di una domanda esponenziale di materie prime ed il peggioramento qualitativo delle risorse potrebbe indurre una domanda energetica non sostenibile senza combustibili fossili.

Inoltre, queste tecnologie, oltre a fornire meno energia netta alla società rispetto ai combustibili fossili, a causa della loro intermittenza e bassa intensità energetica richiedono molti più metalli rari e comuni per produrre un'unità di energia rispetto ai combustibili fossili: un impianto eolico on-shore richiede oltre nove volte la quantità di metalli necessari ad un impianto a gas della medesima potenza.

A ciò si aggiunga che un megawattora (MWh) di elettricità da carbone o da fonte eolica non sono la stessa cosa. Questo ha conseguenze economiche sull'energia ma anche sulle risorse. Il valore dell'elettricità non si misura in MWh, ma in "MWh disponibili su richiesta" e la necessità di mantenere le reti in equilibrio comporta, anche in questo caso, un costo energetico in termini di materie prime.

*Il necessario approvvigionamento di minerali critici richiederà una quantità di materie prime mai estratta prima dal genere umano.*

*Il combinato disposto di una domanda esponenziale di materie prime ed il peggioramento qualitativo delle risorse potrebbe indurre una domanda energetica non sostenibile senza combustibili fossili.*

I dati relativi al costo energetico dell'estrazione dei metalli ed alla loro intensità nelle tecnologie di produzione dell'energia elettrica sono scarsi e soggetti al segreto industriale.

Nessuno si sta accorgendo che non possiamo produrre turbine eoliche o batterie *sempre migliori e più grandi* senza anche accedere a nuove risorse *sempre migliori e più grandi*.

La simulazione proposta mira ad evidenziare la sensibilità dell'EROEI di una tecnologia, come quella eolica, al calo del tenore dei metalli necessari alla sua costruzione.

Attualmente, i dati relativi al costo energetico dell'estrazione dei metalli ed alla loro intensità nelle tecnologie di produzione dell'energia elettrica sono piuttosto scarsi e soggetti al segreto industriale. Ed i database commerciali, come Ecoinvent, spesso palesano evidenti approssimazioni ed imprecisioni.

La storia dell'energia fino ad oggi ci ha mostrato una realtà diversa da quella che è nei progetti del Green Deal: non si è mai verificata una "transizione" energetica, ma sono solo state aggiunte nuove fonti di energia. Quando il petrolio ha sostituito il carbone come prima fonte energetica non abbiamo smesso di utilizzare il carbone anzi ne abbiamo incrementato l'utilizzo perché questo era funzionale alla vera costante in tutte le analisi possibili: la crescita esponenziale della domanda globale di energia. Le fonti energetiche non sono mai state sostituite, se ne sono aggiunte di nuove, ed in effetti nemmeno le fonti rinnovabili stanno sostituendo il "vecchio" carbone.

Mentre gli ambientalisti ci avvertono che non c'è più tempo, gli economisti sviluppano analisi del processo economico senza rapportarsi alle limitazioni dell'ambiente materiale dell'uomo e gli scienziati dell'IPCC ci spiegano che la CO2 da fonte di vita è diventata una minaccia esistenziale nessuno si sta accorgendo che non possiamo produrre turbine eoliche o batterie sempre migliori e più grandi senza anche accedere a nuove risorse sempre migliori e più grandi.

Inoltre l'intermittenza di queste tecnologie implica la necessità di risorse di backup e di rafforzare la rete di trasmissione, generando così una domanda di metalli ancora maggiore. Di conseguenza, nella prospettiva di una transizione verso le tecnologie rinnovabili, potrebbe svilupparsi un potenziale circolo vizioso tra i settori dell'energia e dei metalli dove l'aumento della domanda impone un aumento del costo energetico associato all'attività estrattiva dovuto ad una tendenza generalizzata del calo del tenore.

L'industria mineraria dovrà da un lato moltiplicare anche per 5-8 volte l'attuale produzione di metalli di base e geochimicamente rari e dall'altro gestire i crescenti costi energetici mentre, nel contempo, disaccoppia le proprie emissioni di gas serra.

Questo si traduce in un trilemma minerario ed energetico dove il mancato raggiungimento del primo o del secondo punto rallenterebbe, fino a comprometterla, la transizione verso un Pianeta a basse emissioni di carbonio. Mentre l'adozione di tecnologie rinnovabili realizzate mediante i combustibili fossili, il terzo obiettivo, comporterebbe un enorme debito in termini di emissioni.

La soluzione di questo trilemma indurrà ulteriore pressione nella domanda di energia globale con la conseguente diminuzione dell'EROEI del sistema energetico.

# Il legame energia – estrazione.

La società globale di oggi è economicamente, socialmente e culturalmente dipendente dai minerali e più specificatamente dai metalli, ormai divenuti veri e propri enzimi industriali, al punto tale che i limiti nel loro approvvigionamento si riflettono nella società civile. I limiti nella disponibilità dei metalli per l'attuale società sono altrettanto gravi di quelli di un accesso limitato all'energia.

I modelli di produzione sono trainati dal consumo di risorse minerarie, che continua a crescere nei paesi a reddito medio-alto e sta raggiungendo livelli senza precedenti nei paesi a basso reddito, il cui appetito per le materie prime riflette il loro rapido sviluppo.

Ciò pone l'accento sulla nostra futura capacità di accedere alle risorse minerarie e sui costi economici, sociali e ambientali di tale accesso. Le risorse presenti nella litosfera sono naturalmente finite per cui il dibattito si concentra prevalentemente su due aspetti: gli sviluppi tecnologici e l'evoluzione del prezzo delle risorse. Aspetti che hanno consentito sinora alle compagnie minerarie globali di estrarre, ogni anno, dal sottosuolo circa 70 miliardi di tonnellate di materiale.

Una visione che induce l'idea, fuorviante, che la crescita costante sia possibile, che i miglioramenti tecnologici guidati dal prezzo consentano di superare l'invalidabile: l'esaurimento delle risorse. In buona sostanza l'esaurimento fisico non è considerato il vincolo alla disponibilità di un minerale, ma è subordinato alla capacità di produrre il minerale in modo economicamente efficace. Fino a quando? Quasi tutti i metalli geochimicamente scarsi nella crosta terrestre sono prevalentemente contenuti nella roccia comune, come sostituto atomico nella struttura cristallina: il piombo è un sostituto del potassio su scala atomica, così come lo zinco del magnesio.

La teoria della barriera mineralogica spiega come solo lo 0,8% della massa della crosta continentale terrestre sia costituita da elementi geochimicamente scarsi che tendono ad avere una distribuzione bimodale, come mostrato in Fig. 1, in cui il picco più piccolo, corrispondente a concentrazioni relativamente elevate, i giacimenti, riflette la mineralizzazione geochimica, mentre il picco principale rappresenta la sostituzione atomica nei minerali più comuni.

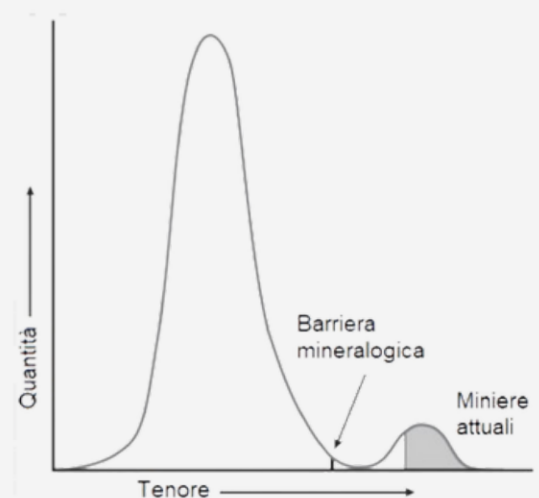


Fig. 1 - Visualizzazione della teoria della barriera mineralogica.

*Sinora le compagnie minerarie globali hanno estratto, ogni anno, dal sottosuolo circa 70 miliardi di tonnellate di materiale.*

*La teoria della barriera mineralogica spiega come gli elementi geochimicamente scarsi tendano ad avere una distribuzione bimodale.*

Estrarre il rame dalla matrice indifferenziata aumenterebbe il fabbisogno energetico di centinaia o addirittura migliaia di unità.

Un ciclo inverso “grave-to-cradle” per opportunamente quantificare la graduale diminuzione dei depositi minerali concentrati, che non saranno disponibili per le generazioni future.

Se consideriamo il rame è possibile osservare come il tenore medio sia sceso nel corso dell'ultimo secolo al valore attuale di circa lo 0.8% a livello globale. Tuttavia, il rame presente come sostituto atomico nelle rocce cristalline comuni ha un grado medio di circa 0.006%. Separare gli atomi di rame dalla matrice minerale circostante richiederebbe molta più energia rispetto agli attuali processi di estrazione su depositi concentrati.

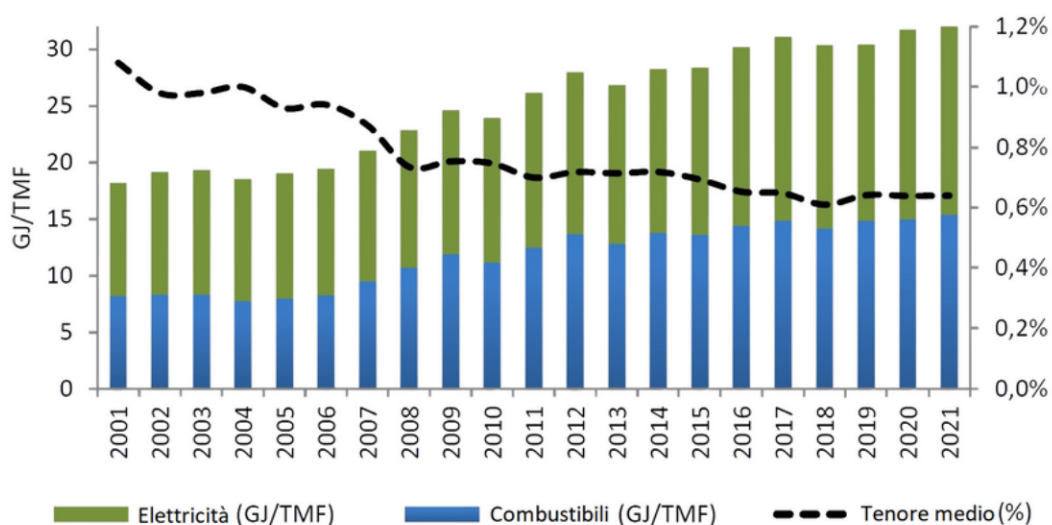
Questo il significato della barriera mineralogica: estrarre il rame dalla matrice indifferenziata aumenterebbe il fabbisogno energetico, per tonnellata di rame metallico estratto, di un fattore di centinaia o addirittura migliaia di unità.

I dati dell'USGS mostrano che la produzione cumulativa di metalli rari, oro, argento, rame, nichel, platino, palladio ed altri è superiore a quella dei metalli di base, come ferro, alluminio, silicio, magnesio, manganese e titanio.

Questi dati confermano la teoria di una velocità di esaurimento dei metalli rari superiore rispetto a quelli comuni, infatti il consumo economico dei metalli rispetto alla loro abbondanza naturale è relativamente sbilanciato a favore di quelli geochimicamente rari. In secondo luogo, tra il 1996 e il 2012, il rapporto tra consumo economico e abbondanza naturale è aumentato più rapidamente per i metalli geochimicamente rari che per quelli comuni.

A questo proposito sarebbe opportuno introdurre nelle analisi del ciclo di vita (LCA) anche il contributo energetico del minerale concentrato in un giacimento essendo una risorsa non rinnovabile. Se nel complesso, minerali e combustibili fossili rappresentano appena lo 0,001% della massa totale della crosta continentale superiore è possibile valutare l'esaurimento dei minerali associandoli ad un costo. Che corrisponda all'energia utile necessaria per concentrare le componenti minerali da una roccia indifferenziata fino a che il suo tenore non raggiunga quello del giacimento in esame.

In altre parole realizzare un ciclo inverso “grave-to-cradle” passando da un ambiente disperso, la tomba, alle attuali miniere, la culla, completando così la valutazione del ciclo di vita convenzionale. Quest'ultimo dovrebbe opportunamente quantificare la graduale diminuzione dei depositi minerali concentrati, che non saranno disponibili per le generazioni future.

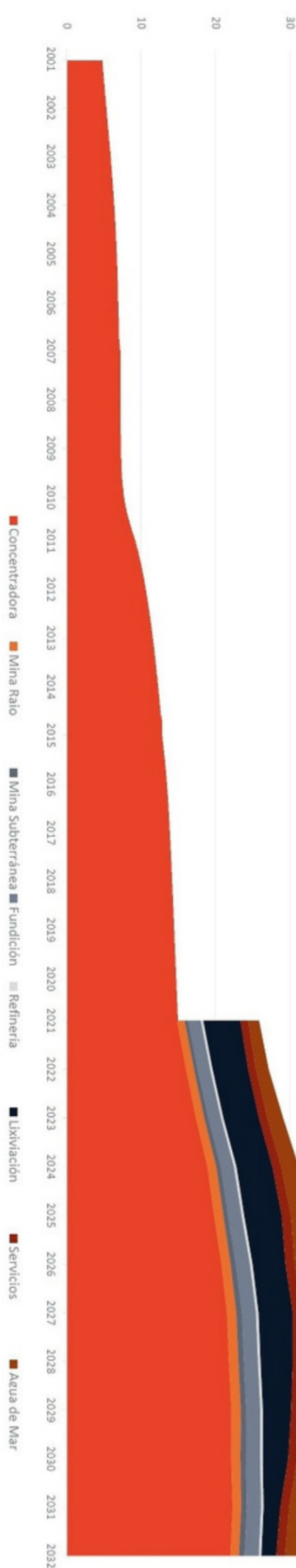


Fonte: Cochilco

Fig. 2 - Domanda di energia del processo produttivo del rame in Cile



Andamento storico (2001 - 2021) del consumo energetico per il processo di concentrazione e proiezione (2022 - 2032) per processo.



Il riciclo può in parte ridurre questo costo ma in realtà, quello che spesso non viene considerato nei bilanci dell'economia circolare, è il contesto dei cicli antropogenici dei materiali, come le perdite dissipative, le barriere tecnologiche e/o economiche che impediscono il riciclaggio e l'irreversibilità dei processi che inevitabilmente induce al consumo di risorse fisiche.

Analizzando la domanda di energia del processo produttivo (vedi grafico di Fig. 2) del rame in Cile, il più grande produttore globale, su una scala ventennale si evidenzia il calo progressivo del tenore, quasi dimezzatosi, a fronte del raddoppio della domanda di energia necessaria.

Ma se analizziamo puntualmente la domanda di energia delle singole fasi produttive l'aumento più significativo del consumo energetico si riscontra nelle attività upstream più che nella fase più propriamente metallurgica come risulta dall'analisi dell'andamento storico (2001 - 2021) del consumo energetico per il processo di concentrazione del minerale e dalla proiezione (2022 - 2032) per processo desunta dai dati forniti dalla cilena Cochilco (vedi grafico in questa pagina).

*In trent'anni l'energia necessaria per il processo di concentrazione si è praticamente quadruplicata.*

I dati rispecchiano da un lato la crescente domanda di energia per la fase di concentrazione nel ventennio trascorso e dall'altro la previsione per i prossimi 10 anni. Indicano, nel complesso, come in trent'anni l'energia necessaria per il processo di concentrazione sia praticamente quadruplicata.

Dato il carattere esponenziale del legame energia-tenore è facile intuire come sia destinata a crescere sempre più rapidamente. Questa ipotesi, dimostrata per il caso del rame, naturalmente è generalizzabile per tutti i metalli. Il progressivo peggioramento qualitativo delle risorse del settore dei metalli condiziona pertanto la loro futura disponibilità a causa dei costi energetici della sua produzione. In assenza di progresso tecnologico, i fattori geologici saranno i principali motori di questi costi.

L'energia della produzione primaria di metalli può essere stimata come la somma di tre contributi: il primo è l'energia di comminazione, necessaria a portare la granulometria del minerale alla dimensione necessaria alla resa economica dell'impianto. Questo valore è proporzionale alla diluizione dell'elemento nella matrice cioè all'inverso del tenore. Il secondo è l'energia minima per separare i minerali metalliferi dal minerale disaggregato ed il terzo è l'energia minima richiesta dalla parte metallurgica del processo.

Vi sono poi ulteriori aspetti che influenzano la domanda di energia: il metodo di coltivazione, ipogeo o a cielo aperto, ed il rapporto di strippaggio, cioè la quantità di rifiuti per tonnellata di minerale. Nel caso di una miniera a cielo aperto, la stragrande maggioranza, è necessaria una quantità di energia aggiuntiva dovuta all'aumento della profondità di scavo: nel caso del rame si stima sia un valore compreso tra 3 - 8 MJ/kg ogni 100 metri.

Il miglioramento dell'efficienza energetica della produzione, mediamente dell'1-2% all'anno tra il 1900 e il 2000, hanno compensato la diminuzione della qualità del minerale.

Il limite termodinamico non può comunque essere raggiunto: i processi industriali non possono essere efficienti al 100%.

Una stima dell'energia necessaria per la rimozione dello strato di copertura, può essere valutata mediamente nel 18% del consumo energetico dell'estrazione e del trattamento e può essere attribuita alla rimozione della roccia di scarto.

Queste tesi di un'incombente carenza di metalli e della potenziale insostenibilità della domanda energetica in futuro vengono confutate dai dati storici a lungo termine che sottolineano come i prezzi delle materie prime, corretti per l'inflazione, sono in realtà diminuiti tra il 1900 e il 2000.

Questo calo viene interpretato con la dimostrazione che l'aumento previsto dell'energia di produzione, dovuto alla diminuzione del tenore del minerale, è stato in realtà compensato dai miglioramenti dell'efficienza energetica e della produttività.

Il miglioramento dell'efficienza energetica della produzione di tutti i metalli, mediamente dell'1-2% all'anno tra il 1900 e il 2000, hanno più che compensato la diminuzione della qualità del minerale.

Ma questa tendenza si è invertita dall'inizio del ventunesimo secolo.

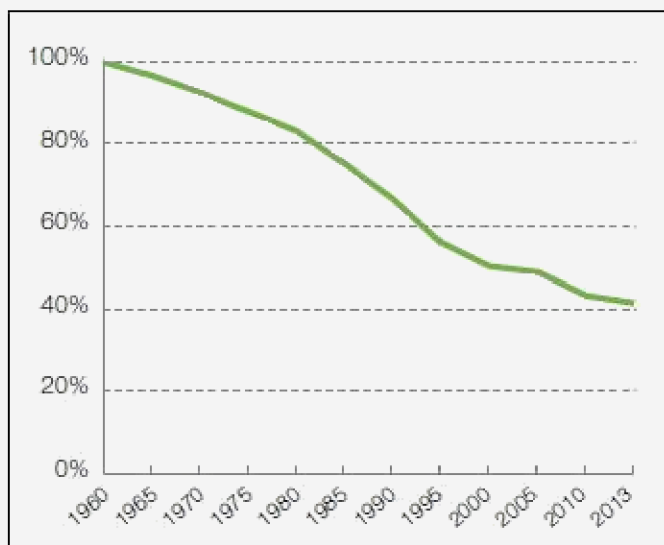


Fig. 3 - Miglioramento relativo dell'efficienza energetica della produzione di acciaio, 1960 - 2013. Fonte: Organizzazione Mondiale dell'Acciaio (2016)

Ulteriore conferma che questa tendenza non fosse sostenibile a lungo termine deriva dal limite termodinamico all'estrazione dei metalli. Questo limite fisico non può essere superato, qualunque sia il miglioramento tecnologico. La produzione di acciaio consumava circa 50 MJ/kg nel 1950, valore che si è dimezzato tra gli anni '50 e il 2000. Ma che non si dimezzerà di nuovo entro il 2050 per raggiungere il limite termodinamico pari a circa 10 GJ/t per il minerale di ossido di ferro, poiché questo limite non può comunque essere raggiunto: i processi industriali non possono essere efficienti al 100% da qui l'introduzione di quella che viene definita energia pratica minima.

L'energia pratica minima dei metalli aumenta esponenzialmente con la diminuzione del tenore del minerale rendendo proibitivo l'investimento energetico necessario a guadagnare qualche megajoule (MJ) quando ci si avvicina al limite termodinamico.

Il miglioramento delle attuali tecnologie di frantumazione e macinazione non compenserà l'energia aggiuntiva necessaria per passare a un minerale di grado inferiore in futuro.

Non sarà possibile continuare con questa tendenza perché con un grado medio del minerale dei depositi di rame che diminuisce dell'1,5% all'anno dal 1900, il miglioramento delle attuali tecnologie meccaniche di frantumazione e macinazione non compenserà l'energia aggiuntiva necessaria per passare a un minerale di grado inferiore in futuro, come è avvenuto nel corso del XX secolo. Conclusioni simili si traggono per i metalli preziosi e per il nichel, lo zinco e il manganese.

Le risorse minerali metalliche sono solitamente composte da due o più minerali e la loro composizione e proprietà sono molto complesse. Esistono differenze significative nelle proprietà fisiche, chimiche e meccaniche dei diversi componenti dello stesso minerale, e le successive operazioni di separazione hanno requisiti diversi in termini di dimensioni delle particelle in base agli specifici componenti minerali.

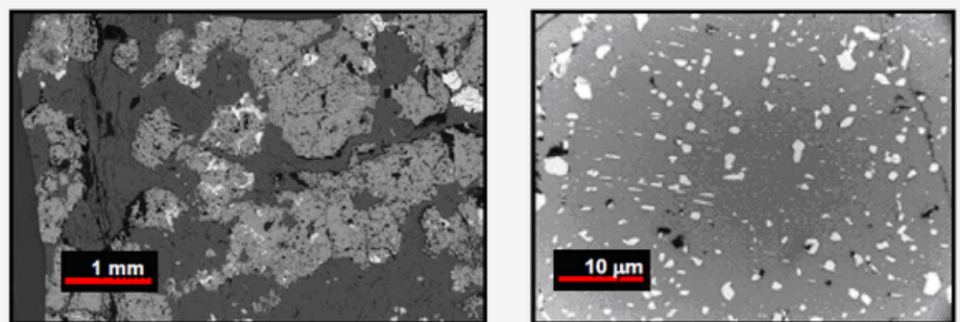


Fig. 4 - A sinistra un minerale di solfuro per cui è necessario un impianto di macinazione a 150 micrometri ( $\mu\text{m}$ ) e a destra un minerale per cui è necessario un impianto che porti la granulometria a 4-5  $\mu\text{m}$ . Fonte: Dee Bradshaw.

Nel 1980 la granulometria dei minerali di solfuro richiedeva una dimensione dell'impianto di macinazione di 150 micrometri ( $\mu\text{m}$ ), attualmente esistono impianti, economicamente sostenibili, in cui la dimensione finale dell'impianto di macinazione è di 4-5  $\mu\text{m}$ . Quello che si è osservato nel corso dei decenni è la decrescita delle dimensioni di macinazione per consentire coltivazioni economicamente redditizie di giacimenti con tenori sempre minori che nel contempo hanno aumentato il consumo di energia e il costo dell'estrazione.

Negli ultimi decenni, inoltre, i minerali hanno dimostrato una crescente resistenza alla frantumazione che ha come conseguenza diretta la necessità di un maggiore assorbimento di energia per rompere la roccia. Lo standard del settore minerario per misurare la durezza della roccia è un test di rottura chiamato Drop Weight Test (o Drop Test). L'obiettivo del test è caratterizzare la resistenza alla frantumazione di un minerale in un intervallo di energie applicate. I dati del database del JKTech contenenti i risultati di circa 3000 test effettuati tra il 1980 e il 2010 dimostrano come il minerale lavorato nelle miniere sia diventato sempre più duro.

Nel corso del tempo, le miniere hanno sempre più lavorato rocce di diversa consistenza, dove i minerali target, di granulometria molto piccola, sono finemente disseminati: questo tipo di roccia è molto più difficile da frantumare. Questi aspetti sono stati uno dei principali fattori che hanno contribuito ad aumentare i costi energetici e minerari in generale.

Quello che si è osservato nel corso dei decenni è la decrescita delle dimensioni di macinazione per consentire coltivazioni economicamente redditizie di giacimenti con tenori sempre minori.



# La correlazione EROEI – tenore.

*L'energia netta è l'energia che la società umana può spendere per alimentare il proprio metabolismo sociale ed economico.*

La prosperità dell'umanità dipende dall'efficienza con cui riusciamo a produrre energia, il rendimento energetico delle tecnologie eolica e fotovoltaica è gravemente limitato dalla loro intermittenza, dovuta alle fonti, sole e vento, da cui dipendono, mentre da un punto di vista sociale, ciò che è rilevante, è l'energia disponibile per la società – energia netta – e non quella prodotta – energia restituita – che è vincolata all'efficienza della tecnologia con cui viene generata.

Pertanto l'energia netta, cioè la differenza fra l'energia prodotta e il costo energetico del processo di produzione, è l'energia che la società umana può spendere per alimentare il proprio metabolismo sociale ed economico che in dimensione ed obiettivi supera di diversi ordini di grandezza quello della somma del metabolismo biologico dei suoi individui.

L'efficienza della fonte energetica consente di disporre nel lungo termine di quello che viene definito surplus energetico che è stato definito, in campi come la biologia o l'antropologia, il fattore chiave per consentire una crescente complessità ed evoluzione di piante, animali ed esseri umani. Pertanto il bilancio energetico di una società, vista come una struttura dissipativa, viene definito dall'energia netta a disposizione e dal rapporto tra l'energia fornita e quella necessaria per ottenerla: l'EROEI (Energy Return on Energy Invested).

Se analizziamo il caso dell'energia fotovoltaica, l'EROEI sarà il rapporto tra l'energia prodotta da un modulo nel corso della sua vita e quella necessaria a produrlo. Naturalmente è possibile, se la società ha un'altra fonte di energia con un EROEI molto alto, ma con caratteristiche poco desiderabili, scegliere di dissipare l'energia di quella fonte per ottenere l'energia nella forma voluta: è il caso delle tecnologie fotovoltaiche prodotte attraverso i combustibili fossili. Da un punto di vista economico o speculativo questo può avere un senso: non lo ha da un punto di vista ecologico.

Oggi l'energia pro-capite, nei paesi OCSE, è di circa 75 GJ: tre volte superiore a quella del 1900, godiamo di un EROEI sociale di circa 15:1 e pertanto occorrono 5 GJ per soddisfare il nostro fabbisogno energetico, 4 GJ per quello alimentare e 10 GJ per altre necessità lasciandoci con un surplus energetico di circa 56 GJ.

Questo ha consentito la crescita del PIL e della popolazione in maniera esponenziale, lo sviluppo della società in cui oggi viviamo, una società che molti, nei paesi in via di sviluppo, vogliono legittimamente emulare ma che comporterà una pressione sulle risorse del pianeta senza eguali, i cui esiti saranno oggetto di studio per le generazioni a venire.

Con un EROEI al di sotto di 5:1 l'umanità cade nella povertà energetica, in cui una parte troppo grande delle risorse umane deve essere investita semplicemente per rimanere in vita, a scapito dei servizi forniti dall'energia netta come l'assistenza sanitaria, l'istruzione e tutto ciò che, oggi, ci consente la nostra società.

*Oggi l'energia pro-capite, nei paesi OCSE, è di circa 75 GJ: tre volte superiore a quella del 1900, godiamo di un EROEI sociale di circa 15:1.*



*E' di fondamentale importanza comprendere le conseguenze socioeconomiche e tecniche della sostituzione su larga scala dei combustibili fossili con le FER.*

*Se si considera solo il bilancio energetico complessivo, la scarsità di un metallo molto probabilmente non porterà a una situazione in cui un sistema di energia rinnovabile diventi troppo inefficiente.*

Da qui ne deriva che il progressivo sviluppo di politiche tese a limitare o escludere le fonti fossili da ogni forma di finanziamento, prima che esista una concreta e credibile alternativa energetica, rischia di destabilizzare il legame energia-cibo-acqua-benessere con l'unico risultato di spostare indefinitamente nel tempo la transizione energetica. Pertanto, è di fondamentale importanza comprendere le conseguenze socioeconomiche e tecniche della sostituzione su larga scala dei combustibili fossili con le FER.

Le tendenze future dell'EROEI dei sistemi di energia rinnovabile saranno condizionate da fattori di segno opposto. Se da un lato si può ipotizzare un contributo dell'innovazione tecnologica e del miglioramento dei tassi di riciclo dall'altro a penalizzare l'EROEI del sistema vanno computati i contributi dovuti alla generazione di riserva, all'ampliamento delle reti e dello stoccaggio di energia oltre, naturalmente, all'aumento del fabbisogno energetico dovuto alla diminuzione del tenore dei depositi.

Per valutare l'impatto del costo energetico associato all'esaurimento dei metalli sull'EROEI di una determinata tecnologia di produzione di energia elettrica, si possono effettuare due ipotesi diverse. Un primo approccio consiste nell'analizzare il contributo individuale del costo energetico dell'estrazione di un determinato metallo sull'EROEI della tecnologia in esame.

Se si considera solo il bilancio energetico complessivo, la scarsità di un singolo metallo molto probabilmente non porterà a una situazione in cui un sistema di energia rinnovabile diventi troppo inefficiente. Per quanto attualmente definire l'energia primaria (diretta e indiretta) necessaria al processo di produzione totale resti per molti aspetti di difficile, o impossibile, determinazione.

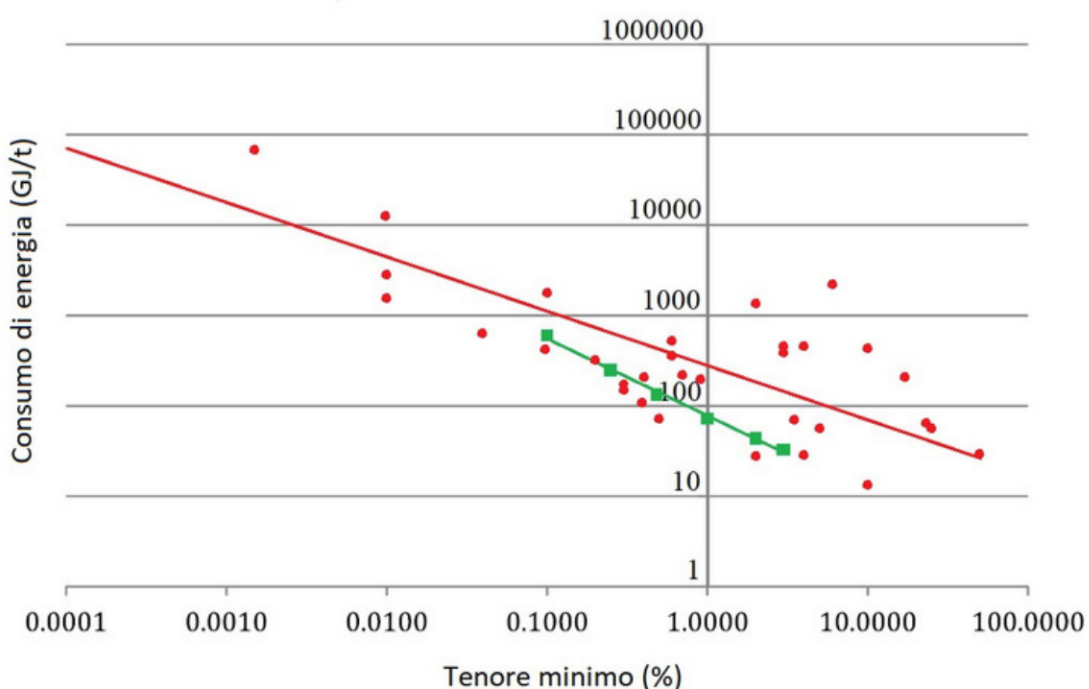


Fig. 5 - La linea verde si riferisce solo al rame mentre la linea rossa si riferisce a tutti i metalli utilizzati che in dettaglio sono: alluminio, antimonio, arsenico, berillio, bismuto, cesio, cromo, cobalto, rame, gallio, germanio, afnio, indio, ferro, piombo, magnesio, manganese, molibdeno, nichel, platino, renio, argento, tantalio, stagno, titanio, tungsteno, vanadio, zinco, zirconio, praseodimio e neodimio.

*Se i metalli, nel loro complesso, venissero estratti con un tenore molto basso il fabbisogno energetico sarebbe così rilevante da incidere significativamente sull'EROEI di queste tecnologie*

Tra le ragioni vi è il fatto che le società minerarie riportano nei loro rapporti di sostenibilità il consumo totale di elettricità e di combustibili fossili utilizzati ma spesso non riportano la quantità di materiali e infrastrutture aggiuntive necessarie per estrarre e lavorare il metallo.

Un secondo approccio, sotto opportune ipotesi, può essere utilizzato per determinare l'impatto dell'esaurimento qualitativo di tutti i metalli geochimicamente rari incorporati in una determinata tecnologia. Analizzando contemporaneamente i principali metalli critici utilizzati nella costruzione di queste tecnologie è possibile stimare, utilizzando una regressione econometrica, la correlazione del tenore medio complessivo con l'energia necessaria al loro processo produttivo, come rappresentato in Fig. 5, nell'approssimazione di un loro esaurimento contemporaneo.

L'EROEI di una tecnologia è più sensibile a un determinato metallo rispetto ad un altro, inoltre andrebbe considerato il momento in cui la scarsità inizia a manifestarsi per ciascun metallo preso in considerazione. Per questa ragione è stata adottata l'ipotesi semplificativa che il tenore dei metalli necessari ad una specifica tecnologia diminuisca in maniera uniforme. Diversamente l'analisi del problema dell'orizzonte temporale richiederebbe la costruzione di scenari complessi basati su diverse ipotesi quali crescita del PIL e della popolazione, l'intensità nell'uso dei diversi metalli nel sistema energetico e in altri usi sociali, e molti altri.

Sotto queste ipotesi i risultati evidenziano che, se i metalli, nel loro complesso, venissero estratti con un tenore molto basso il fabbisogno energetico sarebbe così rilevante da incidere significativamente sull'EROEI di queste tecnologie.





# L'intensità energetica è una dipendenza geologica: il caso del nichel.

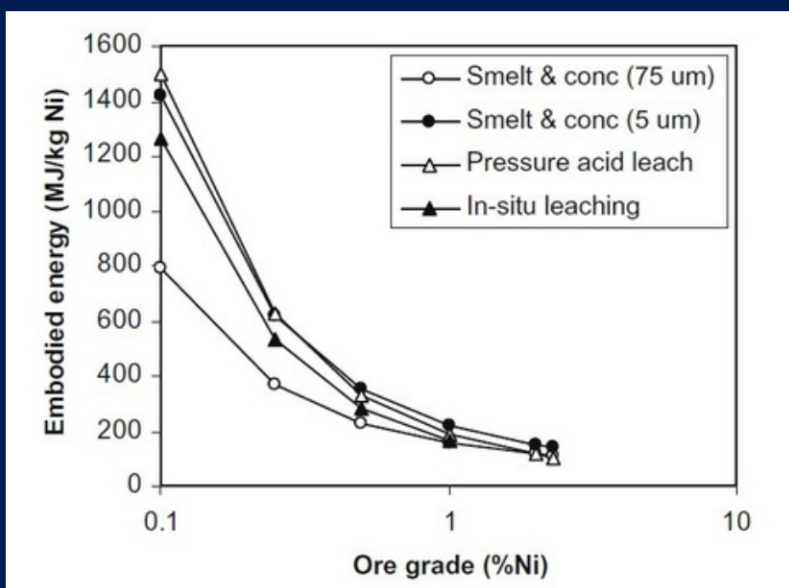
Ogni miniera è un caso a sé stante: l'energia incorporata in un chilogrammo di nichel estratto in Australia è sicuramente diversa da uno estratto in Indonesia. L'intensità energetica è condizionata da molteplici parametri che dipendono fondamentalmente dalle caratteristiche geologiche del minerale estratto. Poiché i depositi di nichel si trovano principalmente in minerali di basso grado, l'estrazione del metallo vero e proprio è un processo estremamente intensivo dal punto di vista energetico.

I **minerali di solfuro** hanno gradi di nichel che vanno dallo 0,25% al 4%, con livelli variabili di metalli secondari e vengono concentrati mediante flottazione fino a raggiungere un tenore di nichel tipicamente inferiore al 10-15%. Più comunemente, il concentrato di solfuro di nichel viene trattato pirometallurgicamente mediante fusione e conversione per produrre quello che viene definito nichel opaco (metallina di nichel) con un contenuto di nichel del 70-80%. La rottura dei legami del minerale solfuro durante il processo libera energia, riducendo l'apporto energetico al processo. Dopo la produzione di nichel opaco, processi, prevalentemente idrometallurgici, utilizzano solfuri di nichel di classe I per produrre solfato di nichel ( $\text{NiSO}_4$ ) per le batterie agli ioni di litio.

I **minerali lateritici** sono depositi superficiali costituiti da limonite e saprolite. I minerali di saprolite sono trattati pirometallurgicamente per produrre leghe di ferronichel o ghisa di nichel (NPI), che normalmente vengono utilizzate direttamente nella produzione di acciaio inossidabile. Recentemente Tsingshan in Indonesia ha aggiunto ulteriori processi a questo metodo tradizionale per produrre nichel opaco dalla ghisa di nichel (con un contenuto in nichel del 12-14%) che viene poi ulteriormente lavorato per produrre solfato di nichel ( $\text{NiSO}_4$ ) per batterie.

Il trattamento di conversione utilizzato da Tsingshan è significativamente energivoro e la sua impronta carbonica complessiva rispetto a quella dei depositi di solfuri, di circa  $10 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$ , è fino a sei volte superiore:  $60 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$ .

Il prodotto finale, solfato di nichel, è il medesimo ma è evidente che l'energia incorporata è profondamente diversa rendendo di fatto inutili quelle analisi del ciclo di vita ove non fossero correttamente computati i contributi energetici dovuti.



Effetto del tenore del nichel nella domanda di energia nella fase di arricchimento.

# Sensibilità dell'EROEI di eolico e fotovoltaico al calo del tenore dei metalli.

*Embodied energy: l'energia consumata durante l'estrazione, la lavorazione della materia prima più l'energia utilizzata in eventuali processi ancillari.*

Con una semplice simulazione, analizzando il calo del tenore di uno specifico metallo, è possibile valutare la sensibilità dell'EROEI delle singole tecnologie. Si consideri il caso del rame utilizzato nella costruzione di una turbina eolica: normalizzando i dati per 1 MW di potenza, si può ritenere un buon compromesso un'intensità del materiale, ovvero la massa specifica di ciascun materiale grezzo o composito per unità di capacità installata, per questa tecnologia pari a 3 tonnellate per megawatt (MW).

Gli altri dati utilizzati sono il capacity factor, pari a 0.4, l'utilizzo previsto, pari a 25 anni, l'EROEI, pari 18:1 ed un tenore di iniziale del rame di circa il 2%. Ulteriori parametri sono quelli dell'energia incorporata o "embodied energy" la cui definizione acquisisce una connotazione più specifica in base all'ambito in cui è applicata e che nel nostro caso si può intendere come "l'energia consumata durante l'estrazione, la lavorazione della materia prima più l'energia utilizzata in eventuali processi ancillari".

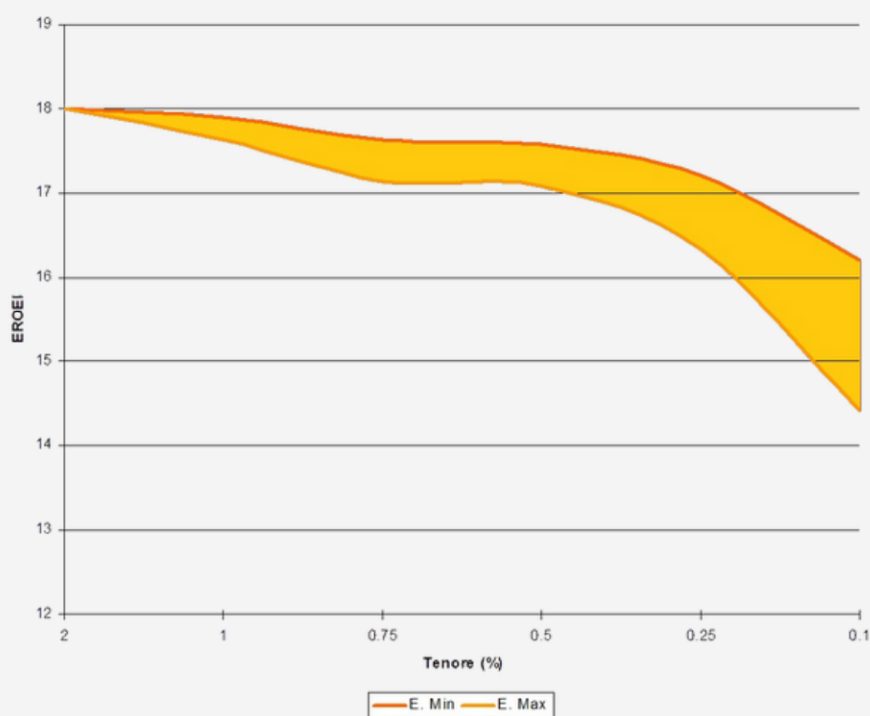


Fig. 6 - Sensibilità dell'EROEI in base al tenore di rame.

*Le perdite di materiale durante la lavorazione comportano la perdita dell'energia utilizzata per la produzione del materiale perso: i valori energetici vanno divisi per il fattore di rendimento.*

La diminuzione dell'EROEI viene calcolata secondo una relazione basata sul rapporto tra l'EROEI, impostato per la specifica tecnologia, ed un'espressione costituita da due termini. Il primo è dato dal rapporto tra l'energia incorporata nel rame presente nella turbina e l'energia totale per produrre la turbina. Assumendo come energia incorporata per il rame un valore di 43 GJ/t otteniamo un valore complessivo di 129 GJ da cui partire per analizzare gli effetti dell'evoluzione del calo del tenore computato nel secondo termine dell'espressione.

Al fine della valutazione dell'energia incorporata sono stati esaminati due processi produttivi, idrometallurgico e pirometallurgico, per disporre di un intervallo di valori che rappresentasse il minimo ed il massimo impatto della sensibilità dell'EROEI in funzione del tenore del metallo.

Circa le perdite di materiale durante la produzione, il rendimento dei due processi è stato stimato dell'87% per quello pirometallurgico e del 75% per quello idrometallurgico. Le perdite di materiale che si verificano durante la lavorazione comportano effettivamente la perdita dell'energia utilizzata per la produzione del materiale perso e quindi, i valori energetici vanno divisi per il fattore di rendimento. In questo caso il rendimento si è ritenuto già incluso nei calcoli energetici.

I risultati, Fig. 6, evidenziano, considerando un tenore medio attuale dello 0,5%, come, rispetto alla condizione iniziale, l'EROEI abbia subito un calo contenuto, nel caso del processo pirometallurgico, stimato in circa il 2%, più significativo nel processo idrometallurgico con circa il 4%. Sfruttare depositi con tenori in rame dello 0,25% comporta una diminuzione dell'EROEI, rispetto all'iniziale, di circa il 4% nel caso pirometallurgico. E' opportuno considerare che in questo momento il tenore medio di "cut-off" nelle miniere cilene è di 0,26%.

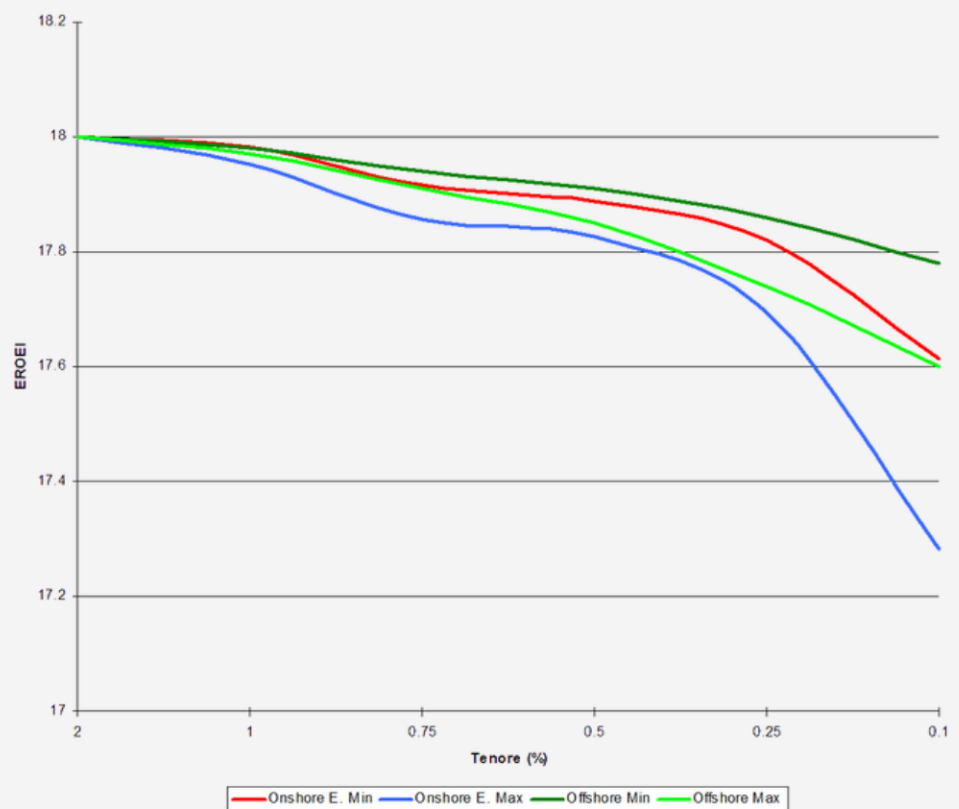


Fig. 7 - Sensibilità dell'EROEI in base al tenore di nichel.

*L'efficienza del processo di arricchimento e raffinazione è una discriminante fondamentale per ridurre l'energia incorporata nel metallo.*

Ma questo valore si raddoppia nel caso di un processo idrometallurgico evidenziando come l'efficienza del processo di arricchimento e raffinazione sia una discriminante fondamentale per ridurre l'energia incorporata nel metallo.

Ogni tecnologia reagisce in maniera diversa sulla base dello specifico utilizzo del metallo nella sua costruzione. Rimanendo nell'ambito delle turbine eoliche è possibile osservare il differente comportamento nel caso la turbina venga prodotta per l'utilizzo onshore piuttosto che offshore. Effetto dovuto al contenuto più elevato di nichel presente per l'utilizzo di acciai fortemente legati. Le tecnologie a trasmissione diretta e cambio hanno intensità diverse di nichel con le prime attestate su un valore medio di 280 kg/MW e le seconde con circa 440 kg/MW, queste ultime più pesanti ed impiegate prevalentemente nell'onshore.

Anche in questo caso, Fig. 7, sono stati esaminati due processi, idrometallurgico e pirometallurgico, ed i valori si attestano su una riduzione percentuale minima dell'EROEI per il processo pirometallurgico nel caso di turbine eoliche offshore, pari allo 0.11%, ed a un valore massimo, per il caso idrometallurgico onshore, di 0,29%.

Se ora si analizzano contemporaneamente i principali metalli critici utilizzati nella costruzione di queste tecnologie è possibile stimare, utilizzando la regressione econometrica vista al paragrafo precedente e sulla base delle ipotesi introdotte, la correlazione del tenore medio complessivo con l'energia necessaria al loro processo produttivo, come rappresentato nel grafico di Fig. 8, nell'approssimazione di un loro esaurimento contemporaneo.

Nel grafico un abbassamento di multiplo di 0.1 del tenore medio significa che i tenori attuali di tutti i metalli sono divisi per un fattore 10. I risultati sono sensibili ai parametri adottati nell'analisi econometrica per far sì che i risultati dell'equazione utilizzata corrispondano ai dati reali.

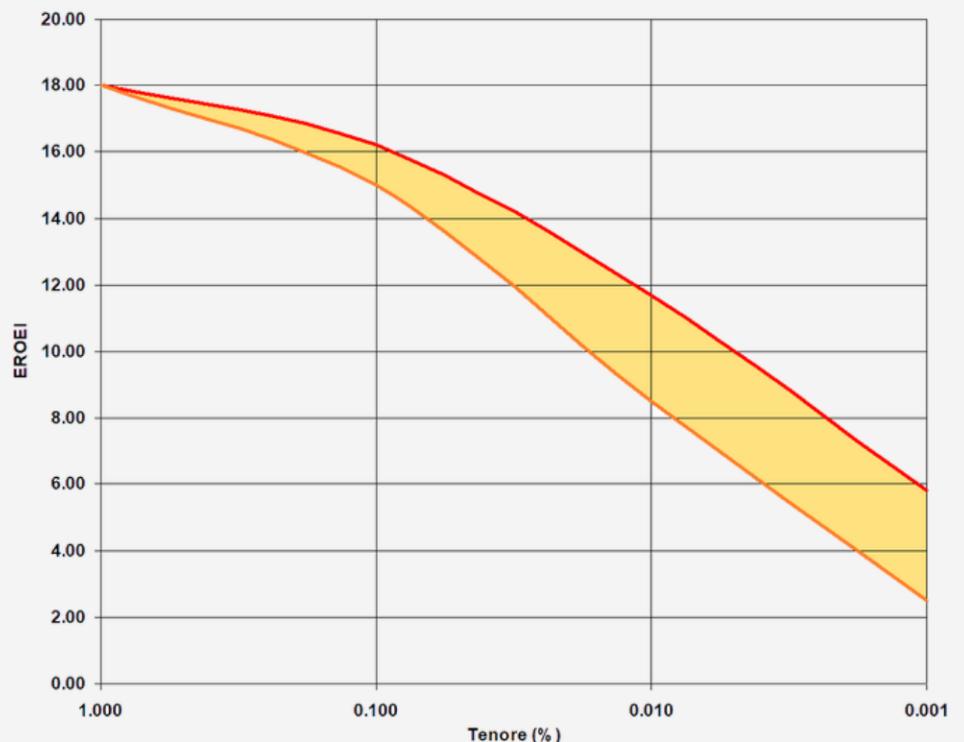


Fig. 8 - Sensibilità dell'EROEI in base al tenore complessivo dei metalli analizzati.



*E' evidente che un tenore medio dello 0,1% implicherebbe una significativa riduzione dell'EROEI di queste tecnologie.*

*Il crescente fabbisogno energetico a causa del degrado del minerale potrebbe innescare un potenziale circolo vizioso tra il settore energetico e quello estrattivo-metallurgico.*

*Viene stimata, per le reti elettriche globali, una domanda di 427 milioni di tonnellate (Mt) di rame e di 625 Mt di alluminio.*

Utilizzando il valore inferiore dell'intervallo di confidenza, che tende a sottostimare i tenori più bassi del minerale, ed il valore superiore, che invece imputa maggior peso ai calcoli dei tenori più bassi, possiamo osservare l'intervallo di valori che definisce la sensibilità dell'EROEI rappresentato nel grafico di Fig. 8.

E' evidente che un tenore medio dello 0,1% implicherebbe una significativa riduzione dell'EROEI di queste tecnologie. L'effetto della scarsità di rame o del nichel sull'EROEI della tecnologia delle turbine eoliche è ridotto nell'ordine di qualche punto percentuale ma sebbene la tecnologia eolica abbia un EROEI relativamente alto, ci sono diversi fattori che influenzano negativamente la crescita della quota di energia eolica nel mix energetico totale.

Si tratta principalmente della natura incontrollata e intermittente del vento e del fatto che i siti delle turbine eoliche sono spesso remoti e dispersi. Entrambi i fattori richiedono una rete più estesa ma attualmente, l'investimento supplementare nella rete elettrica e nell'infrastruttura necessaria in termini energetici non sono stati considerati in nessuno dei presenti calcoli dell'EROEI.

Inoltre un'economia sviluppata ha bisogno di energia prodotta in modo prevedibile pertanto se alcune tecnologie di generazione richiedono sistemi di stoccaggio e sovraccapacità mentre quelle basate sui combustibili fossili quasi nessuna, essendo il combustibile stesso lo stoccaggio, anche queste ulteriori tecnologie vanno considerate all'interno del perimetro del sistema in sostituzione dell'uso flessibile del combustibile. L'intermittenza di queste tecnologie implica la necessità di risorse di backup, attualmente centrali a gas, per compensare le ore in cui la produzione si interrompe.

Pertanto nel contesto di una transizione verso le rinnovabili il crescente fabbisogno energetico del settore estrattivo-metallurgico a causa del degrado del minerale aumenterebbe ulteriormente la domanda energetica e conseguentemente la domanda di tecnologie eolica e fotovoltaica per soddisfarla innescando un potenziale circolo vizioso tra il settore energetico e quello estrattivo-metallurgico.

L'aumento della penetrazione di eolico e fotovoltaico nel mix energetico impone un ampliamento e rafforzamento delle reti di trasmissione e dei sistemi di backup creando nuova domanda di metalli di base e geochimicamente rari.

Per inquadrare numericamente queste considerazioni si consideri che nel Net Zero Scenario di Bloomberg NEF viene stimata, per le reti elettriche globali, una domanda di 427 milioni di tonnellate (Mt) di rame e di 625 Mt di alluminio senza considerare le altre materie prime come, ad esempio, l'acciaio per i tralicci. L'energia necessaria, nell'ipotesi di una costanza del tenore di questi metalli, ipotesi agevole da rispettare per la bauxite molto meno per il rame, si può stimare in circa 55.550 terawattora (TWh): la generazione eolica e fotovoltaica annua attuale è di circa il 5% di questo valore.

Produrre gli impianti fotovoltaici ed eolici per generare la capacità necessaria significa disporre di centinaia di milioni di tonnellate di rame ed alluminio oltre ad acciaio, nichel, cromo, molibdeno o titanio, zinco, e molti altri metalli rari. Vanno previsti i sistemi di backup a supporto, non inseriti in queste stime, e naturalmente le altre tecnologie in competizione per l'accesso a questi stessi metalli per il loro sviluppo: auto elettriche, elettrolizzatori, semiconduttori e moltissime altre.

# La sostituzione contro la scarsità: rame ed alluminio.

---

La sostituzione è un altro modo, oltre all'economia circolare, per ridurre i problemi legati alla scarsità. Il rame può essere sostituito, e questo già avviene in molteplici situazioni, con altri materiali: dalla plastica all'acciaio anche se il principale candidato alla sostituzione del metallo rosso è l'alluminio.

Tuttavia restano molti i settori in cui il rame resta praticamente insostituibile in considerazione del fatto che le analisi circa la sostituzione non possono essere fatte solo sulla base della massa, ma devono considerare anche fattori come la conduttività, la resistenza alla trazione o l'espansione. Il problema legato alla sostituzione del rame con l'alluminio è dovuto alla minore densità del secondo rispetto al primo per cui un cavo di rame con una sezione trasversale di 1 cm che viene sostituito da un cavo di alluminio deve avere una sezione trasversale del 64% superiore per avere la stessa capacità di trasporto di corrente elettrica.

In realtà saranno le scelte consapevoli del progettista a considerare che le apparecchiature disponibili con conduttori in alluminio peseranno sicuramente meno delle stesse apparecchiature in rame, che, al prezzo attuale delle materie prime, costeranno meno e, allo stesso tempo, che potrebbe esserci una differenza di dimensioni fisiche. Anche l'ambiente in cui viene installata l'apparecchiatura può dettare i requisiti del materiale del conduttore, ma soprattutto sono le proprietà meccaniche del metallo rosso a fare la differenza rispetto all'alluminio. I conduttori rigidi in alluminio possono essere soggetti a trazione e torsione mentre quelli flessibili possono essere soggetti a flessione o compressione. Inoltre i conduttori in alluminio in conseguenza dell'affaticamento meccanico sono soggetti a crepe e rotture.

Ma se si cerca di risparmiare energia non è preferibile sostituire il rame con l'alluminio. Naturalmente l'alluminio è molto più abbondante in natura del rame ma richiede molta più energia per essere prodotto: oltre 200 GJ/t.

Questo nonostante la fase di upstream non influisca in maniera significativa sulla domanda di energia grazie all'alto grado del minerale di bauxite (circa il 17%) e alla presenza di uno strato di copertura minimo o nullo.

Oltre l'80% dell'energia richiesta per la produzione di alluminio è necessaria nella fase di midstream poiché la bauxite, la principale fonte di alluminio, possiede legami molecolari molto forti a causa delle temperature estreme al momento della formazione.







# Riferimenti

- F. Fizaine, V. Court, 2015, Renewable electricity producing technologies and metal depletion: A sensitivity analysis using the EROI.
- C.J. Barnhart, S. M. Benson, 2013, On the importance of reducing the energetic and material demands of electrical energy storage.
- G. Lambert, A.S. Hall, S. Balogh, A. Gupta, M. Arnold, 2014, Energy, EROI and quality of life, Energy Policy, Volume 64, Pages 153–167.
- Brian J. Skinner, A second iron age ahead?, American Scientist, vol. 64.
- Norgate T., Jahanshahi S., 2009, Low grade ores – Smelt, leach or concentrate?
- S. P. Michaux, 2021, The Mining of Minerals and the Limits to Growth.
- J.H.M. Harmsen, A.L. Roes, M.K. Patel, 2013, The impact of copper scarcity on the efficiency of 2050 global renewable energy scenarios.
- Maurice C. Fuerstenau and Kenneth N. Han, Principles of Mineral Processing, 2010, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- S. Carrara, P. Alves Dias, B. Plazzotta, C. Pavel, 2020, Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system, EUR 30095 EN, Publication Office of the European Union, Luxembourg.
- Barnhart C.J., Benson S. M., 2013, On the importance of reducing the energetic and material demands of electrical energy storage.
- R.H.E.M. Koppelaar, H. Koppelaar, 2016, The Ore Grade and Depth Influence on Copper Energy Inputs.
- I. Capellan-Perez, C. de Castro, J. M. Gonzalez, 2019, Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies.
- J. G. Lambert, C. A.S. Hall, S. Balogh, A. Gupta, M. Arnold, 2013, Energy, EROI and quality of life.
- W. Wei, P. B. Samuelsson, A. Tillander, R. Gyllenram, P.G. Jönsson, 2020, Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Nickel Products.
- J. Jeswiet, A. Szekeres, 2016, Energy Consumption in Mining Comminution.
- T.E. Norgate, S. Jahanshahi, W.J. Rankin, 2006, Assessing the environmental impact of metal production processes.
- K. Pahud, G. deTemmerman, 2022, Overview of the EROI, a tool to measure energy availability through the energy transition. 8th International Youth Conference on Energy (IYCE'22).
- Shaojian Ma, Hengjun Li, Xiaojing Yang, Wenzhe Xu, Xingjian Deng and Jinlin Yang, 2023, Study on Impact Crushing Characteristics of Minerals Based on Drop Weight Tests.
- L. Pryor, R. Schlobohm, B. Brownell, A comparison of aluminum vs. copper as used in electrical equipment.
- P. Jose-Luis, A. Abadias, A. Valero, A. Valero, Markus Reuter, 2019, The energy needed to concentrate minerals from common rocks: The case of copper ore.
- Olivier Vidal, Ressources minérales, progrès technologique et croissance, Temporalités.
- F. De Rochette and G. De Temmerman, 2022: Fluxes, not stocks: the real challenges of metallic resources for the energy transition, Zenon Research, Paris, France.
- D.E. Sullivan, J.L. Sznopce, L.A. Wagner, 2003, 20th century U.S. mineral prices decline in constant dollars, USGS.
- G. Collins, M. M. Foss, 2022, The Global Energy Transition's Looming Valley of Death, Baker Institute.
- U.S. Geological Survey, 2013, Metal prices in the United States through 2010: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2012–5188
- Prysmian Group, Aluminum cables or copper cables – <https://tr.prysmiangroup.com/en/media/technical-article/aluminum-cables-or-copper-cables>
- Capellán-Pérez I, De Blas I, Nieto J, De Castro C, Mediavilla M, Carpintero O, Rodrigo P, Frechoso F, Cáceres S. (2017), Guiding European Policy toward a low-carbon economy. Modelling sustainable Energy system Development under Environmental And Socioeconomic constraints. D4.1 (D13) Global Model: MEDEAS-World Model and IOA implementation at global geographical level.
- Limpens G., Jeanmart H. (2018), Electricity storage needs for the energy transition : an EROI based analysis illustrated by the case of Belgium.
- IEA (2023), Electricity Grids and Secure Energy Transitions, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/electricity-grids-and-secure-energy-transitions>, License: CC BY 4.0
- IEA (2023), Critical Minerals Market Review 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/critical-minerals-market-review-2023>, License: CC BY 4.0
- Rötzer, N.; Schmidt, M. Historical, Current, and Future Energy Demand from Global Copper Production and Its Impact on Climate Change. Resources 2020, 9, 44. <https://doi.org/10.3390/resources9040044>
- Harald Ulrik Sverdrup, Anna Hulda Olafsdottir, Kristin Vala Ragnarsdottir (2019), On the long-term sustainability of copper, zinc and lead supply, using a system dynamics model – Resources, Conservation & Recycling: X
- Mudd G., Jowitt S., Werner T (2016), The world's lead-zinc mineral resources: scarcity, data, issues and opportunities – Ore Geology Reviews.
- G. Brussato (2021) – Energia verde? Prepariamoci a scavare – Ed. Montanarda.
- B. Skinner, Earth Resources, 1976.
- Magdalena R.; Valero A.; Palacios J., Valero A. (2021), Mining energy consumption as a function of ore grade decline: the case of lead and zinc, Journal of Sustainable Mining.
- Rötzer, N.; Schmidt, M. Decreasing Metal Ore Grades—Is the Fear of Resource Depletion Justified? Resources 2018, 7, 88. <https://doi.org/10.3390/resources7040088>
- Davenport, W. G. (2002) Extractive metallurgy of copper 4th ed., Elsevier Science Ltd.
- S.A. Northey, 2021, Going for Bronze: Will Mineral Resource Depletion Make It Harder to Get an Olympic Medal in the Future? Journal of Japan Society of Energy and Resources (2020) 41(5): 325–331.
- Martin B. Hocking, 2006, Handbook of Chemical Technology and Pollution Control, Elsevier Science & Technology Books.
- C. K. Gupta, 2003, Chemical Metallurgy Principles and Practice, Wiley-VCH.



**Realizzazione**

**Giovanni Brussato**  
ingegnere minerario

**Contatti**

**Amici della Terra Onlus**

Via Ippolito Nievo, 62 – 00153 Roma  
tel. +39 06 6868289 / +39 06 6875308  
[www.amicidellaterra.it](http://www.amicidellaterra.it)  
[astrolabio.amicidellaterra.it](http://astrolabio.amicidellaterra.it)

Per info e contatti:  
[segreteria@amicidellaterra.it](mailto:segreteria@amicidellaterra.it)