

Le transizioni gemelle

Il capitalismo sui binari del verde e del digitale. Parte prima.

Alessandro Montebugnoli e Franco Padella¹

Secondo un'opinione ormai diffusa, alimentata dalle istituzioni di governo dell'economia globale, l'uscita dalla crisi generata dal Covid 19 può inaugurare una nuova fase di sviluppo del capitalismo, di ampio respiro, trainata dalle ondate di innovazioni tecnologiche intitolate alla transizione ecologica e ai prossimi passi della rivoluzione digitale. L'articolo si interroga sulla credibilità di questa prospettiva: quanta strada può fare il capitalismo sui binari del verde e del digitale? A quale velocità può andare? E quanto si può sperare che il viaggio risulti confortevole?

1. I piani di *recovery* destinati a portarci fuori dalla crisi generata dal Covid 19 hanno sancito due orientamenti già rilevabili quando la pandemia doveva ancora insorgere.

Il primo consiste in un mutato atteggiamento nei confronti delle politiche 'fiscali', di spesa pubblica. Verso la metà degli scorsi anni Venti, complice la debolezza della ripresa dopo la crisi del 2008, il lungo dominio delle strategie di tipo *monetario* ha cominciato a essere contestato a vantaggio di cospicui interventi a sostegno della domanda aggregata, destinati a fare la differenza rispetto agli equilibri che stanno nelle corde dei mercati. Per la verità, sviluppi del genere si sono registrati soprattutto negli Stati Uniti, dove la necessità di un nuovo *fiscal activism*, di stampo keynesiano, è tornata alla ribalta nel vivo del dibattito innescato alla fine del 2013 da Lerry Summers circa la possibilità di una futura, ma già iniziata, *Secular Stagnation*². Non

1 Questo testo è stato elaborato in preparazione del convegno Rileggere il Capitale, svoltosi il 14 e 15 giugno 2021, online, per iniziativa di ARS e CRS. La versione presentata in tale occasione, più breve, è [disponibile](#) sul sito del CRS insieme alle registrazioni del convegno. Sebbene l'intero testo sia frutto del lavoro di entrambi gli autori, gli Allegati 1 e 2 vanno attribuiti in particolare a Franco Padella.

2 Cfr. L. Summers, *U.S. Economic Prospects: Secular Stagnation, Hysteresis, and the Zero Lower Bound*, *Business Economics*, Vol. 49, No. 2, 2014. Vari interventi nel dibattito sono raccolti in C. Teuling e R. Baldwin (ed.), *Secular Stagnation: Facts*,

così in Europa, dove soltanto la pandemia, in effetti, è riuscita a rompere la gabbia del *fiscal compact*, e soltanto *pro tempore*, in chiave emergenziale: convintamente quanto all'entità delle risorse messe in campo nel fuoco della crisi, ma non esattamente in linea di principio.

Ben chiaro da entrambi i lati dell'Atlantico, invece, il ruolo di *assi portanti* della crescita che i piani *recovery* hanno accordato al verde e al digitale, in virtù dei rispettivi giacimenti di innovazioni tecnologiche pronte per essere (ulteriormente) sfruttate, dalle *renewables* all'Intelligenza Artificiale; è chiaro anche, però, il collegamento che in tal modo si è venuto a stabilire con la funzione di *rescue narratives* che tanto il verde quanto il digitale svolgono almeno da vent'anni – precisamente a fronte delle incertezze che il capitalismo, da altrettanto tempo³, fa registrare quanto alla consistenza delle proprie capacità espansive.

Così, nel complesso, le prospettive di uscita dalla crisi generata dal Covid 19 sono venute a sovrapporsi a questioni di più lungo periodo. In effetti, data l'entità delle risorse che i piani hanno messo in campo e la consistenza delle ondate di innovazioni tecnologiche sulle quali è lecito contare, la situazione contiene gli estremi per interrogarsi circa la possibilità di una stagione nuova, in grado di sconfiggere i timori di un rallentamento del ritmo di crescita delle economie occidentali, già pervenute a un elevato grado di maturità; e per chiedersi quali caratteristiche, se del caso, la 'ripresa' di un processo espansivo più intenso e più vivace possa assumere.

Nel seguito di questo testo l'argomento sarà affrontato dal punto di vista della cosiddetta 'transizione ecologica'; in un prossimo contributo prenderemo in esame le attese che si appuntano sui più recenti sviluppi della rivoluzione digitale.

Causes, and Cures, CEPR Press, Londra, 2014.

3 Cioè dalla crisi del 2001, puntualmente richiamata da Summers nel testo già citato. Volendo, però, si potrebbe risalire più indietro, alla brusca riduzione del tasso di crescita della produttività intervenuta nei primi anni '70 del secolo scorso e alle caratteristiche della intensa ma breve fase espansiva dei tardi anni '90. Torneremo sull'argomento quando ci occuperemo delle prospettive di crescita legate al corso della rivoluzione digitale. L'espressione *rescue narratives* è tratta da T. Jackson, *The Post-Growth Challenge: Secular Stagnation, Inequality and the Limits to Growth*, CUSP Working Paper No 12, Guildford: University of Surrey, 2018. Online su: www.cusp.ac.uk/publications.

2. A proposito della transizione ecologica, la prima cosa da segnalare è il peso accordato alle questioni che vertono sulla produzione e sul consumo di energia, le quali, complice la gravità della crisi climatica⁴, godono in effetti di un'attenzione pressoché esclusiva. E la strategia destinata ad affrontarle, ridotta proprio all'osso, suona come segue: (i) elettrifichiamo tutto, o quasi tutto, trasformiamo tutti o quasi tutti i consumi di energia in consumi di energia elettrica, e (ii) produciamo tutta o comunque la parte di gran lunga prevalente dell'energia elettrica che serve per mezzo di fonti rinnovabili (solare, eolico, marino, ecc.)⁵.

Così, con le questioni energetiche messe al centro della scena, si capisce bene come alla transizione ecologica possa essere attribuita la funzione di *driver* della crescita. Elettrificare tutto o quasi tutto e produrre tutta o quasi tutta l'elettricità che serve per mezzo di fonti rinnovabili significa costruire enormi quantità di impianti e di dispositivi *nuovi*, auto elettriche comprese: quindi grandi quantità di domanda (sostenuta appunto dalla mano pubblica), di investimenti, di lavoro, di reddito, ecc. Come pure è il caso di notare che le fonti rinnovabili, in tal modo, vengono a configurare una sorta di quadratura del cerchio: non soltanto promettono di disaccoppiare crescita e produzione di CO₂, ma anche di *stimolare* la crescita, di promuoverla, *proprio mentre* la riconciliano con le ragioni dell'ambiente, rendendola pulita, *carbon free*.

In questo, per la verità, non c'è moltissimo di nuovo, perché l'interpretazione dell'ecologia come 'opportunità di crescita' non è estranea alla retorica *main stream* dello 'sviluppo sostenibile', in circolazione, come accennato, almeno da vent'anni. Ma non c'è dubbio che i recenti piani di *recovery*, e i 'discorsi' che li accompagnano, segnino un salto di qualità degno di essere notato. Non soltanto per l'inedita quantità di mezzi finanziari resi disponibili, ma anche per la consapevole e insistita elezione

4 Che essenzialmente, in effetti, dipende dal modo in cui oggi, *rectius* da 200 anni a questa parte, provvediamo ai nostri bisogni di energia.

5 Tale, per esempio, la logica adottata nello *Special Report IEA, Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector*, Francia, maggio 2021 (<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>), dove comunque si prevede che il mix energetico mondiale comprenda ancora una quota di energia nucleare dell'11%. Altri esercizi sono più radicali, escludendo senza eccezioni qualsiasi fonte diversa dalle *renewables*: cfr. per esempio Jacobson et al, *100% Clean and Renewable Wind, Water, and Sunlight All-Sector Energy Roadmaps for 139 Countries of the World*, 1 luglio, 108–121, 6 settembre, 2017 (d'ora in poi *100% WWS*).

del progresso tecnologico di contenuto ambientale, insieme al suo gemello di matrice digitale⁶, a *baricentro* dell'intero processo di accumulazione – non tanto diversamente, poniamo, da come il complesso casa-automobile – elettrodomestici costituì il nucleo trainante dello sviluppo negli anni della *Golden Age*. D'altra parte, a essere sinceri, è difficile evitare il sospetto che la stessa preminenza accordata alla transizione energetica abbia qualcosa a che fare con la misura in cui l'argomento si presta a essere interpretato in termini di investimenti, affari e lavoro – certamente, per dire, più della difesa della biodiversità dai danni legati alle attività di *direct exploitation*.

3. Affinché quest'ultima osservazione non generi equivoci, diciamo subito che la strategia sommariamente richiamata merita senz'altro di essere approvata: l'uso dei combustibili fossili va abbandonato definitivamente, quanto più in fretta sia possibile, e non vi è altro modo per farlo che grazie a una massiccia elettrificazione del consumo di energia, civile e industriale, realizzata con l'impiego di dosi massicce di fonti rinnovabili. La crisi ecologica, però, non consiste soltanto del *climate change*, delle decine di miliardi di tonnellate di CO₂ che ogni anno consegniamo all'atmosfera bruciando carbone e petrolio; la questione energetica, per quanto cruciale, è soltanto una di quelle che meritano attenzione. E soprattutto, c'è da dire che l'operazione di 'assolutizzarla' significa aprire la strada al paradosso che il suo affrontamento – sacrosanto com'è, in vista dell'obiettivo di completa decarbonizzazione che occorre perseguire – possa tuttavia generare esiti perversi a scala planetaria⁷.

In questo, nel paradosso appena detto, è al lavoro una ragione stringente. Quando si tratta di ambiente, forse più che in ogni altro caso, tutto si tiene: l'ambiente, l'ecosfera, è appunto una totalità, un *hólos*, un 'intero', sicché non è possibile intervenire su una qualsiasi delle sue parti senza che ognuna delle altre abbia a subire effetti rilevanti. O almeno, 'metodologicamente': non è lecito intervenire su una qualsiasi delle sue parti senza rappresentarsi la necessità di controllare (cercare di capire) gli effetti che direttamente o indirettamente, con diversi gradi di probabilità, si possono produrre su

6 I due, del resto, presentano anche molteplici connessioni di tipo funzionale.

7 Naturalmente, non si tratterà mai di una assolutizzazione dichiarata, esplicita. Piuttosto, quello che accade, ed è sufficiente a generare esiti perversi, è che la necessità di 'abbandonare i fossili' sia di fatto mandata avanti a qualsiasi altra.

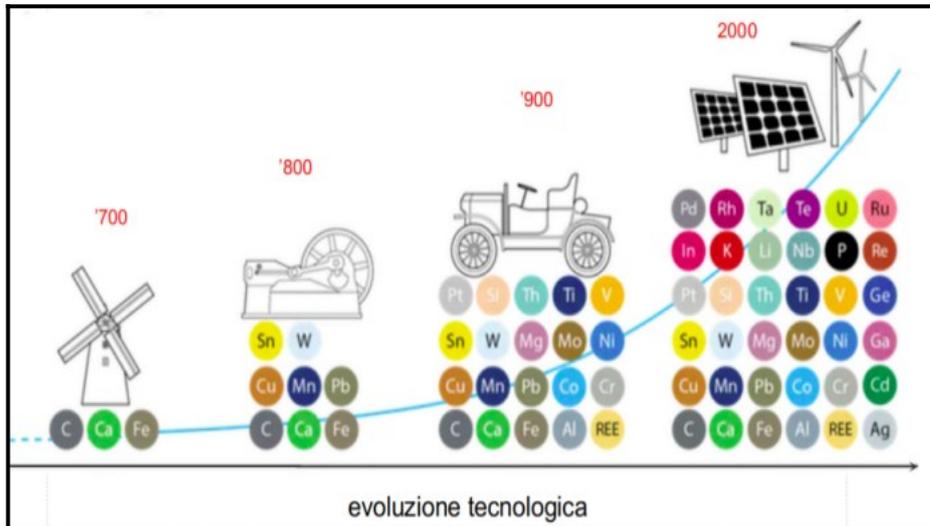
ognuna delle altre. Più alla radice, si tratta della circostanza, a suo tempo già vista da Bateson, che le questioni di natura ecologica mal sopportano approcci di tipo *problem solving*, implicando piuttosto mutamenti ‘profondi’, riguardanti il ‘metabolismo di base’, se non proprio le ‘identità’, dei sistemi chiamati in causa dai loro contenuti.

Per insistere, l’argomento presenta motivi di interesse epistemologico (se basta) che difficilmente potrebbero essere maggiori, e veramente meriterebbe considerazioni di diversa ampiezza, che ruoterebbero intorno alle nozioni di complessità, incertezza, responsabilità e simili. Qualcosa aggiungeremo⁸, ma a questo punto non è il caso di complicare troppo una cosa che pure può essere detta in modo semplice: dacché prevede la produzione di grandi quantità di impianti, la strategia sommariamente richiamata, sebbene riguardi l’energia, comporta l’impiego di grandi quantità di *materia*, di *materiali*, soprattutto metalli, delle quali si tratta appunto di ‘controllare’ se, come e quanto possono essere prelevate, usate, magari più volte, e infine restituite all’ambiente in modo sostenibile.

4. In questo, la transizione dalle fonti fossili a quelle rinnovabili si colloca lungo una linea evolutiva che da sempre, si può dire, ha riguardato la trasformazione dell’energia primaria, presente in natura, nell’energia che serve ai nostri scopi. Il profilo del *trend* è già visibile nel numero delle diverse specie chimiche contenute nelle tecnologie di volta in volta prevalenti in età moderna: come si vede dalla figura che segue, si è trattato di un incremento cospicuo e cumulativo.

8 Nel paragrafo 10 e alla fine dell’Allegato 1.

Figura 1



Fonte: cfr. Allegato 1

Ai fini di questo contributo, però, la questione da affrontare è meno grata di così, riguardando soprattutto, come accennato, le *quantità* di materiali (compresi nel quarto insieme) che devono essere messe a disposizione dei costruttori di impianti e di dispositivi: si può affermare che il loro necessario aumento è ‘sostenibile’?

Tipicamente, valutazioni del genere – in effetti tutte le valutazioni di sostenibilità – prendono le mosse da una determinata ipotesi circa l’andamento del Pil globale fino al 2050 (l’anno dell’auspicata piena decarbonizzazione), talvolta distinguendo tra economie più o meno avanzate; e l’ipotesi che tipicamente viene adottata è quella di un saggio di aumento intorno al 3% all’anno, talvolta articolandola in scenari più o meno ottimistici. Per esempio, lo *Special Report* di IEA che abbiamo già citato⁹

⁹ Cfr. Nota 5.

contiene un valore complessivo del 3,1%, mentre nell'ultimo *Outlook EIA*¹⁰ troviamo il quadro che segue:

Tabella 1 - Proiezioni PIL globale 2018-2050			
% ↑GDP	Reference	High	Low
OECD	1,5	2,1	1,1
non-OECD	3,8	4,6	3,2
World	3,0	3,7	2,4

Fonte: EIA¹⁰

L'operazione successiva consiste nel collegare all'andamento dell'attività economica un determinato andamento del *consumo* di energia in termini aggregati, che in genere incorpora ipotesi più o meno ottimistiche circa la riduzione della quantità di energia consumata per ogni unità di Pil – ed è precisamente all'altezza di questo secondo passaggio che le implicazioni della strategia che abbiamo detto, di elettrificazione massiccia dei consumi e produzione dell'elettricità che serve per mezzo di fonti rinnovabili, possono cominciare a essere messe sul banco di prova della loro sostenibilità.

Per cominciare, una buona notizia. Di per sé, l'elettrificazione dei consumi comporta un forte miglioramento del rapporto tra energia impiegata e lavoro prodotto, sicché, a parità di risultato utile, il consumo della prima subisce una diminuzione che in effetti può dirsi 'drammatica'. Per esempio, sulla base del già citato rapporto IEA, possiamo addirittura assumere che si tratti di una riduzione di oltre la metà, sicché, nel 2050, con un Pil aumentato di un fattore 2,4, ci troveremmo ad avere bisogno di una quantità di energia addirittura un po' inferiore a quella che impieghiamo oggi.

¹⁰ U.S. Energy Information Administration, *International Energy Outlook 2019 with projections to 2050*, U.S. Department of Energy, Washington DC, settembre 2019, p.15. (<https://www.eia.gov/ieo>).

Tuttavia, a parte le possibilità collegate alla cosiddetta economia circolare, delle quali diremo tra poco, le buone notizie finiscono qui. E non bastano a evitare che la domanda che ci siamo posti riceva una risposta di segno negativo: anche a tener conto di consumi di energia drasticamente abbattuti dalla loro elettrificazione, la realizzazione degli impianti e dei dispositivi necessari al fine di impiegare (quasi) soltanto fonti rinnovabili richiede quantità di materiali che possono essere rese disponibili soltanto a prezzo di nuove violazioni dei *planetary boundaries*, certamente diverse dall'effetto serra, ma non per questo più 'sostenibili', meno inaccettabili.

Nell'Allegato 1 sono contenute le basi analitiche che giustificano questa affermazione, di certo molto impegnativa. Qui, nel paragrafo che segue, si richiamano i punti principali dell'argomentazione.

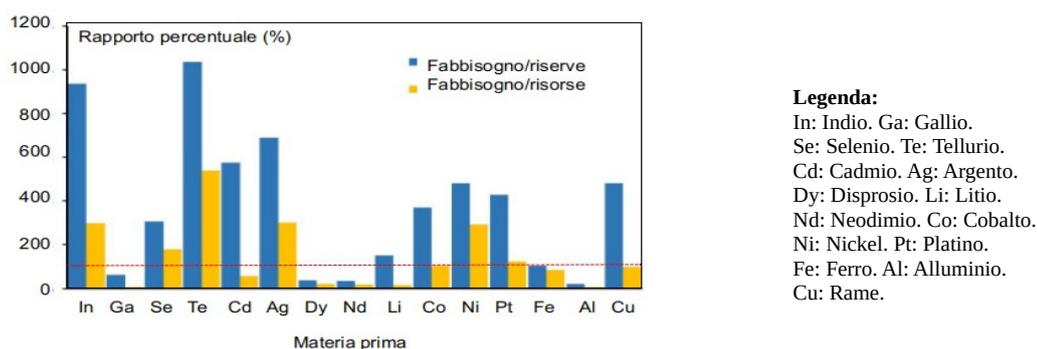
5. Che sono tre.

A. Innanzi tutto, una considerazione di carattere preliminare-prospettico. Per definizione, l'operazione di elettrificare tutto, virtuosa com'è dal punto di vista del rapporto lavoro/energia, si può fare una volta sola. Ammesso di essere riusciti nell'impresa eroica di completarla entro il 2050, tutti i successivi aumenti del PIL, non potendo più godere dei suoi effetti, neppure potranno evitare di tradursi (più o meno linearmente) in conseguenti aumenti dei consumi di energia per usi finali, e inevitabilmente, però, in maggiori quantità di materiali richiesti. Naturalmente, guadagni di efficienza (riduzioni dell'intensità di energia per unità di reddito) resteranno sempre possibili, ma nulla di paragonabile al drammatico abbattimento connesso all'elettrificazione in quanto tale.

Il fatto è che le fonti rinnovabili, a dispetto del carattere inesauribile dell'energia solare, dalle quali quasi tutte dipendono, non valgono affatto a togliere la finitezza del mondo in cui viviamo – e però neppure valgono a sconfiggere il celebre aforisma di Boulding, secondo il quale “chi crede che una crescita esponenziale possa continuare all'infinito in un mondo finito è un folle, oppure un economista”.

B. Comunque, per nutrire motivi di preoccupazione, non c'è bisogno di spingere lo sguardo tanto avanti. La figura che segue prende in considerazione l'insieme dei materiali più ampiamente chiamati in causa dall'espansione delle *low carbon energy technologies*. Le colonne blu e gialle indicano il rapporto percentuale tra la domanda cumulativa al 2060 e, rispettivamente, le riserve note e le risorse delle quali si presume l'esistenza¹¹. Come si vede, nel primo caso, soltanto quattro materiali (Gallio, Disprozio, Neodimio, Alluminio) fanno registrare un rapporto inferiore al 100%, corrispondente alla soglia dell'esaurimento, e il superamento di quest'ultima, perlopiù, quando avviene, si segnala per l'alto numero di volte che prevede. Inoltre, anche a prendere in considerazione i più elevati valori delle risorse, la domanda cumulativa supera le disponibilità stimate di ben sei elementi – Indio, Selenio, Tellurio, Argento, Nickel, Platino – e approssima (al 2060) quelle di Cobalto, Ferro e Rame.

Figura 2



Fonte: cfr. Allegato 1

Quest'ultima circostanza è di particolare rilievo, consentendo di mettere in evidenza un dato finora trascurato. In breve, non è soltanto questione di terre rare (nella figura rappresentate dal Neodimio e dal Disprozio) e neppure, soltanto, di materiali 'specifici': oltre a questi ultimi, le tecnologie legate allo sfruttamento delle *renewables* non mancano di chiamare in causa

¹¹ Vale la pena di segnalare che le valutazioni fanno riferimento allo scenario contenuto in IEA, *Energy Technology Perspectives 2017*, Parigi, 2017, che prevede una strategia di decarbonizzazione meno esigente di quella contemplata nello scenario "Net Zero Emissions by 2050" dell'*Outlook* più recente.

materiali senz'altro 'comuni', già largamente impiegati nella produzione dell'intero complesso di beni e di servizi noto come Pil, e come tali già sottoposti a livelli di pressione che *di per sé* coincidono con serissimi problemi di sostenibilità¹². Da questo punto di vista, può ben dirsi che la situazione è del tipo 'piove sul bagnato' – e come risultato, però, il quadro delle prospettive di *depletion* diventa tanto più severo.

C. Ma neppure, in effetti, è soltanto una questione di *depletion*. Ben si comprende che quest'ultima – nella forma di paventate strozzature dal lato dell'offerta – sia quella che soprattutto preoccupa il mondo degli affari e le istituzioni rappresentative dell'*establishment* economico. Né, per parte nostra, vogliamo certo negarne l'importanza. Ma quand'anche, per ipotesi astratta, nessun vincolo esistesse in termini di disponibilità, resterebbero ancora intatti tutti i problemi di impatto ambientale (e sociale) generati dalle attività di *mining* – da attività di *mining* drammaticamente intensificate in ragione di un aumento della domanda tanto tumultuoso quanto quello che si deve immaginare. Già oggi, del resto, senza bisogno di ipotesi astratte, il caso del litio mostra con tutta chiarezza che l'assenza di vincoli dal lato delle disponibilità (cfr. figura 2) non significa affatto che le cose, allora, vadano bene, dacché l'estrazione e la lavorazione del minerale, disponibile com'è, comporta alterazioni ecosistemiche, danni alla salute umana e impatti negativi su altre attività antropiche che possono ben dirsi 'insostenibili' (cfr. Allegato 1).

La figura che segue riassume gli effetti di cui si tratta con particolare riguardo a quelli di *inquinamento*, mostrando tra l'altro come non si tratti affatto di problemi limitati alla fase specificamente estrattiva dell'attività mineraria. Ai fini di un quadro più completo, rinviamo ancora all'Allegato 1; qui, per suggerire la gravità dell'argomento, accenniamo soltanto all'impatto dell'industria mineraria nei riguardi delle risorse idriche, in termini sia di assorbimento (tra l'altro in competizione con il consumo umano), sia di danneggiamento della qualità. In genere, le cose di cui stiamo parlando sono troppo serie per indulgere a frasi a effetto, ma se un'eccezione è consentita, è questa: davvero, il rischio che si profila è quello di salvare l'aria, l'atmosfera, al prezzo di condannare l'acqua.

12 Su questo punto, di cruciale importanza, cfr. UNEP (2017) *Resource Efficiency: Potential and Economic Implications. A report of the International Resource Panel*. Ekins, P., Hughes, N., et al., soprattutto, p. 287 e sgg..

Prospetto 1

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

6. Adesso, forse, si comprende meglio la fallacia dell'operazione di 'assolutizzare' le questioni legate all'energia, quasi che la crisi ecologica coincida in tutto e per tutto con il *Global Warming*. Mettiamola così: non è un caso che non esista soltanto l'IPCC, l'ormai notissimo *Intergovernmental Panel on Climate Change*, ma anche l'IPBES, che significa *Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*; come non è un caso che dal 2007, all'interno dell'*UNEP-United Nations Environment Programme*, esista un gruppo denominato *IRP-International Resource Panel*. Per dire – certo, in modo allusivo – che 'metà' della crisi ecologica consiste di questioni diverse dall'effetto serra, riguardando piuttosto lo sfruttamento *diretto* degli *ecosystem services* e le sue conseguenze in termini di biodiversità, di qualità dei suoli e delle acque, di migrazioni di specie viventi che non dovrebbero avvenire (virus compresi), ecc.; e per ribadire che già oggi, al netto di qualsiasi necessità aggiuntiva connessa alla transizione energetica, il costante aumento del

consumo di ‘risorse’ presenta profili di insostenibilità non meno gravi, né meno ostici, difficili da aggredire, della quantità di CO₂ presente nell’atmosfera¹³. Con il nesso energia-materia a completare il quadro – nel segno, per non ripetere la metafora della pioggia che cade sul bagnato, del proverbiale rientro dalla finestra di un problema cacciato dalla porta. Talvolta, nella letteratura sulla transizione energetica, per segnalare la portata del cambiamento che serve, ci si compiace di utilizzare la metafora del *leap frog*, del salto della rana: bene, però bisogna stare attenti che la rana, per fuggire il caldo della padella, non salti nella brace.

D’altra parte, siccome tutto ciò non è certo detto per negare la necessità della transizione energetica, né per suggerirne un impianto diverso da quello che verte sul binomio elettrificazione-rinnovabili, è fin troppo chiaro che a questo punto si profila il rischio di un esito aporetico. E già a questo punto, però, si può forse intendere che la possibilità di evitarlo passa per una spregiudicata messa in questione del *bench* iniziale di tutto il ragionamento, costituito, si ricorderà, dal tasso di crescita del Pil ‘incorporato’ nei calcoli in materia di (consumo di) energia. Di preciso, si tratta di sbarazzarsi dell’*assillo* della crescita che visibilmente domina il discorso pubblico dell’economia, e che fin troppo chiaramente è riflesso nel modo di concepire la transizione energetica, per adottare piuttosto, nei confronti della crescita, un atteggiamento altamente *riflessivo*, in tutti i sensi che il termine può assumere – particolarmente, si capisce, nei paesi ricchi, per poco che si voglia applicare con coerenza il principio delle *Common but Differentiated Responsibilities*.

Insomma, si tratta proprio di *non* concepire la transizione energetica alla stregua di un *driver* della crescita – di *sottrarre* la transizione energetica alla presa della narrativa che verte sulla necessità di crescere. Tuttavia, prima di provare a stingere su questo punto, bisogna dire qualcosa dell’argomento lasciato in sospeso verso la fine del paragrafo 4.

7. A discutere di economia circolare, ci si trova in una posizione scomoda. Senza dubbio, l’argomento è di importanza cruciale: tutto quello che precede torna a dire che qualsiasi possibilità di ridurre le quantità dei materiali da estrarre *ex novo* dalla crosta della terra (o dal fondo dei mari...) va tenuta nella massima considerazione. Al tempo stesso, nel dibattito corrente,

13 Cfr. nota precedente.

l'economia circolare è oggetto di un' enfasi davvero spropositata, ignara di troppe cose, o peggio, reticente nel comunicarle. Così, inevitabilmente, bisogna innanzi tutto assolvere a un compito (non grato) di demistificazione.

In primo luogo, va detto che le attività di riciclo non sono esenti da limiti strutturali, legati alle proprietà della materia: esse stesse, in effetti, richiedono l'impiego di energia e altra materia, talvolta in quantità non piccole (in qualche caso perfino superiori a quelle necessarie alle attività di estrazione o prima produzione di un composto).

I limiti appena accennati operano in modo altamente differenziato: più laschi nel caso dei materiali 'comuni' (alluminio, ferro, rame), risultano più stringenti proprio nel caso degli elementi chimici 'specifici', a più alto contenuto tecnologico, il cui recupero può effettivamente comportare oneri severi, soprattutto in termini energetici.

Contrariamente a quello che si è detto a proposito dell'elettrificazione, logica vuole che i principi dell'economia circolare possano dare il meglio di sé avanti nel tempo, non in fase di primo investimento. Vale a dire non presto, visto che le *low carbon energy technologies* utilizzano impianti che perlopiù fanno registrare una vita utile di 20-30 anni (e siamo già al 2050...).

Infine, almeno un cenno merita la circostanza che tanta enfasi sulla possibilità di allungare la vita utile dei *materiali* non è confortata da altrettanta attenzione nei riguardi della vita utile dei *prodotti*, la cui rapidissima obsolescenza (programmata o meno) costituisce in effetti una delle *principali* fonti di pressione sui *planetary boundaries*. E talvolta, per la verità, si ha l'impressione che l'insistenza sulle possibilità di riciclo finisca, essa stessa, per avallare il vorticoso avvicendamento di ogni tipo di *device*.

Detto questo, resta vero che l'economia circolare non manca di modificare il quadro in modo significativo. Appena più in particolare, formuliamo qui l'ipotesi che una rigorosa applicazione dei suoi principi consenta di affermare l'esistenza di qualche spazio di crescita (eco-compatibile) anche all'interno dei paesi ricchi, dove altrimenti sarebbe il caso di non prevederne alcuno. Soltanto, affinché questo accada, bisogna che l'economia circolare, lungi dal presumere troppo di se stessa, formi parte integrante, o meglio, sia *messa a servizio* dell'atteggiamento peculiarmente riflessivo che sotto ogni aspetto, abbiamo sostenuto, deve governare la 'volontà di crescere'. Si tratta appunto della necessità di scrutare in ogni direzione le possibilità

risparmiare entrambe, energia e materia, combinando opportunità di stampo tecnologico e ripensamenti delle *forme* e degli *stili* di consumo – e però di guardare alle variazioni del Pil come a un ‘sottoprodotto’, cioè una grandezza ‘seconda’, derivata, delle cose che sembrano buone e giuste, civili, ragionevoli. Il caso del trasporto discusso nell’Allegato 2 – ovvero la ‘critica’ delle auto elettriche, se così si può dire – costituisce probabilmente il migliore esempio di ciò di cui tratta.

8. Qualche spazio di crescita, abbiamo detto. L’espressione lascia intendere un valore contenuto, che non cercheremo, adesso, di tradurre in un numero preciso. Per farlo, servono mezzi di cui non disponiamo. Ma non per questo rinunceremo a una riflessione di carattere *quali*-quantitativo, destinata a rendere l’intero argomento un poco più stringente.

Sono molti, ormai, e di diverso orientamento, gli autori convinti che i paesi ricchi debbano mettere in conto *a new normal*, una nuova normalità, fatta di saggi di aumento del Pil decisamente inferiori al *trend* secolare del 2,5-3,0%¹⁴. In questa direzione, entro certi limiti, lavora anche la letteratura sulla *Secular Stagnation* citata nel paragrafo 1; tuttavia, rispetto al suo tenore, l’idea di una nuova normalità verte su dati di carattere più strutturale, meno accessibili a interventi di politica economica. In breve, per citare il termine ormai di moda, si tratta di *headwinds*, di ‘venti contrari’ alla crescita, destinati a spirare sulle economie occidentali *in ragione del loro stesso grado di maturità*. Questioni riguardanti la disponibilità delle risorse naturali, o altri vincoli ambientali, formano sempre parte dell’elenco, ma accanto ad altri argomenti di analoga importanza: vale a dire a questioni riguardanti la dinamica demografica, i livelli di partecipazione al lavoro, l’andamento della produttività¹⁵. Del resto, si ricordi quell’1,1% che nello scenario ‘low’ delle proiezioni EIA quantifica l’aumento del Pil all’interno

14 In questo senso – e in ordine di radicalità crescente, per così dire – si possono citare Robert Gordon (*Is U.S. economic growth over? Faltering innovation confronts the six headwinds*, National Bureau of Economic Research, Working Paper 18315, Cambridge, MA, August 2012, <http://www.nber.org/papers/w18315>); *The demise of U.S. economic growth: restatement, rebuttal, and reflections*, National Bureau of Economic Research, Working Paper 19895, Cambridge, MA, February 2014, <http://www.nber.org/papers/w19895>), James Galbraith (*Can Trump deliver up growth?*, Dissent Magazine, Spring 2017) e Tim Jackson (cfr. nota 3).

15 Torneremo su questi aspetti quando discuteremo delle innovazioni tecnologiche di matrice digitale.

dell'area OCSE: non è forse un segno del fatto che saggi di crescita convenzionalmente giudicati 'bassi' hanno ormai acquistato un certo carattere di 'normalità possibile', visto si tratta di proiezioni di qui al 2050?

Tutto questo per dire che soltanto in parte si tratta di volere risultati diversi da sviluppi che in certo modo stanno nelle cose. Sarebbe già molto se i paesi ricchi comprendessero la necessità di non inseguire un ideale della crescita che *comunque* ha fatto il proprio tempo, e il cui perseguimento è pertanto destinato generare disordine e squilibri, rappresentandosi piuttosto il compito di 'organizzarsi' per distribuire meglio le enormi ricchezze di cui *già* dispongono e per goderne in modo più alto e più civile¹⁶. E se poi, su un *mood* del genere, si innestassero riflessioni convenientemente severe circa i termini di una transizione energetica *davvero* sostenibile e circa le *differentiated responsibilities* che bisogna contemplare per ragioni di equità globale, il risultato nello 'spazio' del Pil non sarebbe lontano dal suddetto 1,1% – un po' corretto verso il basso. Comunque, per concludere, qualunque valore sembri plausibile, il suo livello è meno importante del modo di determinarlo – vale a dire del principio, intriso appunto di riflessività, secondo il quale il ritmo di crescita dell'economia deve diventare materia disponibile al vaglio della critica, tanto per ragioni ecologiche quanto per altre ancora, che pure avremo modo di vedere quando ragioneremo del *driver* digitale.

Volendo, si tratta ancora del *leap frog* che la rana è chiamata a compiere, di quale sia sua portata: se esso debba avvenire all'interno del 'programma fondamentale' iscritto nelle strutture portanti del nostro ordinamento sociale ed economico, risolvendosi dunque in un diverso volto del capitalismo (per la verità destinato a una coloritura più metallica che verde); oppure se non sia proprio dal tenore di quel programma che bisogna saltar fuori.

9. Per tutt'altro aspetto, considerazioni abbastanza importanti si connettono a un argomento tanto poco attraente quanto gli stati di ammortamento degli impianti attualmente in funzione. In breve, per non mancare gli obiettivi di

16 Giusto il monito secondo il quale "a failed growth economy and a steady-state economy are not the same thing; they are the very different alternatives we face". Così suona il titolo di un intervento presentato da H. Daly alla Sustainable Development Commission, UK, nell'aprile del 2008, ricchissimo di indicazioni condivisibili anche da parte di chi non accetti alla lettera, senza riserve, l'idea di una *steady-state economy*.

de-carbonizzazione al 2050, le nuove installazioni (pannelli solari, pale eoliche, motori elettrici, ecc.) devono sostituire quelle vecchie *senza aspettare il termine dei loro cicli di vita*. In parole povere, devono sostituirla quando ancora potrebbero funzionare per uno o più anni – il che, intuitivamente, non può essere cosa priva di effetti. Infatti non lo è. In termini economici *standard*, le perdite patrimoniali appena venute in discussione significano che l'uscita dai fossili è pagata al costo-opportunità di tutte le altre cose che si potrebbero fare con le risorse assorbite dalla sua realizzazione.

Né si tratta soltanto della sorte riservata alla vita degli impianti. Se dismetto un'auto a benzina che funziona ancora bene per sostituirla con un'auto elettrica, il mio livello di consumo, *ceteris paribus*, conosce un aumento, come aumenterebbe, poniamo, se usassi gli stessi soldi per pagarmi una lunga vacanza – ma non così il mio 'benessere', visto che quello che posso fare, l'insieme delle mie possibilità di 'funzionamento', resta invariato. In breve, sempre in termini economici *standard*, un'operazione come quella immaginata appartiene alla classe dei consumi 'difensivi', che non perdono questo carattere, di per sé 'negativo', poco esaltante, per il fatto di essere variamente doverosi, meritori o semplicemente inevitabili¹⁷.

Nei numeri, tutto questo non si vede perché i sistemi di contabilità nazionale mancano di registrare le variazioni degli *stock* di ricchezza (non soltanto di quelli naturali): ma che la cosa non si veda nei numeri non significa che non conti nelle cose, nella dinamica sociale. Tanto più che l'ipotesi di un benessere che non varia (a fronte di un consumo che cresce) è utile per fissare le idee, però in effetti bisogna complicarla. Fin qui abbiamo taciuto di una vistosa implicazione dell'impiego di quasi tutte le fonti rinnovabili, le quali non comportano soltanto il consumo di enormi quantità di materiali, bensì anche l'occupazione di determinate quantità di *suolo*, alle quali, ancora, si connettono determinati impatti paesaggistici (ben più ampi, si capisce, delle quantità di suolo direttamente occupate dagli impianti e dalle loro pertinenze). A tener conto di questo ordine di problemi, è chiaro che il

17 Ci sentiamo di dire che questo argomento è largamente sottovalutato. Un'eccezione notevole nel testo di Galbraith citato in nota 14: "Solar is indefinitely sustainable. But for this to help with global warming, we must also forego coal and oil options and accept a diversion of resources away from consumption and toward the investments in renewable energy that are required. In this case, growth and the material living standards we can support under sustainable energy will be lower, and this will be experienced by the population as less (immediate) prosperity than they would have otherwise had".

quadro delle convenienze si può modificare: non è più, soltanto, che l'acqua calda o la luce elettrica prodotta per mezzo di un pannello solare restano pur sempre acqua calda e luce elettrica, e che invece di installare il pannello avrei potuto fare un viaggio; è anche che l'installazione del pannello può danneggiare la vista di cui godo dalla mia finestra.

Più che in altri casi, intorno alla questione del consumo di suolo e dei conseguenti impatti paesaggistici, è facile che sorgano contrasti. A partire dalla determinazione delle quantità di cui si tratta. Per esempio, secondo i risultati dell'esercizio *100% Clean and Renewable Wind, Water, and Sunlight All-Sector Energy* di cui alla nota 5 (*100%WWS*), che ha il merito della completezza ma ha prestato il fianco a critiche durissime, il 2% del territorio italiano sarebbe sufficiente a fronteggiare tutte le necessità del Paese; secondo altre fonti il fabbisogno sarebbe assai maggiore; altre ancora, che però presentano pesanti limiti 'tematici', suggeriscono la possibilità di quantità minori¹⁸. Controverso è anche il termine di confronto che ha senso prendere in considerazione: l'intero territorio di un Paese oppure, come sembra ragionevole, una sua qualche parte 'disponibile'? E quali criteri, però, adottare per stabilire quali parti di un territorio possono dirsi 'disponibili'? Infine, ovviamente: quale peso accordare agli obiettivi di difesa del paesaggio (ma neppure è detto che si tratti solo di questo) rispetto all'insieme di quelli con i quali essi entrano in contrasto?

Indipendentemente dalle risposte che si vogliono dare, è chiaro che domande del genere stanno nelle cose (più che legittime, sono proprio inevitabili) e però formano parte integrante delle *condizioni di consenso* sulle quali la transizione energetica può contare. Il che, a sua volta, ha implicazioni profonde sul *regime di regolazione sociale* del quale essa ha bisogno. In breve: come richiede lo sviluppo di un'attitudine altamente riflessiva nei confronti dell'istanza di 'crescere', così, date le sue inevitabili proiezioni territoriali, la sua inevitabile 'visibilità' territoriale, l'uscita dai

18 Una rapida ricostruzione delle critiche a 100%WWS in <https://www.econopoly.ilsole24ore.com/2021/07/09/transizione-ecologica-italia/>; per un esempio di valutazioni poco ottimistiche si veda Iñigo Capellán-Pérez, Carlos de Castro e Iñaki Arto, *Assessing vulnerabilities and limits in the transition to renewable energies: Land requirements under 100% solar energy scenarios*, in "Renewable and Sustainable Energy Reviews", settembre 2017; un chiaro esempio della tendenza a enfatizzare il contenuto di possibilità parziali è M. Mazzer e D. Moser, *How solar energy could power Italy without using more land*, Nature Italy, aprile 2021 (<https://www.nature.com/articles/d43978-021-00048-z>).

fossili grazie alle rinnovabili ha bisogno di assetti istituzionali – procedure, pratiche, esperienze – di tipo altamente *partecipativo*. Diversamente, i costi-opportunità che comunque implica colpiranno la società alle spalle, in modo incontrollato, dando luogo a situazioni conflittuali comunque destinate a esiti nefasti: vuoi a sviluppi più o meno apertamente repressivi (vale a dire a una qualche combinazione di mercato e autoritarismo); vuoi al risultato che della transizione energetica, alla fine, si faccia poco e niente, comunque meno del necessario, che in effetti è tantissimo.

10. Qualche valutazione di sintesi per concludere il discorso. La domanda iniziale verteva sulla plausibilità di una nuova stagione della crescita trainata dalla diffusione delle *low carbon energy technologies*. Il primo elemento di risposta che emerge dalle cose dette è che la transizione energetica, per poco che voglia restare fedele alle ragioni dell'ecologia, ha veramente poco in comune con il modo in cui il capitalismo, in tempi più o meno lontani, ci ha abituato a concepire il darsi di una fase espansiva – per non tornare troppo indietro, pensiamo al tumultuoso aumento dei consumi nel corso della *Golden Age*, o anche ai 'ruggenti anni 90' del secolo scorso, quando le ITC hanno cominciato a dispensare i propri frutti a scala popolare. L'immagine che sembra appropriata è piuttosto quella di un'economia che torna sui suoi passi, ripensa il modo di fare le cose, sottopone al vaglio della critica la stessa necessità di crescere. Appunto, più o meno il contrario dell'assillo espansivo – iscritto nell'insaziabile bisogno di valorizzazione del valore – che domina il capitalismo dal giorno in cui è venuto al modo.

Il riferimento alla *Golden Age* suggerisce però anche un diverso ordine di considerazioni. Tenuto conto delle cose dette sotto il titolo 'consumi difensivi', che naturalmente valgono anche per gli investimenti, in termini di mancato *aumento* della capacità produttiva, è difficile immaginare che la transizione energetica possa avvenire in un *clima sociale* analogo a quello dei primi decenni del secondo dopoguerra, quando il tumultuoso aumento dei consumi concretava appunto – a tutti gli effetti, nella percezione di milioni e milioni di famiglie – un inedito aumento del benessere (e benessere significava l'arrivo dell'acqua corrente nelle case...). Il capitalismo, in quella fase, ha dato il meglio di sé, mostrando un volto che a buon diritto può dirsi 'democratico' (almeno nel senso che è risultato *compatibile* con l'allargamento del quadro democratico). Ma il meglio di sé, appunto, l'ha già

dato. Oggi, una fase di crescita trainata dall'impossessamento capitalistico delle *low carbon energy technologies* non è impossibile – ma oltre a tradursi in nuove e serissime violazioni dei *planetary boundaries*, non avrebbe comunque la 'popolarità' che non è mancata alla società opulenta, per quante critiche merito tanti dei suoi frutti¹⁹.

Difficilmente, del resto, potrebbe essere altrimenti. Per un aspetto essenziale, l'affrontamento della crisi ecologica significa rimediare a danni (disastri) prodotti nel passato. Significa 'riparare'. Pensare che questo possa avvenire gratis – senza essere in alcun modo chiamati a rispondere del fatto di avere devastato il mondo in cui viviamo, come possiamo appunto interpretare i suddetti costi-opportunità – è una gravissima (e in verità evidente) mistificazione. Argomento, si capisce, che non è messo in chiaro con l'intenzione di crogiolarsi nei sensi di colpa, ma perché mancare di riconoscerlo significa insistere pervicacemente nel reato, appunto reiterarlo, sia pure in forme diverse da quelle del passato.

11. Detto questo, non è il caso che il discorso finisca con una nota negativa. A dispetto di ogni difficoltà – e certamente le questioni legate all'energia non sono le più facili – l'affrontamento della crisi ecologica è una cosa bellissima. E a conforto di questa convinzione, per concludere, due degli argomenti proposti in quello che precede si prestano a essere come intensificati, portati un passo avanti.

Il primo è ancora il grado di riflessività del quale vi è bisogno quando si tratta della crescita. Al fondo, la sua acquisizione dipende proprio dal tipo di cambiamenti – profondi, di identità – ai quali abbiamo già accennato. Appena più in particolare, si tratta di una diversa 'intuizione' del mondo in cui viviamo, incentrata sulla percezione di una fondamentale *co-appartenenza* degli esseri umani e del loro ambiente, piuttosto che su quella di una fondamentale estraneità reciproca, premessa di dominio. Sul senso di un' 'alleanza', si potrebbe anche dire – per aggiungere che l'instaurazione un simile rapporto significherebbe di per sé il darsi di un acquisto netto, di un

19 Per finire di descrivere il regime di regolazione del capitalismo nell'età della transizione energetica bisognerebbe aggiungere l'esame delle questioni legate alla dislocazione geografica delle risorse destinate ad assumere valore strategico, dal rame alle terre rare, e dei rapporti tra governi e imprese più o meno congeniali al loro sfruttamento. Lo diciamo 'per memoria', in vista di futuri lavori.

bene nuovo e preziosissimo. Da questo punto di vista, l'idea di un'attività riparativa non deve condurre fuori strada, perché proprio la riparazione, nel nostro caso, può dirsi generativa di una condizione inedita – di una diversa intelligenza e di un diverso sentimento di ciò che viene salvato dal degrado o dalla distruzione. Così, come una salute ritrovata possiede una sua speciale bellezza, della quale non vogliamo dire che sia maggiore di quella di una salute mai perduta, ma certamente vale moltissimo, forse potremmo anche parlare di un 'ambiente ritrovato' – e lasciare che l'espressione evochi motivi di maturità e al tempo stesso, come ci sembra possibile, di originalità e freschezza.

A tutto ciò, l'espressione 'transizione ecologica' va senz'altro stretta. 'Transizione energetica' va bene, nello stesso senso in cui, per esempio, si parla di transizione demografica o di transizione epidemiologica. Ma in quanto la crisi ecologica sia affissata e affrontata in tutta la sua ampiezza, il termine diventa davvero insoddisfacente – e può anche venire in mente che si debba piuttosto parlare di una 'conversione ecologica'²⁰.

Per tornare all'energia, vale la pena di osservare che la possibilità e la necessità di un profilo dei consumi finali convenientemente misurato, riflessivo, ricordano da vicino la possibilità e la necessità di sottrarre la quantità delle calorie assunte con il cibo agli esiti di un rapporto compulsivo con quest'ultimo – tanto significativamente, oggi, diffuso soprattutto presso i poveri. Appunto una questione di 'metabolismo', che d'altra parte, più che agli individui, bisogna riferire al sistema economico-sociale: difficilmente un mutamento dei profili di consumo all'insegna di un diverso senso del limite potrà essere conseguito senza mettere in discussione le istanze di massimizzazione iscritte nella prevaricazione esercitata dal mercato nei confronti di tutti gli altri tipi di rapporto, a sua volta frutto del dominio che gli interessi di stampo capitalistico esercitano sull'intera realtà economica e sociale. Il che introduce al secondo argomento che può essere portato un passo avanti.

20 Come nel corso del già citato convegno *Rileggere il Capitale* (cfr. nota 1) ha suggerito Elena Gagliasso, Un suo testo – E. Gagliasso, *Per un'epistemologia critica e autocritica*, in E. Gagliasso, M. Della Rocca, R. Memoli (a cura di), *Per una scienza critica. Marcello Cini e il presente: filosofia, storia, politiche della ricerca*, p. 129, Edizioni ETS, Pisa, 2015 – ci ha anche fornito la prima sollecitazione a valorizzare il concetto di 'riparazione'.

In effetti, la necessità di assetti istituzionali di tipo partecipativo si presta a un'interpretazione 'progressiva', del genere che in giurisprudenza si dice 'evolutiva': partecipazione, cioè, non soltanto come coinvolgimento delle collettività interessate all'interno dei processi decisionali, in una logica negoziale, o anche come loro coinvolgimento in forme di democrazia 'deliberativa' (che comunque, si capisce, non sarebbe poco); ma come messa in opera di assetti produttivi che potremmo definire *community based*, all'interno dei quali le collettività assumano la veste di soggetti in grado di governare *in proprio* la formazione e la soddisfazione dei bisogni di energia che le riguardano.

Un'ipotesi del genere può anche trovare una sponda nel quadro normativo europeo, visto che l'articolo 22 della Direttiva del parlamento e del consiglio dell'11 dicembre 2018 sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili (già recepita dal governo italiano) è intitolato appunto alla figura delle "Comunità di energia rinnovabile". In breve, si tratta di immaginare soluzioni locali, decentrate, *consentite* dalla tecnologia delle fonti rinnovabili, che le rende potenzialmente *efficienti*, e però destinate a diffondersi soltanto se volute 'politicamente', come *forme sociali* (Marx) appropriate alla natura del bisogno di cui si fa questione. Da esse, ci sembra, è lecito aspettarsi una rottura radicale con la logica massimizzante (nei riguardi della produzione e dei consumi), e dunque tipicamente 'estrattiva' (nei riguardi dei sistemi naturali), che appartiene al cuore del capitalismo. E la loro formazione, però, può essere letta come un terreno di iniziativa dotato di molteplici motivi di interesse – sul quale, possibilmente, ridare fiato a qualche 'lotta', in chiave *costruttiva*, di innovazione sociale e crescita civile.

Allegato 1

La transizione energetica

Sarà su questa strada che risolveremo la crisi ecologica?

Il passaggio del sistema energetico dalle tecnologie fossili alle tecnologie rinnovabili, parziale al 2030 e ‘pieno’ al 2050, orientato cioè a un saldo di zero emissioni climalteranti, è parte di un cambiamento assolutamente necessario. Il recente raggiungimento di 415 parti per milione di CO₂ nell’atmosfera è un dato che non si può osservare senza restarne allarmati e offesi. Tuttavia c’è un secondo dato oggi trascurato: la transizione comporterà l’utilizzo di una grande quantità di risorse materiali, con ampio utilizzo di specie chimiche, in particolare metalli, differenti da quelli tradizionalmente utilizzati fino ad oggi nel modello energetico fossile; e la misura del fenomeno è tale da dover essere considerata rilevante a scala planetaria. In figura 1.1 è rappresentata una tabella delle specie utilizzate in funzione dello sviluppo delle tecnologie. Come ben visibile in figura, per ogni incremento tecnologico nelle capacità di produzione e di utilizzo dell’energia esiste un incremento parallelo del numero di elementi chimici utilizzati.

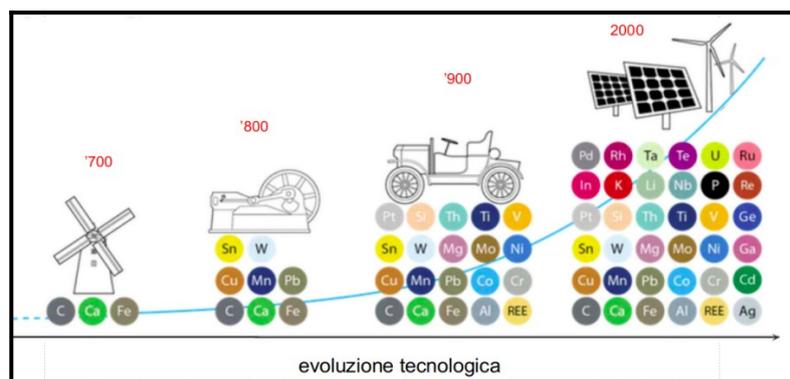
In figura 1.2 sono rappresentati i flussi di materia necessari all’implementazione delle tecnologie necessarie alla transizione. I materiali richiesti intersecano tutte le tecnologie in maniera pervasiva con quantità in gioco che già oggi lasciano intravedere rischi nell’approvvigionamento, correlati sia alle riserve e alle risorse²¹ disponibili che a problematiche di tipo geopolitico.

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

21 Si definiscono riserve i depositi di minerali già identificati e sfruttabili in maniera economicamente competitiva con le tecnologie oggi disponibili; sono definite risorse i depositi indicati come probabili ma sfruttabili a costi attualmente non competitivi o che ancora non sono stati identificati con certezza.

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

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



Elenco dei principali elementi chimici conosciuti. In rosso le terre rare

Simbolo	Nome	Simbolo	Nome	Simbolo	Nome	Simbolo	Nome	Simbolo	Nome
H	Idrogeno	Sc	Scandio	Nb	Niobio	Pm	Promezio	Tl	Tallio
He	Elio	Ti	Titanio	Mo	Molibdeno	Sm	Samario	Pb	Piombo
Li	Litio	V	Vanadio	Tc	Tecnezio	Eu	Europio	Bi	Bismuto
Be	Berillio	Cr	Cromo	Ru	Rutenio	Gd	Gadolinio	Po	Polonio
B	Boro	Mn	Manganese	Rh	Rodio	Tb	Terbio	At	Astato
C	Carbonio	Fe	Ferro	Pd	Palladio	Dy	Disprozio	Rn	Radon
N	Azoto	Co	Cobalto	Ag	Argento	Ho	Olmio	Fr	Francio
O	Ossigeno	Ni	Nichel	Cd	Cadmio	Er	Erbio	Ra	Radio
F	Fluoro	Cu	Rame	In	Indio	Tm	Tulio	Ac	Attinio
Ne	Neon	Zn	Zinco	Sn	Stagno	Yb	Itterbio	Th	Torio
Na	Sodio	Ga	Gallio	Sb	Antimonio	Lu	Lutezio	Pa	Protoattini
Mg	Magnesio	Ge	Germanio	Te	Tellurio	Hf	Afnio	U	Uranio
Al	Alluminio	As	Arsenico	I	Iodio	Ta	Tantalio	Np	Nettunio
Si	Silicio	Se	Selenio	Xe	Xeno	W	Wolframio	Pu	Plutonio
P	Fosforo	Br	Bromo	Cs	Cesio	Re	Renio	Am	Americio
S	Zolfo	Kr	Cripto	Ba	Bario	Os	Osmio	Cm	Curio
Cl	Cloro	Rb	Rubidio	La	Lantanio	Ir	Iridio	Bk	Berkelio
Ar	Argo	Sr	Stronzio	Ce	Cerio	Pt	Platino	Cf	Californio
K	Potassio	Y	Ittrio	Pr	Praseodimio	Au	Oro	Es	Einsteinio
Ca	Calcio	Zr	Zirconio	Nd	Neodimio	Hg	Mercurio	Fm	Fermio

Figura 1.1. Alto: Elementi chimici ed evoluzione delle tecnologie²². Basso: simboli e denominazione degli elementi. In rosso le Terre Rare (Rare Earth Elements, REE).

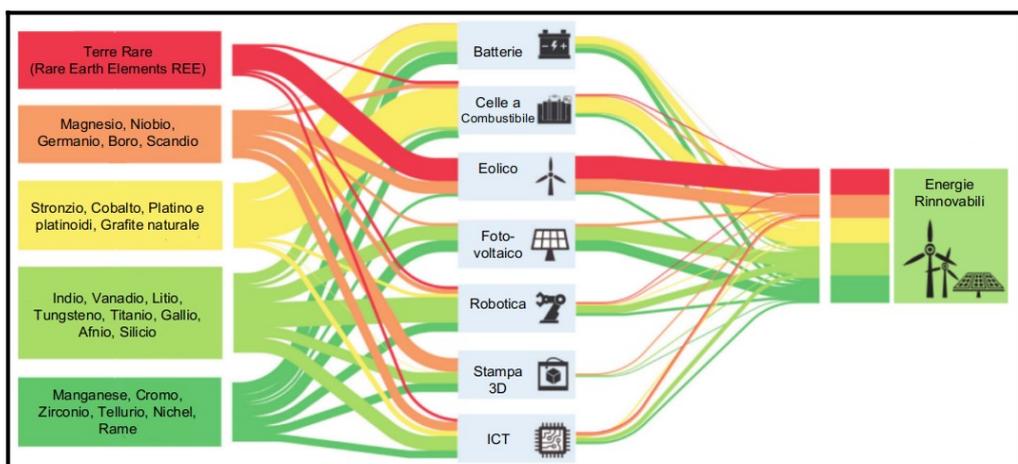


Figura 1.2. Flussi di materia nelle tecnologie della transizione. Non sono considerati i materiali strutturali e i conduttori di uso generale, quali acciaio, rame ed alluminio²³.

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

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

Nota metodologica

Per valutare l'impatto che un dato materiale ha nello sviluppo di una tecnologia risulta utile utilizzare un indicatore che preveda l'incidenza di tale materiale nell'ottenimento di un determinato output. Tale indicatore, detto intensità del materiale, viene espresso come il quantitativo del materiale necessario per ottenere una unità di risultato nel servizio prodotto. Nel caso della produzione di energia, l'intensità del materiale corrisponde al rapporto della massa dello specifico materiale utilizzato in una determinata tecnologia (o dispositivo) per unità di potenza installata (MW o multipli/sottomultipli). Una stima delle necessità globali dei materiali nella transizione energetica deriva quindi dalla stima della produzione di energia prevista nella specifica tecnologia, dal mix energetico di produzione rinnovabile ad un dato tempo e dalle modifiche nelle tecnologie dei consumi (come ad esempio la sostituzione dell'auto con il motore a scoppio con l'auto elettrica). In uno scenario ad alta ambizione, del 55% di riduzione di emissioni climalteranti al 2030 e del 100% al 2050 (rispetto al 1990), si suppone un raddoppio della energia elettrica utilizzata nei consumi finali mondiali al 2050, con una produzione da fonti rinnovabili di circa l'85%. In tale scenario, nel settore trasporti, che nelle economie avanzate attualmente pesa per circa il 30% dei consumi, si suppone una completa transizione verso tecnologie elettriche con alimentazione da batterie o da idrogeno + celle a combustibile.

Le principali tecnologie di produzione

Il solare fotovoltaico

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

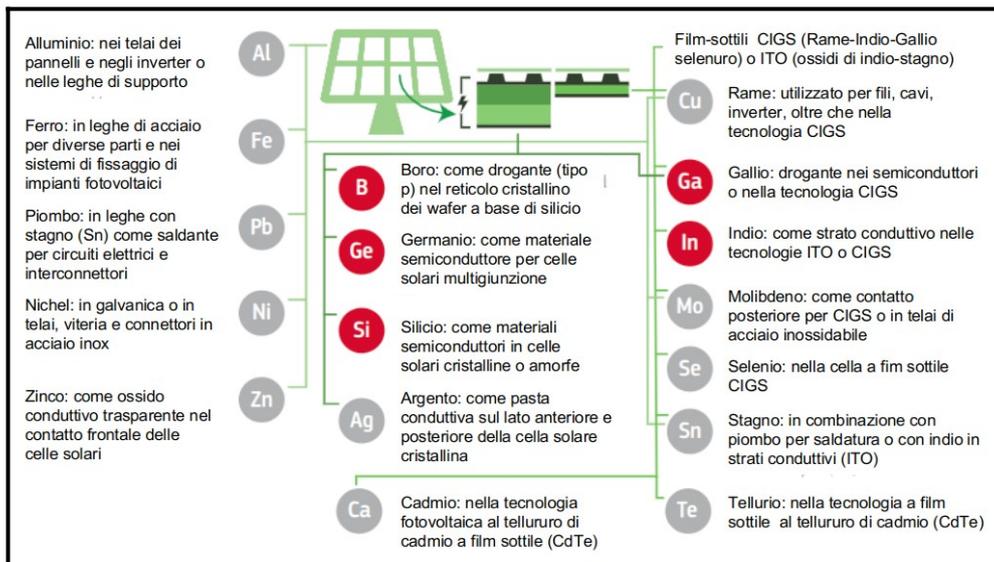


Figura 1.3. Materiali e loro utilizzo nella tecnologia fotovoltaica. ^{23,24}

Calcestruzzo, plastica, vetro, sono pure necessari e diffusi nei componenti strutturali e comuni a tutte le tecnologie fotovoltaiche. Per i materiali funzionali si notano intensità variabili in funzione della specifica tecnologia e della sua evoluzione. Insieme all'indio, al gallio e al selenio, il rame è anche un componente funzionale della tecnologia CIGS (vedi figura 1.3) che insieme al silicio amorfo e al tellururo di cadmio (CdTe) fa parte della famiglia dei film sottili.

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

Le intensità dei materiali costituenti il dispositivo fotovoltaico e le richieste annuali stimate che ne derivano al 2030 e al 2050 sono state riportate in un lavoro pubblicato dal Joint Research Center della Comunità Europea²⁵. Le Tabelle I e II riassumono i risultati dello studio, opportunamente elaborati ai fini del presente lavoro.

²⁴ In rosso le materie prime già considerate come critiche dalla Comunità Europea.

²⁵ S. Carrara, P. Alves Dias, B. Plazzotta and C. Pavel, *Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system*, EUR 30095 EN, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2020.

Tabella I

Intensità dei materiali per la generazione fotovoltaica attuale e stimata					
Tecnologia	Materiale	Unità	Anno		
			2018	2030	2050
Tutte	Calcestruzzo	t/MW	60.7		
	Acciaio		67.9		
	Plastica		8.6		
	Vetro		46.4		
	Alluminio		7.5		
	Rame		4.6		
c-Si	Silicio	t/GW	4	3.5	3
	Argento		20	11	5
CdTe	Cadmio		85	60	35
	Tellurio		95	70	40
CIGS	Rame		24	17.5	15
	Indio		27	17	10
	Gallio		7	4.5	2.5
	Selenio		60	40	20
a-Si	Silicio		150	130	110
	Germanio		48	32	20

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

Tabella II

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

L'eolico

Le turbine eoliche richiedono acciaio. Per raggiungere gli obiettivi della transizione energetica servirà un gran numero di turbine eoliche, la cui la capacità di generazione sta aumentando rapidamente, arrivando al momento attuale fino a 15 MW per turbina. Man mano che le turbine diventeranno più potenti, il numero necessario diminuirà, e con esso il fabbisogno di acciaio, destinato comunque ad essere e restare consistente. La domanda di altri metalli dipende dal tipo di turbina eolica che viene adottata. Esistono sostanzialmente due tipi di turbine eoliche: turbine a ingranaggi, che utilizzano ingranaggi per convertire la velocità di rotazione relativamente bassa della turbina in una velocità molto più elevata per il generatore e turbine a trasmissione diretta, che utilizzano un generatore a bassa velocità. Sia le turbine a trasmissione diretta che quelle a ingranaggi utilizzano cavi in rame nel generatore, ma la maggior parte delle turbine a trasmissione diretta ha anche magneti permanenti, contenenti terre rare. In figura 1.4 è

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

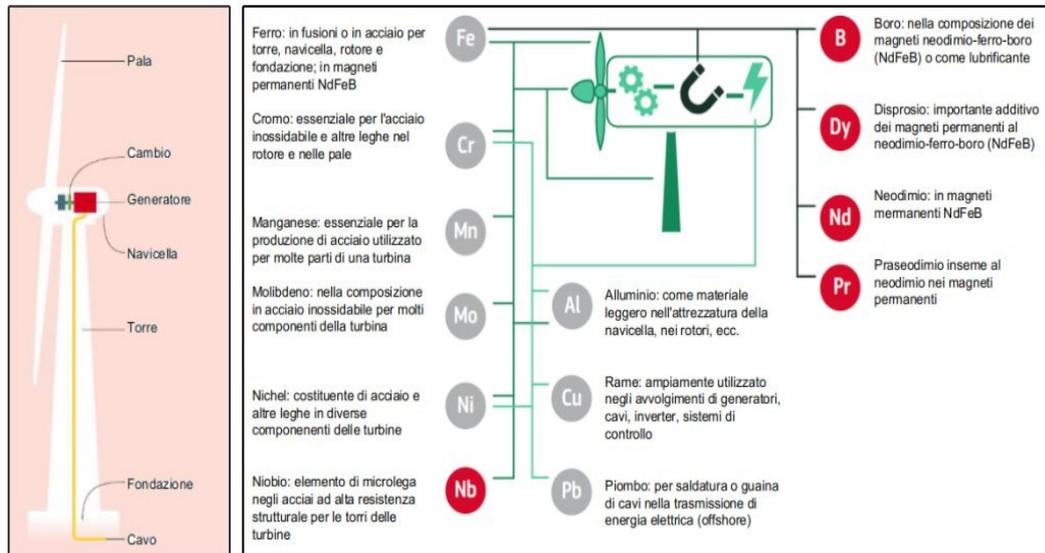


Figura 1.4. Sinistra: schema di una generica pala eolica. Destra: materiali e loro utilizzo nella tecnologia eolica.^{23,24}

A differenza di quanto visto per il fotovoltaico, anche a parità di scelte tecnologiche, le installazioni eoliche hanno una forte dipendenza dalle specifiche scelte costruttive effettuate: trasmissione diretta o ad ingranaggi, potenza del generatore, altezze, scelta dei materiali strutturali, eccetera. Per tale motivo si ha una ampia variabilità nelle intensità dei materiali usati, che vengono a dipendere anche dalle scelte ingegneristiche della ditta costruttrice, oltre che dai vincoli fisici e tecnologici sottostanti (alcuni approfondimenti descrittivi sono riportati nell'apposita scheda). In tabella III sono date le intensità dei materiali per l'eolico, così come risultanti in ref.²⁵ unitamente alle proiezioni sulle necessità annuali future, la cui elaborazione è riportata in Tabella IV come ottenuta dai valori mediani risultanti da tabella III.

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

Tabella III

Intensità dei materiali per la generazione eolica		
Materiale	t/GW	
	Min	Max
Calcestruzzo	243 500	413 000
Acciaio	107 000	132 000
Polimeri	4 600	
Compositi	7 700	8 400
Alluminio	500	1 600
Boro	0	6
Cromo	470	580
Rame	950	5 000
Disprosio	2	17
Ferro (cast)	18 000	20 800
Manganese	780	800
Molibdeno	99	119
Neodimio	12	180
Nichel	240	440
Praseodimio	0	35
Terbio	0	7
Zinco	5 500	

Tabella IV

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

Intensità dei materiali e tecnologie eoliche

- Calcestruzzo. Esistono diversi requisiti di massa per le turbine eoliche onshore e offshore. La stima inferiore è per turbine utilizzate prevalentemente offshore; la stima più alta è per turbine utilizzate principalmente in terraferma.
- Acciaio. I modelli di turbine esistenti utilizzano tra 107 e 132 t di acciaio per MW di capacità installata.
- Polimeri. I valori sono praticamente identici tra i diversi tipi di turbina.
- Compositi. L'utilizzo è costante indipendentemente dal tipo di turbina.
- Alluminio. Le stime inferiori si applicano alle turbine a trasmissione diretta dove è preferito il rame. Ci possono essere requisiti diversi per le turbine eoliche onshore e offshore ed anche in una certa misura la sostituzione selettiva del rame con l'alluminio nel trasformatore a bobina nella navicella o nella torre.
- Boro. Il boro viene utilizzato nel magnete permanente del generatore a turbina. La stima più bassa è per turbine ad alta e media velocità con cambio; la stima più alta è per le turbine a trasmissione diretta.
- Cromo. Un contenuto di cromo più elevato è correlato all'uso di acciai altolegati.
- Rame. In tutti i tipi e modelli di turbine, la gamma di valori possibili per il rame è ampia con un valore mediano di circa 2 100 t / GW. I generatori a trasmissione diretta possono utilizzare tre volte più rame rispetto alle configurazioni con il cambio.
- Disprozio. Il disprozio è utilizzato nei magneti permanenti del generatore a turbina, ma anche in magneti per il fissaggio di infissi interni all'interno della torre, anche se in piccole quantità. La stima più bassa è per alta e media velocità con cambio; la stima più alta è per le turbine a trasmissione diretta.
- Ghisa. La ghisa viene utilizzata nella fondazione della navicella, negli alberi principali nel cambio, nel generatore e mozzo della lama. Sono disponibili diversi gradi di fusione. L'utilizzo della ghisa è molto simile per diversi tipi di turbine. Il ferro è utilizzato anche nei magneti permanenti: la stima più bassa è per le velocità medio-alte; la stima più alta è per le turbine a trasmissione diretta.
- Manganese. Il contenuto di manganese è identico per diversi tipi di acciaio e potenzialmente identico per diversi tipi di turbina. Come per il cromo, le cifre si riferiscono a diverse ipotesi sulla composizione dell'acciaio.
- Molibdeno. Il contenuto più elevato è correlato all'utilizzo di acciai altolegati.
- Neodimio. Il neodimio è utilizzato nei magneti permanenti del generatore, ma anche nei magneti per il fissaggio di dispositivi interni all'interno della torre della turbina. La quantità di neodimio nelle turbine a trasmissione diretta è sostanzialmente più alta.
- Nickel. Il contenuto più elevato è correlato all'uso di acciai altolegati (turbine più pesanti dispiegate in terraferma). Le stesse considerazioni del cromo e del manganese valgono per le ipotesi sulla composizione dell'acciaio.
- Praseodimio. Il praseodimio viene utilizzato nel magnete permanente del generatore a turbina insieme al neodimio. La stima inferiore è per turbine da alta a media velocità con cambio; la stima più alta è per le turbine a trasmissione diretta.
- Terbio. Il terbio viene utilizzato nel magnete permanente del generatore a turbina dove sostituisce il disprozio. La stima inferiore è per turbine da alta a media velocità con cambio; la stima più alta è per le turbine a trasmissione diretta.
- Zinco. Lo zinco è usato come rivestimento protettivo contro la corrosione delle turbine eoliche.

Motori elettrici e mobilità leggera

Attualmente esistono circa 8 miliardi di motori elettrici in uso nell'UE, utilizzati per una vasta gamma di applicazioni, dai prodotti elettronici di piccole dimensioni alle biciclette elettriche, ai motori di grandi dimensioni che si trovano nelle trasmissioni elettriche dei veicoli e nei trasporti pesanti. Si prevede che il numero di motori crescerà in modo significativo in futuro, a causa dell'ampia diffusione di motori a trazione nei veicoli elettrici. La maggior parte dei veicoli ibridi ed elettrici utilizza motori sincroni con magneti NdFeB, o leghe che possono contenere altre terre rare oltre al neodimio, come praseodimio e disprosio. In alternativa ai motori sincroni si possono utilizzare motori a induzione adottati da diversi produttori di veicoli elettrici. Questi non contengono materiali magnetici permanenti e funzionano invece inducendo correnti elettriche nei conduttori del rotore del motore. Tali motori contengono quantità elevate di rame. In futuro, si prevede che la tecnologia dei magneti NdFeB dominerà il mercato. In figura 1.5 è riportata una rappresentazione di un motore elettrico, con evidenza dei materiali necessari al suo funzionamento.

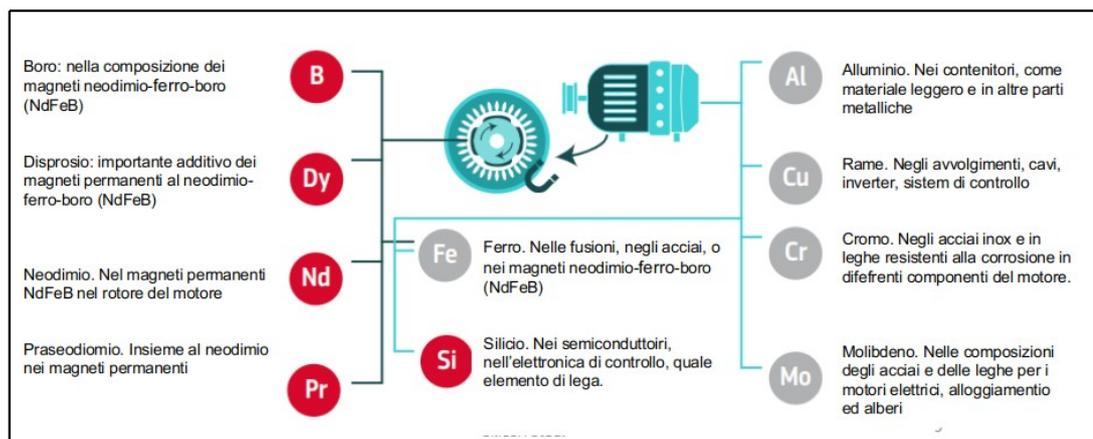


Figura 1.5. *Materiali necessari al funzionamento di un moderno motore elettrico.*^{23,24}

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

per il disprosio, mentre si prevede un incremento attorno al 100% per gli altri due minerali.

Le batterie per la mobilità leggera e per gli accumuli di energia elettrica

Scopo delle batterie è accumulare corrente. La tecnologia delle batterie al litio permette di accumulare relativamente grandi quantità di corrente, rendendo possibili applicazioni che vanno dalla stabilizzazione della rete elettrica (con batterie che entrano in funzione in assenza di produzione da rinnovabili) all'autotrasporto leggero. In questo campo l'obiettivo della transizione energetica è la sostituzione dei motori termici automobilistici con motori elettrici, cosa che renderà necessario l'utilizzo di un gran numero di batterie di capacità relativamente elevata²⁶. Sebbene la durata delle batterie stia migliorando, i tempi di ricarica sono ancora lunghi, rendendo ad oggi difficili i viaggi a lunga distanza, con forti criticità per l'industria dei trasporti pesanti, che tende a orientarsi verso le tecnologie dell'idrogeno. In figura 1.6 è riportata una rappresentazione di una batteria agli ioni di litio, dove si evincono i materiali utilizzati per il suo funzionamento. Accanto alle batterie per autotrazione sono da considerare, seppure in misura significativamente meno rilevante rispetto alla mobilità²⁷, le batterie per accumulo di energia ai fini della stabilizzazione della rete²⁸. Sebbene le chimiche siano in linea principio simili a quelle utilizzate nell'automotive, gli accumuli stazionari tendono a privilegiare i sistemi detti litio-ferro-fosfato, a causa della loro maggiore stabilità chimica, a dispetto del maggior peso delle installazioni.

L'International Energy Agency stima²⁹, nello scenario più ambizioso, che la domanda di batterie da parte dei veicoli elettrici crescerà di quasi 40 volte tra il 2020 (per 160 GWh di energia accumulata) e il 2040 (per 6 200 GWh). Corrispondentemente, secondo questa stessa ipotesi, la domanda complessiva di minerali cresce di 30 volte tra il 2020 e il 2040, da 400 000

26 Attualmente la capacità delle batterie per l'autotrasporto totalmente elettrico va da 20 kWh per una piccola utilitaria a oltre 100 kWh per macchine più grandi.

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

28 Con il termine stabilizzazione della rete si intende la capacità della rete di erogare energia in maniera stabile in funzione della richiesta. Per un sistema ad alto tasso di fonti rinnovabili il maggior fattore di criticità è l'insufficienza della produzione in un determinato momento. Le batterie possono intervenire nella stabilizzazione della rete fornendo alla stessa energia precedentemente accumulata. Si noti che in un sistema pressoché full electric anche le batterie dedicate all'autotrazione possono concorrere alla stabilizzazione della rete.

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

tonnellate a 11 800 000 tonnellate. La domanda di nichel cresce di 41 volte, mentre il cobalto aumenta ‘solo’ di 21 volte, poiché le chimiche del catodo si spostano verso soluzioni a basso contenuto di tale elemento. La domanda di litio cresce di 43 volte, mentre il rame cresce di 28 volte. La domanda di grafite cresce di 25 volte. Il silicio registra la maggiore crescita relativa, oltre 460 volte, poiché gli anodi di grafite drogati con silicio crescono da una quota dell'1% nel 2020 al 15% nel 2040. La domanda di terre rare cresce di oltre 15 volte fino a 35 kt nel 2040.

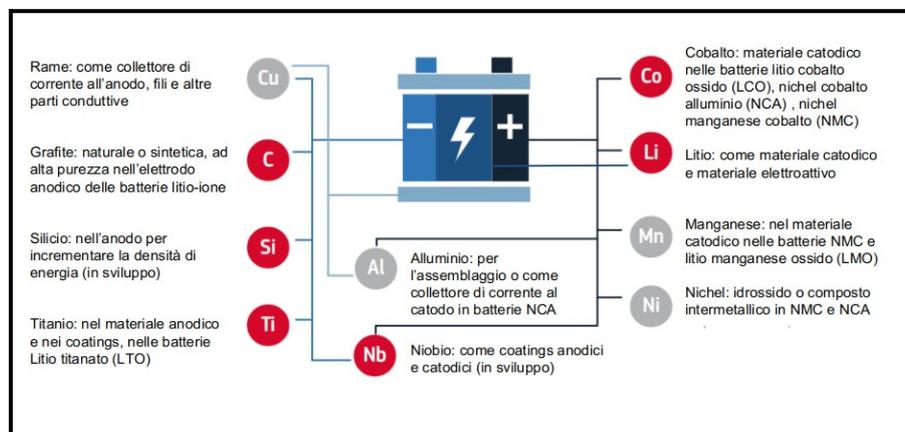


Figura 1.6. Rappresentazione di una batteria agli ioni di litio^{23,24}

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

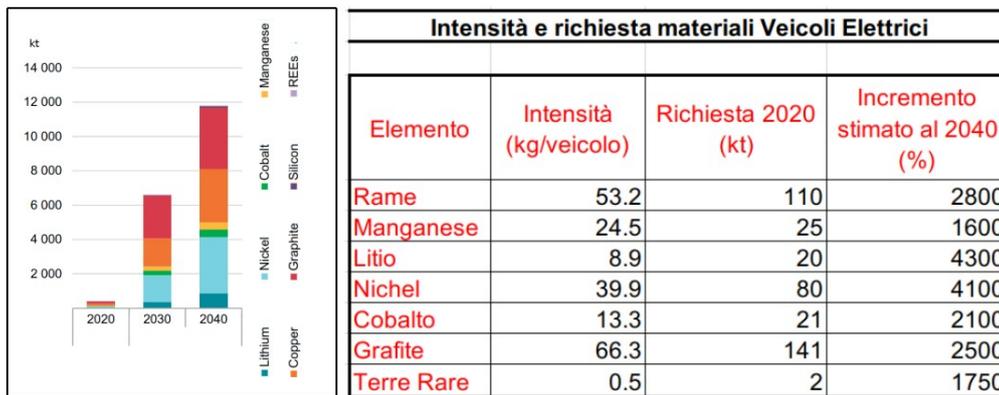


Figura 1.7. Stima del consumo attuale e della crescita annuale prevista al 2030 e al 2040 per i materiali costituenti le tecnologie delle batterie. A destra sono riportati i dati numerici stimati ad oggi e al 2040 (Rielaborazione da ²⁹).

L'idrogeno verde per i consumi di difficile decarbonizzazione e, in prospettiva, per l'accumulo di energia

Nella strategia europea per la decarbonizzazione è prevista la pressoché totale elettrificazione dei consumi energetici, con l'elettricità massicciamente prodotta da fonti rinnovabili. La stessa strategia valuta la permanenza di un 15-20% di consumi di difficile decarbonizzazione (industria metallurgica e chimica, trasporti a lunga distanza, portualità e navigazione marittima ed aerea), per i quali la Commissione Europea ha dato avvio ad un ambizioso piano che prevede l'utilizzo di idrogeno verde³⁰, prodotto da energia sostenibile, in grado di portare alla decarbonizzazione piena anche in questi settori. Man mano che le rinnovabili saranno sviluppate su larga scala, l'idrogeno potrebbe rappresentare una soluzione anche per l'immagazzinamento di energia, sia per la rete elettrica che per i veicoli elettrici leggeri.

L'idrogeno è l'elemento più leggero in natura e non si trova allo stato libero sulla terra. Tuttavia può essere prodotto liberandolo chimicamente dalle molecole che lo contengono, utilizzando processi di diversa natura. Attualmente l'idrogeno è utilizzato fondamentalmente per la chimica industriale e viene prodotto da idrocarburi, con emissione di CO₂. L'elettrolisi dell'acqua, che scinde la molecola in idrogeno e ossigeno grazie all'immissione di una corrente appropriata in un dispositivo elettrochimico detto elettrolizzatore, quando è alimentata con energia elettrica da fonte rinnovabile è l'unico processo di generazione di idrogeno pienamente sostenibile. Il gas generato, infatti, può di nuovo essere fatto reagire con l'ossigeno in un dispositivo elettrochimico chiamato cella a combustibile; si

30 Le differenti "colorazioni" dell'idrogeno:

- *grigio* = ottenuto da idrocarburi attraverso processi chimici. La sua produzione emette rilevanti quantità di anidride carbonica (CO₂);
- *blu* = anch'esso ottenuto da idrocarburi, ma con cattura della CO₂ emessa. La CO₂ catturata, a sua volta, può essere sequestrata e reimpressa nei depositi vuoti di idrocarburi (tecnologia Carbon Capture and Storage - CCS), mineralizzata per reazione con opportuni sali (tecnologia Carbon capture Utilization and Storage - CCUS) o utilizzata come chemical per altri processi (CCU);
- *verde* = ottenuto da fonte rinnovabile, tipicamente da elettrolisi dell'acqua con corrente prodotta da fotovoltaico od eolico;
- *viola* = ottenuto anch'esso da elettrolisi dell'acqua, ma con corrente prodotta da energia nucleare.

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

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

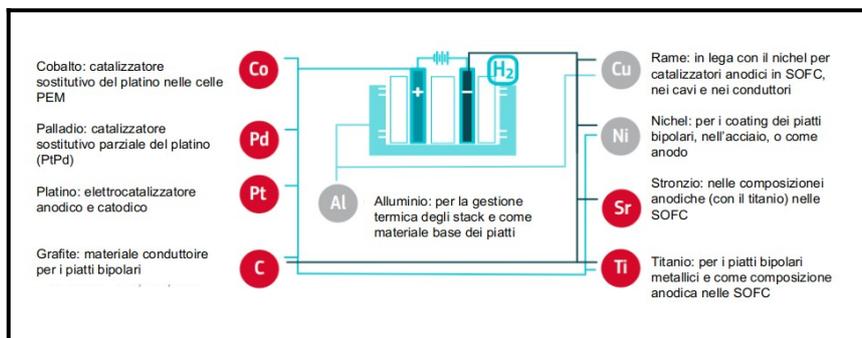
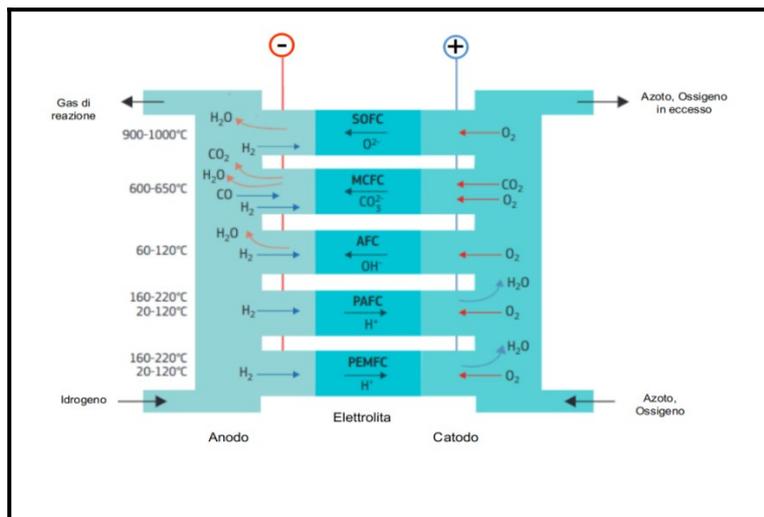


Figura 1.8. Alto: schema generale per diverse tecnologie di celle a combustibile (fuel cell, FC). L'elettrolita determina la chimica ionica del sistema e la tecnologia. Dal basso: Membrana Elettrolita Polimerico (PEM FC), Acido Fosforico (PA FC) Alcalina (A FC) Carbonati fusi (MC FC) Ossidi Solidi (SO FC). Basso: Schema rappresentativo di una cella a combustibile e dei materiali in essa contenuti. Con modifiche nel funzionamento, gli stessi materiali sono condivisibili nelle tecnologie degli elettrolizzatori^{23,24}.

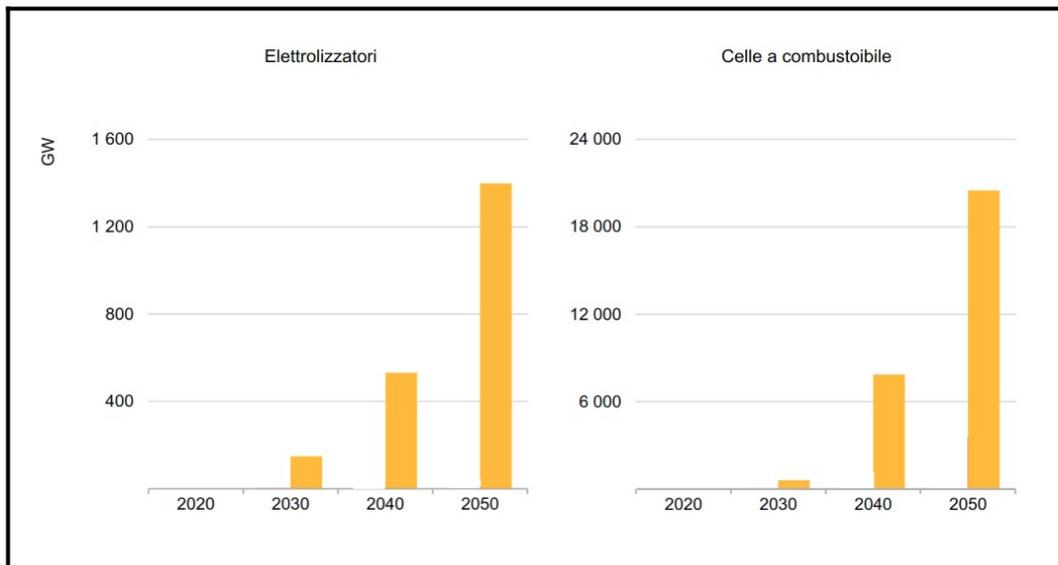


Figura 1.9. Incremento stimato nella potenza installata degli elettrolizzatori e delle celle a combustibile²⁹.

Per quanto riguarda le intensità dei materiali necessari allo sviluppo delle tecnologie dell'idrogeno si può fare riferimento a quanto riportato in figura 1.10, dove i quantitativi sono normalizzati all'energia di output e non alla potenza di installazione. La stima della richiesta integrale di tali materiali, tuttavia, risulta fortemente dipendente dalle tipologie di tecnologia che si affermeranno, essendo il settore ancora non fortemente consolidato. In relazione all'automotive, settore importante per la sua ampia diffusione, sebbene attualmente il mercato si stia orientando verso gli accumuli elettrici diretti in batterie, è da aspettarsi che almeno in specifici settori si assista in

tempi medi ad un incremento non trascurabile nell'utilizzo dell'idrogeno e delle celle a combustibile³¹, con relative conseguenze sul consumo di materiali.

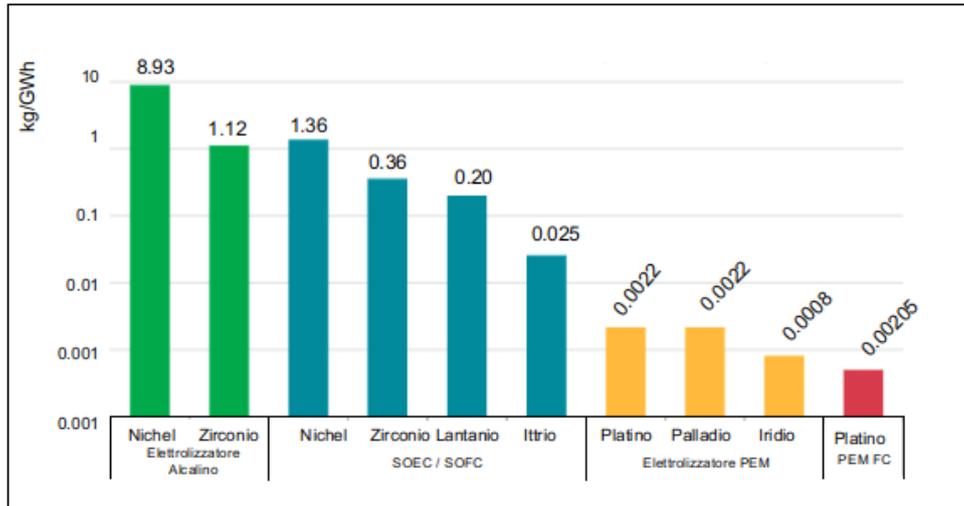


Figura 1.10. Intensità dei materiali per differenti tecnologie di elettrolizzatori e di cella a combustibile. PEM=Membrana ad Elettrolita Polimerico; SOEC: Cella di Elettrolisi ad Ossidi Solidi; SOFC: Cella a Combustibile ad Ossidi Solidi²⁹.

Le materie prime, le riserve e le risorse

Le grandi quantità di materiali necessari alla transizione energetica fanno sorgere il problema della effettiva sostenibilità della loro richiesta rispetto alle disponibilità presenti nel pianeta. Facendo riferimento alle definizioni di riserve e risorse citate in ref², abbiamo oggi riserve sufficienti dei materiali necessari? Se le riserve non sono sufficienti, l'entità stimata delle risorse è sufficiente a rispondere alla richiesta crescente? Utilizzando i valori noti delle riserve e la stima delle risorse disponibili, in uno scenario di trasformazione del sistema elettrico ambizioso (sotto i 2°C di aumento al 2050) sono state valutate le possibilità di esaurimento delle materie prime necessarie alla transizione a tecnologie attuali³². La figura 1.11 riporta il rapporto stimato tra l'incremento della domanda cumulativa di materiali e le

31 Con forte prevalenza delle tecnologie PEM.

32 T. Watari, B. C. McLellan, S. Ogata and T. Tezuka, *Analysis of Potential for Critical Metal Resource Constraints in the International Energy Agency's Long-Term Low-Carbon Energy Scenarios*, Minerals 2018, 8, 156.

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

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

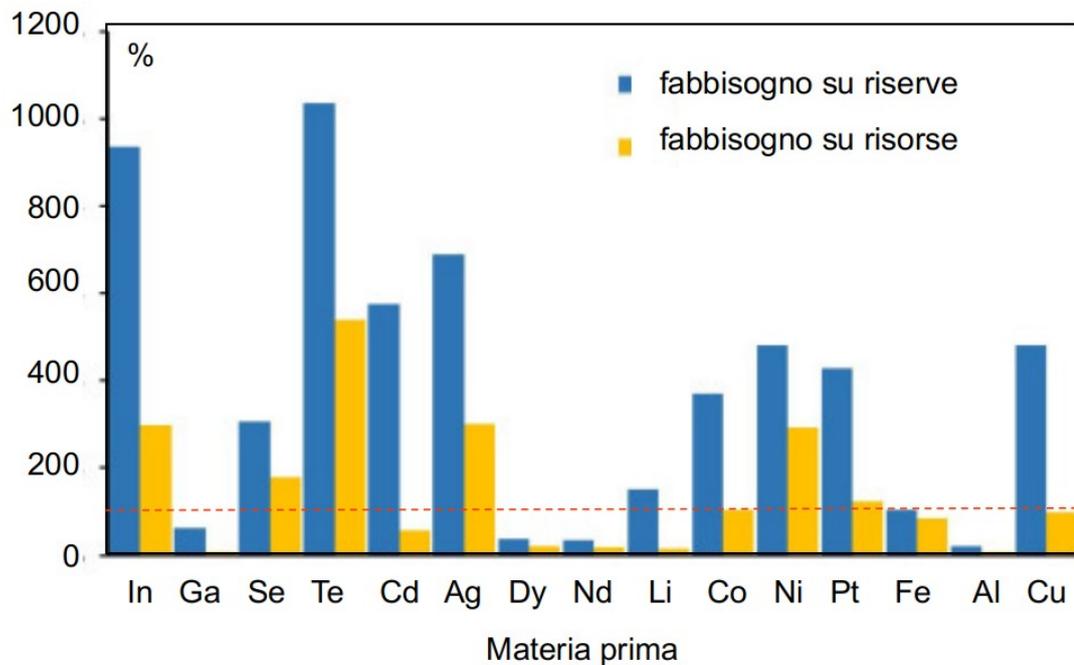


Figura 1.11. Incremento cumulativo stimato al 2060 del fabbisogno di materiali di interesse energetico rapportati all'entità nota delle riserve e all'entità stimata delle risorse. (Rielaborazione da ³²).

Tabella V

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

La situazione potrebbe migliorare considerevolmente inserendo nel computo sia gli effetti delle innovazioni tecnologiche, dalle quali è lecito aspettarsi contrazioni più o meno rilevanti dell'intensità dei materiali (e che però, seppure sommariamente, sono già state prese in esame nei lavori considerati), che gli effetti di processi di riutilizzo e riciclo a fine ciclo vita, secondo i principi della cosiddetta economia circolare, schematizzati in figura 1.12. Seppure da un semplice punto di vista concettuale, per molti dei materiali necessari è possibile prevedere un sostanziale miglioramento nell'utilizzo a fine ciclo vita, con una richiesta primaria che può ridursi di percentuali comprese tra il 20 e il 70%. Tuttavia, permangono almeno 2 criticità al momento difficilmente superabili: il tempo di vita delle installazioni e limiti tecnologici intrinseci derivanti dall'utilizzo di alcuni dei materiali critici, specie quelli con caratteristiche funzionali. Per i materiali strutturali, infatti, il riutilizzo, recupero e riciclo si può considerare relativamente semplice, essendo correlato a processi consolidati per i quali sono anche facilmente prevedibili miglioramenti legati alla maggiore efficienza dei sistemi di raccolta a fine ciclo vita. Tuttavia, mediamente il tempo di vita di una installazione fotovoltaica o eolica può superare i 20

anni e raggiungere i 30, periodo nel quale tuttavia si prevede una persistente crescita delle installazioni, che dovranno necessariamente ricorrere a materie di prima estrazione. Per le batterie, in linea di principio, la situazione potrebbe essere più favorevole, prevedendosi una vita media notevolmente inferiore. Tuttavia qui intervengono le criticità tipiche di alcuni materiali con proprietà funzionali specifiche, spesso presenti in forma complessa, o in quantità minime. Per molti di questi materiali i processi di ri-estrazione, seppure possibili, possono diventare, essi stessi, fattori critici dal punto di vista ambientale e/o comportare grande dispendio di risorse energetiche e/o economiche. Alle criticità tecniche e ambientali, infine, possono aggiungersi criticità geo-strategiche, specie quando il controllo di alcuni materiali risulta pressoché monopolizzato da alcuni Paesi, come avviene per esempio per le terre rare nel caso della Cina. In questo quadro è difficile supporre il totale superamento delle criticità, le quali, per diversi motivi, si prevede possano permanere per metalli quali indio, argento, tellurio, nichel, platino e litio³³.

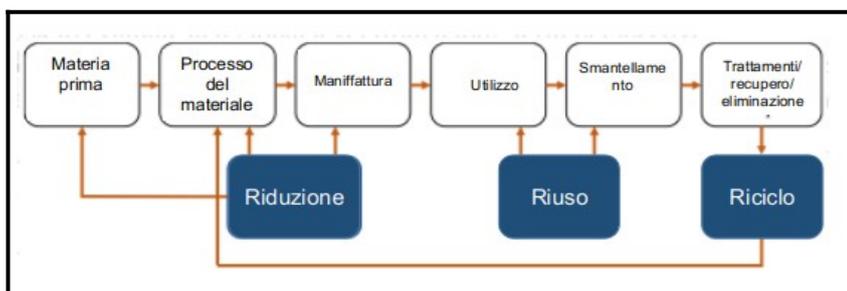


Figura 1.12. Diagramma di flusso di processo dei materiali negli stadi di vita delle tecnologie e opportunità di riduzione, riutilizzo e riciclo. (Rielaborazione da ³²).

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

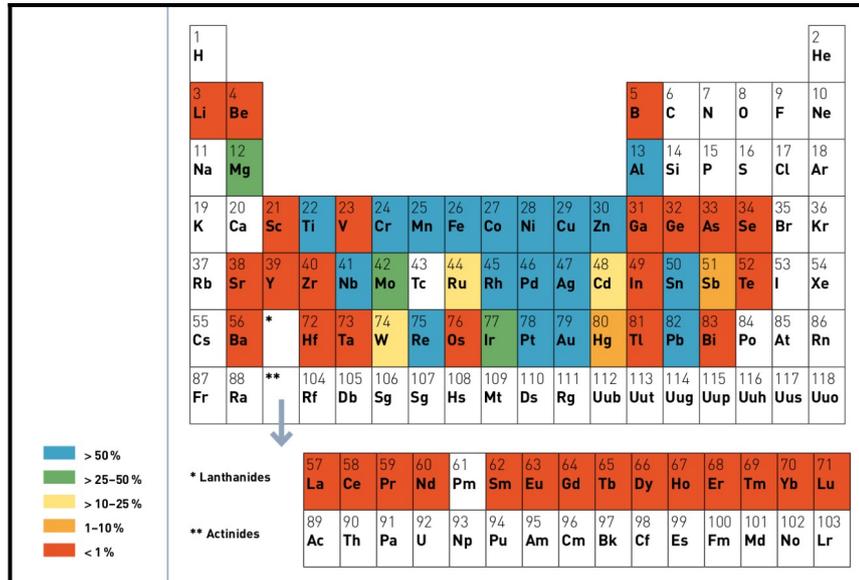


Figura 1.13. Tabella periodica degli elementi con indicazione del grado di riciclo³⁴. Molti dei materiali di interesse nella transizione energetica necessitano di incrementi sostanziali nelle frazioni riciclate.

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

Dal petrolio ai metalli. Nuove tecnologie, vecchi problemi

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

34 T. E. Graedel, J. Allwood, J. P. Birat, B. K. Reck, S. F. Sibley, G. Sonnemann, M. Buchert, C. Hagelüken, *Recycling Rates of Metals – A Status Report, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel*, UNEP (2011).

contributo all'abbattimento delle necessità di materiali da prima estrazione potrà venire dal riciclo, con l'implementazione di tecniche di economia circolare e produzione di elevate quantità di materiali riciclati. Tuttavia queste potranno dare un contributo maggiore per alcuni materiali rispetto ad altri, e solo una volta a regime, quando che le installazioni saranno già effettive e via via stabilizzate nel numero. Le stesse azioni di riciclo, se non svolte correttamente, condividono con l'estrazione primaria molte delle problematiche ambientali (in Tabella VI sono schematicamente riportate le maggiori criticità).

Le criticità sono tali che è entrata nell'orizzonte delle possibilità la raccolta di minerali in siti marini³⁵, costosa ma appetibile per la presenza nei fondali di alcuni dei minerali necessari alla transizione. In generale il più delle volte i progetti minerari sono tutt'altro che ambientalmente e socialmente sostenibili, specie quando avvengono in condizione di scarsi o nulli controlli del rispetto delle norme lavorative ed ambientali, come nel caso più noto del minerale di Cobalto in Congo³⁶.

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

36 Quasi due terzi dei depositi conosciuti si trovano nella Repubblica Democratica del Congo, uno stato estremamente povero e dilaniato dalla guerra dell'Africa centrale con un governo instabile e inefficace. L'estrazione di cobalto nella RDC si basa in larga misura sulla manodopera umana a basso costo, bambini compresi.

TABELLA VII

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

In generale tutti i processi minerari sono caratterizzati da grandi movimenti di materiale che si verificano per tutto il ciclo di vita della miniera. Questi movimenti si traducono in ammassi di rifiuti e in numerosi scavi, che sono la principale causa di inquinamento diretto del suolo. In termini di utilizzo delle aree, le zone di stoccaggio dei materiali trattati (e spesso inquinati) e non più produttivi, detti sterili, possono coprire anche la metà dell'intera area di lavoro³⁷. Le sostanze presenti all'interno del materiale dissotterrato e le pareti vuote degli scavi, esposte a vento, pioggia e aria, favoriscono reazioni chimiche, liscivazione e diffusione dell'inquinamento, drenando polveri e agenti chimici. Quando non effettuato correttamente, cioè in modo da garantire l'integrità strutturale degli accatastamenti, il contenimento a lungo termine dei mucchi degli scarti può portare al collasso dei minerali "sterili" con gravi impatti sulle comunità e sugli ecosistemi.

³⁷ Il rame, ad esempio, attualmente viene estratto a partire da una presenza del minerale nell'estratto pari all'1%. Questo significa che per ogni tonnellata di minerale di rame si debbono estrarre 100 tonnellate di inerti, che dovranno essere accantonati dopo il primo trattamento estrattivo.

Le attività minerarie e di lavorazione nei siti minerari, inoltre, hanno un elevato fabbisogno idrico³⁸. L'acqua dolce utilizzata è acqua di alta qualità, potenzialmente adatta al consumo umano, il cui utilizzo entra quindi in competizione diretta con le necessità delle popolazioni. Fattori quali inadeguata gestione dell'acqua della miniera, elevato prelievo, bassi tassi di riutilizzo delle acque e smaltimenti impropri impattano pesantemente sulle risorse idriche locali e influenzano gli ecosistemi circostanti.

Le attività estrattive colpiscono gli habitat naturali sia all'interno che all'esterno della locazione mineraria. Accedere e trasportare il minerale richiede zone di accesso che vanno ben oltre l'area mineraria vera e propria, con impatti pesanti e rischi per la conservazione della biodiversità. Le persone che vivono o lavorano nelle vicinanze di un progetto minerario diventano portatori di rischio sociale. Comunità presenti prima dello sviluppo della miniera debbono far posto e adattarsi alle attività minerarie e ai cambiamenti ambientali, a partire dalla fase di prima esplorazione e fino alla chiusura della miniera. Dal punto di vista del minerale estratto, successivamente all'estrazione mineraria, sono necessari processi di concentrazione, separazione, fusione e raffinazione fino ad ottenere l'elemento nella sua forma metallica. In ogni fase, le impurità vengono separate e la concentrazione del metallo nel prodotto finale aumenta. Spesso è richiesta un'elevata intensità energetica, le differenti fasi della lavorazione sono spesso basate sull'uso diretto di combustibili fossili, sia come riducenti chimici che indirettamente per il calore e/o l'elettricità³⁹. L'intensità energetica dell'estrazione e dell'arricchimento aumenta nel tempo man mano che le estrazioni passano a minerali con minori tenori metallici e ci si avvia a estrarre da depositi più complessi. In figura 1.14 viene riportata l'impronta carbonica dell'estrazione di minerali⁴⁰ mentre in figura 15 viene riportato uno schema esemplificativo della raffinazione del rame (da minerale o da riciclo)⁴⁰.

38 Per l'estrazione delle terre rare si stima un consumo complessivo di circa 90 m³/kg.

39 La produzione di acciaio, ad esempio, rappresenta il 30% delle emissioni industriali globali di anidride carbonica (CO₂).

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

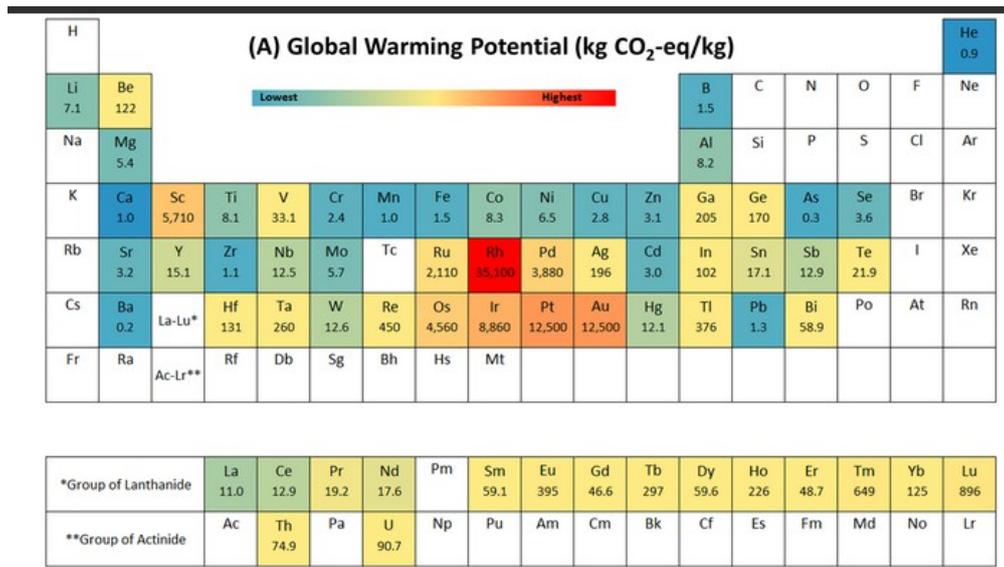


Figura 1.14. Rappresentazione in tabella periodica degli elementi del potenziale climalterante nell'operazione di estrazione degli elementi²⁰.

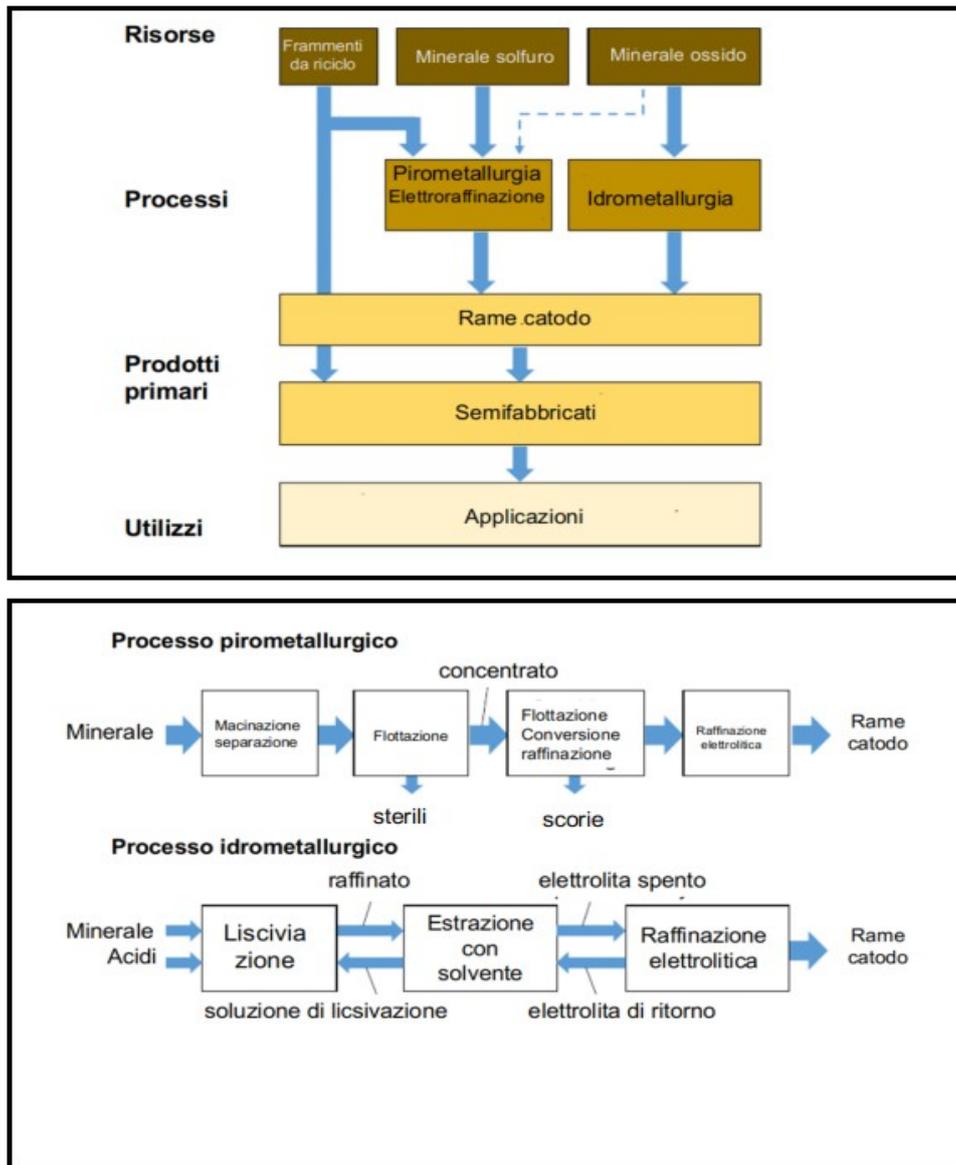


Figura 1.15. In alto: schema rappresentativo del ciclo del rame, dal minerale all'utilizzo finale. Come si vede, in questo caso, il processo di riciclo può condividere molti degli step necessari alla raffinazione del prodotto ottenuto dal minerale. In basso: schematizzazione dei processi piro- e idrometallurgici di estrazione e raffinazione del rame⁴¹.

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

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

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

A fianco dei fattori di inquinamento quasi sempre coesistono in parallelo forti fattori di ingiustizia sociale. L'organizzazione Transition Mineral Tracker⁴³ tiene traccia delle irregolarità correlate all'estrazione dei minerali nel mondo da parte delle società di estrazione. Nel suo report annuale

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

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

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

“Global analysis of human rights policies & practices”, aggiornato a febbraio 2021, l’organizzazione registra 103 compagnie, di cui ben 51 delle quali hanno denunce di abusi in materia di diritti umani. Nel report sono registrate 276 denunce, di cui 125 relative agli impatti sulle comunità, 119 agli impatti ambientali, 68 agli abusi di governance e trasparenza, 67 agli effetti sui lavoratori, 36 alla sicurezza e alle zone di conflitto e 12 alla pandemia. In figura 1.16 sono riportate le denunce registrate dall’organizzazione. A fianco delle organizzazioni minerarie registrate (e per questo visibili), infine, è da sottolineare la presenza delle cosiddette “miniere artigianali”, condotte più o meno abusivamente e al di fuori da ogni seppur minima capacità di controllo.

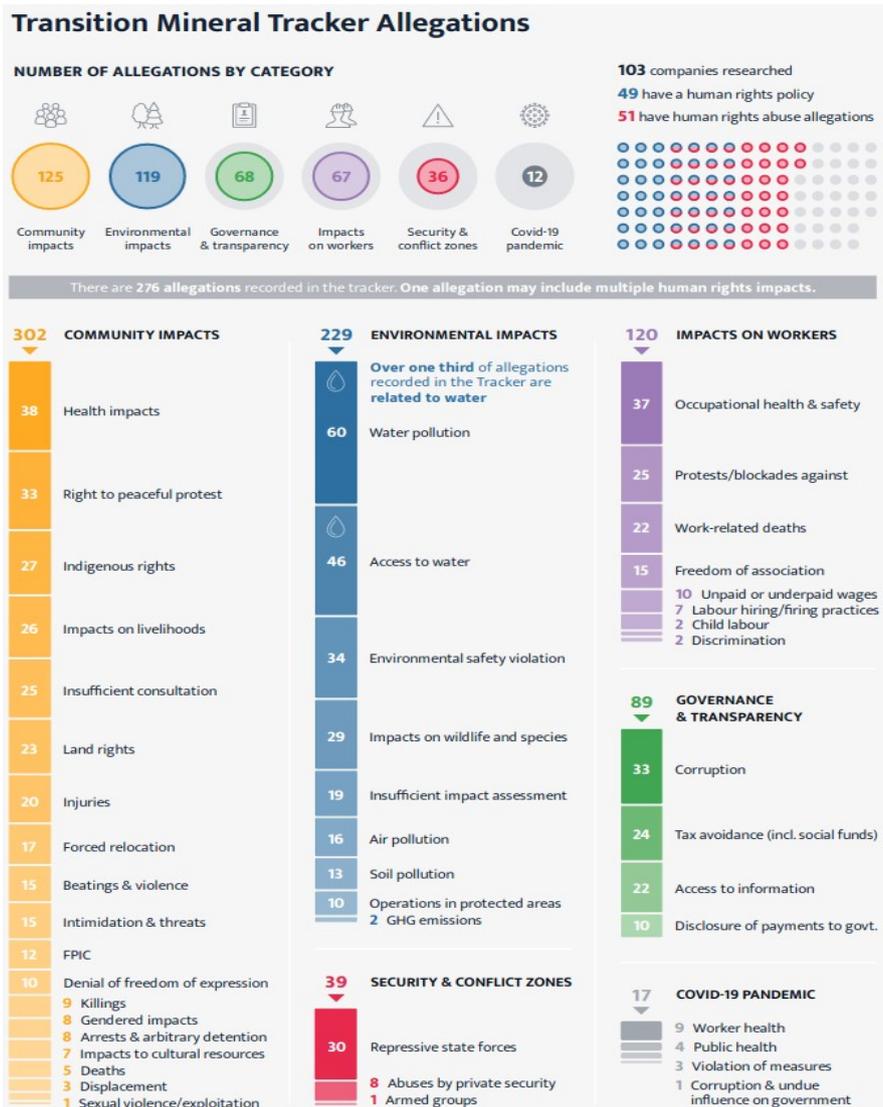


Figura 1.16. Denunce verso compagnie di raccolta di minerali raccolte dall'organizzazione Transition Mineral Tracker.

L'energia, il sistema e l'ambiente

La transizione tecnologica verso la sostenibilità della produzione e del consumo di energia ha bisogno, come visto, di una ingente quantità di materiali. La prima conseguenza diretta sarà una intensificazione delle estrazioni minerarie, con la parallela ricerca di nuovi siti di approvvigionamento, che diverranno economicamente produttivi a sempre minori tenori di minerali e a maggior difficoltà di estrazione⁴⁴. È ragionevole pensare che questa intensificazione mineraria si avvierà in maniera tumultuosa parallelamente alla crescita delle installazioni per poi procedere in maniera via via più moderata con il consolidamento quantitativo dei processi di riciclo dei materiali riguardanti le prime installazioni: ma questo non potrà che avvenire a fine vita degli impianti, almeno venti se non trenta anni dopo il loro avvio.

Concettualmente si tende a non dare peso agli impatti ambientali dell'uso dei minerali, o a confinarli nelle specifiche zone di estrazione, relegandoli a fenomeni di cattiva gestione locale o di sfruttamento esasperato. Del resto, nella visione del mondo consolidata, i metalli, che sono i materiali di nostro interesse, si possono riciclare più e più volte. In qualche modo siamo portati a considerare i materiali che dovremo utilizzare "sostenibili" in quanto riciclabili. Tuttavia questo non è sempre vero: anche per i materiali esistono problemi di sostenibilità. In questa sede, la sostenibilità può essere opportunamente correlata al livello di entropia che è necessario contrastare e abbattere per rendere il materiale utilizzabile o riutilizzabile per gli obiettivi antropici. Più è elevata l'entropia del materiale di partenza (lo stato di "dispersione" del materiale) più sarà elevata l'energia necessaria a contrastarla (a contrastare lo stato di dispersione"). Da questo punto di vista, sostanzialmente chimico-fisico, potremmo correlare la sostenibilità alla quantità di energia necessaria per portare il materiale dal suo stato di origine (sia esso minerale o da riciclo) allo stato di utilizzo. Il materiale sarà considerato "sostenibile" se l'energia necessaria alla sua raccolta ed ai trattamenti necessari per il suo secondo utilizzo sarà minore di quella richiesta dalla raccolta in miniera e ai trattamenti del suo primo utilizzo. In questa condizione, dal punto di vista dello specifico materiale ci sarà sostenibilità. Tuttavia, in questa concettualizzazione, l'attenzione si

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

concentra soltanto sull'energia necessaria alle manipolazioni dirette del materiale in oggetto, Questa è una concettualizzazione del tutto analoga a quella proposta dalla termodinamica classica, nella sua modellazione della correzione tra calore e lavoro. La “macchina termica” utilizza calore ad alta temperatura, con il quale produce lavoro (che noi utilizziamo) e disperde il calore degradato (a bassa temperatura) nell'ambiente. È l'impianto concettuale che razionalizza la modalità propria dell'utilizzo dei combustibili fossili, gli stessi combustibili che dalla macchina di Watt al motore a combustione interna hanno creato il mondo (e i danni) che conosciamo. La “scienza del calore” vede e razionalizza le positività correlate al calore, ma trascura la chimica delle operazioni correlate alla sua produzione e gli effetti dell'utilizzo di quel calore per produrre lavoro. La materialità sottostante è considerata certamente necessaria ma è relegata sia nell'approvvigionamento che negli effetti dei residui ad un ambiente esterno, “serbatoio infinito” sia per l'alimentazione che per gli scarichi.

È evidente che questo è un limite meccanicista, in quanto l'ambiente esterno, impropriamente considerato infinito, è esso stesso parte finita, e in quanto tale da considerare pienamente negli effetti della sua interazione con il sistema che di esso si avvale. In altre parole, la nostra azione modifica l'ambiente, in maniera tanto più rilevante, quanto più tale azione avviene in maniera ripetuta e massiva. Il pianeta non è un esterno infinito ma il luogo in cui operano le macchine che mettiamo all'opera (i “sistemi”) ed in cui noi stessi ci troviamo ad operare. Ed è un sistema chiuso. La “macchina elettrica” con cui ci avviamo sperabilmente a sostituire la “macchina termica” è solo una parte del puzzle con cui dovremo fare i conti per affrontare la questione ecologica. Se non riusciamo a tenere insieme il tutto, utilizzando gli effetti positivi e necessari delle fonti rinnovabili e contemporaneamente minimizzando (ma sarebbe meglio dire un impossibile annullando) gli impatti verso l'”ambiente esterno”, che è fatto di territori, suoli, acque e persone, rischiamo di ripetere l'errore già fatto a suo tempo: considerare l'esistenza di un esterno serbatoio infinito, in ultima analisi fonte dei nostri approvvigionamenti e scarica dei nostri rifiuti. Viceversa l'ambiente, il mondo, è il sistema chiuso in cui noi viviamo, il cui contenuto entropico inevitabilmente incrementa con una velocità che dipende fortemente dalla nostra azione. L'elettrificazione massiva dei consumi, necessaria alla transizione, eviterà emissioni di gigatonnellate di CO₂ ed è

buona cosa, ma dovrà anche evitare che il mondo si ritrovi con acqua e terreni avvelenati, dati gli enormi impatti negativi che la ricerca e l'estrazione mineraria potrebbe comportare sia verso i luoghi di impiantazione che verso i sistemi idrici direttamente necessari alla vita. Trascurando il degrado generalizzato che si prospetta per la biodiversità, e in generale per tutti gli ecosistemi.

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

Allegato 2.

Spostamenti ed emissioni.

Il caso dell'automobile elettrica

Nel 2020 in Italia era registrato un volume complessivo di 53 000 auto ad alimentazione solo elettrica, numero che sale a 116 000 considerando anche le auto ibride (in cui, in genere, la capacità della batteria è attorno al 10% delle auto pienamente elettriche). Considerando che nel 2015 le auto elettriche immatricolate erano circa 1500, si può valutare quanto impetuosa sia stata la crescita di tali veicoli, il cui numero in 5 anni si è incrementato del 3500 %, sia pure a partire da un valore iniziale molto basso. Non si può nascondere che questo è avvenuto anche grazie ad una decisa politica di incentivazione economica, che ancora prosegue in maniera vigorosa e che prevede fino a 8000 € di supporto all'acquisto del veicolo. Il Piano Nazionale Integrato Energia e Clima (PNIEC) del 2019 prevede al 2030 un numero di macchine elettriche per trasporto privato pari a 4 milioni, per un valore del 10% del parco automobili attualmente circolante. Possiamo valutare, ed è riportata in figura 2.1, la richiesta di metalli necessari all'auto elettrica in Italia oggi e nel 2030 in confronto alla medesima richiesta e alle proiezioni al 2030 per il consumo mondiale, come stimata dall'Agenzia Internazionale dell'energia. Dal punto di vista del consumo dei materiali va notato che nell'ipotesi del PNIEC di 4 milioni di auto al 2030, il consumo complessivo rispetto alla produzione mondiale passa dal 2.75% al 12.75 %⁴⁵. Tale valore appare critico, data la condizione generale mondiale per il reperimento dei materiali, anche tenendo conto delle possibili azioni di riciclo, che potranno iniziare ad essere consistenti solo al termine della vita stimata delle batterie, come esemplificato in figura 2.2.

Per una analisi significativa è anche da considerare la valutazione degli impatti climalteranti di una auto elettrica rispetto ad una a combustione interna durante tutto il suo ciclo di vita. Le emissioni di CO₂ dovute al funzionamento del mezzo dipendono dal mix energetico elettrico di alimentazione, che già oggi nel contesto italiano è per il 30% rinnovabile e per il quale si può ragionevolmente prevedere una quota del 50% al 2030. Diversa è la questione delle emissioni per la costruzione dell'automobile medesima. Mentre per il mezzo a combustione interna queste sono nei fatti

45 La frazione di auto in Italia rispetto alle auto nel mondo è di circa il 2%.

trascurabili rispetto a quelle dovute agli spostamenti, per i veicoli elettrici così non è: la costruzione delle batterie comporta di per sé l'utilizzo di un grande quantitativo di energia, le cui emissioni, una volta di più, dipendono dal tipo di energia utilizzata. Proprio perché rilevante, la questione dell'impronta complessiva dell'auto elettrica in termini di emissioni è oggetto di molte controversie e di analisi divergenti. Polestar, che è il marchio elettrico di Volvo, ha provveduto ad effettuare una analisi del ciclo di vita del suo modello Polestar 2, in confronto con l'analogo modello a combustione interna Volvo XC40⁴⁶. In figura 2.3 sono riportate le emissioni di CO₂ delle 2 automobili in funzione della percorrenza effettuata e del mix energetico in input.

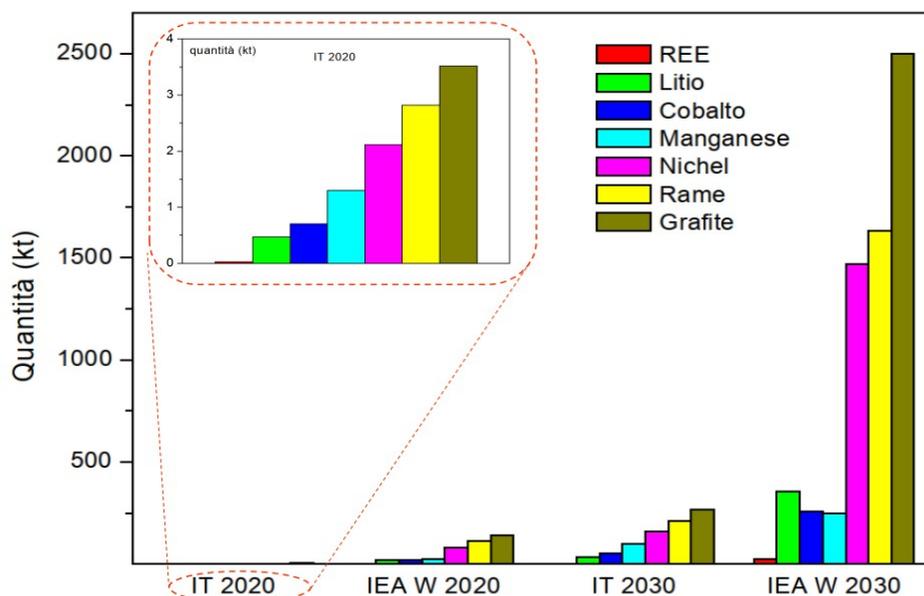


Figura 2.1. Richiesta di metalli per auto ad alimentazione elettrica. IT2020: auto immatricolate in Italia nel 2020; IEA W 2020: stime IEA consumo mondiale al 2020; IT 2030: obiettivo italiano Piano Nazionale Energia e Clima; IEA W 2030 proiezione mondiale IEA al 2030.

46 <https://www.polestar.com/dato-assets/11286/1600176185-0200915polestarlcafinala.pdf>.

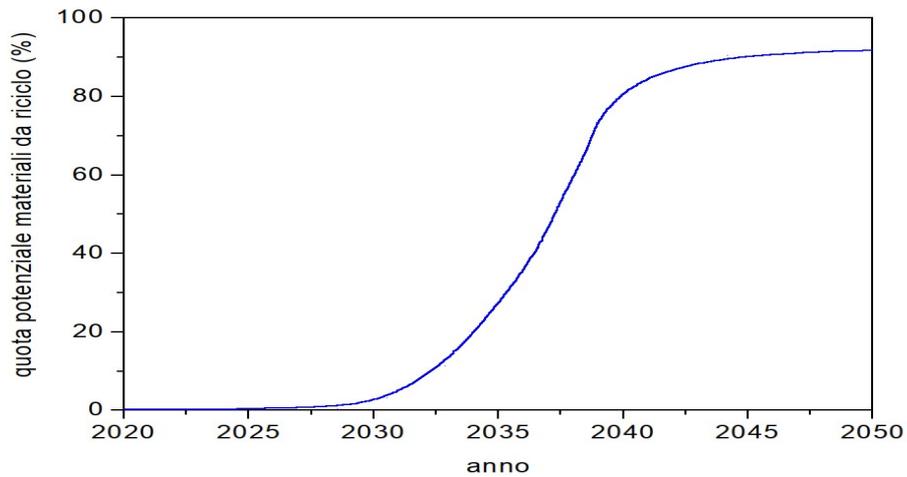


Figura 2.2. Fornitura potenziale di materiali critici riutilizzabili da batterie di veicoli elettrici, considerando una vita media di 15 anni.

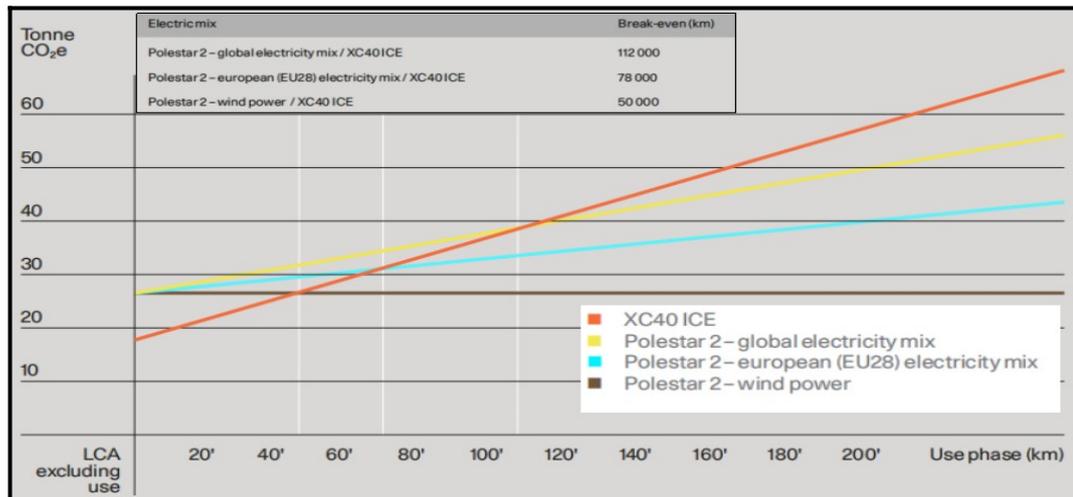


Figura 2.3. Emissioni di CO₂ dell'auto elettrica Polestar 2 e dell'auto a combustione interna equivalente Volvo XC40 considerando l'intero ciclo di vita delle automobili e in funzione dei chilometri percorsi. In un sistema energetico completamente rinnovabile il punto di pareggio nelle emissioni si otterrebbe a 50 000 km. Considerando la vita dell'auto di 200 000 km, in questo caso, che rappresenta il migliore dei casi, il risparmio in emissioni è del 53%. Nel mix energetico europeo (in Europa circa il 50% delle fonti di energia non ha effetti climalteranti) il punto di pareggio è a 78000 km, con un risparmio in emissioni del 28%.

Nelle stime dell'Unione Europea sono riportate le valutazioni delle emissioni climalteranti dovute al trasporto passeggeri con motori a combustione interna⁴⁷. Utilizzando come dato di partenza tali stime, con un fattore di scala ottimistico nelle emissioni delle auto elettriche durante il loro ciclo vita (si considera il 50% di abbattimento delle emissioni a 200.000 km), otteniamo i consumi per passeggero km riportati in figura 2.4.

È evidente la permanenza di un rilevante contributo climalterante per l'autotrasporto privato, mentre il mezzo con maggior vantaggio negli spostamenti rimane il trasporto pubblico alimentato direttamente da rete, come tipicamente il treno o la metropolitana. Questo risultato è dovuto all'alto numero di passeggeri trasportati (156 in media) e, significativamente, proprio all'assenza dell'impatto dovuto alla batteria nel conteggio energetico-ambientale del mezzo.

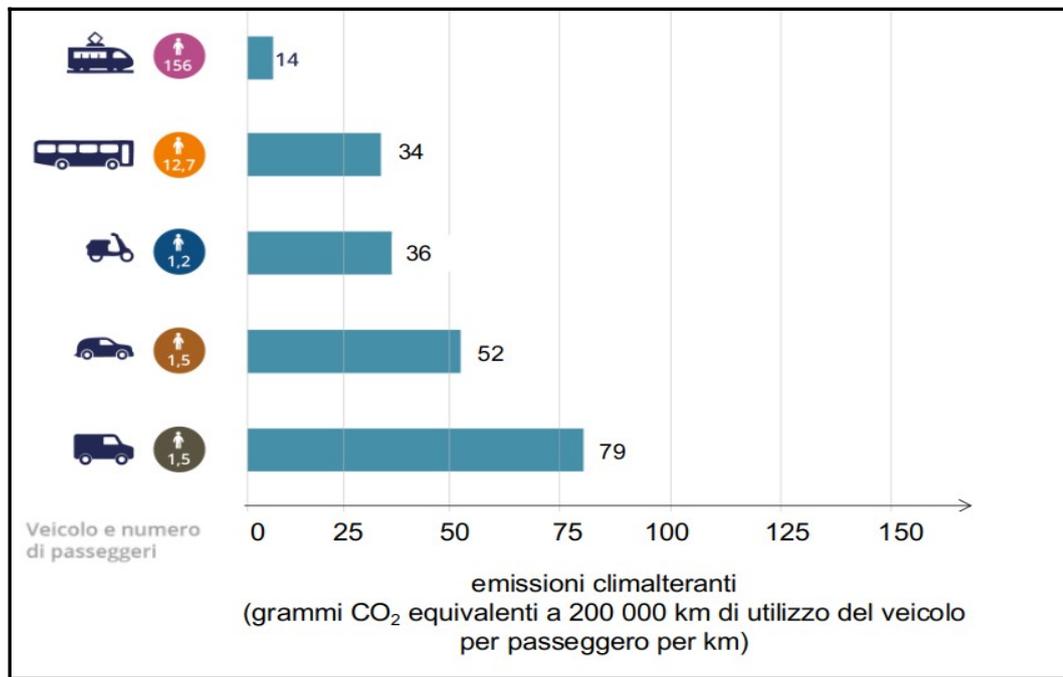


Figura 2.4. Emissioni climalteranti nel trasporto passeggeri con differenti mezzi, tutti supposti ad alimentazione elettrica. Per i veicoli alimentati a batteria si è valutato un impatto di emissioni di CO₂ del 50% rispetto agli analoghi veicoli a combustione interna, per una percorrenza media pari a

⁴⁷ <https://www.eea.europa.eu/it/pressroom/infografica/emissioni-di-anidride-carbonica-prodotte/view>.

200.000 km. Elaborazione da ref. 3. ottenuta per abbattimento del 50% delle emissioni degli analoghi mezzi a combustione interna.

In questo quadro generale, che vede da una parte l'esistenza di criticità nel reperimento dei materiali e contemporaneamente, dall'altra, una rilevante permanenza dell'impronta carbonica nella mobilità elettrica, ci si potrebbe correttamente chiedere se la via del forte supporto economico pubblico alla trasformazione della mobilità privata di massa verso l'elettrico sia condivisibile, proprio nei confronti della necessaria azione di intervento verso la crisi climatica. Chiaramente il trasporto pubblico su rotaia appare da privilegiare e rafforzare senz'altro e ovunque possibile, ma altre considerazioni possono essere pure fatte proprio sulla mobilità automobilistica. Uno specifico contributo positivo al decremento dell'impronta carbonica nella mobilità individuale potrebbe avvenire attraverso un deciso miglioramento nell'efficienza nelle condizioni di utilizzo dell'automobile, cosa oggi possibile e facilitata dalle tecnologie informatiche. L'analisi riportata in figura 2.4 ci dice che le auto sono mediamente occupate da 1,5 passeggeri. Privilegiando la centralità del servizio rispetto a quella del possesso dell'auto si possono concepire differenti modalità di trasporto individuale, basate sugli utilizzi in condivisione, che permetterebbero utilizzare un minor numero di veicoli a parità di servizio. Si avrebbe un immediato beneficio nella domanda di materiali, con contemporaneo abbattimento nelle emissioni dovuto alla maggiore efficienza del trasporto. L'intensificazione del numero medio di persone trasportate per auto a 4, significativamente, farebbe scendere a poco meno di 20 grammi la CO₂ emessa per passeggero per km e in prospettiva la riduzione del parco macchine italiano dagli attuali 40 milioni di veicoli a meno di 15 milioni diverrebbe possibile. Ovviamente sarebbero necessari investimenti sugli aspetti sociali, oltre che sulle infrastrutture e sulle tecnologie, ma i guadagni a medio e lungo termine correlati ad un abbattimento delle auto circolanti sono facilmente immaginabili.

In questo senso le incentivazioni in corso verso una conversione dell'autotrasporto da alimentazione termica ad alimentazione elettrica sono anche, e significativamente, forme di incentivazione al permanere di una erronea centralità dell'autotrasporto privato.