

Risorse e popolazione umana

Abstract: The history of the genus *Homo*, and of the *sapiens* species in particular, is different from that of other species due to the extreme importance of cultural evolution compared to biological evolution. But from the discovery of how to use fire and generate it, up to the invention of the steam engine, man essentially lives, like the other organisms of the biosphere, on the energy flow guaranteed by solar radiation. With the encounter between machines and fossil fuels and the entry into the era of engines, the rules of the game change radically, and the activities of *Homo sapiens* change in extent and intensity, in such a way as to progressively reduce the living space of all other animal and plant species, except for the allied and commensal ones. The global industrialized society arising from the meeting between machines and fossil sources is presently facing two fundamental difficulties: the gradual saturation of terrestrial ecosystems with the waste of social and economic metabolism, and the finiteness of fossil energy sources, which are not easy replacement due to their special chemical-physical properties.

Introduzione

L'eccezionalità, rispetto a tutti gli altri primati, del genere *Homo* si manifesta molto presto con la creazione di strumenti (che, almeno all'inizio, non sono altro che concentratori di energia biomeccanica) e la parallela evoluzione culturale. L'uso degli strumenti extrasomatici in sé non è un'eccezione, molti altri animali usano strumenti più o meno complessi, l'eccezione si manifesta nella varietà funzionale e nell'evoluzione delle tecniche che ha luogo negli umani.

A partire da due milioni di anni fa, presumibilmente con *Homo erectus*, inizia la lunga sperimentazione dell'uomo con il fuoco. È l'inizio della lunga preistoria, che porta dalla semplice "raccolta" del fuoco, da fonti naturali, alla sua conservazione e generazione. In questo percorso l'uomo si appropria di uno stock (accumulo) molto grande di energia biochimica: la biomassa vegetale.

Questo accumulo può essere visto come un flusso lento, rispetto ai tempi caratteristici del suo sfruttamento. Rispetto al ritmo della vita di una società di cacciatori e raccoglitori, la biomassa legnosa delle foreste è ad esempio un accumulo stabile. Viceversa, per una società basata sull'agricoltura, lo stock subisce processi locali di *depletion* (esaurimento), che vengono eventualmente risolti con l'abbandono del luogo esaurito.

La storia riporta un numero infinito di esempi di esaurimento, anche terminale, della biomassa vegetale causata dall'uomo e dal "suo" fuoco. Lo *stock* vege-

tale è comunque relativamente poco denso (come tutte le fonti solari) e dipende da un processo poco efficiente, la fotosintesi clorofilliana, che trasforma il già poco denso flusso solare in energia biochimica con un'efficienza inferiore al 5%; ossia, fatta pari a 100 l'energia che cade su una data area vegetata, meno del 5% si trasforma in zuccheri, cellulosa, lignina e altri tessuti vegetali.

Il fuoco non è solo energia, il suo uso ha dato vita ad altri fenomeni dell'evoluzione umana. La cottura dei cibi rende via via meno necessario un apparato masticatore potente e porta ad un processo di redistribuzione delle masse nel cranio che permette e/o favorisce l'accrescimento del cervello. Questo fatto, insieme agli aspetti sociali del fuoco, produce la rapida evoluzione culturale del genere *Homo*. Il termine "focolare" è in quasi tutte le lingue sinonimo di famiglia e di aggregazione sociale. Il focolare è il luogo intorno al quale si prolunga l'attività nelle ore notturne, si raccontano storie, si dipingono le pareti di roccia delle caverne e si sviluppa quella tendenza all'astrazione che rende sempre più potente la mente umana. Tanto forte è la fascinazione atavica per il fuoco, che alcune case di lusso contemporanee hanno focolari di arredamento in cui brucia un realistico finto fuoco, che può essere tenuto acceso anche in piena estate. In presenza del fuoco, è stato documentato da alcuni studi, si abbassa la nostra pressione sanguigna.

Il secondo passaggio, anche questo storicamente di estesa durata, è quello della domesticazione di piante e animali, che copre un periodo di diversi millenni, dal tardo paleolitico alla nascita degli imperi agricoli e, in realtà, tutt'ora in corso con le biotecnologie. Questo processo si accompagna allo sviluppo della tecnica e, in particolare, all'uso della forza da tiro degli animali. Fino dalle sue prime manifestazioni embrionali, l'agricoltura è il modo di concentrare l'energia fotosintetica nelle parti della pianta di nostro interesse (frutti e semi), a discapito degli altri tessuti vegetali. Essa inoltre favorisce le specie addomesticabili, rispetto a quelle che per qualche motivo sono indisponibili alla domesticazione.

La lunga evoluzione delle tecniche agricole e zootecniche dura diversi millenni, durante i quali la popolazione cresce ad un tasso annuo stimato molto basso pari allo 0,03%, con tempi di raddoppio plurimillenari (2.500 anni). Il tasso rimane basso anche durante la fase iniziale dell'urbanizzazione, probabilmente perché l'aumento di natalità è bilanciato da un contemporaneo aumento della mortalità, essendo la città un'occasione di riproduzione (ovvero di accoppiamento), ma anche un crogiuolo di malattie, molto più efficiente rispetto al piccolo gruppo di cacciatori raccoglitori.

Parallelamente allo sviluppo dell'agricoltura e dell'allevamento animale, si evolve la tecnologia: in particolare la metallurgia, che permette l'invenzione e la realizzazione di sempre nuove macchine semplici e di loro combinazioni. La ruota viene adottata, dove sono disponibili animali da tiro, all'incirca al tempo in cui si inventano i primi alfabeti.

Dall'inizio della sperimentazione con il fuoco di *Homo erectus* 1,5-2 milioni di anni fa, fino al XVIII secolo, l'umanità vive sfruttando quattro fonti "solari" di energia: la citata biomassa, l'energia fluidodinamica delle cadute d'acqua e del vento, sfruttata con i mulini, e l'energia biomeccanica del lavoro umano e ani-

male. Il totale di queste quattro fonti – biomassa vegetale, vento, corsi d’acqua e forza muscolare – ammonta a meno di un decimo dell’energia extrasomatica procapite media disponibile oggi nel mondo, ma non è lontano da quello attualmente disponibile nei paesi più poveri.

Il terzo passaggio, molto più rapido di quelli precedenti, conduce alla scoperta di nuovi modi di utilizzazione dei combustibili fossili. Queste sostanze chimiche di origine biologica sono note da millenni, ma i modi con cui vengono usate non consente loro di acquisire la centralità che rivestiranno nella civiltà industriale.

Proviamo a fare un esperimento mentale. Supponiamo che il nostro pianeta sia identico a quello che è, ma privo di giacimenti di combustibili fossili nel sottosuolo. Niente carbone, niente petrolio e niente gas naturale. La storia umana si dipana praticamente nello stesso modo in cui si è svolta, dalla comparsa dei primi ominidi fino alla metà del XVIII secolo. Gli umani, e i *sapiens* in particolare, inventano e usano strumenti sempre più sofisticati, imparando a controllare e poi a produrre il fuoco. A partire da quindicimila anni fa, essi iniziano ad addomesticare piante e animali. Infine sviluppano tutte le tecnologie che hanno dato vita all’industria, che precede la prima rivoluzione industriale, basata sull’uso di materiali tradizionali (il legno, la pietra, la terra cotta, le fibre naturali, le pelli e così via), sulla metallurgia dei sette metalli “storici” (i metalli preziosi, oro e argento, il rame e lo stagno, che uniti in lega danno il bronzo, il piombo, il mercurio e soprattutto il ferro), e sulle quattro fonti di energia primaria già citate. Detto per inciso, un’invenzione essenziale in questo quadro è la carbonella di legna (*charcoal*), indispensabile per raggiungere le condizioni necessarie alla forgiatura del ferro in acciaio nelle fornaci chiuse.

La popolazione umana, che dall’anno mille all’inizio del XVIII secolo è triplicata, continua ad aumentare ad un ritmo che è difficile immaginare molto più rapido di quello instauratosi nel XVIII secolo prima dell’avvento dei combustibili fossili: un notevole 0,41%, che deve essere confrontato con tassi di crescita inferiori allo 0,1%, spesso molto inferiori, per tutti i millenni precedenti. Una crescita demografica che, facendo una pura estrapolazione matematica, se si fosse protratta per cinque secoli avrebbe portato la popolazione umana a raggiungere i livelli attuali nel XXII secolo.

A noi sembra in effetti impensabile che, in assenza di combustibili fossili, la popolazione avrebbe raggiunto i numeri attuali sia in termini di dimensione della popolazione che di espansione economica. La disponibilità delle fonti fossili di energia primaria, che coprono oggi l’85% dei consumi globali, è ciò che ha determinato una moltiplicazione per un fattore dieci della popolazione di *sapiens* a scapito di tutte le altre specie, tranne quelle domestiche e quelle commensali: ratti, mosche, piccioni e molti altri.

In assenza di combustibili fossili non saremmo mai entrati nell’era dei motori – macchina a vapore, motori a combustione interna, turbine, motori elettrici – e tutte le attività umane si sarebbero attestate su livelli di intensità ed estensione molto più contenuti. Niente petrolio gas e carbone, niente “grande divergenza” (il decollo dello sviluppo economico in Occidente). Il disboscamento sarebbe stato intenso, come già lo era nel XVIII secolo, ma senza i mezzi alimentati con

prodotti petroliferi, principalmente benzina e gasolio, non avremmo mai provocato il livello di deforestazione raggiunto negli ultimi 100 anni. All'inizio del secolo XX, e in realtà perfino all'inizio del secondo dopoguerra, i "biomi" terrestri originari (le comunità animali e vegetali), benché già modificati dall'azione umana, erano ancora riconoscibili. Così essi sarebbero rimasti, in assenza dei motori che ne hanno trasformato la natura al punto da farli definire "antromi", cioè biomi più o meno modificati dall'azione umana, come accade per gli spazi urbani, per quelli dedicati all'agricoltura intensiva, per le grandi infrastrutture industriali e di trasporto, e così via.

L'antroposfera si espande e si diversifica a discapito della biosfera: un fatto che viene certificato dal rapporto fra la biomassa dell'uomo e dei suoi animali domestici (bovini, ovini, suini, pollame e così via) e quella degli altri mammiferi terrestri. Si stima che questi ultimi rappresentino attualmente intorno al 5% della biomassa totale dei mammiferi. La vita selvatica si è ridotta drammaticamente nel corso del XX secolo, sia in percentuale che in assoluto. Questa osservazione, da sola, dà conto del livello di semplificazione degli ecosistemi con una riduzione drammatica di diversità funzionale e genetica.

Il capitalismo non nasce con i combustibili fossili, ma il suo impeto rivoluzionario – la sua inusitata capacità di trasformare la biosfera – dipende da essi. La disponibilità di petrolio, in particolare, moltiplica la produttività delle principali attività di produzione del cibo: agricoltura, allevamento e pesca. L'agricoltura vede un aumento delle rese con la meccanizzazione, l'irrigazione forzata, l'uso dei fertilizzanti a base di nitrati e fosfati e la vasta gamma di fitofarmaci, oltre che grazie alle tecniche di miglioramento genetico.

La cosiddetta "rivoluzione verde" non è altro che un modo di trasformare petrolio in cibo. Per ogni caloria proveniente dalle filiere agricole industriali che ci troviamo nel piatto, sono state investite da 4 a 10 calorie di combustibili fossili, principalmente petrolio, per la meccanizzazione delle operazioni, e gas per i fertilizzanti. Negli Stati Uniti, dove l'agroindustria è maggiormente sviluppata, dal 1950 al 1980, l'aumento medio di 3-4 volte della resa dei cereali è stato ottenuto con un aumento dalle 20 alle 50 volte del consumo di fertilizzanti, pesticidi e irrigazione meccanizzata.

La disponibilità dei combustibili fossili a partire dalla metà del XVIII secolo ha un impatto, simile a quello visto per l'agricoltura, sull'estensione e intensità di tutte le altre attività umane: la pesca, l'allevamento di animali, l'attività di estrazione mineraria, i trasporti e così via. Se può non essere facile stabilire un confine temporale preciso per l'inizio dell'Antropocene – l'epoca in cui i *sapiens* plasmano la biosfera –, è certo che l'incontro fra combustibili fossili e macchine, cioè la nascita dell'era dei motori, segna un salto qualitativo e quantitativo straordinario. La costruzione di mezzi meccanici stimola il consumo di energia, e in particolare di petrolio, la più versatile delle fonti energetiche, e la costruzione di nuovi mezzi meccanici che aumentano ancora la domanda di energia, in un ciclo di retroazione positivo che sembra senza fine.

Tornando all'esperimento mentale dal quale siamo partiti, dobbiamo confrontare il mondo attuale con uno in cui, in assenza di combustibili fossili, si

continua a dissodare la terra con gli animali da tiro e con le braccia umane, e con gli stessi animali si trasportano le merci via terra, mentre in mare si continua ad usare la navigazione a vela. Non esiste il trasporto su rotaia e quello aereo. L'estrazione dei minerali dal sottosuolo si compie a mano, con l'ausilio di pala e piccone, asini e muli. L'esercizio sembra impossibile a noi cittadini dei paesi sviluppati, ma appare molto meno esotico per il resto del mondo.

È difficile immaginare che in un mondo del genere si sarebbe arrivati, per altra via, allo sviluppo dell'elettrotecnica e poi dell'elettronica, che sono la base della complessità tecnologica attuale. Non avremmo avuto i sistemi sanitari attuali, con ospedali e cliniche dove ci si cura da ogni genere di malattia allungando la speranza di vita media e, soprattutto, si riduce in modo drammatico la mortalità al parto di donne e neonati. Senza i fossili non si sarebbe ridotto il tempo di lavoro dando vita al tempo di istruzione per tutti e allo svago/riposo per giovani e vecchi, tanto da far nascere l'idea di scuola pubblica, cultura di massa, previdenza e pensionamento.

Non ci sarebbe stata la varietà di materiali di sintesi, come le plastiche e le gomme, il silicone, e le fibre tessili che hanno sostituito quelle naturali permettendo a centinaia di milioni di persone di accedere ad un abbigliamento vario e soprattutto igienicamente conveniente. La farmacopea sarebbe rimasta, in assenza di petrolchimica e chimica fine, a poco più di quanto si trova in erboristeria. Le grandi infrastrutture in cemento armato, acciaio e altri materiali non sarebbero mai state costruite.

La popolazione umana sarebbe comunque andata in *overshoot* (avrebbe superato la "capacità di carico" della biosfera), ma si sarebbe stabilizzata prima o poi, ad un livello inferiore a quello attuale e compatibile con l'unica fonte energetica disponibile il flusso solare, costante, ma con i suoi cicli circadiani e stagionali.

Il paradigma fossile ha permesso anche un crescente sfruttamento di risorse minerali mai usate prima nell'evoluzione della tecnica. Nel giro di un secolo ai sette metalli storici si sono aggiunti, in un incalcolabile numero di applicazioni tecniche di complessità varia, virtualmente tutti i metalli stabili della tavola periodica e, includendo l'industria nucleare militare e civile, anche numerosi materiali radioattivi fra i quali numerosi isotopi di sintesi e gli elementi transuranici. Molti elementi non metallici come il fosforo contenuto nei fosfati, usato nella composizione dei fertilizzanti agricoli insieme all'azoto e al potassio, il silicio e altri non metalli vengono estratti e consumati in quantità crescenti grazie alle nuove capacità estrattive fornite dalle macchine alimentate con i combustibili liquidi ottenuti dal petrolio.

In breve, il paradigma fossile nel quale viviamo da due secoli e mezzo, ma che si è imposto a livello globale nel corso del XX secolo, ha permesso un'espansione, senza precedenti nella storia naturale dei vertebrati, della popolazione di una singola specie e di alcune specie alleate, grazie allo sfruttamento di una fonte energetica strettamente non rinnovabile, il cui tasso di ricostituzione è cioè virtualmente nullo. Ognuno può capire che questo sia un problema. La natura non rinnovabile dei combustibili fossili dà luogo a due fenomeni fra loro cor-

relati: 1) il picco produttivo della risorsa e 2) il declino del ritorno energetico sull'energia investita o EROI. Volgiamoci a considerarli.

Il picco delle risorse non rinnovabili: il Re è nudo

Dunque la civiltà industriale si è legata a doppio filo al consumo di risorse non rinnovabili: per la fornitura di energia, con i combustibili fossili, per la maggior parte dei materiali usati nella tecnologia moderna, i metalli e i materiali polimerici, e per la produzione di cibo con l'uso di fertilizzanti e fitofarmaci che derivano o da risorse minerali (i fosfati) o dalle risorse petrolifere (i nitrati e i fitofarmaci). Le risorse non rinnovabili, per definizione, hanno il difetto di esaurirsi. Non lo fanno improvvisamente, ma con una dinamica in cui la produzione nel tempo inizialmente aumenta, raggiunge un massimo e poi inizia a declinare. La curva che descrive questo fenomeno presenta un picco (o un *plateau* più o meno prolungato) come rappresentato in figura 1. Tale modello ha avuto la sua prima formulazione grazie al geologo petrolifero Martin King Hubbert, nel caso del petrolio, e da lui prende il nome. Esso è stato applicato e confermato in molti casi di risorse minerarie e anche di risorse rinnovabili sfruttate ad un tasso superiore a quello di rigenerazione.

Si tratta di un fenomeno ineluttabile e il fatto che non sia ancora avvenuto non significa che le risorse sono infinite e non ci esime dal chiederci quando avverrà e che effetti avrà. Affrontare questa realtà implica mettere in discussione l'esistenza stessa della civiltà industriale (vedi capitolo 3). Tutti, in fondo, vedono questa realtà, ma pochi ammettono che esista questo problema, chi lo sottolinea fa la figura dell'ingenuo bambino della fiaba di Andersen che grida "il Re è

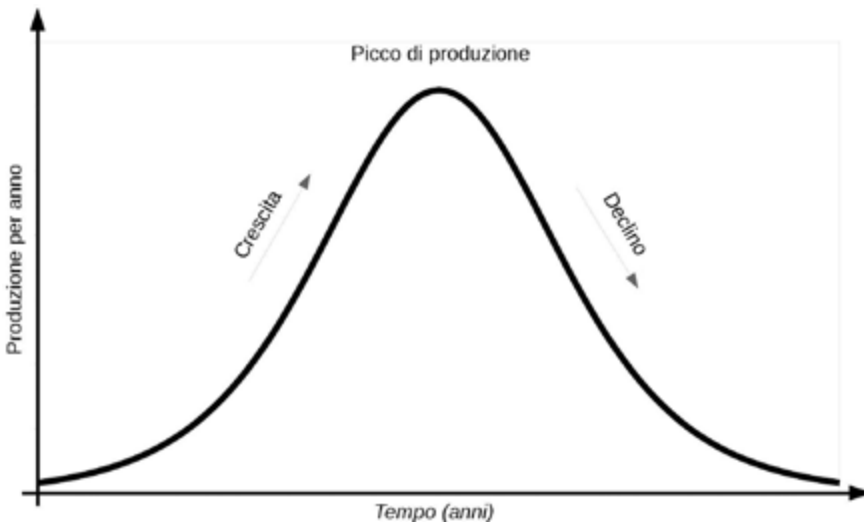


Figura 1. La curva di Hubbert con il picco.

nudo". Quindi il problema è capire non il se, ma il quando e in che modo si presenta il picco delle risorse non rinnovabili. Partiamo dal petrolio.

Curve di produzione con un massimo sono state osservate in centinaia di campi petroliferi e in decine di bacini petroliferi, che spesso coprono la capacità produttiva di interi paesi, e sono state documentate anche per diverse *commodities* minerali a livello globale.

La teoria alla base del modello di Hubbert si basa sull'osservazione che mediamente si sfruttano prima i giacimenti più facili da raggiungere, meno costosi da sviluppare, più produttivi e più grandi e poi, via via che questi si esauriscono, si passa a sfruttare giacimenti più remoti, meno produttivi e più piccoli. In altri termini, il picco è determinato dalla distribuzione asimmetrica di risorse limitate. Quando i giacimenti migliori entrano in declino produttivo, quelli peggiori, scoperti successivamente, non riescono più a compensare il declino e l'intera produzione inizia a decrescere. Possiamo ricorrere alla metafora del gioco della battaglia navale – nel quale è più facile colpire e affondare le imbarcazioni più grandi – oppure a quella dell'albero da frutto – dal quale si raccolgono prima i frutti bassi, raggiungibili da terra e poi via via quelli più alti per i quali ci vogliono scale di altezza crescente.

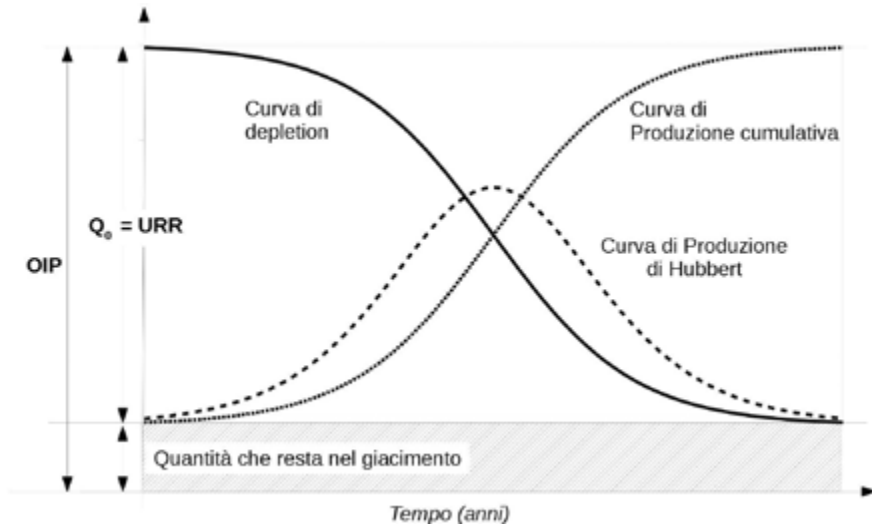
In questo processo la produzione accelera esponenzialmente nelle fasi iniziali, quando i giacimenti migliori entrano in produzione e si ha un rapido sviluppo tecnologico che risponde ad una domanda crescente. Segue una fase di crescita più lenta, che corrisponde ad un aumento delle difficoltà estrattive, che possono essere superate o attenuate soltanto grazie al ricorso a tecnologie sempre più costose, e che prelude al picco o al *plateau* produttivo (una stasi più o meno prolungata), al quale segue il declino (vedi box 1).

La teoria fin qui illustrata, assume che la risorsa in questione sia omogenea e si differenzi soltanto per la dimensione e le caratteristiche geologiche e geografiche dei giacimenti che ne determinano la maggiore o minore convenienza economica. In realtà le risorse minerarie sono tutt'altro che materiali omogenei, poiché l'omogeneità riguarda soltanto le sostanze e i materiali che se ne traggono: la benzina, il ferro, il rame e così via. Al contrario, le risorse si presentano in diverse forme con variazioni quasi continue delle proprietà chimiche e fisiche.

Nel caso specifico del petrolio e, in parte, del gas naturale, otteniamo una varietà di prodotti che differiscono per composizione chimica, densità, livelli di contaminanti più o meno problematici dal punto di vista ambientale (metalli pesanti, zolfo, e così via) che, per questo motivo, impongono costi di depurazione, nonché per la natura geologica dei giacimenti: in terra, in mare, a diverse profondità, in rocce permeabili (all'interno delle quali cioè i fluidi scorrono liberamente) o in rocce compatte, in giacimenti localizzati in trappole geologiche o in formazioni continue geograficamente estese. Non esiste una classificazione rigorosa dei diversi tipi di petrolio, ma la figura 2 dovrebbe dare un'idea generale della variabilità della risorsa petrolifera per quanto riguarda la sua parte liquida (vedi anche box 2).

Il petrolio convenzionale, di cui il greggio è la quota maggiore, è quello più conveniente e facile da estrarre, una risorsa che ha alimentato il sistema indu-

BOX 1. IL MODELLO DI HUBBERT



Il momento in cui viene raggiunto il picco produttivo è un fenomeno che può essere previsto, e non soltanto osservato a posteriori. Se si considera una risorsa mineraria omogenea, si può assumere che la riserva attingibile sia una data quantità, che prima dell'inizio dello sfruttamento indichiamo in Q_0 . Quando inizia lo sfruttamento, l'estrazione è lenta per ragioni di immaturità tecnologica e per debolezza della domanda. La curva che descrive il progressivo assottigliarsi della riserva (curva di *depletion*) va accelerando, perché la domanda aumenta e la tecnologia migliora. Ad un certo punto intervengono fattori di limite geofisici che rallentano l'estrazione: la curva, superato il flesso, inizia ad appiattirsi fino ad andare a zero. Lo zero non corrisponde all'esaurimento totale della risorsa originariamente contenuta nel giacimento (OIP: *Originally in Place*), ma a quello delle risorse fisicamente attingibili (URR: *Ultimate Recoverable Resource*). Per le risorse petrolifere è noto ad esempio che, mediamente, il 40% della risorsa originariamente presente nel giacimento non viene mai estratta per limiti tecnici. La curva che nasce da questa dinamica è quella che viene chiamata curva logistica ed è la curva sigmoide disegnata a tratto continuo in figura. La produzione della risorsa nell'unità di tempo è data dalla pendenza della curva cambiata di segno (curva tratteggiata), e rappresenta la curva a campana di Hubbert. La campana è, in termini matematici, la derivata della logistica, cambiata di segno rispetto al tempo, mentre la curva a tratto punteggiato è la produzione cumulativa. Ovviamente, quando la produzione cumulativa eguaglia il valore Q_0 , tutta la risorsa attingibile è stata estratta. Detto per inciso, il modello di Hubbert descrive piuttosto bene anche la dinamica delle epidemie, basta andare a guardare i dati sui contagi giornalieri (corrispondenti alla campana) e i contagi cumulativi (corrispondenti alla logistica).

storiale globale per oltre un secolo e che ha raggiunto un picco nel 2008. Si tratta del petrolio che madre natura ha concentrato in giacimenti localizzati in formazioni rocciose porose e permeabili, raggiungibili con una "semplice" trivellazione verticale; di rocce in cui, come in una spugna, gli idrocarburi liquidi o gassosi sono contenuti in minuscole cavità, fra loro connesse in modo tale che



Figura 2. Tassonomia dei combustibili liquidi.

la pressione intrinseca del giacimento (o quella indotta introducendo altri gas o fluidi dall'esterno) li fa scorrere verso la bocca dei pozzi praticati con trivellazioni verticali. Stiamo parlando dunque dei giacimenti di idrocarburi sfruttati usando i sistemi di estrazione che fanno parte dell'iconografia petrolifera del XX secolo: *derrick*, trivelle, pompe oscillanti (i famosi *oil donkeys*) e infine le piattaforme petrolifere.

Il picco del petrolio convenzionale, quantunque non abbia avuto gli effetti economici che alcuni degli osservatori avevano previsto, è comunque un fatto cruciale nella storia energetica.

Il declino del convenzionale è stato compensato per lo più dal ricorso allo sfruttamento di risorse meno accessibili come il cosiddetto *Tight Oil* prodotto, prevalentemente negli Stati Uniti, con la tecnica della fratturazione idraulica combinata con trivellazioni direzionali. Il ricorso a questa tecnologia, nota da almeno tre decenni e sviluppata prima per il gas, ha permesso di far crescere l'offerta di 5-6 milioni di barili a giorno, ma ad un prezzo del barile che è rimasto stabilmente maggiore di almeno tre volte rispetto al minimo del 1998, fino al crollo della primavera 2020 in conseguenza della pandemia di Covid-19, evidentemente dovuto ad un crollo della domanda.

Ognuna delle categorie di figura 2 ha un costo specifico di estrazione e una sua specifica curva di esaurimento. La somma del complesso di queste curve deve necessariamente condurre ad un picco del complesso dei liquidi combustibili. Si tratta unicamente di capire quando accade. Il ricorso a categorie meno con-

BOX 2. TASSONOMIA PETROLIFERA

- Crudo (greggio). Miscela liquida di idrocarburi prima della raffinazione, così come esce dai pozzi.
- *Condensate*. Miscela di idrocarburi a basso peso molecolare che si condensa a pressione e temperatura ambiente dai pozzi di gas naturale. A volte definito “benzina naturale”, è essenzialmente costituito da pentano, ma contiene anche molecole più pesanti fino all’ottano.
- NGL (*Natural Gas Liquid*). Miscela di Etano, Propano e Butano che viene dai pozzi di olio. L’etano viene a volte separato per la produzione di polietilene.
- *Extra-Heavy Oil*. Olio ultra pesante, cioè con grado API (l’unità di misura che indica il peso specifico di una miscela idrocarburica liquida) inferiore a 10 (vedi più avanti). Ad esempio, gli olii estratti dal bacino dell’Orinoco in Venezuela.
- *Oil Sands*. Sabbie bituminose. Sono idrocarburi solidi o molto viscosi contenuti in giacimenti di sabbie. Sono presenti prevalentemente nella regione canadese dell’Alberta. Si tratta di idrocarburi in parte degradati dal contatto con l’atmosfera.
- *Tight Oil*. A volte indicato come *Shale Oil* (da non confondere con l’*Oil Shale*). Si tratta di giacimenti di idrocarburi ancora residenti nella roccia madre, cioè in formazioni continue e compatte. La loro estrazione implica la combinazione delle tecniche di trivellazione direzionale e di fratturazione idraulica (*Hydraulic Fracturing* o *Fracking*).
- *Oil Shale*. Si tratta di un materiale ceroso (*Kerogen*) originato dalla parte organica dei sedimenti che non sono scesi all’interno della finestra del petrolio, sono perciò immaturi e devono essere trasformati in vero e proprio olio attraverso un processo chimico- fisico di maturazione.
- *GTL – CTL*. Combustibili liquidi ottenuti dalla liquefazione del gas (*Gas to liquid*) e del carbone (*Coal to liquid*).

Questa tassonomia è tratta dal sito dell’EIA (*Energy Information Agency*) del DoE (*Department of Energy*, praticamente il Ministero dell’Energia statunitense). In altri database internazionali, ad esempio nel database aggiornato annualmente dalla British Petroleum nel suo *World Energy Outlook*, con “condensate” si indica una categoria comprensiva di tutti gli idrocarburi liquidi escluso il NGL, quindi: greggio, *tight oil*, sabbie bituminose, *extra heavy* e le frazioni leggere che vengono dagli impianti di estrazione del gas naturale. L’insieme del “condensate” ammontava secondo la BP ad una media di circa 83 milioni di barili al giorno nel 2018, mentre, nello stesso anno, la produzione di NGL ammontava a poco meno di 12 Milioni di barili al giorno. I restanti 5 milioni di barili del consumo medio giornaliero di quell’anno, 100 milioni di barili/giorno, era coperto da altri liquidi non convenzionali fra i quali i biocombustibili.

venienti del petrolio convenzionale, sposta in avanti nel tempo il picco di tutti i liquidi, ma non ci esime dal considerare gli effetti di questo evento ineluttabile.

Ormai quasi nessuno nega che l’evento si verificherà in qualche momento futuro da qui al 2040, ma spesso, in particolare da parte dei paesi produttori e delle compagnie petrolifere, si tende ad offuscare il tema introducendo fattori di disturbo. Il primo argomento usato è quello sulla consistenza delle riserve esistenti, il secondo è quello dello sviluppo tecnologico, il terzo è quello del picco della domanda. Affrontiamoli separatamente.

La consistenza delle riserve esistenti

Una “riserva” è la frazione della risorsa mineraria sfruttabile in determinate condizioni tecniche ed economiche. Essa è, in genere, una piccola percentuale

della risorsa totale. Ad esempio, secondo l'USGS (*United States Geological Survey*), le riserve globali di rame sono stimate in 500 milioni di tonnellate di metallo, a fronte di una risorsa totale di oltre 3 miliardi di tonnellate.

In effetti, soltanto le quantità scoperte che possono essere estratte tecnicamente ed economicamente, possono essere definite riserve. In questo quadro, per il petrolio ed il gas si identificano tre tipi di riserve: le certe (*proved*), le probabili (*probable*) e le possibili (*possible*).

Queste tre categorie corrispondono a quantità conosciute che hanno un'alta (il 90%), una media (50%) e una bassa (10%) probabilità di essere estratte nelle condizioni tecniche ed economiche attuali. Una prima confusione introdotta nella discussione sulle riserve, è quella determinata dal sommare in modo meccanico le riserve delle diverse categorie della figura 2.

L'operazione equivale a sommare mele e pere, aggiungendoci qualche banana. In pratica, sappiamo che c'è ancora un sacco di petrolio nel sottosuolo, ma non sappiamo nulla delle possibilità reali di estrarlo e portarlo sul mercato alla velocità necessaria. Per decenni, queste possibilità reali hanno riguardato prevalentemente le riserve di petrolio convenzionale.

Generalmente, nei *database* pubblici venivano riportate le riserve certe, e queste erano dichiarate in modo molto conservativo dalle compagnie petrolifere soggette alle regole di borsa. In pratica le quantità dichiarate erano spesso molto inferiori a quelle che «potranno, con ragionevole certezza essere commercialmente prodotte nelle condizioni tecniche, contrattuali, economiche ed operative esistenti al momento considerato» (USGS).

Le ragioni di questa "prudenza" sono da ricercare nelle regole imposte dalle borse (ad esempio la *New York Stock Exchange* di Wall Street) nella dichiarazione degli *assets* delle società quotate. Il risultato però è che quando successivamente si determinavano meglio le quantità, le riserve crescevano. Nel corso dei decenni molte riserve inizialmente ignorate, o classificate solo come "probabili", diventavano certe, determinando una continua crescita virtuale della quantità totale che, attribuita a miglioramenti tecnologici e/o a nuove scoperte, induceva una falsa sicurezza sulle magnifiche sorti e progressive dell'industria petrolifera.

Un secondo fattore di dubbio sulla consistenza delle riserve globali di petrolio è determinato dalla strana dinamica storica delle riserve dei paesi del cartello OPEC. Intorno alla metà degli anni '80, infatti, dopo aver sottoscritto un accordo in base al quale ciascun membro dell'OPEC avrebbe coperto una quota di mercato proporzionale alle proprie riserve, si è visto un susseguirsi di rivalutazioni delle riserve nazionali che appare sospetto. La presenza dei salti nella consistenza delle riserve di figura 3, appare più una scelta politica, finalizzata ad aumentare la produzione, che legata a nuove scoperte o alla rivalutazione quantitativa delle riserve esistenti.

Ancora più sospetto è il fatto che, a seguire dai vari salti visibili nella figura 3, le riserve dei paesi OPEC restino praticamente costanti, nonostante che l'estrazione ammonti per l'insieme dei paesi OPEC a diversi milioni di barili al giorno, e che non ci siano notizie di scoperte che rimpiazzino il prodotto estratto. Sulla base di stime "educate", diversi osservatori sono giunti alla conclusione che le

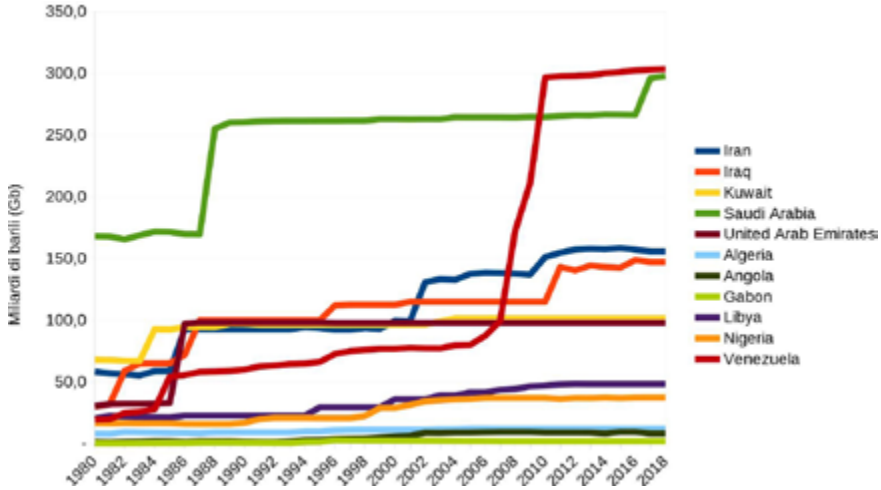


Figura 3. Diagramma storico della variazione delle riserve certe dei paesi OPEC.

BOX 3. LE RISERVE

CERTE (proved): quantità stimate di idrocarburi che, sulla base dei dati geologici e di ingegneria di giacimento disponibili, potranno, con elevata certezza (probabilità maggiore del **90%**) essere commercialmente prodotte nelle condizioni tecniche, contrattuali, economiche ed operative esistenti al momento considerato. **P90**

PROBABILI (probable): quantità stimate di idrocarburi che, sulla base dei dati geologici e di ingegneria di giacimento disponibili, potranno, con ragionevole certezza (probabilità maggiore del **50%**) essere commercialmente prodotte nelle condizioni tecniche, contrattuali, economiche ed operative esistenti al momento considerato. **P50**

POSSIBILI (possible): quantità stimate di idrocarburi che, sulla base dei dati geologici e di ingegneria di giacimento disponibili, potranno, con moderata certezza (probabilità maggiore del **10%**) essere commercialmente prodotte nelle condizioni tecniche, contrattuali, economiche ed operative esistenti al momento considerato. **P10**

Si definiscono anche le seguenti sigle:

1P = CERTE

2P = CERTE + PROBABILI

3P = CERTE + PROBABILI + POSSIBILI

La stima della quantità totale estraibile da una determinata porzione delle riserve, o da determinati giacimenti, è spesso definita URR (*Ultimate Recoverable Resource*). Questa è una frazione dell'OOIP (*Oil Originally In Place*), la quantità stimata di olio presente nel giacimento prima dell'inizio dello sfruttamento. Il rapporto fra URR e OOIP corrisponde al fattore di recupero.

riserve di petrolio convenzionale hanno superato un picco intorno alla metà degli anni 1980. La confusione e l'offuscamento rimangono comunque notevoli.

Proprio per affrontare questo problema, intorno alla metà del primo decennio del secolo, il geologo petrolifero Colin Campbell formulò una proposta politica

interessante: sulla falsariga dei protocolli ONU sul clima e sull'assottigliamento dello strato di ozono stratosferico, egli propose l'istituzione di un Protocollo riguardante il petrolio. Attraverso la collaborazione, patrocinata dall'ONU, di governi e istituzioni dei paesi consumatori e dei paesi produttori, nonché di compagnie petrolifere private, il Protocollo avrebbe permesso di giungere ad un progressivo aggiustamento sia dei consumi che della produzione, in modo da evitare nuovi e più pesanti effetti economici delle crisi petrolifere.

Il progetto, che fu inizialmente denominato "Protocollo di Rimini", perché fu presentato in quella città nell'autunno del 2005, alla Conferenza internazionale Pio Manzù, fu poi ripreso da Richard Heinberg nel 2006 con un libro dal titolo *The Oil Depletion Protocol*, il cui scopo dichiarato consisteva nell'evitare guerre petrolifere, terrorismo e collasso economico. Questi tentativi sono stati vani. Ancora oggi parlare di limiti delle risorse, picco del petrolio e problemi di esaurimento delle materie prime significa affrontare una pletora di obiezioni inconsistenti, basate su cattiva informazione, manipolazione di dati coperti dal segreto, e su una incrollabile fede nello sviluppo tecnologico.

Lo sviluppo della tecnologia

Non ci sono dubbi sul fatto che dalle prime operazioni di trivellazione alla ricerca dell'Oro Nero, fino ad oggi, lo sviluppo tecnologico in campo petrolifero e minerario in generale sia stato straordinario. Il confronto fra le immagini di un tipico pozzo petrolifero di inizio XX secolo e i progetti di trivellazione attualmente attivi in molte parti del mondo, è impressionante.

Vi sono tuttavia tre considerazioni che inducono ad assumere un atteggiamento prudente, rifuggendo da eccessivi entusiasmi. La prima è che gran parte delle tecnologie che hanno interessato l'industria petrolifera, sono ormai in campo da almeno tre decenni. Anche il cosiddetto *fracking*, che è stato applicato in modo massiccio, soprattutto negli Stati Uniti, dopo il 2007, è una tecnologia che è stata sviluppata a partire dagli anni 1980 e che viene applicata, guarda caso, quando la categoria di petrolio di gran lunga più conveniente, il citato convenzionale, supera il picco.

La seconda considerazione segnala che la tecnologia costa: nel ventennio passato abbiamo in effetti assistito ad una crescita costante delle spese in capitale delle aziende petrolifere. La spesa che aumentava ad un tasso inferiore all'1% prima del 2000, in seguito ha iniziato a crescere ad un tasso prossimo al 10% annuo. Inoltre, nonostante questo sforzo, la quantità di petrolio portato sul mercato è aumentata molto meno che nel ventennio precedente.

Terza considerazione: lo sviluppo tecnico porta ad una complessificazione generale dei sistemi produttivi, che oltre ai costi rende possibili, a volte probabili, incidenti catastrofici come quello della *Deep Water Horizon* nel Golfo del Messico nel 2010. Allo stesso tempo, dal lato della domanda l'aumento dell'efficienza nei consumi, ad esempio nel settore dei trasporti, non sfugge a possibili manifestazioni di illusionismo pubblicitario, come ha mostrato il caso "dieselga-

te” della Volkswagen, oltre ad essere soggetto al “paradosso di Jevons”, secondo il quale un miglioramento di efficienza nell’uso di una risorsa può comportare un aumento della quantità consumata di quella stessa risorsa.

Il picco della domanda

Una delle argomentazioni usate dagli scettici sull’imminenza del picco del petrolio, si basa sull’idea che in realtà, proprio grazie allo sviluppo tecnologico, prima che si manifestino problemi di offerta, ci sarà un picco della domanda. Uno degli argomenti forti di questa linea di ragionamento si basa sulla crescita iper-esponenziale delle vendite di veicoli elettrici e ibridi, supportata da un parallelo continuo sviluppo e miglioramento dei sistemi di accumulo dell’energia elettrica (le batterie), con un allungamento dell’autonomia dei mezzi e dei sistemi di ricarica.

Altrettanto importanti sono ovviamente gli sviluppi tecnologici che limitano i consumi energetici in campo civile, ad esempio per il riscaldamento e il condizionamento degli edifici e industriale. Grazie a questi fatti, si prevede un progressivo disimpegno di quote crescenti di petrolio, e di combustibili fossili in generale, che porterebbe ad un picco dei consumi.

Questa linea di ragionamento presenta un quadro rassicurante nel quale, mentre l’industria petrolifera continua a svolgere il suo ruolo di fornitura di energia primaria, il suo contributo decresce sul lato fossile e si allarga su quello delle fonti alternative. Tutte le compagnie petrolifere hanno in effetti iniziato a sviluppare un proprio settore dedicato alle fonti rinnovabili, anche se questo ha più una funzione pubblicitaria e tranquillizzante nei confronti dei propri azionisti, che di reale impegno alla transizione energetica. Si vedano ad esempio i periodici rapporti della British Petroleum, che descrivono una tranquilla e lunga passeggiata verso un lontano orizzonte *carbon free*. Ma che non mancano di puntualizzare che le fossili, e in particolare gli idrocarburi, continuano a giocare un ruolo centrale nei decenni a venire. Abbastanza ovvio, nessuna industria darebbe mandato ai curatori di pubbliche relazioni di affermare che, come si dice, il *core business* dell’attività di quella stessa industria è destinato ad un prossimo tramonto.

Nel campo del picco della domanda si trovano anche osservatori che si collocano, al contrario delle compagnie petrolifere, apertamente in una prospettiva catastrofica. Questi concordano con gli studiosi del picco, che vi siano dei problemi sul lato dell’offerta. In particolare essi sono convinti che il picco del convenzionale spinge al rialzo i costi dei progetti di ricerca, sviluppo e produzione delle risorse petrolifere. I sistemi economici più ampi e dinamici, dovendo fronteggiare forniture energetiche minori e più onerose, riducono i propri margini di surplus economico; essi inoltre, dovendo scaricare almeno parte dei maggiori costi sui prezzi finali, abbassano la domanda effettiva delle classi medie e popolari; il risultato è, su entrambi i lati del mercato, una tendenziale stagnazione della crescita. A sua volta, la stagnazione provocata dal picco non si traduce in

una fiammata inflazionistica, come era accaduto nella crisi petrolifera iniziata alla metà degli anni 1970, e come si aspettavano gli studiosi del picco durante la prima decade di questo secolo. Si formano invece prezzi del barile abbastanza alti da restringere la domanda, ma non abbastanza elevati da garantire la piena redditività di molte imprese petrolifere.

In questo filone si collocano anche i critici della “Rivoluzione dello *Shale Oil*”, come fu chiamata inizialmente la corsa al *fracking* negli Stati Uniti. Secondo questi autori, l'estrazione di petrolio da rocce compatte con la tecnica del *fracking* non sarebbe conveniente che in alcuni luoghi particolari (*sweet spots*), nei quali il flusso è particolarmente abbondante. Nel suo complesso l'industria del *fracking* si reggerebbe su uno “schema Ponzi” – qualcuno guadagna da altri, promettendo loro che potranno guadagnare da altri, promettendo loro che potranno guadagnare da altri ancora – destinato a crollare a breve. Tale dinamica sarebbe una delle componenti dell'espansione monetaria operata dalle Banche Centrali dopo la crisi del 2007-2008, che avrebbe determinato l'inflazione sui mercati finanziari, invece che su quelli delle merci. Recentemente un rapporto della British Petroleum ha affermato che, in seguito alla pandemia di COVID-19, si è raggiunto il picco della domanda e che la produzione petrolifera non tornerà più al di sopra dei livelli del 2019. Questo è ovviamente un picco determinato dal calo dei consumi in seguito alla crisi indotta dalla pandemia, ed è quindi un vero picco della domanda, se sia definitivo o meno è ancora presto per dirlo.

Conclusioni sul picco del petrolio

Il petrolio – come il gas, il carbone e tutte le risorse minerarie – è soggetto ad una dinamica di esaurimento che prevede un picco produttivo al quale segue il declino. Picchi produttivi sono stati osservati a livello locale in numerosissimi campi petroliferi e in ormai 63 paesi produttori. Il progressivo esaurimento dei giacimenti di maggiori dimensioni, geologicamente più disponibili e quindi meno costosi, ha portato nel 2008 al picco del petrolio convenzionale, la categoria di petrolio che ha alimentato il sistema industriale lungo tutto il XX secolo. Il declino di questa categoria è stato compensato dalla crescita della produzione di altri tipi di petrolio, la cui produzione implica sistemi tecnicamente più complessi e costosi.

La previsione del picco di tutti i liquidi combustibili (vedi la figura 2) implica la conoscenza delle riserve delle varie categorie, dei loro costi di estrazione e quindi una condivisione di informazioni che, al momento, appare impossibile. Sulla base di un esame critico dei dati pubblici non è possibile escludere l'imminenza del picco globale di tutti i liquidi. L'effetto di questo evento sull'economia globale è imprevedibile. Rimane in ogni caso essenziale comprendere l'unicità della risorsa petrolifera nel panorama delle risorse energetiche, e su questo ci soffermeremo nel paragrafo sull'EROI (Ritorno Energetico sull'Investimento).

Il petrolio come risorsa energetica è stato efficacemente qualificato con gli attributi: onnipotente, versatile, polimorfo e onnipresente. *Onnipotente* perché

genera flusso di energia nell'unità di tempo (potenza) in tutti i modi possibili. *Versatile* perché adattabile a diversi scenari tecnici, sociali ed economici, dal più remoto villaggio rurale dell'Africa subsahariana alla metropoli industriale. *Polimorfo* perché moltiplica le forme in cui si presenta, dai combustibili usati nei motori a combustione interna, alle gomme usate per i pneumatici, al bitume usato per il manto stradale, solo per nominare le applicazioni legate al trasporto. Infine, *onnipresente* perché ubiquitario in ogni momento della nostra vita, dalla culla alla tomba.

Questi quattro formidabili attributi aiutano a inquadrare un punto di grande rilevanza, così teorica come empirica: *il petrolio è difficilmente sostituibile*. Le fonti energetiche sono molteplici e ciascuna ha sue caratteristiche fisiche. Ma una caratteristica peculiare delle fonti fossili e dei loro prodotti derivati – oltre ad avere, almeno inizialmente, un alto EROI – è che si tratta di sostanze chimiche stabili (cioè impervie alla degradazione in condizioni normali), facilmente trasportabili e immagazzinabili, nonché dotate di una densità energetica (sia in peso che in volume) molto elevata rispetto, ad esempio, alla biomassa (si veda la tabella 1).

Tabella 1. Densità energetica di alcuni prodotti energetici.

Prodotto	Densità volumetrica (Wh/l)	Densità gravimetrica (Wh/Kg)
Gasolio	10.942	13.762
Benzina	9700	12.200
Legna		1.600- 4.710
Carbone		83.000

Fra tutti i combustibili, quelli liquidi di origine petrolifera raccolgono le caratteristiche fisiche che li rendono massimamente convenienti. Il punto è che le fonti energetiche sono difficilmente intercambiabili a tecnologia costante: quando si sostiene che si devono sostituire le fonti fossili con quelle rinnovabili, si dovrebbe aggiungere, ma spesso lo si fa solo implicitamente, che per riuscirci occorre una totale elettrificazione della società; ossia, l'abbandono quasi totale del "fratello fuoco" che, come visto prima, ci accompagna da milioni di anni.

Tutte le fonti alternative alle fossili sono fonti elettriche, a parte i biocombustibili che sono e, per diversi motivi, resteranno marginali. Oltre a determinare uno sfruttamento di terreno agricolo per fini non alimentari, e quindi una competizione fra produzione di cibo e produzione di carburanti, essi sono estremamente inefficienti rispetto a qualsiasi altra tecnologia nella cattura dell'energia solare. Fra le fonti alternative, inoltre, le nuove fonti rinnovabili, essenzialmente fotovoltaico ed eolico, sono intermittenti e hanno bassa densità territoriale (la potenza media delle tecnologie fotovoltaiche è in un intervallo di 10-30 W/m²). Modificare l'infrastruttura delle nostre società, con densità di consumo energetico che vanno dalle centinaia alle migliaia di W/m², e che si è modellata sul-

la disponibilità di petrolio (e gas) che fino a questo momento hanno garantito queste intensità di consumo, è un processo molto complesso, che richiederebbe diversi decenni di progressivo adattamento e transizione. Qualcosa che appare incompatibile con i tempi richiesti per gli interventi necessari ad affrontare il declino della disponibilità delle risorse (il picco), e il degrado della biosfera che le stesse fonti fossili hanno provocato.

Con questo non si vuol dire che le fonti rinnovabili non siano convenienti in assoluto e che si debba rinunciare alla transizione energetica. Sosteniamo soltanto che: 1) fino a questo momento, esse sono state una mera aggiunta alle fonti tradizionali, cioè fossili e biomassa; 2) le loro caratteristiche rendono la loro penetrazione nelle società avanzate piuttosto problematica. Non impossibile, ma problematica, e questo, inevitabilmente, rallenta il processo di sostituzione e facilita le resistenze del paradigma energetico esistente.

Una transizione efficace dovrebbe dar luogo ad una infrastruttura urbana, industriale e dei trasporti, che si regga su una estesa e crescente elettrificazione di tutti i mezzi meccanici e di tutte le attività industriali e civili, pubbliche e private. Per una tale infrastruttura si dovrebbe creare un sistema di produzione e distribuzione di potenza elettrica, prevalentemente basato su fonti alternative alle fonti fossili. Tale sistema, data la natura elettrica e intermittente di tutte le fonti alternative, con l'eccezione del nucleare da fissione, avrebbe bisogno di un diffuso sistema di accumulo dell'energia, di una rete intelligente e di un sistema di supporto basato o sull'uso residuale delle fossili, principalmente gas, o sul nucleare. Per un paese come l'Italia, ad esempio, per creare un'infrastruttura energetica interamente alimentata dalle fonti rinnovabili (rinunciando del tutto quindi a fossili e nucleare) avremmo bisogno di una capacità di accumulo diffusa dell'ordine delle centinaia di MWh, per risolvere i problemi del ritmo notte giorno e, soprattutto, dei cicli stagionali. Oggi, per ogni MW di potenza intermittente immesso nella rete, si deve garantire una certa porzione di potenza elettrica prodotta da centrali turbogas, che entrano in gioco in caso di calo della produzione da fonte rinnovabile. Il tema non è se la costruzione di una tale infrastruttura sia ingegneristicamente possibile, bensì quanto sia politicamente ed economicamente fattibile nei tempi necessari ad affrontare e superare i problemi strutturali ed ambientali della nostra società, tenuto anche conto che nel 2018, a livello globale, le fossili coprivano ancora il 64% dei circa 27.000 TWh di energia elettrica prodotta nel mondo e che l'energia elettrica copre solo una parte minoritaria (circa il 40%) dei consumi globali di energia primaria.

I tre secoli circa della civiltà delle macchine, alimentate con i combustibili fossili, sono, nella prospettiva storica lunga, un battito di ciglia. Ma in questo periodo di poche generazioni l'uomo ha esaurito il carburante su cui ha costruito questa civiltà, e dal quale si è reso totalmente dipendente, e ha alterato profondamente gli ecosistemi da cui dipende. L'idea che una mera sostituzione delle fonti fossili con quelle alternative (rinnovabili e nucleare) sia possibile in tempi abbastanza rapidi da evitare problemi seri, sembra piuttosto puerile.

Riassumendo, la centralità del petrolio nella nostra vita quotidiana può essere difficilmente negata. L'idea che davanti a noi ci sia un inevitabile declino della

disponibilità di questa risorsa, dovrebbe essere preso altrettanto sul serio degli effetti che l'uso plurisecolare dei combustibili fossili ha causato, e continua a causare, agli ecosistemi terrestri. La faciloneria con cui spesso si tende a descrivere la transizione che ci porterà ad usare nuove fonti energetiche più pulite e potenzialmente illimitate, come quelle basate sull'energia solare, è più preoccupante dei vari fenomeni di esaurimento di cui abbiamo parlato in questo capitolo.

Altre risorse minerali

Prima di entrare nel tema conclusivo della questione energetica, consideriamo brevemente il tema delle risorse minerarie non energetiche. Anche queste risorse sono finite, e dunque hanno una dinamica di esaurimento in cui si osservano uno o più picchi produttivi. Qui si parla di risorse che vanno dal sale marino, con tempi di rinnovo molto rapidi e per il quale non ci sono problemi visibili di disponibilità, ai minerali da cui si estraggono i metalli usati nella tecnologia, fino ad un certo numero di minerali e rocce non metallici di rilevanza economica come i fosfati.

I minerali presentano le stesse limitazioni dei combustibili fossili in termini di localizzazione, qualità delle fonti, abbondanza e così via. Uno dei parametri di interesse è la percentuale dell'elemento o degli elementi di interesse che le rocce di un dato giacimento contengono.

In genere, in ossequio alla regola "prima si raccolgono i frutti bassi", i giacimenti ad alto tenore vengono subito sfruttati. Così ad esempio, nel corso della storia estrattiva dei minerali di rame, siamo passati dallo sfruttamento di minerali con concentrazione dell'1,8%, per cui si processavano 55 tonnellate di roccia per ottenere una tonnellata di metallo, negli anni 1930, allo 0,8% nel 2010 (125 tonnellate di roccia per tonnellata di metallo).

Naturalmente la discesa nel campo delle concentrazioni più basse implica un aumento dei costi economici ed energetici. La questione è aggravata dal fatto che alcuni metalli presentano riserve con una distribuzione non uniforme. Per le risorse di questo tipo le riserve riportate in funzione della concentrazione presentano un doppio massimo come rappresentato qualitativamente in figura 4.

La prima curva a campana corrisponde ad una grande quantità di risorse, contenute nelle rocce della crosta terrestre a tenore debole. La seconda curva corrisponde alle quantità maggiormente concentrate che si sono formate per opera di meccanismi geologici di mineralizzazione. Le prime corrispondono a formazioni rocciose nelle quali l'elemento o gli elementi che ci interessano sono presenti, per sostituzione, al posto degli elementi principali dei minerali che compongono la roccia. In questi casi la concentrazione è prossima a quella attesa sulla base dei dati dell'abbondanza media dell'elemento nella crosta terrestre. Estrarre gli elementi da queste rocce indifferenziate è estremamente difficile, e costoso dal punto di vista energetico. Per le seconde invece gli elementi di interesse sono contenuti nella roccia, in grani cristallini di minerali che possono essere separati con relativa facilità dalla matrice e dai quali è relativamente fa-

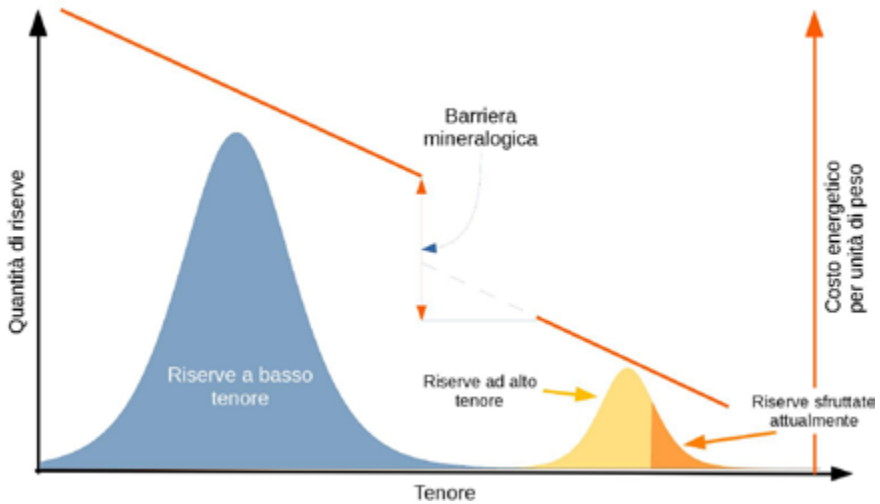


Figura 4. Distribuzione bimodale delle riserve minerarie e barriera mineralogica.

cile ottenere l'elemento puro. Queste risorse più concentrate sono state le più sfruttate durante lo sviluppo industriale. Si tratta di quantità generalmente più piccole di un fattore da 1.000 a 10.000 rispetto all'ammontare totale contenuto nella crosta terrestre.

Nel processo di esaurimento di una risorsa con una distribuzione bimodale delle riserve (che presenta due massimi relativi), nella quale c'è un iato fra risorse concentrate e risorse diluite, come quella rappresentata in figura 4, si può prevedere l'esistenza di una barriera energetica. La spesa energetica infatti cresce al diminuire della concentrazione (linee rosse in figura 4), essendo la distribuzione bimodale, quando si esaurisce la parte "buona" ad alto tenore, si deve passare a sfruttare le risorse diluite con un salto repentino del costo energetico: tale salto viene definito Barriera Mineralogica.

Un altro dei problemi che si incontra, considerando il tema delle risorse minerarie, è quello delle applicazioni dispersive. I materiali di origine mineraria, in particolare i metalli, hanno applicazioni che possono essere "dispersive" o "conservative". Le applicazioni *dispersive* portano alla perdita della materia prima dopo l'uso. Esempi di questo tipo di applicazioni sono molto numerosi: l'uso del rame nei fitofarmaci, dei fosfati nei fertilizzanti, del litio negli psicofarmaci, dell'elio gassoso nei palloni sonda (e nei palloncini), e così via. Un semplice florilegio di applicazioni dispersive comprenderebbe una lista di diverse pagine.

Possono al contrario essere considerate applicazioni *conservative* tutte quelle applicazioni in cui il materiale viene incluso in manufatti che si accumulano nella tecnosfera, e dai quali sono suscettibili di recupero e riciclo. Questo è il caso, ad esempio, del rame degli impianti elettrici di ogni tipo, del ferro contenuto nei mezzi di trasporto, e così via. I limiti di recupero e riciclo sono determinati

da fattori termodinamici che, a loro volta, ne delimitano la fattibilità economica. Torneremo a parlarne nel capitolo quarto, discutendo l'economia circolare.

La misura della qualità dell'energia: l'EROI

Per ottenere l'energia di cui ha bisogno, ciascun organismo deve spendere energia. Il bilancio fra l'energia spesa e quella guadagnata determina il successo o la morte dell'organismo. Questa considerazione ci porta a definire una grandezza che definisce la misura della qualità di una risorsa energetica a cui si attinge: il ritorno energetico sull'energia investita o EROI (dall'acronimo dell'inglese *Energy Return On Investment*), definito appunto come il rapporto fra l'energia fornita da una data risorsa energetica e l'energia che è costato estrarla.

Ad esempio, se diciamo che l'EROI di una fonte è 100:1, ciò significa che con la spesa di una unità energetica (un barile di petrolio, 1 wattora e così via) si ottengono 100 unità di energia. Tutto molto semplice. Per il ghepardo la fonte di energia è la gazzella (supponiamo), la spesa energetica per catturare la gazzella è l'energia biomeccanica consumata nell'inseguimento e nella cattura, il rapporto fra l'energia alimentare contenuta nei tessuti della preda e l'energia consumata per catturarla e ucciderla è l'EROI della fonte energetica del ghepardo, e determina nell'immediato la sua sopravvivenza individuale.

Per la sopravvivenza della specie, occorre aggiungere alla spesa energetica, il costo del mantenimento del metabolismo basale dell'animale, quello necessario per la riproduzione, la protezione e la crescita della prole e così via. Già così le cose si complicano. Per alcuni animali l'EROI specifico è probabilmente di poco superiore all'unità. Questo vuol dire che l'energia estratta dall'ambiente in cui essi vivono supera di poco la somma dei costi energetici necessari per procurarsela.

Queste specie corrono dunque sulla lama del rasoio fra sopravvivenza ed estinzione. Ciò che però, in realtà, determina la sopravvivenza dell'animale non è il rapporto fra ricavi e costi energetici che definisce l'EROI, bensì la *differenza* fra numeratore e denominatore di questa frazione, cioè l'energia netta che rappresenta il surplus energetico che l'animale è in grado di sfruttare.

Nella tabella 2 si riporta il confronto fra EROI (*rapporto* fra ricavi e costi energetici) ed Energia Netta (*differenza* fra ricavi e costi).

Come si vede dalla tabella 2, l'energia netta decresce al decrescere dell'EROI. Ma per valori alti dell'EROI decresce molto lentamente, e si contrae in modo sempre più accelerato man mano che l'EROI si riduce, in particolare al di sotto di un EROI di 5:1 essa va rapidamente a zero (vedi figura 5).

Il nostro ghepardo, come qualsiasi organismo, vedrà nel corso della propria vita un aumento iniziale dell'EROI (e dell'Energia Netta) quando, eventualmente aiutato e protetto dai genitori, impara ad estrarre dall'ambiente l'energia alimentare di cui necessita. Vedrà poi una stasi nell'età adulta ed un lento e inesorabile declino nella fase di invecchiamento. Quando l'EROI scende al di sotto dell'unità per un periodo prolungato l'animale muore.

Tabella 2. Confronto tra EROI ed Energia Netta.

EROI	Energia Netta
100:1 = 100	100-1 = 99
100:2 = 50	100-2 = 98
100:3 = 33,333	100-3 = 97
100:4 = 25	100-4 = 96
100:5 = 20	100-5 = 95
100:10 = 10	100-10 = 90
100:20 = 5	100-20 = 80
100:25 = 4	100-25 = 75
100:33,333 = 3	100 - 33,333 = 66,666
100:50 = 2	100-50 = 50
100:75 = 1,3333	100-75 = 25
100:100 = 1	100-100 = 0

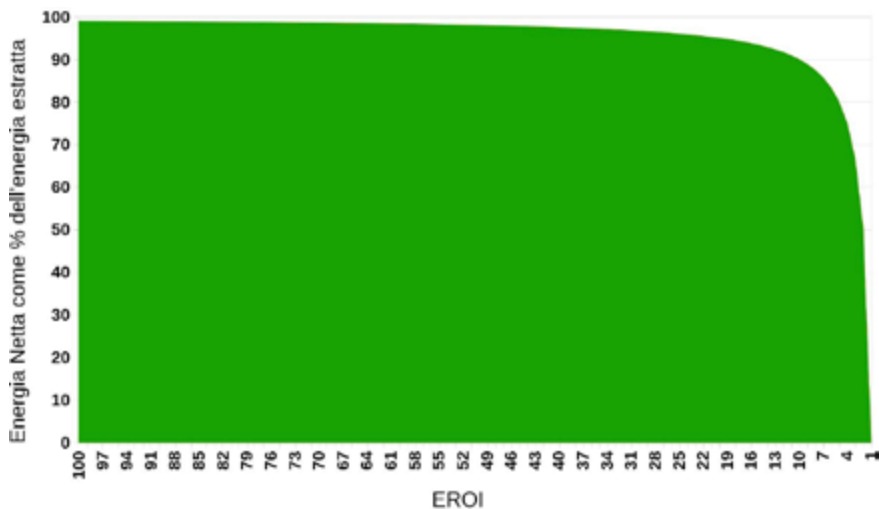


Figura 5. Energia Netta come percentuale dell'energia estratta, in funzione dei valori decrescenti dell'EROI.

Non molto diversa è la storia energetica della società industriale, basata sulle risorse energetiche fossili. Una delle caratteristiche delle fonti di energia fossile è di presentare un massimo storico di EROI seguito da un declino. Questo dipende dalla già citata circostanza che le risorse minerarie vengono sfruttate mediamente attingendo prima ai giacimenti più convenienti e a minor costo (alto EROI) e poi a quelli peggiori.

Inoltre, quando si inizia a sfruttare una risorsa le tecniche non sono ancora sviluppate. Quindi si vede subito un progressivo miglioramento delle tecniche estrattive (con un aumento dell'EROI). Quando invece la tecnologia è pienamente sviluppata e inizia il declino della qualità intrinseca dei giacimenti – determinato da profondità, permeabilità delle rocce, distanza geografica dalle zone di consumo – l'EROI globale di quella fonte inizia a scemare.

Tale declino non è inizialmente apprezzato dalla società, perché, a fronte di variazioni anche grandi dell'EROI, l'energia netta, che è quella che la società sente, scende relativamente poco, mentre soltanto verso la fase terminale del processo l'energia netta crolla rapidamente (vedi figura 5).

In effetti, si stima che l'EROI delle fonti fossili abbia superato un massimo nei decenni passati e adesso sia in declino (con la possibile eccezione del carbone). Si stima che l'EROI dell'insieme delle fonti fossili (carbone, petrolio e gas) abbia superato un massimo fra gli anni 1960 e 1970, intorno ad un valore di 40:1, e sia oggi intorno ad un valore intorno ai 30:1. Per il petrolio, in particolare, si stima che il massimo sia stato negli anni quaranta (ad un valore superiore a 40:1), essendo oggi compreso fra 10 e 20:1. Il ricorso a nuove fonti petrolifere, che erano state ignorate in passato, significa, visto da questo punto di vista, che abbiamo consumato le risorse più convenienti, ad alto EROI, per attingere adesso a quelle con EROI inferiore.

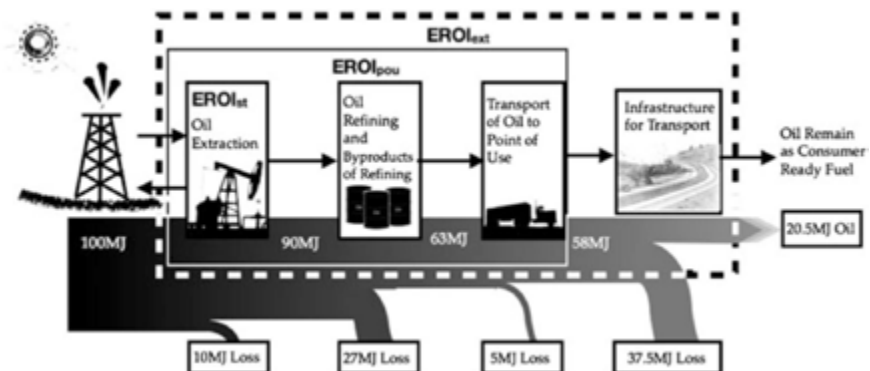
Un'ulteriore complicazione per la società umana, rispetto al caso del nostro ghepardo, dipende dal fatto che essa fa uso di una molteplicità di fonti energetiche, ed è dunque la qualità dell'insieme di queste fonti, definita da un EROI e da una energia netta media sociale, a definire la condizione energetica umana (si veda il box 4). Poiché tuttavia circa l'85% dell'energia primaria consumata nel mondo ha origine da qualche tecnologia che sfrutta le fonti fossili, possiamo assumere che la condizione attuale di declino dell'EROI dei combustibili fossili, comporti un parallelo declino dell'energia netta media sociale globale. Una delle poche note positive rilevabili in questo momento, è che le fonti alternative esistenti alle fossili, in particolare le fonti rinnovabili, hanno EROI costante o suscettibile di migliorare nel tempo grazie allo sviluppo tecnologico. Sui limiti di queste fonti torneremo in seguito.

Come vedremo nel capitolo terzo, i concetti di EROI ed Energia Netta, che definiscono il surplus energetico di una società, sono alla base del concetto di surplus economico. Da questo punto di vista, potremmo vedere la seconda colonna della tabella 2 che riporta l'Energia Netta (surplus energetico) in funzione dell'EROI, come la percentuale di persone che, in una società umana con un $EROI_{soc}$ pari a quello della prima colonna, sono libere di occuparsi di altre attività che non siano il procacciamento di energia.

Tale percentuale declina con l' $EROI_{soc}$, ma è sempre piuttosto elevata fino a valori veramente bassi di EROI. In una società che sperimenta un EROI sociale di 10, ancora il 90% delle persone possono dedicarsi ad attività che non sono direttamente legate alla produzione di energia. Tuttavia, con un EROI sociale di 2 la situazione è radicalmente mutata, poiché metà della popolazione deve occuparsi nella produzione di energia. Molte società di cacciatori-raccoglitori

BOX 4. STIMA DELL'EROI DELLE FONTI ENERGETICHE

La stima dell'EROI delle fonti energetiche è un procedimento piuttosto complesso. Innanzitutto l'EROI, essendo un rapporto fra valori di energia, è una grandezza adimensionale. Esso si indica in genere in unità fisiche di Joule/Joule, o, date le dimensioni del fenomeno, in gioco MJ/MJ o MWh/MWh e talvolta di potenza MW/MW. Pur essendo un rapporto fra grandezze fisiche, il suo valore è influenzato da fattori economici, giuridici e perfino culturali nonché, ovviamente, da quelli tecnologici. Per stimare l'EROI di una fonte si deve fare un'Analisi del Ciclo di Vita (*Life Cycle Assessment* o LCA) dell'impianto che ne fa uso. Questo implica lo studio dei consumi energetici di tutte le fasi di costruzione, acquisizione di materie prime, esercizio, manutenzione, autoconsumo e smantellamento dell'impianto al termine della vita utile. Per questo genere di analisi si usa dire che segue il destino dell'impianto "dalla culla alla tomba", confrontando i costi energetici sostenuti in ciascuna fase con la produzione energetica dell'impianto nel corso della sua vita utile. Concettualmente il procedimento è semplice, ma all'atto pratico ci sono sempre molte incertezze, anche se le regole per condurre una LCA sono standardizzate a livello internazionale, con riferimento a specifiche norme ISO. Se prendiamo il caso della produzione di energia elettrica, è possibile confrontare l'EROI di un impianto eolico o fotovoltaico con quello di impianto a carbone o a turbogas. Per diversi usi dell'energia il confronto non è sempre facile. Il petrolio, ad esempio, è prevalentemente usato per il trasporto ed altri usi non energetici. Si possono fare stime dell'EROI del petrolio e di altre fonti a diversi stadi della filiera: ricerca, prospezione, sviluppo ed estrazione (il cosiddetto *upstream*) che porta all'EROI a bocca di pozzo o standard $EROI_{st}$, cioè il rapporto fra il contenuto energetico del petrolio estratto e l'energia che è servita ad estrarlo dall'ambiente. Questo stadio è generalmente il più semplice ed è anche l'unico su cui c'è una certa concordanza in letteratura. A questo stadio si possono aggiungere, sempre rifacendosi all'esempio del petrolio, gli stadi successivi del trasporto via petroliera o via oleodotto, della raffinazione e della distribuzione fino alla pompa di benzina, $EROI_{pou}$ (*point of use*) e infine un $EROI_{ext}$ più esteso che si riferisce non solo ai costi della produzione di energia, ma anche ai costi del suo uso finale. È stato anche proposto un EROI sociale che estende ulteriormente il confine del calcolo e che includerebbe tutte le fonti energetiche usate da una determinata società o nazione, prodotte localmente o importate. Quest'ultimo, $EROI_{soc}$, anche se concettualmente molto interessante risulta difficile da stimare dovendo, ad esempio, considerare anche i costi energetici dell'energia importata dall'estero e un insieme di costi nascosti. Nella figura seguente si riporta lo schema dei vari confini entro i quali si calcolano i diversi EROI citati nel caso del petrolio.



Confini di riferimento per il calcolo dei diversi EROI del petrolio dal petrolio "alla bocca del pozzo" ai prodotti per i consumatori. Ad ogni passaggio sono riportate le stime delle perdite energetiche. (Hall et al., Energy Policy, 2014)

A prescindere dalle difficoltà dell'intera procedura, dopo quasi due decenni di ricerca sul tema, un confronto fra gli EROI_{st} delle diverse fonti può essere fatta abbastanza agevolmente. Nella tabella seguente prendiamo le stime proposte e aggiornate da Charles Hall, che è lo scienziato che ha aperto la strada all'uso di questa importante figura di merito della qualità delle fonti di energia.

RINNOVABILI	EROI
Fotovoltaico a tellururo di cadmio	30-40
Grande idroelettrico	30-40
Eolico a grande scala	20-30
Fotovoltaico al silicio	8-12
Eolico a piccola scala	5-15
<hr/>	
NON RINNOVABILI	
Petrolio storico (anni 1930)	30-40
Petrolio oggi	15- 20
Carbone	50
Gas Naturale	20
Energia nucleare	7-20

hanno EROI non inferiori a 10; in queste società generalmente il lavoro è assente, l'attività di procacciamento di energia alimentare occupa una parte limitata del tempo, mentre il resto del tempo è speso in attività di socializzazione.

Riferimenti bibliografici

Sull'uso di strumenti esosomatici nel mondo animale si veda C. Baber, *Cognition and Tool Use: Forms of Engagement in Human and Animal Use of Tools*, Taylor & Francis, London 2003.

Sulla preistoria del fuoco e l'*Obligate Cooking*, si veda M. Chazan, *Toward a Long Prehistory of Fire*, "Current Anthropology", 58 (S16), 2017, pp. S351–S359. <https://doi.org/10.1086/691988>.

Sull'eccezionale etologia del genere umano: G. Barbujani e A. Brunelli, *Il giro del mondo in sei milioni di anni*, Il Mulino, Bologna 2018; K. Lorenz, *L'altra faccia dello specchio: per una storia naturale della conoscenza*, Adelphi, Milano 2007; K. Lorenz, *Gli otto peccati capitali della nostra civiltà*, Adelphi, Milano 2007; D. Mainardi, *L'animale irrazionale: l'uomo, la natura e i limiti della ragione*, Mondadori, Milano 2001.

Sull'origine dell'agricoltura e dell'allevamento, si vedano J. C. Scott, *Against the Grain: A Deep History of the Earliest States*, Yale University Press, New Haven 2017; J. Diamond, *Armi, acciaio e malattie: breve storia del mondo negli ultimi tredicimila anni*, Einaudi, Torino 2010 (ed. orig. 1997); R. C. Francis, *Addomesticati: l'insolita evoluzione degli animali che vivono accanto all'uomo*, Bollati Boringhieri, Torino 2016 (ed. orig. 2015).

Sulla dinamica di crescita della popolazione umana si veda: *The Real Population Problem* sul blog *Do the Math* <<https://dothemath.ucsd.edu/2013/09/the-real-population-problem/>> (09/20);

Sul tema della centralità del petrolio e dei combustibili fossili nello sviluppo capitalistico si vedano M. Bonaiuti, *La grande transizione. Dal declino alla società della decrescita*, Bollati Boringhieri, Torino 2013; U. Bardi, *Extracted. How the Quest for Mineral Wealth Is Plundering the Planet*, Chelsea Green Publishing, Chelsea (Vermont) 2014. Sulla centralità del petrolio nel mondo industriale si veda: M. Auzanneau *et al.*, *Oil, Power, and War: A Dark History*, Chelsea Green Publishing, Chelsea (Vermont) 2015. Per avere un punto di vista entusiasticamente favorevole all'industria petrolifera, ma anche molto ben scritto e completo, rimandiamo a D. Yergin, *The Quest: Energy, Security and the Remaking of the Modern World*, Penguin Press, New York 2011 e, tradotto in italiano, D. Yergin, *Il premio*, Sperling & Kupfer, Milano 1991 (ed. orig. 1991).

Sul picco del petrolio la letteratura è molto abbondante, specialmente quella in lingua inglese, si vedano, ad esempio: K. S. Deffeyes, *Beyond Oil. The View from Hubbert's Peak*, Farrar, Strauss & Giroux, New York 2006; K. Aleklett, *Peeking at Peak Oil*, Springer, New York 2012; R. Bentley, *Introduction to Peak Oil*, Springer, New York 2016.

Su EROI ed Energia Netta, si consiglia di fare riferimento al lavoro di Charles Hall: C.A.S. Hall, *Energy Return on Investment. A Unifying Principle for Biology, Economics, and Sustainability*, Springer, New York 2016; C.A.S. Hall e K. Klitgaard, *Energy and the Wealth of Nations. Understanding the Biophysical Economy*, Springer, New York 2018².

Sulla criticità delle risorse minerali e l'estrattivismo si veda: P. Bihouix e B. de Guillebon, *Quel Futur Pour Les Métaux? Raréfaction Des Métaux: Un Nouveau Défi Pour La Société*, EDP Sciences, Les Ulis 2010; P. Bihouix, *L'âge des low tech vers une civilisation techniquement soutenable*, Éd. du Seuil, Paris 2014. E di nuovo U. Bardi, *Extracted, op. cit.*. In italiano, dello stesso autore sullo stesso argomento U. Bardi e L. Mercalli, *La terra svuotata: il futuro dell'uomo dopo l'esaurimento dei minerali*, Editori Riuniti University Press, Roma 2011.

Sul cosiddetto "picco di tutto": R. Heinberg, *Peak Everything: Waking up to the Century of Declines*, New Society Publishers, Gabriola Island (British Columbia) 2007.

Sui limiti delle fonti rinnovabili, si veda: Mirco Rossi, *Pieno per Vuoto: chiaro e scuro delle rinnovabili*, <<https://www.aspoitalia.it/index.php/articoli/articoli-dei-soci/379-pieno-per-vuoto-chiaro-e-scuro-delle-rinnovabili>> (09/20).