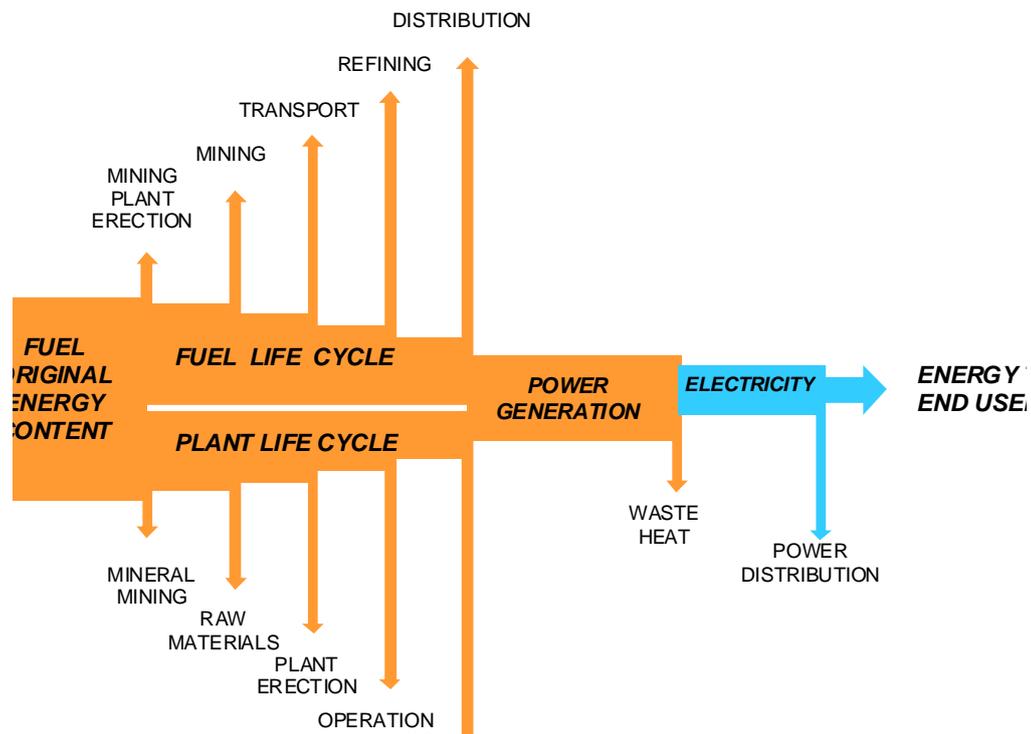


LE VARIE FORME DELL'ENERGIA PRIMARIA¹

Introduzione

Fonti di energia primaria (costituite da una serie eterogenea di risorse naturali) sono quelle fonti da cui è possibile ricavare una quantità di energia effettivamente utilizzabile, E_r , maggiore dell'energia spesa dall'uomo per renderle utilizzabili, E_s . Le energie naturali all'origine, E_o , come ad esempio l'energia solare intervenente nella fotosintesi nel caso dei biocarburanti, non vanno considerate "energia spesa". Per una fonte energetica, dato che $E_r = E_o - E_s$, $E_o \geq E_r > E_s \geq 0$, da cui $E_o > 2E_s$.

INVESTIMENTO ENERGETICO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA³



Sono stati definiti dei parametri per valutare la convenienza in termini di resa energetica di una data fonte di energia e dei relativi processi per renderla utilizzabile:

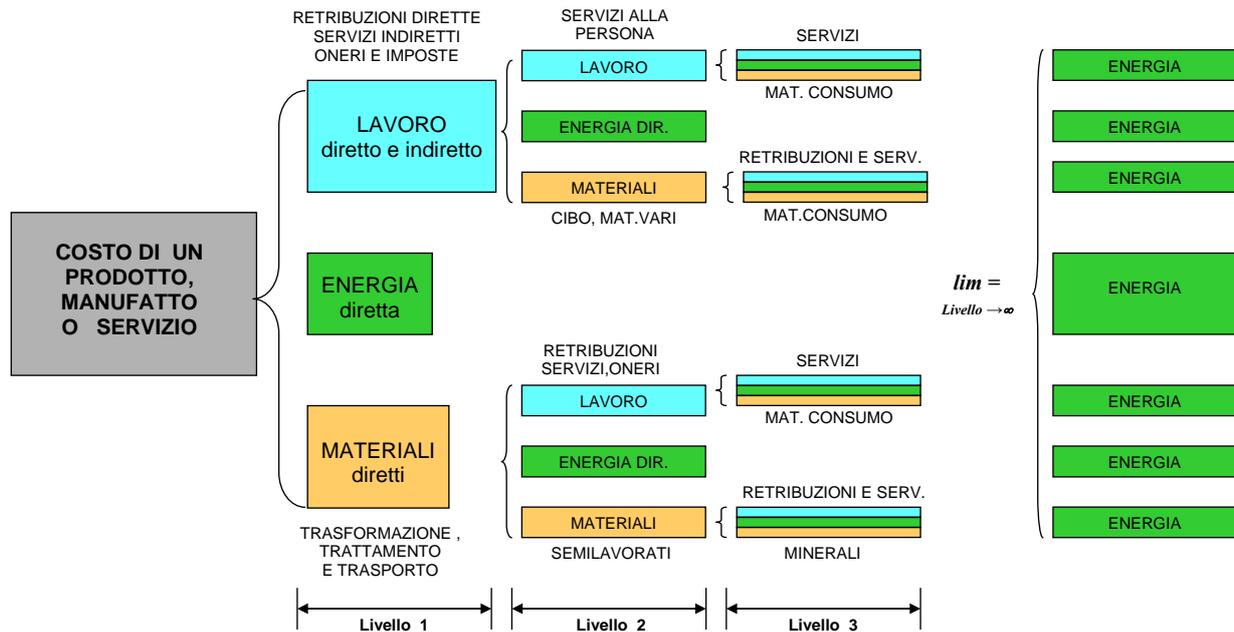
- l'EROEI (o EROI), acronimo inglese che sta per Energy Returned On Energy Invested (o Energy Return On Investment) = E_r/E_s . Per una fonte energetica, $EROEI > 1$
- l'EPT, Energy Payback Time, ovvero tempo di ritorno energetico, strettamente correlato all'EROEI, che è il tempo necessario perché un impianto (o un sistema di impianti) produca una quantità di energia pari a quella che è stato necessario spendere nel suo ciclo di vita. Se un sistema di produzione di energia utilizzabile ha un EROEI, diciamo, pari a X e una vita di Y anni, ne consegue che l'EPT dovrebbe essere di Y/X anni (infatti, se la potenza media ricavata durante il funzionamento del sistema fosse indipendente dal tempo, moltiplicata per Y dovrebbe dare E_r , mentre moltiplicata per EPT dovrebbe dare E_s). Comunque, la relazione fra EPT e EROEI non sempre si può determinare semplicemente come un rapporto: può darsi che la resa di un sistema vari col tempo, per esempio degradandosi progressivamente, per cui, in questo caso, il sistema potrebbe avere un buon EPT ma un basso EROEI.

¹ Fra le varie referenze bibliografiche cito: Mario Silvestri, *Il futuro dell'energia*, Bollati Boringhieri, Torino, 1988.

Tabella EROEI costruita dal prof. Ugo Bardi²

Tecnologia	EROEI (Elliott)	EROEI (Hore-Lacy)	EROEI Altri autori	Note
Grande idroelettrico	50-250	50-200		Decade con il degrado dei bacini
Mini idro	30-270			
Petrolio "anni d'oro"	50-100			Fino al 1970, circa
Petrolio oggi			5-15	Pozzi in esaurimento rendono l'estrazione sempre più costosa
Eolico	5-80	20		Dipende dai siti. Potrebbe essere un ottimo valore, 50 - 100, per le coste del Mare del Nord. E' minore (forse intorno a 20) per un tipico sito in Italia.
Nucleare	5-100	10-60	<1	Come ovvio, ci sono infinite controversie su questo valore. Secondo alcuni, la tecnologia nucleare standard, "reattori ad acqua leggera" potrebbe avere una resa energetica minore di 1. Tuttavia, quasi certamente i reattori nucleari moderni hanno una resa energetica discretamente buona anche se non necessariamente superiore a quella di molte tecnologie rinnovabili
Fotovoltaico a film sottile			25-80	
Fotovoltaico convenzionale (silicio)	3-9	4-9	<1	Il valore < 1 è tratto da un lavoro di Odum del 1994 ed è sicuramente obsoleto. Ha dato però origine alla diffusa leggenda urbana che ci vuole più energia per produrre un pannello fotovoltaico di quanto questo ne possa ridare nel corso della sua vita operativa. Ovviamente, questa è solo una leggenda, completamente falsa per le ultime generazioni di pannelli.
Carbone	2-7	7-17		
Gas Naturale		5 - 6		
Biomassa	3-5	5-27		
Etanolo			0.6-1.2	Ci sono molte controversie sull'EROEI dell'etanolo. Secondo Patzek e Pimentel è minore di 1, ma altri autori ritengono che sia intorno a 1.2 con particolari accorgimenti. Potrebbe non essere una cattiva idea, ma la cosa va fatta con molta cura
Sabbie bituminose			<1?	Anche sulle sabbie bituminose ci sono molte controversie. Può darsi che l'EROEI di estrazione sia maggiore di 1, ma è sicuramente basso e, secondo alcuni, minore di 1

² adattata dal lavoro di David Elliott, "A Sustainable Future" e di Ian Hore-Lacy, "Before the wells Run Dry" Feasta 2003, pubblicato in <http://www.feasta.org/documents/wells/contents.html?two/wellselliott.html>.

IL PRINCIPIO DI PANERGIA³

Nella pratica, calcolare l'EROEI di un sistema energetico non è cosa ovvia ed i margini di incertezza sono altissimi e dipendono dalle valutazioni soggettive di chi fa le stime e da quanto si tiene conto delle esternalità che accompagnano la spesa e il ricavo energetici. Per esempio, siccome le quantità di energia sono messe in gioco anche in tempi diversi, incide anche il “tasso di sconto” assunto per l'energia investita, perché, in generale, il valore dell'EROEI dipende dal contesto tecnologico dove si fa la valutazione e dalla facilità di reperimento e trasformazione della fonte energetica primaria, che sono variabili con il tempo.

Valutazioni dell'EROEI, sicuramente approssimate, ma rapide e probabilmente più precise per quanto riguarda la considerazione di tutte le esternalità, si fondano sul Teorema della Panergia³: “Il costo di un prodotto è dovuto totalmente all'energia diretta ed indiretta investita nella sua produzione”. Infatti, se il costo di ciascun prodotto può essere originato dai costi associati all'energia, ai materiali e al lavoro impiegati per produrlo, e ciascuno di questi tre costi, suddiviso nelle sue varie parti, è considerato come dovuto ancora a costi di energia, materiale e lavoro, risalendo la catena fino all'origine - per tener conto di tutte le esternalità - si trova che in pratica il costo totale è dovuto solo al costo dell'energia complessivamente impiegata, dato che fonti energetiche primarie, materiali e vita umana sono regalati da madre natura. Se poi si suppone che il contesto economico e tecnologico sia stabile e pienamente sviluppato dal punto di vista competitivo (ipotesi invero piuttosto pesanti) e il prodotto sia commercialmente “maturo”, i prezzi possono essere considerati proporzionali ai costi. Allora, l'energia complessivamente consumata (per esempio, in termini di kWh di energia elettrica o m³ di metano) per ottenere il prodotto (e l'energia utilizzabile è un prodotto) può essere stimata dividendo il prezzo del prodotto per il prezzo unitario dell'energia utilizzata (per esempio, energia elettrica o metano).

³ Piergiulio Avanzini, Assessment of Power Generation Systems Through a Novel Tool: Panergy, II Congresso AIGE, Pisa, 4-5 settembre 2008.

GERARCHIA DELLE TECNOLOGIE CORRENTI DI PRODUZIONE ENERGETICA BASATA SULLA PANERGIA (Contesto ITALIA dic 2006)³

RISPARMIO ENERGETICO
(EROEI: Energia prodotta su
investimento energetico)

	EROEI <small>E_p/E_i</small>
Termovalorizzazione rif.	31.2
Idraulica	21.9
Eolica	19.7
Nucleare (PWR)	15.4
Solare (termodinamica)	6.3
Carbone (USC)	5.3
Biomassa (combustione)	4.1
Nat Gas (cicli combinati)	2.3
Nat Gas (celle combust.)	2.0
Petrolio (cicli vapore)	1.9
Solare (fotovoltaico)	1.3

MIGLIORE



PEGGIORE

EFFETTO DI RISCALDAMENTO GLOBALE
(SEI: Impatto ambientale specifico
da CO₂)

	SEI <small>Kg CO₂/KWh_{el}</small>
Nucleare (PWR)	0.011
Idraulica	0.013
Eolica	0.014
Solare (termodinamica)	0.044
Solare (fotovoltaico)	0.209
Gas nat (cicli combinati)	0.296
Gas nat (celle combust)	0.305
Petrolio (cicli vapore)	0.654
carbone (USC)	0.739
Biomassa (combustione)	0.952
Termovalorizzazione rif.	1.329

Contesto: Italia 2006

Prezzo dei sistemi di generazione da: ENEA Rapporto Energia e Ambiente 2006

Le fonti energetiche primarie possono essere suddivise in tre grandi categorie: energie rinnovabili, energie (quasi) inesauribili ed energie esauribili.

Le fonti rinnovabili

Le energie rinnovabili ci arrivano, in forma diretta o indiretta, dal Sole (gli altri astri presi insieme forniscono alla Terra una quantità di energia trascurabile), esclusa l'energia delle maree (quest'ultima è provocata dall'attrazione gravitazionale della Luna e il Sole vi ha una parte molto modesta.). La *costante solare*, 1366 W/m^2 (watt al metro quadrato), rappresenta la potenza che il Sole invia su ogni metro quadrato a 150 milioni di chilometri di distanza (chilometri fra la Terra e il Sole). Il watt, l'unità di potenza (energia per unità di tempo), è pari a 1 joule al secondo (= 1 W). Se si moltiplica questo numero per la sezione mediana della Terra (πR^2 , dove R è il raggio terrestre $\approx 6300 \text{ km}$), si ricava la potenza, con cui il Sole investe la Terra o, se si preferisce, l'energia solare intercettata dalla Terra in un secondo, che risulta pari a $1.74 \cdot 10^{17} \text{ W}$.

Se volessimo conoscere la potenza che il Sole irradia in tutto l'universo, basterebbe moltiplicare la costante solare per la superficie della sfera che ha per centro il Sole e per raggio la distanza fra il Sole e la Terra (i già citati 150 milioni di chilometri). Si ottiene (approssimativamente): $3.86 \cdot 10^{26}$ watt, cioè più di 2 miliardi di volte la potenza che il Sole invia sulla Terra. Nonostante l'enormità di tale potenza, se la immaginassimo uniformemente distribuita entro il Sole (il che però non corrisponde al vero), troveremmo che essa, per unità di volume, è appena 1/7000 (un settemillesimo) della potenza sviluppata mediamente per unità di volume dal corpo umano (1.7 watt/litro), che noi consideriamo una potenza specifica molto esigua (nei reattori nucleari a neutroni veloci si raggiungono potenze di 500 000 W/l). Ciò significa che la zona del Sole, entro cui si sviluppano le reazioni nucleari che sprigionano l'energia che da esso irradia, è confinata in un piccolissimo nocciolo centrale. Il resto del Sole è tutta una crosta isolante, attraverso la quale la temperatura scende da 20 milioni di gradi a 5775 gradi Kelvin, che è la temperatura con cui l'energia affiora sulla superficie solare.

Volendo sorprendere gli ingenui, si può calcolare la perdita di massa da parte del Sole per via dell'energia da esso irradiata nell'unità di tempo:

$$\frac{3.8 \cdot 10^{26} \text{ J/s}}{(3.0 \cdot 10^8)^2 \text{ (m/s)}^2} = \frac{\text{energia irradiata dal sole per unità di tempo}}{\text{quadrato della velocità della luce}} = 0.4 \cdot 10^{10} \text{ kg/s}$$

cioè 4 milioni di tonnellate al secondo. Poiché il volume del Sole è pari a $1.5 \cdot 10^{27} \text{ m}^3$ e la sua densità è 1.4 kg/l, la massa del Sole è pari a circa $2 \cdot 10^{27}$ tonnellate. Affinché 1/1000 di tale massa ($2 \cdot 10^{24}$ tonnellate) venga consumato a causa della fuoriuscita della massa associata all'energia irradiata, è necessario che trascorra un tempo pari a $(2 \cdot 10^{24}/4 \cdot 10^6)$ secondi = $0.5 \cdot 10^{18}$ secondi, cioè 17 miliardi di anni, superiore quindi all'età dell'universo (convenzionalmente conteggiata a partire dal big-bang che gli ha dato inizio; che poi questo sia il primo o l'ennesimo big-bang la cosmologia non dice). Si vede comunque che, anche se un giorno tutto finirà e finirà quindi anche il Sole, chiamare «rinnovabile» in eternità l'energia da esso emanata non sarà formalmente esatto, ma lo è in buona sostanza.

Per tornare, e limitarci, alla potenza che il Sole invia sulla Terra, cioè $1.74 \cdot 10^{17} \text{ W}$, possiamo confrontarla con quella che l'uomo oggi produce utilizzando fonti di energia non rinnovabili, circa 350 quadrilioni (1 quadrilione = $(10^3)^{4+1} = 10^{15}$) di BTU/anno (1 BTU = 1055 J = 0.252 kcal), ovvero circa 9 miliardi di tep/anno (tep, energia ottenibile dalla combustione di una tonnellata di petrolio, per convenzione = 10^7 kcal), cioè circa 10^{13} W . Si vede allora che l'energia solare in arrivo sulla Terra è 17 500 volte superiore all'energia «artificiale».

L'energia solare in arrivo sulla Terra non può però essere tutta raccolta a livello del suolo. Di essi possiamo descrivere le vicende nel modo seguente:

- potenza in arrivo sulla Terra	1.750 10 ¹⁷ W
- potenza riflessa, prima di giungere sulla superficie terrestre	0.525 10 ¹⁷ W
- potenza netta in arrivo sulla superficie terrestre (circa 1 kW/m ² a perpendicolo) ⁴	1.225 10 ¹⁷ W

Di quest'ultima la sorte è:

- conversione diretta in calore	0.817 10 ¹⁷ W
- evaporazione, pioggia, neve, ecc.	0.404 10 ¹⁷ W
- tutto il resto	0.004 10 ¹⁷ W

Il «resto» è costituito da: correnti convettive marine, venti e onde (3.68 10¹⁴ W), nonché fotosintesi sulla Terra e negli oceani (0.983 10¹⁴ W = 75 10⁹ tep/anno). Quest'ultima voce, benché apparentemente minuscola, è di estrema importanza per l'uomo, perché in virtù di essa e alle sue spalle noi viviamo.

Il mondo vegetale, sotto la cui forma per prima si sprigionò la vita, non ha bisogno, a differenza del mondo animale, di respirare ossigeno. Esso vive di energia solare diretta, mediante la quale, attraverso una sequenza di reazioni molto complesse (la fotosintesi clorofilliana) riesce a convertire due sostanze inerti, l'anidride carbonica (che è nell'aria e nei mari) e l'acqua, in combustibili (nutrienti) e ossigeno: $6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} + \text{energia solare} = \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ O}_2$. L'ultimo termine è l'ossigeno molecolare, che si disperde nell'aria che respiriamo, tonificandola. Il primo termine al secondo membro altro non è che glucosio, lo zucchero di frutta, un carboidrato che è alimento e combustibile. Naturalmente, nella realtà chimico-fisica, le cose non vanno in modo così semplice: si tratta di reazioni estremamente complesse (catalizzate dalla verde clorofilla che impregna le foglie dei vegetali) e quel che si è riassunto sopra è il risultato finale.

Il rendimento di conversione dell'energia solare in biomassa (così è detta la massa della materia vegetale vivente) è dell'ordine dell'1%, ma la quantità annualmente prodotta è tuttavia imponente.

All'energia in arrivo sulla Terra dal Sole dobbiamo aggiungere due ulteriori contributi:

- l'energia gravitazionale (specialmente lunare) che dà luogo alle maree (3 10¹² W);
- l'energia proveniente dal centro caldo della Terra (3.24 10¹³ W).

Si tratta di aggiunte, trascurabili sul piano globale, ma relativamente importanti per l'utilizzazione che ne fa l'uomo.

L'energia solare in arrivo sulla superficie terrestre (suddivisa come sopra descritto) non è immagazzinata nella Terra, altrimenti la temperatura di questa continuerebbe a crescere al ritmo di qualche millesimo di grado all'anno. L'ammontare non è piccolo, tutt'altro. Andando a ritroso lungo l'arco del tempo, ad esempio fermandoci all'atto dell'apparizione dell'uomo (non meno di 500 000 anni fa), la temperatura della Terra doveva essere suppergiù pari al valore medio attuale (che è di circa 15 °C = 288 K) per consentire la vita, ma allora oggi sarebbe mille gradi più alta e noi non saremmo qui a ragionare! La Terra si trova invece, da tempo immemorabile, in equilibrio termico: l'energia in arrivo su di essa è uguale a quella in uscita. Come il Sole, anche la Terra irradia nello spazio, naturalmente come un corpo a 288 K e non già, come il Sole, a 5775 K.

Come viene mantenuto l'equilibrio termico terrestre, nonostante l'enorme differenza di temperatura fra il Sole e la Terra? Grazie al fatto che la Terra riceve energia dal Sole che ci appare come un piccolo disco nello spazio, mentre la Terra irradia verso tutto l'universo. Se mancasse l'apporto del Sole, la superficie della Terra, alimentata dal calore proveniente dal suo interno, si adagerebbe su una temperatura di equilibrio di 30 K (- 243 °C) in lentissima discesa per progressivo raffreddamento.

⁴ Rispetto a questa, la potenza artificiale oggi aggiunta dall'uomo è circa 1/12 000.

L'energia irradiata dalla Terra è della stessa natura di quella irradiata dal Sole. Si tratta di energia elettromagnetica sotto forma di fotoni, cioè globuletti di luce. Quanto maggiore è l'energia della radiazione (cioè «più alto» è il suo colore andando dall'invisibile infrarosso all'altrettanto invisibile ultravioletto), tanto più piccola è la sua lunghezza d'onda o più elevata è la sua frequenza. Infatti, ogni corpo irradia energia su tutte le lunghezze d'onda, addensando però il massimo di emissione verso una lunghezza d'onda preferita, che è legata alla temperatura del corpo da una relazione molto semplice: (lunghezza d'onda in corrispondenza del massimo di densità energetica) \times (temperatura assoluta corrispondente a tale massimo) = costante. Mentre lo spettro solare ha il massimo a 0.6 μm , che corrisponde al colore giallo, lo spettro terrestre lo ha a 0.6 (5775/228) = 12 μm , cioè collocato nel lontano infrarosso, al quale i nostri occhi sono insensibili. Di notte infatti non vediamo, con i nostri occhi, benché speciali apparecchi oggi possano «vedere» tale infrarosso.

In conclusione le energie rinnovabili sono sulla Terra disponibili in quantità così elevata, che la loro scarsa utilizzazione (superiore però a quel che si crede) è dovuta evidentemente ad altri motivi.

La potenza solare che arriva dal sole a perpendicolo è pari a 1 kW/m^2 , ma sulla terra, in realtà, ciò avviene per qualche giorno dell'anno, entro la fascia tropicale, con giornate serene. A latitudini superiori la radiazione solare su una superficie perpendicolare ai raggi del sole deve attraversare uno spessore d'aria superiore, per cui ai poli, a cielo sereno, non supera 0.5 kW/m^2 .

Inoltre il sole ha periodicità diurna, variabile con le stagioni. Lungo la sua corsa incontra strati di atmosfera di spessore variabile, per questa sola ragione un impianto solare produrrebbe durante le ore di sole un'energia che è la metà di quella che produrrebbe alla potenza massima. E poi di notte non produce nulla. Altro inconveniente la casualità: mediamente per il 35% il cielo è oscurato da nubi.

In generale, per solare ed eolico sono necessari impianti convenzionali di riserva per approvvigionare l'energia elettrica che dovrebbe essere prodotta (aumentando fortemente il costo finanziario ed energetico dell'energia elettrica). Sono da poco iniziate ricerche importanti per creare sulla rete elettrica avveniristici grandi sistemi di accumulo (ESS = Energy Storage System) e gruppi di continuità (UPS = Uninterruptible Power Supply), per via elettrochimica (batterie innovative), elettrica (supercondensatori), elettromagnetica (SMES = magneti superconduttori), chimica (idrogeno elettrolitico + celle a combustibile), meccanica (volani con raggi da pochi cm a 3 m, da 1000 a 70 000 giri/min, anche sostenuti per levitazione con elettromagneti a superconduttori) e termica (TES = serbatoi di sali fusi nelle centrali solari a concentrazione), per far fronte alla discontinuità del sole e del vento e permettere di superare in prospettiva il 20% di potenza elettrica prodotta da rinnovabili (il 20%, limite insuperabile per gli attuali sistemi di controllo potenza-frequenza di rete, è l'obiettivo fissato dall'Unione Europea per il 2020).

Con 1 kW/m^2 , 1 m^2 di superficie attiva di un impianto solare riceverebbe in Italia mediamente un'energia pari a 1200 kWh in un anno (su 8760 ore/anno), ma tenendo conto del rendimento con cui l'energia solare viene trasformata in energia elettrica con la tecnologia attuale potrebbe produrre solo 150 kWh elettrici.

Se tutta l'energia elettrica in Italia si producesse, per assurdo, con il solare «avanzato», cioè tecnologicamente ipotizzabile ma non ancora attuale, sarebbero necessari 1500-2000 km^2 di superficie attiva e il suo costo sarebbe 30 volte quello attuale.

Le fonti quasi inesauribili

Energie quasi inesauribili sono qui definite le fonti primarie, la cui durata, al livello dei consumi attuali, si misuri in tempi lunghi rispetto alla durata della civiltà neolitica (comparsa circa 10 000 anni fa). Preoccuparsi del loro esaurimento sembra infatti eccessivo: dalla prudenza si scivolerebbe nel ridicolo. Tali fonti primarie sono tutte di origine extrasolare e si possono raccogliere sotto quattro categorie diverse:

- calore endogeno;
- utilizzazione autofertilizzante dell'energia nucleare di fissione;
- utilizzazione autofertilizzante dell'energia nucleare di fusione;
- utilizzazione non autofertilizzante dell'energia nucleare di fusione.

Calore endogeno

La prima categoria è stata già accennata, parlando delle energie rinnovabili, ma non è una energia rinnovabile ed è in questo paragrafo che ne tratteremo più a lungo. Si è visto che il calore affiorante dal centro caldo della Terra verso la crosta terrestre è pari a 3.24×10^{13} W (circa 1/15 di W/m^2). La sua manifestazione più vistosa è la presenza di un gradiente termico sulla crosta terrestre (cui contribuisce anche l'energia liberata dal materiale radioattivo naturale, di cui la stessa crosta è imbevuta). Tale gradiente è pari a 3 gradi ogni 100 metri di profondità.

Ciò significa che, mediamente, la temperatura, rispetto a quella superficiale, sarà superiore di 30 gradi alla profondità di 1000 metri e di 300 gradi a 10 000 metri. Attualmente, a scopo conoscitivo, nella Russia e in Svezia si stanno perforando pozzi con l'obiettivo di raggiungere i 15 000 metri (nella penisola di Kola si sono già superati i 12 500). Se consideriamo un parallelepipedo avente sulla superficie terrestre la base di un chilometro quadrato e la profondità di un chilometro, la quantità di calore in esso contenuta, a temperatura superiore alla temperatura ambiente, è pari a quella che sarebbe sviluppata da 3.75 milioni di tonnellate di petrolio.

Scienziati illustri si sono rovinati la reputazione esaltando questa uguaglianza. Anche tenendo conto che, di tale calore, molta parte è anergia e dando quindi valore solo al contenuto exergetico, si arriva pur sempre a poco meno di 100 000 tep. La cifra sembra ancora impressionante, salvo che, diluita in un miliardo di metri cubi, si immiserisce poi a 100 gep/m³ da estrarre (una tantum) a centinaia di metri di profondità, se pur ci si riesce. Ciò mette in evidenza quanto sia mitica la fonte energetica geotermica, volendo sfruttare il gradiente termico ordinario.

Viceversa, là dove ci siano anomalie termiche rilevanti sulla crosta terrestre, ed esistano giacimenti di acque calde e pressurizzate, o meglio ancora caverne a vapore dominante, questi punti anomali possono essere considerati fonti preziose e pressoché perenni di energia termica, purché esse siano sfruttate con la dovuta cautela, non vengano cioè «munte» al di là delle condizioni che consentono al flusso di calore circostante di convergere dalle rocce vicine per mantenere caldo il giacimento nonostante il suo sfruttamento.

Ben più arduo si presenta lo sfruttamento dell'energia geotermica imprigionata nelle rocce calde e secche. Anche in questo caso si deve essere in presenza di una forte anomalia termica, cioè di un addensamento verso la superficie terrestre delle isoterme ipogee. Ma penetrare entro di esse, frantumarle (con pressione idraulica o esplosivi) e lavarle poi con acqua fredda che al loro contatto diviene calda o vaporizza, è stato sì, realizzato sul piano tecnico, ma sembra inaccettabile sul piano economico. In conclusione la geotermia, cercando con cura i giacimenti termici adatti, potrà offrire una fonte primaria quasi inesauribile nel tempo, di temperatura e quindi di qualità diversa, ammontante forse potenzialmente a qualche centinaio di milioni di tep all'anno.

Energia da fissione autofertilizzante

L'utilizzazione autofertilizzante dei combustibili fissili (cioè dell'energia nucleare da fissione) si basa su principi estremamente semplici. Si dicono *fissili* gli elementi del sistema periodico i cui nuclei, se percossi da un neutrone, si scindono in due parti, fra loro non molto diverse e animate da velocità elevatissime. L'energia cinetica dei due frammenti di fissione (e di altre forme minoritarie di corpuscoli, che da essa si liberano) è così elevata che per ogni grammo *fissilizzato*, la quantità di energia liberata è pari a 1 MWd (1 megawattgiorno). Questa inconsueta unità di energia è riducibile a unità più abituali: 1 MWd = 24 MWh (megawattora) = 24 000 kWh (chilowattora) = 24 000 x 860 ($\frac{\text{kcal}}{\text{kWh}}$, chilocalorie per chilowattora) = 20 000 000 kcal = $2 \cdot 10^7 \times 4.2 \cdot 10^3 \left(\frac{\text{J}}{\text{kcal}}\right) = 8.4 \cdot 10^{10} \text{ J}$.

Poiché un grammo di petrolio ha un potere calorifico di 10 kcal, il rapporto fra il potere calorifico di un combustibile fissile e quello del petrolio è pari a 2 milioni.

La reazione di fissione si può scrivere, in analogia con le reazioni chimiche, nel modo seguente: elemento fissile + 1 neutrone = 2 prodotti di fissione + circa 2.5 neutroni + altri prodotti residui + energia cinetica con cui i prodotti sono espulsi.

Gli elementi fissili si formarono alcuni miliardi di anni fa, quando nelle molte galassie si ebbero contrazioni e successive esplosioni di stelle, (fenomeno che continua sporadicamente), le cosiddette *supernove*, al centro delle quali vennero raggiunte condizioni di temperatura e pressione tali da consentire la sintesi di elementi pesanti (torio, uranio) partendo da elementi di massa intermedia.

Come è noto, la molecola è la più piccola suddivisione di una sostanza che ne mantenga le proprietà (acqua, ossigeno, propilene, metano, urea e così via, per milioni e milioni di combinazioni diverse). Ma la molecola (di cui si contano appunto milioni di specie) è un organismo composito, costituito da accoppiamenti e configurazioni diverse di atomi (che tuttavia non sono più di un centinaio). Ogni atomo consiste di tre mattoni essenziali: neutroni (particelle di massa pari a $1.66 \cdot 10^{-24} \text{ g}$ e privi di carica elettrica), protoni, di massa eguale a quella dei neutroni (a meno di una impercettibile differenza), ma dotati di carica elettrica positiva ($+1.6 \cdot 10^{-19} \text{ coulomb}$) ed elettroni, che hanno massa piccolissima (1/1840 di quella del protone) e carica numericamente eguale a quella del protone, ma negativa ($-1.6 \cdot 10^{-19} \text{ coulomb}$). Gli elettroni, in ugual numero dei protoni, cosicché l'atomo risulta elettricamente neutro, avvolgono, come in una nuvola, i neutroni e i protoni che sono confinati nel nucleo, di dimensioni esigue rispetto all'atomo stesso (1/100 000).

Nel nucleo protoni e neutroni sono fra loro fortemente abbracciati, con forze milioni di volte più potenti di quelle dei legami chimici (dove l'enorme differenza nella tonalità termica delle reazioni nucleari, rispetto a quelle atomiche o molecolari).

Il fato ha voluto che in natura esista oggi un solo nucleo fissile, appartenente all'elemento uranio, l'ultimo (il novantaduesimo) degli elementi esistenti in natura (alcuni altri sono stati recentemente prodotti dall'uomo in modo artificiale).

Il nucleo di uranio è caratterizzato dall'aver una carica elettrica pari a 92 volte quella del protone, il che significa che in esso sono contenuti 92 protoni (il numero dei protoni nel nucleo è detto *numero atomico*), mentre il numero dei neutroni, superiore a quello dei protoni, può essere variabile. Accade così che l'elemento uranio, come lo si trova in natura, sia formato da due *isotopi* («isotopo» è sinonimo di «variante») dell'uranio, entrambi con 92 protoni nel nucleo, ma l'uno con 143 neutroni, l'altro con 146. E poiché la somma della massa dei neutroni e dei protoni è la massa del nucleo, la massa del nucleo dei due isotopi dell'uranio è rispettivamente di 235 e 238 masse protoniche (o neutroniche). Il tutto si riassume in simboli, dicendo che l'uranio naturale è composto per lo 0.71% di ${}_{92}^{235}\text{U}$ e per il 99.29% di ${}_{92}^{238}\text{U}$: così la natura ha voluto che oggi meno dell'1% dell'uranio sia costituito da un nucleo fissile e che questo sia l'unico sopravvissuto. Ho scritto *oggi*, perché l' ${}_{92}^{235}\text{U}$ (detto anche U 235) non è un nucleo stabile, ma radioattivo (per emissione di raggi α , cioè di nuclei di elio) con tempo di dimezzamento di 700 milioni di anni, mentre l' ${}_{92}^{238}\text{U}$ (detto anche U 238) lo è con tempo di dimezzamento di 4.5 miliardi di anni. *Il tempo di dimezzamento* è

quello che deve intercorrere, perché la quantità dell'isotopo in questione si riduca a metà, per via della sua consunzione radioattiva. E quindi, ad esempio, 2100 milioni di anni fa l'U 235 era in quantità 8 volte superiore rispetto a oggi, mentre l'U 238, essendo trascorso meno della metà del suo tempo di dimezzamento, era appena 1/3 in più del valore attuale. Applicando la necessaria ma elementare aritmetica, si conclude che 2100 milioni di anni fa le proporzioni di U 235 e U 238 erano rispettivamente il 4.1% (anziché lo 0.7%) e il 95.9% (anziché il 99.29%). Un uranio di tal fatta, come vedremo più oltre, è suscettibile di generare con relativa facilità una reazione nucleare a catena: con facilità tale che essa si è verificata in natura più di due miliardi di anni fa nel Gabon, dove vent'anni fa, ne furono trovate le tracce (sotto forma di residui di prodotti di fissione).

Ma, per tornare al nostro problema, si può concludere in sintesi che la bassa percentuale di U 235 è oggi un grave ostacolo alla creazione di condizioni adatte per l'innescò e lo sviluppo di una reazione nucleare a catena, cosicché ci si semplifica la vita arricchendo l'uranio naturale in U 235, con procedimenti tecnologicamente molto complessi. I reattori nucleari oggi in funzione operano quasi tutti con uranio mediamente arricchito al 3% in U 235.

L'obiezione che sorge spontanea, considerando la precedente reazione di fissione (formalmente non dissimile da una reazione chimica), è che, mentre l'uranio esiste, i neutroni non esistono liberi in natura. Si pensi, per fare un confronto, alle reazioni chimiche di combustione: disponendo del combustibile, il comburente (cioè l'ossigeno) è liberamente disponibile nell'aria. L'affermazione che non esistono in natura neutroni liberi non è però esatta: i neutroni piocono sulla Terra dagli spazi celesti, al ritmo di uno per centimetro quadrato e per secondo. Una volta che sia stata accumulata una sufficiente massa reattiva, il neutrone per innescarla si trova nell'ambiente. La domanda però è: dove trovare i neutroni, indispensabili per proseguirla? Come si è già visto, i prodotti della reazione comprendono, oltre ai due frammenti di fissione e ad altri residui, anche 2.5 neutroni (cioè 2 o 3 o 4 o 1 o 5 neutroni per reazione, in numero tale che, su una casistica abbastanza elevata di reazioni, ve ne siano in media due e mezzo). Nella massa reagente, per ogni neutrone che vi impinge dall'esterno, ne nascono 2.5 all'interno, moltiplicandosi in modo esponenziale, cioè rapidamente esplosivo, se non si provvede con mezzi opportuni a ridurre i neutroni in sovrabbondanza: quel neutrone e mezzo che supera il fabbisogno indispensabile per continuare la reazione.

Per meglio dire, sarà necessario far divergere (cioè moltiplicare) la reazione fino al livello di potenza voluto, dopo di che essa dovrà essere stabilizzata.

Consideriamo un reattore nucleare (di quelli tradizionali, ad acqua in pressione), avente potenza pari a 1 milione di chilowatt elettrici, cioè 3 milioni di chilowatt termici, cioè 3 miliardi di watt, cioè ancora 3 miliardi di joule al secondo). Ogni grammo di combustibile che si fissiona genera, come abbiamo visto, 1 MWd. Con semplice aritmetica (ricordandosi che in una grammoatomo di una sostanza, 235 g per U 235, c'è il numero di Avogadro, $0.6 \cdot 10^{24}$, di atomi, quindi di nuclei) si vede che ciò corrisponde approssimativamente a $3.2 \cdot 10^{-11}$ joule/fissione. Ogni secondo il numero di neutroni necessario per attivare le richieste fissioni è dato da

$$\frac{3 \cdot 10^9}{3.2 \cdot 10^{-11}} \frac{J/s}{J/fissione} = \text{circa } 10^{20} \text{ fissioni/s.}$$

Ma, dal momento in cui nasce per fissione, al momento in cui muore per indurre un'altra fissione, il neutrone vive circa 20 milionesimi di secondo ($2 \cdot 10^{-5}$ s): è questa l'attesa di vita per una generazione di neutroni. In ogni generazione vi saranno $10^{20} \times 2 \cdot 10^{-5} = 2 \times 10^6 \times 10^9 = 2$ milioni di miliardi di neutroni, un numero che può sembrare enorme, ma non inafferrabile (constatando, ad esempio, che il prodotto interno lordo italiano si aggirava nel 1988 sul milione di miliardi di lire). Orbene, in un reattore come quello sopra citato, in regime stazionario (come si dice quando si vuole indicare che il livello di potenza non varia nel tempo), a una generazione di $2 \cdot 10^{15}$ neutroni attivi per indurre fissioni ne devono seguire, dopo una generazione, cioè dopo $2 \cdot 10^{-5}$ s, altri $2 \cdot 10^{15}$ e così via. Quelli in eccesso vanno eliminati. Una parte si elimina da sé: assorbiti in materiali strutturali, assorbiti dallo stesso U 235 senza dar luogo a fissione (ciò avviene, mediamente, 1 volta su 6), assorbiti negli atomi (specialmente di idrogeno) che compongono l'acqua, in parte infine assorbiti

nell'U 238, che non è fissile. I neutroni assorbiti nell'U 238 (che, anche in un reattore in cui l'uranio sia arricchito al 3%, rappresenta pur sempre il 97% dell'uranio presente nel combustibile) fanno fare a quest'ultimo una fine singolare:

U 238 + neutrone = U 239 (instabile con vita media di 23 minuti) + β^- = Np 239 (nettunio 239, instabile con vita media di 2.3 giorni) + β^- = Pu 239 (plutonio 239, instabile con vita media di 24 000 anni, cioè praticamente stabile agli effetti di una utilizzazione industriale). Il simbolo β^- indica l'emissione (spontanea) di un elettrone, detta anche emissione beta.

La corsa in avanti dell'U 238 si arresta dunque al Pu 239. E che cosa è il Pu 239? Esso andrebbe scritto ${}_{94}^{239}\text{Pu}$, e rappresenta un nuovo elemento, non più esistente in natura, nel cui nucleo sono 94 protoni e $239 - 94 = 145$ neutroni. Mentre la massa iniziale (l'uranio e il neutrone da esso ingerito) è pari a 239 ed è rimasta costante, l'emissione dal nucleo di una radiazione beta (cioè di un elettrone, che ha una carica negativa) ha fatto crescere di un'unità la carica positiva del nucleo, salita a 93 (numero atomico del nettunio), cioè ha fatto salire a 93 il numero dei protoni, mentre il numero di neutroni, già pari a 147 (il numero di neutroni esistenti nel nucleo di U 238 più il neutrone assorbito) è sceso a 146. Un analogo fenomeno si ripete con il nettunio: si ripete, cioè, un'altra emissione beta, che fa salire a 94 il numero atomico (plutonio) e scendere a 145 il numero dei neutroni. Ciò non avrebbe importanza, se non fosse per il fatto che il Pu 239, essendo dotato di caratteristiche nucleari molto simili a quelle dell'U 235, va classificato come elemento fissile, sia pure artificiale. Esso si forma in seno al reattore e compensa in parte, nascendo a spese dell'U 238, il consumo di U 235, che è il vero combustibile. L'U 238, che combustibile non è, ma che l'aggiunta di un neutrone trasforma dopo breve vita travagliata in un altro elemento fissile, è detto elemento o isotopo *fertile*. Possiamo affermare che, se il neutrone assorbito da un nucleo di U 238 dà luogo esattamente a un nucleo di Pu 239 (ed equiparando per semplicità le proprietà fissili di quest'ultimo a quelle dell'U 235), il combustibile bruciato viene esattamente compensato dal combustibile nuovo, formatosi a spese dell'U 238. In tal caso ciò che brucia non è il *solo* U 235, ma anche l'U 238 che, nell'elemento quale si trova in natura, è 140 volte più abbondante dell'U 235.

Nei normali reattori, giunti alla maturità industriale da almeno quattro decenni e oggi responsabili della produzione del 6.6% dell'energia totale e del 17% dell'energia elettrica prodotte annualmente nel mondo, per ogni nucleo di U 235 bruciato, si ha formazione di 0.6 nuclei di plutonio: tali reattori non sono perciò *autofertilizzanti*.

Ma esiste una categoria di reattori, quelli detti appunto autofertilizzanti, nei quali la produzione di nuovo fissile avviene addirittura a un ritmo superiore alla consunzione del fissile originario. Di reattori di quest'ultimo tipo ne esiste nel mondo una ventina, di varia potenza, la minima di pochi megawatt, la massima rappresentata dal SuperPhénix, che era capace di produrre 1.2 milioni di chilowatt elettrici (costruito in Francia e ubicato presso Lione).

Per valutare le risorse di combustibile nucleare, se utilizzate nella variante autofertilizzante, si può fare riferimento alla disponibilità di uranio esistente nel mare. In esso sono contenuti circa 3 miliardi di tonnellate di uranio alla concentrazione media di 1÷2 ppb (parti per miliardo, in peso). Peraltro i fiumi trasportano ogni anno decine di migliaia di tonnellate di uranio dilavato dai continenti, cosicché l'estrazione dal mare di una quantità uguale non ne altererebbe la concentrazione.

Ma, innanzitutto, è economicamente utilizzabile tale uranio? Le miniere di uranio oggi sfruttate forniscono concentrati di ossido di uranio al costo di 500 \$ per kg di combustibile⁵. L'estrazione di

⁵ **Uranium Information Centre Ltd**, A.C.N. 005 503 828, GPO Box 1649N, Melbourne 3001, Australia
phone (03) 9629 7744, fax (03) 9629 7207, Email: uic@mpx.com.au, URL - <http://www.uic.com.au>
The Economics of Nuclear Power, Nuclear Issues Briefing Paper 8, November 2006:

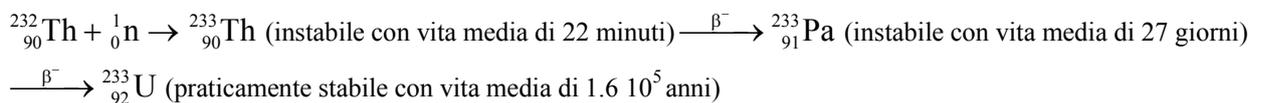
uranio dal mare è stata messa a punto, dal punto di vista tecnologico, su impianti pilota fin dagli anni cinquanta, concludendo che l'estrazione potrebbe avvenire a un costo dieci volte maggiore di quello che si affronta nelle miniere attualmente operanti, cioè 5000 \$/kg, circa 4000 €/kg, il costo di combustibile per generare 1 kWh di energia elettrica risulterebbe di 2 cents, per un rendimento di conversione fra energia elettrica ed energia termica eguale a 0.334, e porterebbe il costo totale del kWh prodotto con impianti nucleari non autofertilizzanti da 3.5-5 c\$ a 5-6.5 c\$ (sistemazione definitiva delle scorie inclusa). Il costo del combustibile nucleare risulterebbe ancora inferiore al costo attuale del carbone (il più economico dei combustibili fossili) e il maggior costo di costruzione degli impianti nucleari autofertilizzanti sarebbe più che compensato dai costi di sequestro della CO₂ nei futuri impianti a combustibile fossile (il costo dell'energia elettrica via fonti rinnovabili non è ad oggi competitivo, eccetto che per l'idroelettrico e il geotermico).

Accertato perciò che, al limite, persino l'uranio contenuto nel mare è un combustibile economicamente accettabile per i reattori autofertilizzanti, si tratta di valutarne il fabbisogno. Se esso dovesse sopperire a una richiesta annua di 10 miliardi di tep, (superiore, di poco, al consumo mondiale attuale di ogni forma di energia = 9.6 miliardi di tep), dato il rapporto dei poteri calorifici (2 milioni a uno, a favore del combustibile nucleare), l'uranio naturale annualmente richiesto sarebbe pari a

sarebbe pari a $\frac{10 \cdot 10^9 \text{ tep}}{2 \cdot 10^6 \text{ tep}/t_U} = 5000$ tonnellate di uranio all'anno. Ecco che l'uranio affluente nel

mare con le acque dei fiumi basterebbe a sostituire assai più dell'attuale fabbisogno di energia primaria per un tempo indefinito. Considerando invece di sfruttare 1/3 dell'uranio del mare al ritmo di 10 000 tonnellate all'anno, trascurando l'apporto dei fiumi, la risorsa basterebbe per 100 000 anni.

Un'ulteriore riserva di combustibile nucleare di enormi proporzioni è offerta dal torio. Questo elemento naturale è costituito da una sola variante (o isotopo): $^{232}_{90}\text{Th}$. Il torio può essere introdotto in reattori termici, simili a quelli attuali. E anch'esso, attraverso un processo di fertilizzazione analogo a quello cui può essere sottoposto l'U 238, dà luogo ad un elemento fissile analogo all'U 235, che è l'U 233 (per l'esattezza $^{233}_{92}\text{U}$):



Accumulata perciò una carica iniziale di U 233, si può innescare fra questo e il Th 232 un processo di autofertilizzazione analogo a quello che si può stabilire fra il Pu 239 e l'U 238. Quanto all'abbondanza del torio sulla terra essa è circa tripla di quella dell'uranio, mentre la sua localizzazione quasi coincide con quella dell'uranio. In conclusione le riserve di combustibili nucleari fissili, utilizzate in modo autofertilizzante, sono incalcolabili.

Uranium has to be processed, enriched and fabricated into fuel elements. At least three quarters of the fuel cost is due to enrichment and fabrication. Allowances must then be made for the management of radioactive spent fuel and the ultimate disposal of this spent fuel or the wastes separated from it. The US \$ cost to get 1 kg of reactor fuel:

U₃O₈: 8.9. kg x \$52 (two thirds of current spot price: 108) = 463 (961)

conversion [dagli ossidi del minerale all'esfluoruro di uranio]: 7.5 kg U x \$12 = 90

enrichment: 7.3 SWU x \$134 = 978. The capacity of enrichment plants is measured in terms of 'separative work units' or SWU. The SWU is a complex unit which is a function of the amount of uranium processed and the degree to which it is enriched, ie the extent of increase in the concentration of the U-235 isotope relative to the remainder. The unit is strictly: Kilogram Separative Work Unit, and it measures the quantity of separative work (indicative of energy used in enrichment) when feed and product quantities are expressed in kilograms. The unit 'tonnes SWU' is also used. For instance, to produce one kilogram of uranium enriched to 3% U-235 requires 3.8 SWU if the plant is operated at a tails assay 0.25%, or 5.0 SWU if the tails assay is 0.15% (thereby requiring only 5.1 kg instead of 6.0 kg of natural U feed).

fuel fabrication, per kg: = 240

total: = US\$ 1770 (2286)

This yields 3400 GJ [G, giga da γίγας, gigante, = 10⁹] thermal which gives 315 000 kWh, hence fuel cost: 0.57 (0.72) c/kWh. Nonetheless with these costs included, the total fuel costs of a nuclear power plant in the OECD are typically about one-third of those of a coal-fired plant and about one-quarter to one-fifth of those of a gas combined-cycle plant.

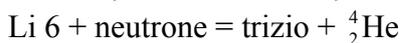
Energia da fusione autofertilizzante

Rispetto all'energia di fissione, che ha raggiunto la maturità industriale per la versione non autofertilizzante (mentre per la versione autofertilizzante, essa è tecnologicamente a punto, ma economicamente non ancora competitiva), l'energia di fusione presenta il grave interrogativo iniziale di non essere stata ancora fisicamente dimostrata. E' questione di qualche anno - o di pochi anni - dicono gli specialisti; ma è altrettanto vero che, a mano a mano che ci si avvicina alla attesa dimostrazione, difficoltà inaspettate sempre più gravi si frappongono alla verifica. La reazione nucleare che si vuole realizzare è la seguente: deuterio (isotopo due volte più pesante dell'idrogeno) + trizio (isotopo tre volte più pesante dell'idrogeno) = elio + neutrone + energia. In simboli:



Tale energia si manifesta sotto forma di energia cinetica dei prodotti di reazione (elio e neutrone). Il potere calorifico della reazione (cioè l'energia liberata a parità di massa) è 4.2 volte superiore a quella delle reazioni di fissione: non, perciò, 2 milioni di volte quella del petrolio, ma 8.4 milioni di volte. Quanto alle materie prime, il deuterio è disponibile in quantità pressoché illimitata: un settemillesimo (1/7000) dell'idrogeno esistente sulla Terra, in particolare quello in combinazione con l'ossigeno sotto forma di acqua, è costituito da deuterio. Ci risparmiamo perciò la fatica di calcolare quanto deuterio ci sia nel mare, perché ne risulterebbe un ammontare spropositato. Per quel che riguarda il costo di estrazione, un valore approssimativo può essere considerato 500 000 L/kg. Una tonnellata di petrolio (che costa $10 \div 25$ \$/barile $\approx 140\,000 \div 350\,000$ L/t; 1 barile = 42 US galloni ≈ 159 litri; densità media ≈ 0.9 kg/l⁶) può essere sostituita, dato il rapporto fra i poteri calorifici, con una piccola frazione di grammo di deuterio, che vale poche decine di lire. Il deuterio va quindi considerato, oltre che disponibile in quantità illimitata, anche gratuito.

Quel che manca è il trizio, che ha nucleo radioattivo beta con un tempo di dimezzamento di 12 anni; quindi, se pur esisteva ai primordi dell'universo, fin da quei primordi è sparito. Intorno alla Terra ce n'è un paio di grammi, formati dall'interazione della radiazione cosmica con l'alta atmosfera: continuamente autodistrutto per decadimento radioattivo e continuamente riprodotto. E allora? L'elemento determinante per produrre il trizio è il litio. Esso è un elemento leggero, costituito in natura dagli isotopi ${}^6_3\text{Li}$ (Li 6; 7,5% del litio naturale) e ${}^7_3\text{Li}$ (Li 7; 92,5% del litio naturale). Utilizzando i neutroni della reazione di fusione (pressappoco come si fa nei reattori a fissione autofertilizzanti), dalle reazioni di questi con il Li 6, che presenta elevate capacità di cattura dei neutroni e, in minor misura, con il Li 7, si ottiene il seguente risultato:



La prima delle due reazioni è esotermica; la seconda, che offre il vantaggio di produrre trizio senza consumare neutroni, è però endotermica.

Uno dei prodotti della reazione (il neutrone) fornisce dunque, attraverso la fertilizzazione del litio, trizio in quantità sufficiente per alimentare la reazione di base. La disponibilità dell'energia da fusione è perciò legata alla quantità di litio esistente sulla Terra a costi accettabili. E tale quantità è paragonabile a quella dell'U 238. Ciò significa che, comunque, anche la reazione di fusione autofertilizzante è senz'altro classificabile come fonte di energia quasi inesauribile. Si può pertanto concludere che tanto la fissione autofertilizzante quanto la fusione deuterio-trizio sono fonti primarie di energia, sufficienti per centinaia di migliaia di anni, ai valori di consumo attuali e anche notevolmente superiori. Ma è un marchiano errore o, peggio, un imbroglio, sostenere che l'energia

⁶ **API Gravity:** An arbitrary scale expressing the gravity or density of liquid petroleum products, as established by the American Petroleum Institute (API). The measuring scale is calibrated in terms of degrees API. The higher the API gravity, the lighter the compound: 45 °API = 0.8 kg/l, 10 °API = 1 kg/l. Light crude oils generally exceed 38 degrees API and heavy crude oils are commonly labeled as all crude oils with an API gravity of 22 degrees or below. Intermediate crude oils fall in the range of 22 degrees to 38 degrees API gravity.

di fusione ci viene dal mare: essa viene dal litio, per quanto riguarda la reazione $D + T$; e le risorse del litio sono ben minori di quelle del deuterio.

Si è già detto che la verifica fisica dell'ignizione (o accensione) della miscela $D + T$ in maniera controllata non è stata ancora acquisita (lo è stata, dal 1952, l'accensione incontrollata, usando come innesco una bomba atomica a fissione: in questo è consistita l'invenzione della bomba H). Perché l'accensione controllata sia raggiunta bisogna soddisfare contemporaneamente a due condizioni:

1. densità della miscela esplosiva in nuclei/cm³ (n) x durata della reazione in secondi (τ) > (maggiore di) $5 \cdot 10^{14}$ (condizione di Lawson);
2. la prima condizione deve essere conseguita contemporaneamente al raggiungimento di una temperatura di circa 100 milioni di gradi (se centigradi o assoluti poco importa).

Per contenere una simile temperatura, le pareti del contenitore debbono essere molto speciali, perché un contenitore materiale è chiaramente inconcepibile. Un tipo di contenimento molto studiato è di tipo magnetico: le particelle (nuclei ed elettroni, in quantità tale da rendere elettricamente neutro il plasma, ma sciolti dai legami reciproci a causa dell'enorme temperatura) sono contenute in un preciso volume geometrico mediante un potentissimo e invisibile campo magnetico, creato dall'esterno con l'impiego di enormi correnti elettriche. La prima parete materiale (una parete di acciaio speciale) non è perciò sottoposta all'urto delle caldissime particelle cariche, che sono immerse nel plasma (deuterio, trizio ed elio 4), mentre i neutroni, che sono l'altro prodotto della reazione, attraversano la parete materiale senza distruggerla. Il tubo materiale è percusso oltre che, in piccola misura, dai neutroni fuoriuscenti, dall'energia radiante, che emana dalla sorgente a 100 milioni di gradi a sua volta contenuta entro il campo magnetico, che però non è impermeabile all'energia radiante. Si tratta di energia elettromagnetica nel campo dei raggi X duri, che non riscalda però apprezzabilmente il tubo, purché di dimensioni adeguate alla potenza che deve contenere e sufficientemente refrigerato da litio liquido che ha il compito di estrarre il calore prodotto e produrre il trizio necessario a sostenere la reazione.

La reazione $D + T$ può essere innescata anche in condizioni diverse da quelle sopra descritte. Ferma restando la temperatura, la condizione di Lawson può essere soddisfatta, riducendo il tempo di durata della reazione a 10^{-10} secondi (in tal caso siamo in presenza di un'implosione-esplosione tipo microbomba H) e aumentando la densità da 10^{14} a $5 \cdot 10^{24}$ nuclei/cm³. Deuterio e trizio solidi (a temperatura di pochi gradi superiore allo zero assoluto) contengono circa $0.4 \cdot 10^{23}$ nuclei/cm³. Quindi, per operare in questo secondo modo, bisogna raggiungere densità della materia circa 100 volte maggiore della densità della materia a pressione e temperatura ordinarie, mentre invece la temperatura è di 100 milioni di gradi.

E per comprimere la materia in tale misura ci vogliono pressioni incredibili. Per farsene un'idea si può osservare che, sottoponendo l'acqua a una pressione di 50 000 atmosfere, se ne riduce il volume a metà; ma a noi occorre un effetto enormemente maggiore: si parla infatti di mille miliardi di atmosfere. La possibilità intravista (e sperimentata su piccola scala) consiste nel far pervenire sulla superficie del combustibile (sotto forma di sferule gelate di miscela $D + T$) parecchie improvvise e simultanee vampate di energia, così da eiettare parte della materia sotto forma di plasma caldissimo a raggiera verso l'esterno. Il nocciolo della sferula (per rinculo, cioè per reazione su se stessa) si raggrinzisce fino a raggiungere le dimensioni volute (da 1/10 a 1/20 del diametro iniziale). Le vampate di energia richieste sono fornite da una moltitudine di potentissimi laser (o anche di macchine generatrici di fasci di ioni pesanti) disposti sfericamente intorno alla cavità (anch'essa di forma sferica), in cui avviene la microesplosione.

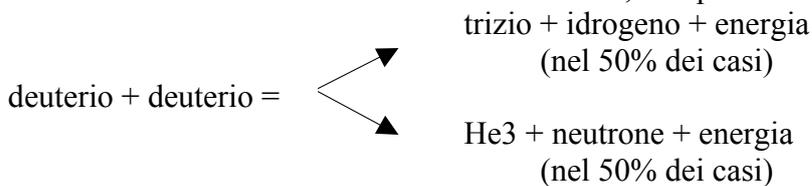
E' una microesplosione *sui generis*. Supponiamo infatti che la sferula gelata abbia un diametro di 1 mm, cioè un volume di 0.5 mm^3 , cui corrisponde una massa di 0.175 mg di soluzione solida $D + T$. Dato il potere calorifico di questa, si ha: $0.175 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \times 10^4 \text{ kcal/kg}$ (potere calorifico del petrolio) $\times 8.2 \cdot 10^6$ (rapporto fra il potere calorifico del combustibile di fusione e quello del petrolio) = circa $1.5 \cdot 10^4 \text{ kcal} = 15 \text{ 000 kcal}$ (equivalenti a più di 10 kg di tritolo).

Il tutto si svolgerebbe con sequenza da mastodontico motore a scoppio. Una centrale da 1 milione di chilowatt elettrici e quindi 3.3 milioni di chilowatt termici (ammettendo un rendimento

del 30%) richiederebbe una cadenza di poco meno di 60 esplosioni al secondo, tipiche di un motore a scoppio lento o di un motore diesel veloce. La camera di scoppio non potrebbe essere inferiore a qualche centinaio di metri cubi. Anche in tal caso è necessaria la refrigerazione della camera con litio liquido. Come si vede, si tratta di tecnologie molto diverse da quelle del contenimento magnetico, ma anch'esse di difficoltà eccezionali. Concludiamo pertanto questa fulminea esposizione sulla natura e le difficoltà della reazione di fusione più semplice (D + T), da usare come fonte energetica primaria, per concludere che essa va sperata in prospettiva secolare, se la fortuna ci assisterà.

Utilizzazione non autofertilizzante dell'energia di fusione

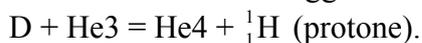
La necessità di rigenerare in continuità il trizio necessario alla reazione D + T mediante il litio può essere evitata utilizzando altre reazioni di fusione, non più autofertilizzanti. La più semplice è:



In questo caso il potere calorifico è circa uguale a quello della fissione (due milioni di volte maggiore del petrolio), ma la materia prima (deuterio) stavolta è tutta estraibile dall'acqua del mare.

Tuttavia la temperatura alla quale si deve confinare il plasma, nel caso del confinamento magnetico, è molto superiore a 100 milioni di gradi (circa un miliardo di gradi), con le ulteriori enormi difficoltà che ciò comporta e il prodotto $n\tau$ deve essere superiore a 10^{15} . Allo stato attuale delle conoscenze, benché la reazione D + D non possa considerarsi un miraggio (perché il fenomeno è reale), la sua realizzazione fisica e tecnologica è rimandata a un tempo nebuloso e imprevedibile. Di valutazioni economiche non è neppure il caso di parlare. Vale però la pena di dire qualcosa di più su tale reazione, per un ulteriore motivo. L'accusa fatta dagli «schizzinosi» alla reazione di fusione (D + T) è che essa si estrinseca nella produzione di neutroni (uno per ogni singolo atto di fusione, responsabile inoltre di portarsi seco l'80% dell'energia della reazione). La produzione di neutroni dà luogo a non piccoli «inconvenienti» ecologici. Nella reazione (D + D), invece, un neutrone è prodotto ogni due reazioni. Poiché però la reazione (D + D) - quella che viene dall'acqua del mare - è cinque volte meno esotermica della (D + T), i neutroni prodotti, a parità di energia liberata, sono più del doppio di quelli prodotti nella (D + T). Di tali neutroni, solo pochi reagiscono col deuterio per formare trizio e complicare la reazione, mentre i più fuoriescono dal campo magnetico, cui sono insensibili, attraverso la parete materiale e devono essere rallentati ed eliminati in qualche modo.

Una reazione fra nuclei leggeri esente da neutroni sarebbe la seguente:



Senza citare le severissime condizioni (di temperatura e di valore di $n\tau$) affinché essa possa aver luogo, taglia la testa al toro la constatazione che di He3 (elio 3) in natura non ne esistono quantità apprezzabili. Nell'aria che circonda la Terra vi sono 25 miliardi di tonnellate di elio (concentrazione in aria di 5 parti per milione, in massa). Ma l'He3 è contenuto nell'elio dell'aria, a sua volta, alla concentrazione di 1.3 ppm (parti per milione), cosicché tutto l'He3 esistente nell'atmosfera si riduce a 32 000 tonnellate. Il costo di estrazione sarebbe folle, e ad estrarne 1/10 esso darebbe un contributo di 50×10^9 tep. Sarebbe cioè una fonte costosissima e non rinnovabile.

L'altra fonte di He3 è costituita dall'elio contenuto in taluni getti di gas naturale (fino al 7% per qualche pozzo del Texas). Si tratta di eccezioni ed è noto che l'elio terrestre (cioè non atmosferico) contiene He3 a concentrazione dieci volte più bassa di quello dell'aria. Anche ammettendo che tutto il gas naturale estratto nel mondo contenesse l'1% di elio, l'He3 in esso contenuto fornirebbe un'energia pari all'1 o al 2% di quella fornita dal gas naturale da cui è estratto.

Resta allora, unica fonte di energia di fusione, illimitata ed esente da neutroni, cioè «pulita», la seguente:



(80% di quella di fissione per grammo reagente)

Basta che $n\tau$ sia maggiore di 10^{16} e T superiore a 2 miliardi di gradi!

Fonti energetiche non rinnovabili

Riserva - La quantità stimata di un materiale naturale che si pensa di poter recuperare con le tecnologie e ai prezzi attuali; “riserva” è un sotto-insieme di “risorsa”.

Risorsa - La quantità stimata di un materiale naturale che si pensa di poter recuperare non solo nella situazione tecnico-economica attuale ma anche in quella che si prevede possa esistere in un prossimo futuro.

Sembra un paradosso che oggi le fonti primarie di gran lunga più utilizzate non siano né rinnovabili né «quasi inesauribili», ma i motivi ovviamente esistono: esse sono di più facile e conveniente utilizzazione sia come fonti di energia primaria sia come vettori energetici, perché (1) il loro reperimento finora è stato economico (in termini finanziari ed energetici), (2) la loro densità energetica è sufficientemente alta da facilitarne il trasporto, la distribuzione e l’immagazzinamento, (3) la tecnologia che le rende utilizzabili è nota, “matura” e affidabile e, infine, (4) con esse si è in grado di generare con continuità, nella quantità corrispondente alle esigenze della società, potenza in volumi e spazi ridotti (ovvero di ottenere elevate potenze specifiche).

Alla categoria delle fonti esauribili appartengono carbone, petrolio, gas naturale e fissione non autofertilizzante. Le prime tre sono di origine solare, l’ultima è di origine cosmica (così come la fissione autofertilizzante).

Parlando del destino dell’energia solare che arriva sulla Terra, si è già mostrato che attraverso la fotosintesi clorofilliana la materia vivente vegetale sintetizza una potenza pari a $9.83 \times 10^{13} \text{ W} = 75 \times 10^9 \text{ tep/anno}$. E’ materia che nasce, vive e muore, talché ci si aspetterebbe di trovare, sotto forma di residui fossili combustibili, se non tutto ciò che si è formato dall’origine dei tempi ad oggi, per lo meno una sua frazione non trascurabile. Ed è invece uno dei misteri della natura che della materia vivente che muore, la frazione che si converte in combustibile sia estremamente minuscola: $1.33 \times 10^7 \text{ W} = 10^4 \text{ tep/anno}$. Vi è perciò un rapporto pari a poco meno che un milione fra la materia vivente che annualmente muore e quella parte di essa che si trasforma in combustibile fossile. Molti sono i tentativi di spiegazione, ma nessuno di essi è convincente.

Ai combustibili fossili che non siano carbone (e naturalmente che non siano combustibili nucleari) nella XII Conferenza mondiale del petrolio, tenutasi a Houston nel 1987, si è convenuto di dare la denominazione onnicomprensiva di *petroleum*. Si tratta di idrocarburi, cioè di combinazioni molecolari di carbonio con idrogeno.

Del petroleum, quello che in condizioni ambientali normali è solido, si è proposto di chiamarlo *bitumen* mentre per i liquidi si è riservata la denominazione *oil* e per i gassosi *gas*. A causa dell’equivoco che può nascere dall’impiego in lingua italiana della parola petrolio, converrà che i prodotti che alla XII Conferenza mondiale è stato proposto di denominare petroleum siano qui nel seguito definiti *idrocarburi naturali* suddivisi in: bitume (solidi), petrolio (liquidi) e gas (gassosi).

Nel 1999 il rapporto stimato risorse / produzione annuale è di oltre 225 anni per il carbone, 65 per il gas naturale, 45 per il petrolio.

Ciò porta alla ovvia conclusione che in futuro il consumo di gas propenderà ad aumentare rispetto a quello del petrolio.

Naturalmente, mentre per le riserve accertate si può parlare di un costo di $15 \div 20$ \$/barile = $110 \div 150$ \$/t (una tonnellata = 7.2 barili), le risorse estreme saranno probabilmente estraibili a costi superiori, tanto più elevati quanto più ci si avvicinerà all'esaurimento⁷.

Per dovere di completezza va ricordata, per quanto riguarda il metano, l'ipotesi dell'astrofisico americano Thomas Gold, che ha trasposto sulla Terra certe sue considerazioni relative al sistema solare (è noto che in esso il metano è abbondante: per esempio su Giove). Gold - e non è il solo - afferma che l'origine di gran parte del metano è abiologica, frutto di una reazione, in condizioni estreme di temperatura e di pressione, fra carbonio e composti idrogenati nel profondo della crosta terrestre. Il metano andrebbe quindi cercato sotto rocce granitiche e non nei giacimenti sedimentari, entro i quali trasuderebbe da strati assai più profondi ma anche molto più ricchi. L'ipotesi di Gold non è solo teoria: essa si appoggia su un certo numero di indizi sperimentali, ad esempio sulla presenza di metano in manifestazioni vulcaniche non certo emananti da rocce sedimentarie. Che dire di tutto ciò? Per ora, per i profani, stare a vedere e attendere. A grandi profondità ipogee potrebbe esserci metano inorganico, ma quanto, quanto accessibile e quanto costoso nessuno è in grado di predire. Al momento non è possibile tener conto di tale ipotetico metano nella valutazione delle riserve di gas naturale.

Sul carbone, il combustibile di gran lunga più abbondante, i dati sono più malsicuri. Mentre le riserve accessibili di carbone sono enormi, quelle economicamente sfruttabili in condizioni confrontabili con le attuali sono dello stesso ordine di grandezza degli idrocarburi.

Quanto alla fissione non autofertilizzante, le riserve minerarie di uranio a prezzi accessibili si valutano pari a 5×10^6 t, mentre l'utilizzazione del combustibile è limitata all'1% (con la tecnologia dei reattori termici ad acqua, oggi prevalente). Sono cioè non più di 50 000 le tonnellate di uranio, che è possibile fissilizzare. Con un costo massimo (di materia prima) di 20 \$/g fissilizzato e una resa energetica di 8000 kWhe/g fissilizzato, l'incidenza della materia prima è pari a $2 \cdot 10^{-3}$ €/kWhe, costo ancora modesto (ed esso pure una piccola frazione del costo del combustibile, che in gran parte è costo di lavorazione).

Le riserve presunte sono valutate a 25 milioni di tonnellate di uranio, cioè a 250 000 tonnellate fissilizzabili, a costi tuttavia superiori a quelli delle riserve accertate. Dato il rapporto dei poteri calorifici (2 milioni), ma tenendo conto del minor valore del combustibile nucleare rispetto al petrolio (circa 0.7, per il minore rendimento degli impianti nucleotermoelettrici rispetto a quelli a olio combustibile), le riserve di combustibile nucleare, con la tecnologia oggi prevalente, ammontano a $70 \cdot 10^9$ tep e le risorse a $350 \cdot 10^9$ tep.

Per riassumere: petrolio, gas e combustibili nucleari con fissione non autofertilizzante hanno riserve accertate fra loro pressoché uguali, mentre le riserve accertate di carbone sono circa doppie delle altre messe insieme. Le risorse ultime presunte delle fonti di energia non rinnovabili (circa mille miliardi di tep per petrolio, gas e uranio non autofertilizzante e seimila miliardi per il carbone) saranno disponibili in un futuro incerto e lontano, a prezzi molto superiori a quelli attuali.

⁷ **Non-renewable resources** (da OECD-NEA "Nuclear Energy in a Sustainable Development Perspective", 1999) Non-renewable resources, while finite, do not generally seem to have an availability problem at the front end of the product cycles. Although proven economic reserves of many non-renewable commodities represent only a few decades of supply at current rates of consumption, this is only a snapshot of resources discovered as a result of active searching. It is not economic to spend a lot of money looking for resources that will not need to be developed for many decades, so the short-term nature of the reserve picture is not surprising. As more resources are needed, exploration and development will be funded, and more reserves will be defined. Technology is constantly improving the ability to find and develop lower-grade or more remote deposits, and to use resources more effectively. Prices for many commodities are at or near their historic lows, suggesting that scarcity is not imminent, although geographic distribution and politics may affect the price or availability of some commodities, such as oil.

Il fabbisogno energetico dal passato al presente

Il fabbisogno energetico dell'umanità mutò (e in generale si accrebbe) con il passare del tempo. Si accrebbe per l'intervento contemporaneo di due fattori: l'accrescimento della popolazione e l'aumento del fabbisogno energetico pro capite. A pesare sull'economia energetica del globo, il primo fattore è stato di gran lunga prevalente rispetto al secondo.

Si dice convenzionalmente, ed erroneamente, che l'umanità primitiva, incapace di accendere il fuoco, avesse bisogno della sola energia necessaria alla sua sopravvivenza: circa 3000 kcal/giorno (integrate dagli elementi nutritivi di scarsa rilevanza energetica ma indispensabili alla sopravvivenza come vitamine, sali minerali, metalli in tracce, ecc.).

Computando il solo potere calorifico di tali alimenti, come se si trattasse di combustibili (e quindi non dando giusto rilievo al loro pregio), si arriva a $3000 \text{ kcal/giorno} \times 365 \text{ giorni} = 1\,095\,000 \text{ kcal/anno} = \text{circa } 0.11 \text{ tep/anno}$. In realtà l'uomo primitivo, per alimentarsi, avrà avuto bisogno di dissipare molto più dello stretto necessario per sopravvivere (negli animali uccisi, le parti commestibili crude erano poca cosa rispetto al resto, che l'uomo lasciava all'ambiente). Ma di tali complicazioni non occorre tener conto. Dopo avere scoperto il fuoco (data presunta: 500 000 anni fa), l'uomo poté meglio utilizzare sia i prodotti commestibili animali sia quelli vegetali (con una riduzione dello sciupio). Ma gli si offrì l'opportunità di riscaldarsi (e sopravvivere durante le terribili glaciazioni, in tempi geologicamente recenti e a noi vicinissimi). Ciò comportò un aumento del fabbisogno energetico pro capite, che secondo l'opinione corrente venne almeno raddoppiato (0.22 tep/anno).

L'uomo neolitico, agricoltore oltre che allevatore e pastore, ebbe bisogno dell'energia animale, in particolare per la coltivazione dei campi. Aumentava nel frattempo il fabbisogno di energia per il riscaldamento, poiché si diffondeva l'impiego di abitazioni, costruite appositamente al di sopra del suolo e quindi termicamente meno isolate delle grotte naturali o dei cunicoli scavati in profondità lungo i fianchi delle colline, fino allora utilizzati. Altra energia pregiata (calore ad alta temperatura) fu richiesta per l'estrazione dei metalli dai loro minerali e per le successive lavorazioni, dopo che si apprese la tecnica di lavorare il bronzo e il ferro. A tale livello di civiltà si crede che il fabbisogno di energia di ogni specie si aggirasse attorno a 0.45 tep/anno: un altro raddoppiamento.

Circa 2000 anni fa le società più progredite videro l'avvento, nel bacino del Mediterraneo e sulle sponde del Mar Cinese, dell'utilizzazione di fonti energetiche non animali: ruote motrici ad acqua fluente per azionare mulini e frantoi, per il sollevamento dell'acqua e simili nel mondo greco-romano; canalizzazione in tubazioni di bambù e impiego del gas naturale in Cina; mulini a vento, a partire dal v secolo d.C., sull'altopiano iranico; e per tutti l'uso del vento nella propulsione navale. Inoltre lo sviluppo di un fiorente e diffuso artigianato (con manodopera libera o servile) richiese un più accentuato sfruttamento del legname come fonte energetica per produrre manufatti di terracotta o per estrarre, mediante evaporazione, il sale dall'acqua del mare. Né si deve trascurare l'impiego di olio organico e inorganico, nonché di prodotti catramosi per fini di illuminazione. A questo livello di civiltà, raggiunto nei primi secoli dell'era volgare entro l'impero romano, il presumibile fabbisogno energetico pro capite si attestò intorno a 0.5 tep/anno. Se è vero che nell'impero romano, al tempo della sua massima estensione, la popolazione ammontava a 100 milioni di abitanti, la richiesta di energia al suo interno si aggirava quindi intorno a 50 milioni di tep.

Nell'intero globo (con una popolazione presunta di 300 milioni di abitanti) la richiesta di energia doveva quindi aggirarsi intorno a 150 milioni di tep, poiché l'area cinese come pure la penisola indiana erano altrettanto civilizzate che il bacino del Mediterraneo.

Il fabbisogno unitario non doveva essere molto diverso, al sorgere della società industriale considerando che l'aumento del fabbisogno fu sempre contrastato dal progressivo risparmio energetico, sia pure messo a punto e perfezionato su basi totalmente empiriche. Prendendo ad esempio il Regno Unito nel secolo XIX (periodo durante il quale esso si trasformò in nazione industriale), il fabbisogno di carbone pro capite passò da 0.68 tonnellate nel 1800 a 4.00 nel 1900: il

fabbisogno totale di fonti primarie, ridotto in tep, si può quindi valutare in 0.5 tep/pro capite nel 1800 e 2.8 nel 1900. Dopo il 1900 esso è ancora cresciuto, ma assai più lentamente, raggiungendo nel 1982 il valore di 3.3 tep/anno [nel 1999, 4.2 tep/anno]. Eppure negli ottantadue anni intercorsi a partire dall'inizio del nostro secolo, il prodotto lordo pro capite si è moltiplicato per 2.5. Ciò significa che l'innovazione tecnologica e il risparmio energetico hanno avuto un'importanza grandissima nel ridurre il fabbisogno di energia a parità di ricchezza prodotta. Il secolo della grande crescita energetica, della sua vera espansione esponenziale nei paesi industrializzati, fu quello XIX e non il XX. Tuttavia l'espansione, benché frenetica, avveniva nell'ambito di un'area geografica e demografica del globo ancora ristretta, mentre sul finire del secolo in cui viviamo, tale espansione sta permeando tutto il mondo.

Le fonti energetiche che hanno alimentato la rivoluzione industriale sono state principalmente quelle fossili non rinnovabili (prima il carbone, poi il petrolio, poi il gas, indi la fissione non autofertilizzante). Quelle rinnovabili hanno contribuito con l'impiego sempre più ampio dell'energia idraulica, mentre è declinato l'impiego delle biomasse (in particolare l'uso del legname) ed è in fase di semperiterno decollo, senza mai riuscire a decollare, l'uso diretto dell'energia solare, sia sotto forma termica sia trasformata in elettricità.

Quanto alle fonti «quasi inesauribili», oggi si fa una utilizzazione intensa della geotermia: nei pochissimi siti dove si ritrovano campi di vapore o di acqua pressurizzata ad alta temperatura e in quelli più numerosi, in cui si rinviene acqua tiepida.

Della fissione autofertilizzante si sono gettate, come già detto, le basi tecnologiche lungo più direzioni, avendo però solo in parte risolto i problemi economici da essa posti, mentre non ne sono risolti i complessi problemi sociali. Il contributo che essa fornisce al fabbisogno energetico mondiale è inferiore allo 0,01%. La fusione, tuttora avvolta in una nube di punti interrogativi, non potrà dare alcun contributo, se mai lo darà, ancora per molto tempo.

Dai 300 milioni di abitanti e 150 milioni di tep di duemila anni fa, siamo passati a 6.1 miliardi di abitanti e 10 miliardi di tep nel 2001⁸: un aumento maggiore di 20 volte nella popolazione e di 65 volte nel fabbisogno energetico, mentre il fabbisogno medio di energia pro capite è aumentato solo 3 volte dall'antichità ad oggi. A meditare perciò sui valori medi mondiali (che sono spesso ingannevoli), si sarebbe indotti a concludere che la richiesta di energia è in crescita soprattutto a causa del fattore demografico, assai più che del fattore tecnologico-consumistico. Certo il valore medio nasconde sperequazioni assai profonde (ad esempio, USA: 7.98 tep/abitante; Russia: 4.29 tep/ab.; Giappone: 4.09 tep/ab.; Germania: 4.26 tep/ab.; Italia: 2.97 tep/ab.; Portogallo: 2.46 tep/ab.; Cina: 0.90 tep/ab.; Nigeria: 0.73 tep/ab.)⁶. Vi è insomma un rapporto 10÷20 fra chi assorbe di più e chi chiede di meno. Nessuno d'altronde si prefigge di far consumare all'umanità l'energia oggi assorbita pro capite negli USA o nella Russia. Escludendo come ingiusta l'affermazione apodittica che ciò, allo stato delle cose, sarebbe fisicamente impossibile, resta il fatto che non è assolutamente necessario pervenire a consumi tanto elevati, per raggiungere un livello di vita più che dignitoso, il ben-essere, la felicità!

Inoltre una rigorosa uguaglianza sarebbe, oltre che impossibile da acquisire, anche terribilmente ingiusta, così come il mitologico letto di Procuste⁹ per livellare gli uomini. Alcune differenze sono infatti dettate da necessità obiettive. Un abitante della Sicilia per il proprio conforto individuale ha bisogno di assai meno energia di un abitante della Svezia, dove i lunghi freddi inverni coincidono con la stagione delle lunghe notti. Ma altrettanto sgradevoli e pericolosi sono certi climi caldi ad alto tasso di umidità, dove il condizionamento estivo e il consumo energetico ad esso associato, più che un lusso, divengono una vitale necessità.

⁸ International Energy Agency, *Key World Energy Statistics* (2003).

⁹ Polipemone, soprannominato Procuste (stiratore), viveva a Coridallo in Attica, ai margini della strada. Accolti i viandanti, slogava le membra di quelli di piccola statura e amputava le gambe di quelli di alta, per adattare alle proporzioni del letto. Taluni dicono invece che si servisse di due letti, uno grande e uno piccolo: faceva sdraiare quelli piccoli sul letto grande e quelli alti sul letto piccolo, allungando o accorciando i suoi ospiti a seconda del caso. Teseo lo ripagò della stessa moneta.