

RISORSE ENERGETICHE*

RENATO A. RICCI

Presidente onorario della Società Italiana di Fisica

0. Introduzione

La struttura della società moderna, lo sviluppo socio-economico e culturale, il tenore e la qualità della vita, il livello di civiltà e di indipendenza politica di una nazione dipendono sempre più dal suo potenziale energetico e dall'efficienza dei sistemi di conversione e di utilizzo di esso.

L'aspetto dominante dell'attuale fase di sviluppo delle comunità umane è la *crescente domanda di energia e l'aumento del suo consumo pro-capite*. È quindi il *valore assoluto* di tale fabbisogno che conterà nei prossimi decenni, accentuato peraltro dall'espansione sociale e demografica dei Paesi in via di sviluppo, i quali hanno già compiuto o si accingono a compiere radicali mutamenti di struttura al fine di trasformare la loro esistenza in un sistema di vita più complesso ed avanzato.

Sulla base di significative previsioni, l'indice demografico mondiale si porterà, nella prima metà del prossimo secolo, a 8-9 miliardi di persone ed il corrispondente indice di consumo energetico salirà a 15-20 miliardi di tep (tonnellate equivalenti di petrolio) il doppio cioè dell'attuale.

Ciò significa che *il problema energia ha dimensioni planetarie* ed i conseguenti aspetti scientifici, economici, sociali, culturali e politici non possono essere affrontati con pregiudizi, improvvisazioni e schematismi ideologici fuori della portata storica di tale problema ...

È con questa dichiarazione, firmata da Edoardo Amaldi, Ferdinando Amman, Nicola Cabibbo, Carlo Castagnoli, Donato Palumbo, Renato Angelo Ricci, Carlo Rubbia, Giorgio Salvini e Claudio Villi e sottoscritta da quasi 1000 fisici italiani che nel 1987, ad un anno circa di distanza dal disastro di Chernobyl e prima della Conferenza Nazionale dell'energia e del famoso referendum che sancì, purtroppo, l'uscita del nostro Paese dalla produzione di energia nucleare, al contrario di tutti i principali paesi europei e del mondo industrialmente sviluppato, la Società Italiana di Fisica si espresse chiaramente sulla crisi energetica italiana.

In effetti il problema energetico è sicuramente il principale tra le questioni che riguardano l'evoluzione pacifica della società moderna. L'energia è alla base di ogni forma di sviluppo materiale e sociale dell'umanità, della sua sopravvivenza alla civiltà più avanzata.

Energia vuol dire possibilità di ottenere *lavoro* o più semplicemente di produrre

spostamenti o movimenti (Energia cinetica). Non sempre però si realizzano movimenti e l'energia accumulata o immagazzinata in attesa di essere utilizzata è *Energia Potenziale*.

E ancora: tale energia invece di produrre lavoro si può liberare sotto forma di *Calore*.

L'Energia *si misura* così come il Lavoro e il Calore. Le unità di misura più generalmente usate sono il *Joule* (Lavoro) e la *Caloria* (Calore) ma è più comune, anche perchè legata al concetto di *Potenza* (e all'uso dell'*Energia elettrica*), il *kilowattora* (kWh)

La Potenza di qualunque corpo o strumento che implica l'energia che esso è capace di esprimere nell'unità di tempo (*il secondo*) è appunto data dal rapporto

$$Potenza = \frac{Energia}{Tempo}$$

e si misura in Watt: 1 Watt = J/sec. Si ha: 1 kW = 1000 Watt, 1 kilowattora = $3.6 \cdot 10^6$ Joule = $8.6 \cdot 10^2$ k Cal.

Le misure correnti che riguardano invece l'energia prodotta dai vari combustibili si ottengono con le seguenti equivalenze 2: 1 tep (tonnellata equivalente di petrolio) = 42 GJ ~ 10000 MCal ~ 11.700 kWh ~ 1,4 tec (tonn. eq. di carbone) ~ 1200 m³ Gas.

Per avere un'idea del significato pratico delle quantità di energia d'uso comune sono riportati, nella Tabella I, il contenuto energetico di vari prodotti e, in Tabella II la potenza e l'energia erogata in 8 ore per vari strumenti o macchine, compreso il corpo umano.

Tabella I	
Il contenuto energetico dei prodotti	
1 kg di grano	1-2 kWh
1 kg di ferro	10 kWh
1 kg di proteine animali	15 kWh
1 kg di alluminio	70 kWh
un trattore agricolo	oltre 10.000 kWh

Tabella II		
<i>Utenza</i>	<i>Potenza (kWh)</i>	<i>Energia in 8 ore</i>
Lampadina media	0,06	0,48
Scaldabagno	1	8
Trapano elettrico	0,7	5,6
Automobile media	50	400
Televisore	0,15-0,25	1,2-2
Stufa elettrica	1-2	8-16
Radio a transistor	0,0005	0,004
Locomotiva elettrica	3.000	24.000
Asciugacapelli	0,6-1,2	4,8-9,6
Essere umano	0,06	0,48

È chiaro inoltre che l'energia e quindi il soddisfacimento dei bisogni che derivano dai consumi energetici costituisce non solo un fattore essenziale per lo sviluppo delle civiltà ma anche un motivo di *stabilità* o *instabilità* delle società umane essendo una causa prima del *grado di benessere*, ossia della cosiddetta *qualità della vita*.

La fig. 1 illustra l'andamento di due *indicatori* di questa qualità in funzione del *consumo di energia annuale pro-capite*, espresso in kilocalorie: la *mortalità infantile* (morti su mille nati) e la *longevità* (aspettativa di vita in anni). Si vede come la prima scenda rapidamente e la seconda salga all'aumentare del consumo energetico (procedendo cioè dai paesi più sviluppati a quelli in via di sviluppo e meno sviluppati). La media (in cui entra ovviamente la grande differenza fra i primi ed i secondi) è all'incirca di 30 - 40.000 KWh che corrisponde al consumo medio di un italiano (circa 3 tep).

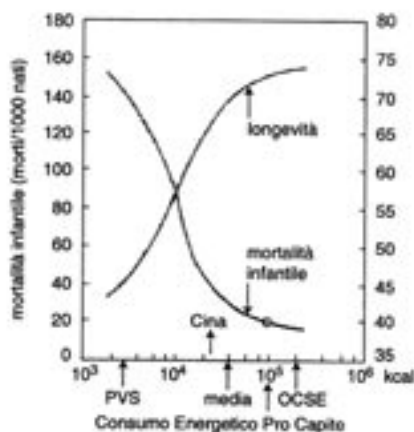


Figura 1 - Indicatori di benessere (mortalità infantile e longevità) in funzione dei consumi energetici.

Si noti che se il consumo di un italiano fosse accessibile agli abitanti dei Paesi in via di sviluppo (PVS) il consumo totale di energia nel mondo salirebbe a 20 Gtep (20 miliardi di tonnellate equivalenti di petrolio), ossia *circa il doppio di quello attuale*. Ciò sta a dimostrare quanto sia essenziale una strategia globale del problema energia.

La crescita dei consumi mondiali di energia primaria è riportata in fig. 2, insieme con l'andamento della popolazione del pianeta dal 1850 in poi.

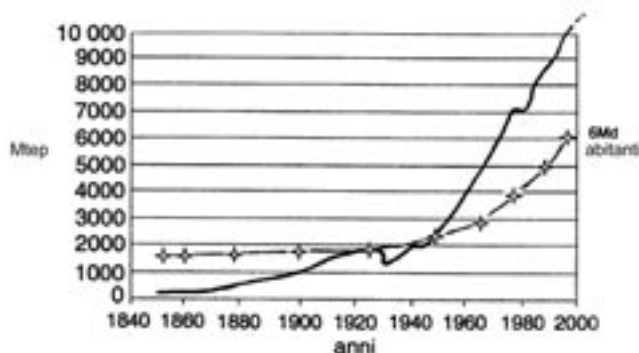


Figura 2 - Evoluzione della popolazione (◊) e dei consumi energetici (linea continua) del pianeta dal 1850.

Si vede che, a partire dal 1950, la crescita energetica sale molto più rapidamente fino a toccare per i 6 miliardi di abitanti degli anni 2000, i 10 Gtep di consumi di energia primaria.

Un'analisi dettagliata dello IIASA (Istituto Internazionale di Analisi dei Sistemi) di Vienna rende conto dell'evoluzione dei consumi globali che procede ad un tasso di circa il 2% annuo (vedi fig. 3).

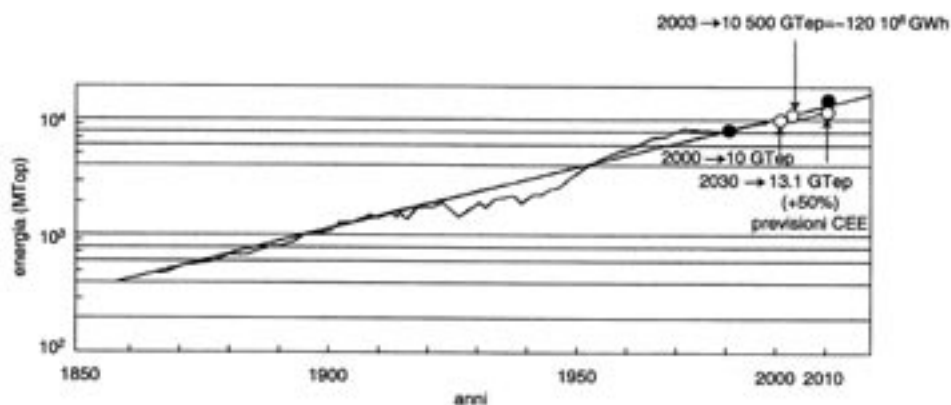


Figura 3 - Crescita (esponenziale) dei consumi energetici mondiali e analisi logistica della IIASA (scala logaritmica).

In valore assoluto tale fabbisogno è arrivato ormai a circa 11 Gtep, pari all'utilizzo di 11.000 centrali da 1000 MW, di cui circa il 14% per la produzione di energia elettrica.

Le varie fonti primarie, dal legno al carbone, al petrolio, al gas naturale, all'energia nucleare, alle energie rinnovabili, si sono succedute e si succedono convivendo e sostituendosi mano a mano per motivi di convenienza economica, di adattabilità sociale, di possibilità tecniche e di impatto ambientale. Esse come tutte le innovazioni,

si sviluppano ad ondate successive riproducibili secondo equazioni logistiche (equazioni di Volterra), consistendo e superandosi come mostra la fig. 4.

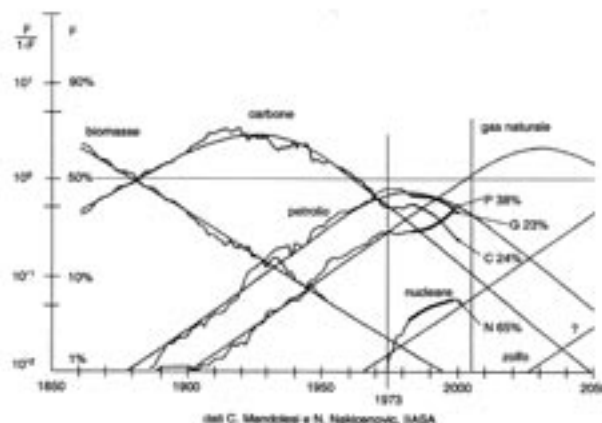


Figura 4 - Evoluzione logistica delle varie fonti primarie di energia (analisi IASA, vedi testo).

Oggi la convivenza e la competitività delle fonti di energia più utilizzate, utilizzabili e disponibili *su larga scala* riguarda soprattutto il petrolio, il gas naturale, il carbone e, sia pure in misura ancora meno rilevante, l'energia nucleare da fissione.

L'attesa di ulteriori nuove fonti (fusione, solare?) fa parte di questo secolo. In ogni caso una fonte che abbia penetrato circa il 5% del mercato non torna più indietro.

1. Fonti energetiche: classificazione

Le Fonti energetiche primarie. Esse derivano direttamente da risorse naturali presenti nel pianeta o, più in generale, nell'Universo e, sostanzialmente, si tratta di energia potenziale concentrata che mano a mano l'uomo ha scoperto e poi utilizzato.

Naturalmente vi sono forme di energia che liberandosi in modo incontrollato danno luogo ad «esplosioni» (nell'Universo le esplosioni stellari, le Supernovae, l'energia nucleare del sole e delle stelle) che, se usate dall'uomo (ad esempio l'energia chimica, la dinamite, le bombe a energia chimica o nucleare) servono solo a scopi distruttivi e militari.

Qui ci interessiamo ovviamente delle forme di energia controllabili e controllate ad uso civile e pacifico sia che siano già esistite in natura (combustibili fossili, acqua, vento, geotermia) sia che siano frutto di scoperte e invenzioni scientifiche (energia nucleare, fotovoltaica...).

Le fonti primarie, come detto, possono essere sfruttate direttamente. Vi sono forme di energia *secondarie* che derivano dalla trasformazione delle prime, con opportuni accorgimenti tecnici, nelle seconde. Tra queste la più nota, anche perchè molto pregiata, flessibile e facilmente utilizzabile, è l'*energia elettrica*.

Altre forme di energia secondaria sono ovviamente l'energia *termica* (calore) e l'energia *meccanica* (movimento).

Classificazione delle energie primarie

Le fonti energetiche primarie utilizzate nel mondo (tecnologie disponibili) si distinguono in:

1. fonti energetiche *fossili*
2. fonti energetiche *nucleari*
3. fonti energetiche *rinnovabili*

LE FONTI ENERGETICHE *FOSSILI* sviluppano *energia termica* in seguito a *trasformazione chimica* (processo di combustione) e sono le seguenti:

- Petrolio
- Carbone
- Gas naturale

LE FONTI ENERGETICHE *NUCLEARI* sviluppano *energia termica* in seguito a *trasformazione nucleare* (processo di fissione o di fusione) e sono le seguenti:

- | | | |
|---|---|----------|
| <ul style="list-style-type: none"> • Uranio • Plutonio • Torio | } | fissione |
| <ul style="list-style-type: none"> • Deuterio • Trizio | } | fusione |

LE FONTI ENERGETICHE *RINNOVABILI* sviluppano *energia meccanica, termica o elettrica* in seguito a *trasformazioni chimiche o fisiche* e sono le seguenti:

fonti rinnovabili classiche:

- energia idraulica
- energia geotermica

nuove fonti rinnovabili:

- energia eolica (vento)
- energia solare (termica, fotovoltaica)
- combustibile derivato dai rifiuti (CDR)
- biomassa (legna)
- biocombustibili (etanolo, biogas).

L'impiego delle fonti energetiche. Le fonti energetiche primarie non sono automaticamente sostituibili tra loro, in quanto hanno caratteristiche intrinseche diverse che riguardano:

- il tipo di energia producibile (termica, meccanica, elettrica)

- la potenza specifica (energia per unità di massa, volume, superficie occupata dagli impianti)
- la disponibilità (costante, periodica, casuale)
- i costi di approvvigionamento
- i costi di trasformazione (impianto e manutenzione)
- l'impatto ambientale e i rischi associati.

Gli usi prevalenti dell'energia. Il fabbisogno prevalente di fonti energetiche riguarda

- la produzione diretta di mobilità (trasporti)
- la produzione diretta di calore
- la produzione di elettricità

Mentre i primi due sono usi finali, il terzo è un uso intermedio ed è finalizzato alla trasformazione delle fonti primarie in una forma di energia particolarmente idonea all'uso differenziato e alla distribuzione su larga scala.

Nei paesi industrializzati avanzati

- il 33% dell'energia primaria è utilizzato per produrre mobilità
- il 33% dell'energia primaria è utilizzato per produrre calore
- il 33% dell'energia primaria è utilizzato per produrre elettricità

Storicamente l'uso delle fonti di energia (essenzialmente energia solare) nel Neolitico era limitata alla produzione (o procacciamento) di cibo. Già al tempo dei Sumeri si ha una suddivisione tra produzione di cibo, usi domestici e terziario, industria ed agricoltura. L'utilizzazione consistente di energia per trasporti (mobilità) si ha a partire dal XVIII sec. e nel XX sec., a parte una frazione ormai minoritaria per la produzione di cibo, si ha una distribuzione quasi paritaria fra usi domestici e terziario, industria e agricoltura e trasporti (vedi fig. 5).

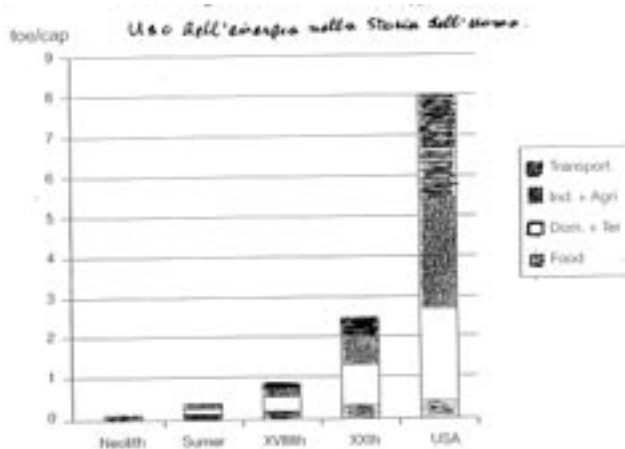


Figura 5 - Uso dell'energia nella storia dell'uomo (cibo, usi domestici e terziario, industria ed agricoltura, trasporti).

Fonti «alternative» e «integrative». Le fonti energetiche primarie sono dunque considerate »alternative» o « integrative» sulla base della loro attitudine a produrre

- mobilità
- calore
- elettricità

a condizioni confrontabili di

- versatilità
- disponibilità
- costo.

Usi delle fonti energetiche primarie

Usi finali possibili	Calore	Mobilità	Elettricità
Carbone	Sì	Sì	Sì
Petrolio	Sì	Sì	Sì
Gas naturale	Sì	Sì	Sì
Nucleare	Sì		Sì
Energia idraulica			Sì
Energia geotermica	Sì		Sì
Energia solare	Sì		Sì
Energia eolica			Sì
Energia da CDR	Sì		Sì
Energia da biomassa	Sì		Sì
Energia da biocombustibili	Sì	Sì	Sì

2. Fonti energetiche: storia

Nella Preistoria dell'umanità (5 milioni di anni fa): Austrolopiteco; 2 milioni di anni fa: Homo Habilis; 1,5 milioni di anni fa: Homo Erectus e fino a 300.000 anni fa, l'unica fonte di energia disponibile ai nostri antenati erano essi stessi, il loro corpo, le loro braccia che consumavano energia nutrendosi. L'Homo Erectus ad esempio è vissuto per ben un milione e 200 mila anni a livello animale o quasi, senza vestiti e ripari dipendendo dagli animali stessi per i suoi bisogni e limitandosi al necessario per la sopravvivenza. Si valuta che il *consumo energetico annuo pro-capite* fosse di 1,1 megacalorie/uomo-anno (MCal/u.a).

Questa *1ª tappa* coincide con la *scoperta del fuoco*: Il fuoco viene usato per distruggere boschi e farne praterie per la caccia, per ardere legna per riscaldarsi e proteggersi dalle belve, per costruire imbarcazioni e percorrere *corsi d'acqua*. Il consumo energetico sale a 2,2 mcal/u.a. (il doppio della preistoria).

La *2ª tappa* si ha con la scoperta dell'*AGRICOLTURA*, nel 7000 avanti Cristo. Si tratta della prima rivoluzione ecologica dell'uomo che interviene sulla natura e moltiplica i

vegetali modificandone il corso naturale con la semina e la raccolta controllata. Diventa più *sedentario* (costruzioni e abitazioni stabili, lavoro nei campi da parte dell'Uomo e con l'aiuto di animali resi domestici). Nascono comunità e categorie sociali a seconda del lavoro effettuato, le prime rudimentali città. Si cuociono i cibi di origine sia animale che vegetale (e si bolliscono in acqua); si esercitano le prime forme di arte decorando i vasi di terracotta con i minerali di rame forgiati con il fuoco. Il *fabbisogno energetico* si raddoppia ancora e sale a 4,5 mcal/u.a.

La 3^a *tappa* si ha nel 4000 a.c. quando nasce la *METALLURGIA*, lungo periodo che va dall'età del bronzo all'età del ferro, dando luogo al *periodo propriamente storico* dell'umanità, così come noi lo conosciamo. Cominciano le *specializzazioni tecniche*, le *suddivisioni del lavoro* che originano le *classi sociali* (anche la schiavitù), la fabbricazione e l'uso di *utensili*, lo sfruttamento di *FONTI NATURALI DI ENERGIA* (Acqua, Vento, Sole) oltre al *Fuoco*, utilizzate per *trasporto e riscaldamento*. È questo anche il periodo in cui hanno inizio e fioriscono la scrittura (Asia Minore, Egitto, Cina), la contabilità, il capitalismo agrario, forme più evolute di arte. Tuttavia il fabbisogno energetico pro-capite resta *costante*, grazie ad una maggiore efficienza nell'uso di energia.

La 4^a *tappa* inizia con l'uso del *MULINO AD ACQUA* (1° secolo a.C.) a partire dai Greci poi sviluppato dai Romani (potenza 2,2 kW) fino al 3° secolo d.C., mentre il *MULINO A VENTO* viene introdotto dagli Arabi verso il 650 d.C., anche se esso era già usato nel 400 d.C., ma in modo limitato in Persia ed in Afghanistan e il vento era ben utilizzato nella navigazione a vela da 3-4000 anni prima. Anche in questo periodo e fino all'Ottocento i consumi energetici non aumentano molto e arrivano a 5 mcal/u.a.

La 5^a *tappa*, in cui il fabbisogno energetico rimane costante, vede la scoperta o meglio l'invenzione della *POLVERE DA SPARO* (1300 d.C.) che è la prima vera *ENERGIA ARTIFICIALE* (sintesi tra sostanze naturali) non esistente in natura. Essa dà inizio alle *ARMI DA FUOCO* che rivoluzioneranno le battaglie militari e le guerre. Naturalmente la polvere da sparo può essere utilizzata come esplosivo per frantumare rocce, scavare miniere, studiare il sottosuolo. Ed anche come propulsore di proiettili nei cannoni. La costruzione di questi ultimi sviluppa la *siderurgia* e, in particolare, la *fusione dell'acciaio*, il che fa aumentare la necessità di molto calore e quindi di nuove fonti energetiche, oltre al legno e si apre l'era del *CARBONE FOSSILE* (1600-1700).

6^a *tappa*: arriva il grande salto qualitativo che impone un salto quantitativo. Siamo alla *RIVOLUZIONE INDUSTRIALE*. Si introduce, verso il 1600, l'utilizzazione del carbone fossile e si scopre l'energia contenuta nel vapor d'acqua e viene inventata, nel 1800, la *Macchina a Vapore*, in cui l'energia prodotta viene *indirizzata* a seconda delle esigenze e non più a seconda delle disponibilità naturali (come con il vento e il sole).

7^a *tappa*: arriva il *PETROLIO* (1890) seguito poi dal *GAS NATURALE* (metano) e con gli *IDROCARBURI* si ottengono i *CARBURANTI* necessari per intensificare i trasporti con maggiore velocità via *automobilistica* e *aerea*. Una nota curiosa che dimostra la capacità delle società di compensare con reazioni opportune eventuali rischi ambientali³, è data dall'avvicendamento tra il cavallo e l'auto come mezzo sociale di trasporto.

Nel 1920, negli USA, il mezzo più comune di trasporto era il cavallo (25 milioni di cavalli) ma cominciava l'era dell'automobile, che tuttavia, per velocità e costo, non era affatto competitiva con il cavallo. Il fatto discriminante fu il problema dei parcheggi notturni e delle *emissioni*: 20 chili al giorno per cavallo!

«Anche se ai contadini della mia giovinezza e ai Verdi di oggi vengon le lacrime al pensiero, la società nel suo insieme scelse il mezzo meno inquinante (più ecologico): *l'automobile!*» – è quanto afferma Cesare Marchetti, uno degli autori delle analisi più accreditate di sviluppo delle fonti energetiche, condotta dallo IIASA (Istituto Internazionale di Analisi dei Sistemi) di Vienna.

8ª tappa: nel 1945 nasce l'*ENERGIA NUCLEARE*. La prima dimostrazione della possibilità di produrre la *REAZIONE A CATENA* derivante dal bombardamento di Uranio 235 con neutroni lenti e di innescare la *SCISSIONE DEI NUCLEI* con grande produzione di energia fu ottenuta nel 1942 con la *PILA DI FERMI* a Chicago. Purtroppo le prime applicazioni di questa energia sono state a scopi distruttivi (bomba atomica, più precisamente nucleare); tuttavia essa costituisce, se usata a scopi pacifici e civili, una grande opportunità per competere, nel soddisfacimento dei fabbisogni energetici mondiali, con i combustibili fossili. Le *centrali elettronucleari* coprono oggi il 17% dell'energia elettrica mondiale. I consumi mondiali di energia sono arrivati a circa 35 mcal/u.a.

Per il futuro, a parte l'uso e la diversificazione delle fonti di cui si è parlato (con miglioramenti e innovazioni tecnologiche e maggiore efficienza di utilizzazione), speranze sono riposte soprattutto sulla fusione nucleare, di cui si prevede l'eventuale utilizzo non prima del 2040.

Per meglio comprendere l'evoluzione storica dei consumi energetici dell'umanità, si pensi che per esempio in Inghilterra nel 1800 si consumavano 0,55 tep/anno pro-capite, nel 1900 2,8 e nel 2000 si è arrivati a 3,5; e che in Italia tale consumo nel 1900 era di 0,5 tep/anno pro-capite con una frazione agricola del PIL (Prodotto Interno Lordo) del 50% e si è arrivati nel 2000 a 3 tep/anno pro-capite con una frazione agricola del PIL del 3,3%.

3. Origine e uso delle fonti energetiche

LE FONTI FOSSILI (*carbone, petrolio, gas naturale*) appartengono alla categoria dei combustibili, rispettivamente solidi, liquidi e gassosi.

La *combustione* è una *reazione chimica* che avviene tra una sostanza (combustibile) e un'altra (comburente) con notevole sviluppo di calore (*Energia Termica*). Il comburente è generalmente l'*ossigeno*; i combustibili fossili sono formati, in generale, da *Carbonio* e *Idrogeno*, in varie percentuali. Questa è la ragione per cui nella combustione si forma, tra i vari altri prodotti, il *BIOSSIDO DI CARBONIO* (o *Anidride Carbonica*, la CO_2) uno dei gas a *EFFETTO SERRA*.

A parte il Carbone, che contiene poco idrogeno, il Petrolio e il Gas naturale, per il fatto di contenere parti consistenti di C e H, sono detti *IDROCARBURI*. È pertanto la parte in Carbonio che costituisce la causa principale dell'inquinamento prodotto da

tali fonti.

- Il *carbone fossile* si trova in natura e deriva dalla carbonizzazione di vegetazione depositata negli strati più profondi del terreno e per ciò viene chiamata «*fossile*». Esso viene utilizzato nei «*motori a combustione esterna*» (motori a stantuffo e turbine a vapore) e per la produzione di *energia elettrica*.
- Il *petrolio grezzo* si trova in natura ed è una miscela di sostanze, alcune non essenziali e perfino nocive. Pertanto esso deve essere «*distillato*» (*distillazione frazionata*) per produrre sostanze più pregiate (GPL, Benzina, Kerosene, Gasolio, residui di distillazione) i quali servono per i motori a combustione esterna e *interna* (motori a scoppio, motori Diesel) e per la produzione, meno interessante, di energia elettrica. Un'applicazione interessante è la trasformazione in sostanze solide ma malleabili come la PLASTICA e altre materie chimiche. Il petrolio viene estratto nei Pozzi e nelle piattaforme petrolifere e si trova soprattutto in regioni particolari, il che dà luogo a problemi geopolitici ben noti (vedi Iraq, Kuwait, Iran) oltre che paesi come il Venezuela, la Russia.
- Il *Gas naturale*, in particolare il *metano* (CH_4) è molto diffuso, brucia molto bene, è meno inquinante del Carbone e del Petrolio ed è molto calorifico. Viene usato abbondantemente sia per usi domestici, produzione di calore, trasporti, che per usi industriali (energia elettrica con *impianti a ciclo combinato*), sostituendo anche il *gas di città* destinato a scomparire. Il gas naturale accompagna spesso il petrolio (molto più raramente avviene il viceversa). In effetti, ai primordi dell'era petrolifera, il gas era considerato più un disturbo che un prodotto pregiato. Esso cominciò a venire utilizzato come combustibile importante quando (negli USA, 1935) si riuscì ad ottenere tubature efficienti e sicure per trasportarlo (*gasdotti*). La diffusione negli altri continenti avvenne dopo la seconda guerra mondiale (metanodotti Russia, Algeria, Iran, Africa settentrionale, Nord Europa). La grande diffusione attuale è dovuta anche al minor inquinamento rispetto al carbone e al petrolio.

Per la produzione di energia elettrica le *centrali termoelettriche* (che usano tali combustibili) funzionano secondo lo schema di fig. 6.

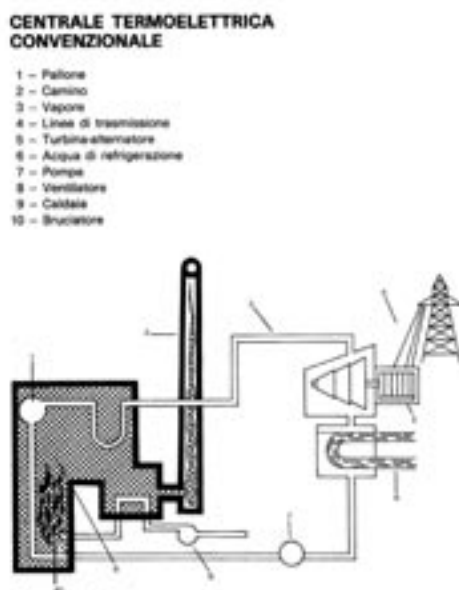


Figura 6 - Schema di centrale termoelettrica convenzionale. Un bruciatore (a gas metano, a carbone, a olio pesante, ecc.) riscalda dell'acqua, trasformata in vapore che è quindi inviato ad una turbina. In una centrale elettronucleare il bruciatore e la caldaia sono sostituiti dal recipiente contenente il nocciolo in cui avvengono le reazioni a catena.

La potenza standard di questi impianti è di 800-1000 MW.

Riassumendo i combustibili fossili che coprono attualmente più dell'80% dell'energia primaria mondiale hanno anche il pregio della versatilità nella loro utilizzazione (mobilità, calore, energia elettrica) mentre le fonti che ora andremo ad esaminare (nucleare e fonti rinnovabili) sono prevalentemente utilizzate per la produzione di energia elettrica oltre che in qualche caso (solare e nucleare) per la produzione di calore.

LE ENERGIE RINNOVABILI (E/O INTEGRATIVE). Come si è detto esse si distinguono in fonti «classiche» (idroelettrica e geotermica) e «nuove». Questa distinzione è tuttavia solo tecnica e serve a distinguere forme di utilizzazione in uso da tempo nella società moderna e altre che, pur essendo note fin dall'antichità (vento, solare, biomasse) sono state riconsiderate alla luce di interventi tecnologici solo oggi possibili e al loro uso per la produzione di energia elettrica. Fa eccezione il solare fotovoltaico, che si basa su una scoperta scientifica (l'effetto fotoelettrico) dell'era moderna (così come l'energia nucleare). Ci riferiamo quindi nel seguito a queste fonti come energie primarie utilizzate nelle centrali elettriche.

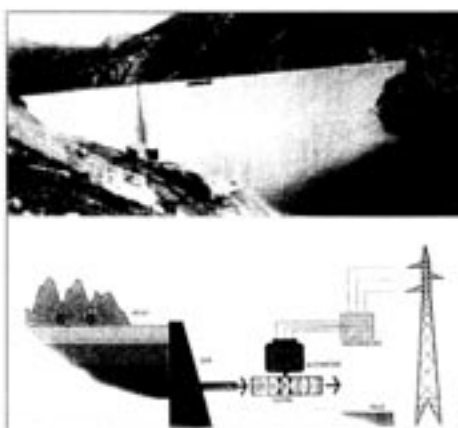
Energia Idroelettrica

Le centrali idroelettriche sono il tipo più semplice di centrale per la produzione di energia elettrica. Sono costituite da una turbina idraulica, cioè azionata dall'acqua, che fa girare un alternatore; l'acqua deve naturalmente trovarsi ad un livello più alto di quello della turbina e deve essere convogliata, con opportuni mezzi, fino alla turbina stessa. La spinta dell'acqua sulle palette della turbina provoca la rotazione di quest'ultima e, quindi, del rotore dell'alternatore, che genera l'energia elettrica.

Partendo dall'alto, cioè dal livello superiore, troveremo quindi:

- un serbatoio d'acqua ad alta quota;
- una condotta per portare l'acqua fino al livello della turbina (condotta forzata)
- organi di intercettazione;
- organi di regolazione, per graduare la quantità d' acqua e, quindi, la potenza di funzionamento dell'impianto;
- la turbina;
- un bacino per la raccolta dell'acqua a bassa quota (vedi fig. 7)

La potenza erogata (lavoro a unità di tempo) si può ottenere dal rapporto L/t . Essendo $L=Mgh$ dove M è la massa d' acqua che cade da un dislivello h , e g l'accelerazione di gravità, basterà moltiplicare la «portata» dell'acqua (m^3/sec) per h e per g . Ad esempio per un dislivello di 750 metri ed una portata di $160 m^3/sec$ ($160.000 kg/sec$) si ha una potenza di 1.200.000 Watt, ossia 1200 Mwat t che è una potenza abbastanza usuale per un grande bacino idroelettrico.



In alto: un bacino idroelettrico. In basso: lo schema di principio di una centrale idroelettrica.

Figura 7.

Osserviamo che l'*impatto ecologico* di una centrale idroelettrica, anche se completamente priva di emissioni e quindi di effetti dal punto di vista dell'inquinamento atmosferico non è certamente trascurabile. I rischi sono ovviamente legati alla possibilità di cedimento delle dighe di sbarramento, certamente non frequente ma non impossibile, come dimostrano disastri accaduti negli Stati Uniti, in Francia e in Italia; in quest' ultimo caso (Vajont), nel 1963, non si trattò di cedimento della diga ma fu il bacino a traboccare per effetto della caduta in esso di una falda montana, causando la distruzione del paese di Longarone e la morte di 2000 persone. Inoltre la realizzazione di un grande bacino ha un impatto sugli equilibri ambientali non indifferente.

Energia Geotermica

Sfrutta il calore naturale della terra. Si tratta di acqua o vapore caldo che viene esalato per pressione dalle profondità terrestri. Esso viene sfruttato a causa della sua temperatura più alta di quella ambientale. In genere le potenze sono modeste. L'Italia, che è all'avanguardia nello sfruttamento di questa fonte di energia (*bacino geotermico* di Larderello, in Toscana i cosiddetti «*soffioni boraciferi*») ha oggi in funzione 13 centrali *geotermoelettriche* per una potenza complessiva di 400 MW.

Energia da Biogas e Biomasse

Il biogas è un gas combustibile proveniente dal letame delle fattorie, opportunamente trattato. La centralina azionata dal biogas è una centrale turbogas in miniatura, in grado di fornire una potenza di una decina di kW.

Le biomasse sono tutti i materiali organici, di origine animale o vegetale, che possono essere trasformati in fonti di energia. Sono esempi di uso di biomasse l'idrolisi acida ed enzimatica per la produzione di alcool e derivati e l'uso di reazioni di fotosintesi per la produzione di idrogeno, che può funzionare da vettore energetico. Lo sfruttamento può essere conveniente nei luoghi in cui la materia prima è a portata di mano, come le campagne e le fattorie; non sempre è conveniente nelle grandi città per motivi opposti.

Energia dai rifiuti urbani

Più che un sistema per produrre energia, questo è un sistema per l'eliminazione dei rifiuti, in quanto il potere calorifico degli stessi è molto basso. I rifiuti vengono infatti bruciati insieme a normale combustibile (inceneritori, termovalorizzatori). Il sistema ha attraversato negli ultimi anni una importante evoluzione tecnologica che consente, qualora si utilizzino le tecnologie più avanzate, di limitare notevolmente le emissioni inquinanti.

Energia Solare

Qui entriamo nel campo delle energie *rinnovabili vere e proprie* poichè non vi è bisogno di combustibile apposito, l'energia primaria provenendo direttamente dalla natura (sole, vento e acqua per l'idroelettrico). Occorre tuttavia precisare che di energia solare si tratta anche quando parliamo, ad esempio, di combustibili fossili, perchè è energia proveniente dal sole che è stata *capitalizzata* nei fossili in tempi geologici di milioni di anni.

L'energia solare intesa come fonte primaria *diretta* è quella che *il sole invia annualmente sulla terra*. Essa dipende dall'*insolazione*, ossia da quanta *potenza* investe ogni metro quadrato della superficie terrestre (*potenza specifica*) e che può essere utilizzata. Ed è qui che sta il limite fisico di tale fonte, che non è *concentrata* ed è *molto diluita* (diffusa). Questa *potenza specifica media* è di circa 200 Watt/m².

Il principale vantaggio dell'energia solare è che la fonte di energia è del tutto gratuita e non inquinante. Al contrario, le installazioni sono generalmente molto costose ed ingombranti e generano energia utilizzabile solo a livello locale. Questo

tipo di energia si presta molto bene per il moderato riscaldamento dell'acqua, ma non certo per generare le grandi quantità di energia necessarie per il funzionamento di una nazione industrializzata in quanto la potenza disponibile non supera circa un kW per ogni metro quadrato di superficie investita dai raggi solari.

L'utilizzazione di questa energia segue 3 vie:

- produzione di calore a bassa temperatura
- conversione termodinamica
- conversione fotovoltaica.

In tutti e tre i casi il principio base è quello di raccogliere le radiazioni solari mediante opportuni dispositivi e concentrarle in modo che siano utilizzabili. È lo stesso principio che si applica quando appicchiamo il fuoco ad un pezzo di carta concentrando i raggi solari mediante una lente di ingrandimento. Questi dispositivi vengono chiamati «*collettori solari*». L'energia raccolta, nei tre casi suddetti, viene sfruttata nei seguenti modi:

- Nel caso della «produzione di calore a bassa temperatura» viene usata direttamente per il riscaldamento dell'acqua fino ad una temperatura di circa 50°C. Nel caso della «conversione termodinamica» l'energia viene raccolta da specchi e viene concentrata su una caldaia posta su una torre; la caldaia produce vapore che aziona una piccola turbina (fig. 8).

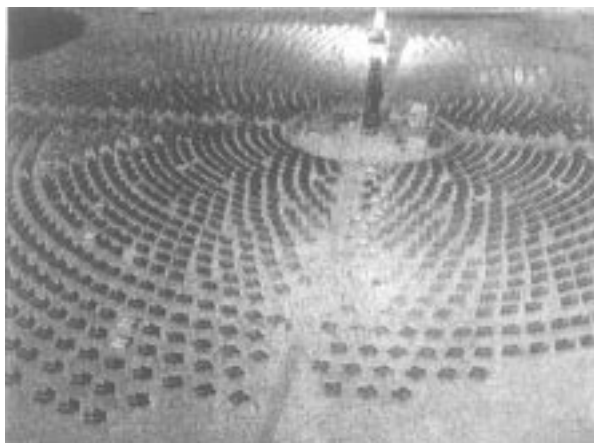


Figura 8 - Il campo specchi della centrale solare Number One in California (USA).

- In Italia è stato fatto un importante esperimento di conversione termodinamica ad Adrano. In provincia di Catania, della potenza di circa un MW. Per dare un'idea delle dimensioni, basti sapere che la superficie complessiva degli specchi è di 6.200 metri quadrati, e il territorio complessivamente occupato è di 35.000 metri quadrati. Per avere un termine di paragone, approssimativamente le aree occupate rispettivamente dal campo di gioco e dall'intero stadio olimpico di Roma.

- Nel caso della «conversione fotovoltaica» l'energia portata dalle radiazioni solari su certi tipi di materiali (per esempio il silicio) induce l'estrazione di elettroni che opportunamente convogliati danno luogo a corrente elettrica (fotoni = luce, volt = differenza di potenziale elettrico). Si ha così produzione diretta di energia elettrica con una certa efficienza che tuttavia è limitata (<15%) (vedi fig. 9).

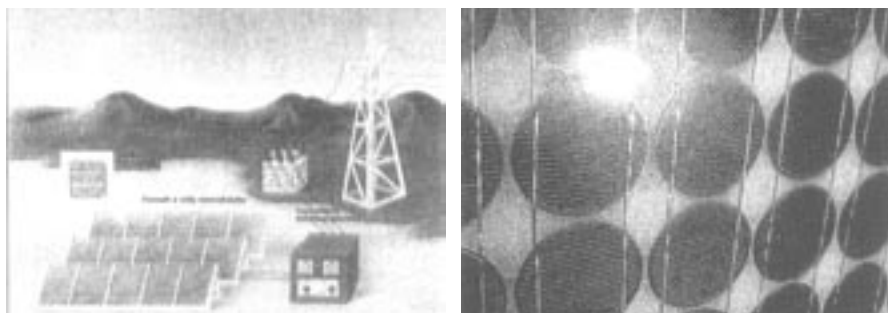


Figura 9a/b - Schema di principio di una centrale di conversione fotovoltaica (a sinistra) e particolare di celle fotovoltaiche (a destra).

Energia Eolica

È l'energia derivata dal vento, e prende il suo nome da Eolo, il mitico re dei venti della mitologia greca. Il principio, molto semplice, è quello di far girare un'elica, solidale con il rotore di un piccolo alternatore. In pratica, è molto simile al principio di funzionamento di un mulino a vento, solo che in questo caso l'energia non viene utilizzata direttamente come energia meccanica ma trasformata in energia elettrica (fig. 10).

Naturalmente si tratta di un' energia molto discontinua, come lo è il vento stesso, ed il miglior utilizzo può essere quello di impiegarla per caricare batterie di accumulatori, cioè immagazzinarla per utilizzarla in seguito in modo più continuativo.



Figura 10 - Un generatore di una centrale eolica.

I generatori eolici di massima potenza raggiungono oggi 1 MW e hanno notevoli dimensioni (circa 80 metri di altezza e 30 metri di apertura delle pale) con un impatto spaziale non indifferente ed una efficienza dell'ordine dell'1%.

L'Energia Nucleare

È sicuramente una delle scoperte che hanno modificato il corso della storia umana. Tutte le fonti energetiche note e utilizzate dall'uomo fino alla fine dell'ottocento erano quelle che venivano dal sole, sia direttamente che indirettamente. Un bue può trascinare un aratro perchè mangia il fieno, il quale a sua volta cresce con la luce solare per la reazione clorofilliana. I combustibili fossili non sono altro che energia solare congelata nelle ere geologiche. Per essere precisi questo non è il caso dell'energia geotermica (calore latente della terra) e di quella delle maree (energia gravitazionale terra-luna) ma comunque il loro apporto non è molto rilevante. Restava da capire quale fosse l'energia che, a sua volta, sostiene il sole e le altre stelle.

La risposta venne data dall'energia nucleare, che nell'accezione più comune è quella che si ottiene dalla scissione o *fissione* di un nucleo pesante con un neutrone, con formazione di due o tre nuclei la cui massa complessiva è minore di quella del nucleo di partenza oppure dalla unione o *fusione* di due nuclei leggeri, con formazione di un nucleo la cui massa è minore della somma delle masse dei nuclei di partenza. In ambedue i processi si ha una perdita di massa e il rilascio di una grande quantità di energia, che si trasforma ben presto in calore. L'energia vale, seconda la ben nota equivalenza di Einstein, la perdita di massa moltiplicata per il quadrato della velocità della luce (300.000 km/s).

$$E = mc^2$$

La fissione è sfruttata industrialmente fin dagli anni '50. Essa è utilizzata nei reattori nucleari, che sono delle vere e proprie caldaie. La fusione è tuttora attivamente studiata per comprenderne pienamente la fenomenologia fisica e per dimostrarne la capacità di autosostenersi, cioè di produrre almeno l'energia necessaria al mantenimento della reazione. La possibilità di un suo sfruttamento industriale non è ancora del tutto certa e comunque dovrebbe avvenire in un futuro abbastanza lontano (2050?). Tuttavia la fusione è il processo che genera il calore delle stelle e quindi del sole.

I due processi sono schematizzati, in fig. 11.

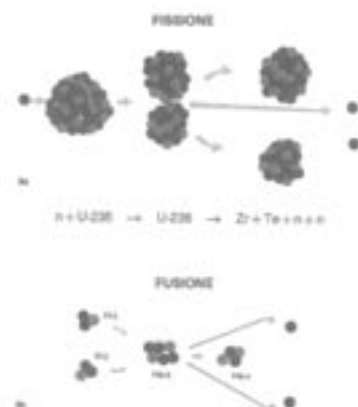


Figura 11a/b - Esempio di fissione dell'Uranio-235. 1^a fase: un neutrone urta un nucleo di U-235; 2^a fase si forma U-236 instabile; 3^a-4^a fase: il nucleo si spacca in due frammenti grossi (nel nostro caso Tellurio e Zirconio), e due piccoli frammenti corrispondenti a due neutroni. In molti casi i piccoli frammenti (neutroni) sono 3.

Esempio di fusione. Due nuclei di Trizio si fondono e generano un nucleo di Elio-4 (particella α) e due neutroni. Affinché i due nuclei iniziali possano «fondere» occorre superare la repulsione elettrica fra i protoni (cioè tra le sferette grigie); sotto una certa distanza la coesione tra nucleoni è molto più forte della repulsione elettrica.

Nel caso della fusione si ha la *sintesi* di 2 nuclei leggeri (esempio Deuterio D e Trizio T, due isotopi dell'Idrogeno): si forma un nucleo più pesante l'Elio (He) con emissioni di un neutrone e liberazione di energia. Nel secondo un nucleo pesante (esempio Uranio fissile, U235) bombardato da un neutrone si spacca (*scissione*) in due nuclei più leggeri (Bario e Kripton) emettendo altri neutroni e liberando energia.

Il fatto peculiare della fissione è che essa si *propaga* perchè ad ogni scissione si liberano più di un neutrone e si innesca una *moltiplicazione* di reazioni (*reazione a catena*, vedi fig. 12.)



Figura 12 - Schema di reazione a catena (sferette nere=neutroni). Nel caso illustrato ad ogni «generazione» il numero di nuclei fissionati raddoppia (il fattore di moltiplicazione K è perciò uguale a 2).

Tale moltiplicazione può avvenire rapidamente e divergere fino all'*esplosione* (bomba)

oppure essere *controllata* (rallentando la reazione a catena con appositi *assorbitori* di neutroni, per esempio barre di Cadmio, che possono frenare il processo continuo di scissione ed anche *bloccarlo* e quindi *spegnere* il processo). Naturalmente occorre, per mantenere il processo, dare ai neutroni le velocità necessarie e più utili per scindere i nuclei di Uranio e per questo vanno *rallentati* con opportuni *moderatori* (per esempio grafite o acqua).

La potenzialità dell'energia nucleare è enormemente maggiore di quella dei combustibili fossili: un kg di petrolio può fornire 45 MJ (megajoule), mentre un kg di uranio naturale può fornire, usato in un reattore commerciale, 500.000 MJ (ovvero 10.000 volte di più).

La fissione ha tre caratteristiche fondamentali: 1) produce una grande quantità di energia, ii) è innescata da un neutrone e produce a sua volta neutroni, così da consentire l'autosostentamento della reazione. Iii) produce sostanze radioattive sia nel combustibile, l'uranio, sia negli altri elementi strutturali necessariamente presenti in un reattore nucleare.

La nascita dell'energia nucleare, come fonte alternativa di energia, si può far risalire alla seconda metà degli anni '60, quando si dimostrò concretamente che l'energia elettrica prodotta da un reattore nucleare era economicamente competitiva. Tra le più importanti fonti di energia per il soddisfacimento del fabbisogno energetico mondiale, l'energia nucleare è quella di più recente introduzione. Il suo contributo attuale è circa pari al 6% del fabbisogno energetico mondiale, praticamente tutto sotto forma di energia elettrica (16%). L'energia nucleare è una fonte molto importante per l'umanità ed è quindi opportuno che sia meglio conosciuta. Essa infatti è svantaggiata dal fatto di essere poco conosciuta, non intuitibile, non utilizzabile in modo diffuso e soprattutto di essere implicitamente collegata, nell'immaginario collettivo, alle bombe atomiche. Tutto ciò ha facilitato il diffondersi di una sua immagine negativa al limite della demonizzazione, anche per l'azione di disinformazione di vari gruppi organizzati.

Nella fig. 13 sono riportati gli schemi semplificati dei reattori nucleari più usati (moderati e raffreddati ad acqua, bollente o a pressione) nei Paesi occidentali e più industrializzati, insieme con lo schema del reattore di Chernobyl (RBMK) moderato a grafite e, come si vede, privo di *contenitore esterno*.

Furono queste peculiarità a rendere più disastroso l'incidente del 26 aprile 1986 in Ucraina, dovuto fra l'altro a gravissimi errori nella gestione di un esperimento estremo da parte degli operatori della Centrale nucleare (fig. 13).

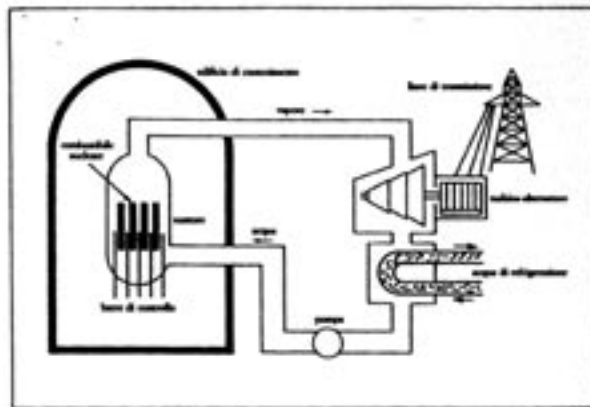


Figura 13a - Schema semplificato di un reattore ad acqua bollente.

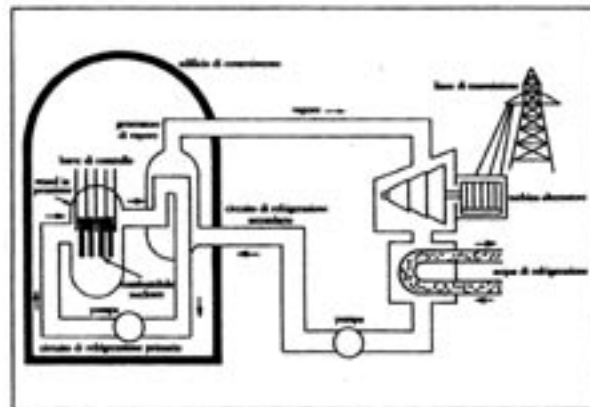


Figura 13b - Schema semplificato di un reattore ad acqua pressurizzata.

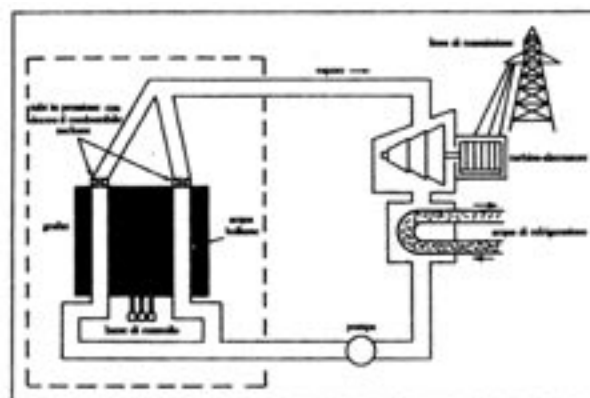


Figura 13c - Schema semplificato del reattore di Chernobyl (RBMK-1000).

Una cosa importante da ricordare è che, contrariamente ai luoghi comuni ampiamente diffusi e propagandati, la produzione di *energia elettronucleare*, dopo Chernobyl, è aumentata di oltre il 60%, passando da circa 1700 TWh a circa 2700 TWh (miliardi di kilowattore) (vedi fig. 14).

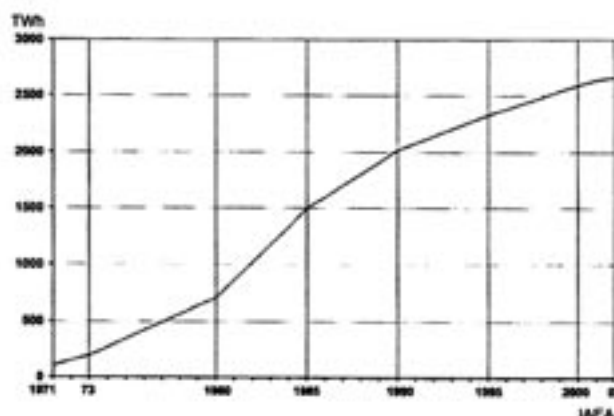


Figura 14 - Produzione mondiale di energia elettronucleare (1971-2002).

Nuove centrali sono in costruzione in Giappone, Corea, Cina, Russia e Finlandia. Inoltre il fatto che, grazie a significativi progressi tecnologici, la durata della vita di centrali nucleari occidentali (in particolare negli Stati Uniti) sia stata prolungata dai 25-30 anni ai 50-60 anni, rinvia la loro dismissione e costituisce un atout economico e competitivo ben significativo rispetto alla costruzione di nuovi impianti.

Del resto, è alquanto improprio parlare di uscita progressiva dal nucleare dei Paesi che detengono tale patrimonio e ben si guardano dal privarsene. Ne è prova la Svezia (46% di energia elettrica prodotta da 11 centrali nucleari) che, dopo un primo referendum abrogativo, ha chiuso una centrale (Barseback) nel 2000 e rinviato ogni ulteriore decisione «*per mancanza di alternative valide sul piano economico e ambientale*». La Svizzera ha da poco tempo bocciato un referendum teso a bloccare e a chiudere le sue cinque centrali nucleari. In Germania la decisione di limitare a 35 anni (in pratica fino al 2020) la vita utile degli impianti nucleari trova notevoli opposizioni ed è difficile pensare che tale Paese possa permettersi di rinunciare a una fonte che copre il 33% del fabbisogno elettrico nazionale. La Francia, con la conferma della sua scelta nucleare, registra il più basso e stabile costo del KWh in Europa e ha ridotto dal 1973 a oggi la sua dipendenza energetica dal 78 al 50% e le proprie emissioni di CO₂ del 30%, riuscendo a rientrare nei vincoli del protocollo di Kyoto.

L'Italia «uscita» dal nucleare a seguito dell'interpretazione «politica» di un referendum di venti anni fa, interpretato in modo restrittivo, è tuttavia tra i Paesi europei che utilizzano in modo consistente l'energia elettronucleare (18-20% del fabbisogno nazionale di energia elettrica fornita dalle centrali di Francia, Svizzera e Slovenia).

4. Incidenza delle varie fonti sulla produzione di energia. Confronti

Nella tabella III è riportata la produzione mondiale di energia primaria divisa per fonti con il loro contributo percentuale.

Fonte	Energia prodotta (GW/anno)	Percentuale sul totale
Petrolio	5.700	38
Carbone	3.700	25
Gas naturale	3.500	23
Nucleare	925	6,25
Idroelettrico	925	6,25
Altre rinnovabili	250	1,5
Totale	15.000	100

Si vede che i combustibili fossili costituiscono circa l'85% del totale. Tenendo conto non solo dei problemi di sicurezza e ambientali, ma anche delle prospettive di approvvigionamento (40-50 anni per il petrolio, 50 e 200 rispettivamente per il gas e il carbone, al ritmo dei consumi attuali) è chiaro che, malgrado il predominio dei combustibili fossili (ancora per due o tre decenni all'incirca) la riduzione delle riserve e il conseguente aumento dei costi impongono la necessità di utilizzare fonti alternative. Ciò anche in relazione alle previsioni ormai realistiche di una crescita della popolazione mondiale di circa il 25% nei prossimi 20 anni (da 6 a 7,5 miliardi di abitanti) e di un corrispondente aumento dei consumi totali di energia (e delle concomitanti emissioni di CO₂) del 50%. Tali crescite riguarderanno soprattutto i Paesi in via di sviluppo, in particolare le cosiddette «*economie emergenti*», come ad esempio la Cina, l'India e alcuni Paesi del Sudamerica.

Ancora più significativa è la situazione relativa alla produzione di energia elettrica per due ragioni: perchè l'energia elettrica è un indice significativo del benessere e dello sviluppo sociale e perchè nella produzione di tale energia conta l'uso di fonti primarie e del loro impatto ambientale (per esempio le emissioni di CO₂).

Nella Tabella IV viene riportata tale produzione con il contributo percentuale delle varie fonti primarie e nella Fig. 15 le emissioni di CO₂ dai vari impianti di produzione a seconda delle fonti per ogni kWh.

Fonte	Mondo		Europa		USA	
	GW/anno	%	GW/anno	%	GW/anno	%
Fossile	1.250	66	205	52	330	71
Nucleare	300	16	110	28	90	20
Idroelettrico	310	16	62	16	30	7
Altre rinnovabili	40	2	16	4	10	2
Totale	1.800	100	393	100	160	100

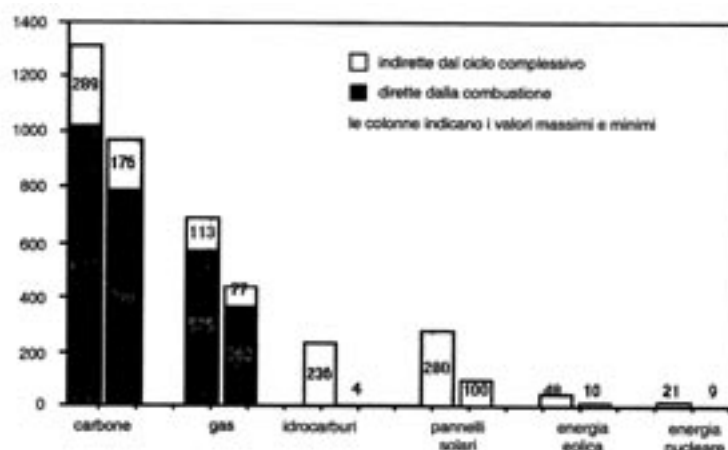


Figura 15 - Emissioni di gas serra dalla produzione di energia elettrica.
Le 2 colonne per ogni fonte rappresentano i valori massimi e minimi.

È significativa e alquanto anomala la situazione italiana rispetto al mondo industrializzato. Come si vede dalla Tabella V (consumo per fonti di energia primaria) e VI (energia elettrica) noi non produciamo ma utilizziamo energia elettronucleare (importandola) e siamo il paese che più consuma (e importa) combustibili fossili ed usa più petrolio (olio combustibile) per produrre energia elettrica.

Tabella V Consumo italiano d'energia primaria e contributo percentuale dalle varie fonti (anno 2004)		
Fonte	Consumi (GW/anno)	Percentuale sul totale
Petrolio	117	44
Gas naturale	88	33
Carbone	23	9
Nucleare importato	13	5
Geotermia + RSU + altro	5	2
Totale fonti «non solari»	246	93
Idroelettrico	13	5
Legna da ardere e altre biomasse	<4	1,5
Eolico e solare diretto	<2	<0,5
Totale fonti «solari»	<19	7
Totale	265	100

Tabella VI Energia elettrica in Italia (anno 2004)		
<i>Fonte</i>	<i>Contributo (%)</i>	
	<i>Produzione (32 GW/anno)</i>	<i>Consumo (37 GW/anno)</i>
Fossile	81	70
Nucleare	zero	13
Geotermia + RSU	5	<4
Idroelettrico	14	13
Solare non-idro	1	<1

Confronto tra diverse fonti. Costi e impatto ambientale

Se si confrontano le varie fonti primarie tenendo conto di tutti i costi compresi quelli ambientali, si trova che il costo totale per un impianto che produce 1000 MWe (MegaWatt elettrici) è realisticamente di 1400-1500 \$/kWe per il nucleare, con un'area occupata di 15 ettari, 1770 \$/kWe per il carbone (area occupata 30 ettari), 1500 per l'olio combustibile (20 ettari), 1200 per il gas naturale (12 ettari) mentre, escludendo gli impianti idroelettrici per le cosiddette *nuove energie rinnovabili* come il solare (fotovoltaico) e l'eolico, si hanno rispettivamente costi totali di impianto di 7.200 \$ al kWe (area occupata 200 ettari) e 2.400 \$ al kWe (12.500 ettari).

Tenendo conto inoltre dei costi di funzionamento e della effettiva disponibilità, si ottiene che il prezzo di kWe è di circa 3 centesimi di euro per il nucleare, 4 per il carbone, 7 per l'olio combustibile, 6 per il gas a ciclo combinato, 55 per il fotovoltaico e 11 per l'eolico.

Corrispondentemente le emissioni di CO₂ nulle per il nucleare e le energie rinnovabili, ammontano a 7,5 Mtonn annue per il carbone, 6,2 per l'olio combustibile e 4,3 per il gas. Differenze notevoli si hanno anche per le emissioni di ossidi di zolfo e di azoto, comuni a tutti i combustibili fossili e assenti negli impianti nucleari, fotovoltaici ed eolici. Un dato interessante è il rapporto fra energia spesa ed energia ricavata: 1,7% per il nucleare, 5% per il carbone, 3% per l'olio combustibile, 3,8% per il gas mentre sale al 27% per il fotovoltaico e al 16,7% per l'eolico. Il che è correlato con il fatto che il *fattore di carico* (grosso modo la percentuale di utilizzazione) è del 90% per le centrali nucleari, a carbone, olio e gas, mentre è del 15% e del 30% rispettivamente per il fotovoltaico e l'eolico. In effetti, a fianco di un *sistema rinnovabile* va sempre previsto un metodo tradizionale di supporto e completamento, pena interruzioni impreviste e imprevedibili, con un aggravio ulteriore di costi.

Una questione altrettanto importante è, ovviamente, la relazione tra massa del combustibile e l'energia prodotta. In effetti, per ogni Kg di combustibile si ottiene:

1 Kg di legna:	1 kWh
1 Kg di carbone:	3 kWh
1 Kg di petrolio:	4 kWh
1 Kg di uranio:	50.000 kWh
(con riprocessamento):	3.500.000 kWh

(Il confronto non riguarda ovviamente fonti rinnovabili come il solare e l'eolico, che per natura sono inesauribili (alla scala umana).

Altro dato interessante è la disponibilità delle riserve energetiche che si misura in anni di possibile sfruttamento a costi economicamente affrontabili.

La Tabella VII mostra questi dati per le fonti non rinnovabili:

<i>Fonte</i>	<i>Anni</i>
Petrolio	40
Gas	50
Carbone	200
Uranio	300
Uranio in Surgeneratori	20.000
Uranio e Torio in Surgeneratori	infinito

In effetti ciò che detterà l'evoluzione e il declino delle fonti primarie di energia sarà la loro convenienza economica, da una parte, e l'assestamento ragionevole dell'impatto ambientale dall'altra.

Nel primo caso giocherà soprattutto il costo di approvvigionamento del petrolio che trascina sempre il prezzo di tutti i prodotti energetici.

Esso pone seri problemi, anche se non tutti gli economisti sono d'accordo, di fronte alla realtà delle scorte mondiali – 2700 miliardi di barili, di cui già 1000 consumati – e senza contare il fatto che appare sempre più credibile *l'ipotesi di Hubbert* sulla curva della effettiva disponibilità del petrolio, la cosiddetta *curva critica*, il cui massimo (parità fra domanda e offerta) verrebbe a cadere fra non più di 10 anni, dopodiché la domanda supererebbe l'offerta.

Il confronto tra possibili nuove risorse e ritmo accelerato dei consumi appare negativo di fronte alla scomoda verità che l'80% del petrolio oggi prodotto proviene da giacimenti scoperti prima del 1973 e che la capacità produttiva della grande maggioranza dei giacimenti sta declinando. Vi è discussione su possibili nuove scoperte, anche se la tendenza dopo il massimo degli anni 60, è alla diminuzione.

Infine, occorre considerare che il fabbisogno tendenziale di petrolio è dettato ormai più che dai paesi industriali avanzati, dalla domanda che vanno esprimendo le vaste aree geopolitiche in via di sviluppo e si stima che crescerà del 60% entro il 2020.

Nel secondo è chiaro ormai che la *Questione Ambientale* entra nel gioco in modo

determinante. Del resto l'uomo ha sempre interferito con l'ambiente fin dalla *scoperta del fuoco* per ciò che riguarda, in particolare, la produzione di energia e via via con l'agricoltura, con l'estrazione e l'utilizzo del carbone fossile e poi del petrolio.

In questo contesto va vista anche la questione, più strettamente correlata con la produzione di energia, dell'«effetto serra» di origine antropica e delle (presunte) conseguenze, secondo visioni ormai diffuse, addirittura catastrofiche dal punto di vista climatico quali la teoria (che di «teoria» per ora si tratta) del «riscaldamento globale». Che il pianeta in cui viviamo subisca cambiamenti climatici anche notevoli legati a variazioni di temperatura di più di 5-6°C nei secoli e nei millenni della propria storia è, o dovrebbe essere, noto ed è ampiamente studiato. Restano le crescenti preoccupazioni che le attività umane possono essere una causa importante delle apparenti alterazioni del clima riscontrabili a livello planetario. Esse tuttavia si confrontano con notevoli incertezze, dovute alla flessibilità dei modelli computerizzati utilizzati per i possibili scenari e alla variabilità dei riscontri nelle misure di temperatura per esempio a terra, in aree urbane o con strumenti satellitari. Non vi è quindi accordo sul fatto che i gas-serra antropogenici siano il fattore dominante.

Le misure proposte al fine di «rimediare» e «prevenire» tale ipotetico rischio sono, come noto, riassunte nel Protocollo di Kyoto. Tale Protocollo, inteso come Patto Planetario e costruito sulla base del cosiddetto Principio di Precauzione preso alla lettera, senza una più approfondita analisi del rapporto costi/benefici, sancisce le restrizioni e gli interventi che i vari paesi si obbligano a rispettare per ricondurre il tasso annuale di emissioni entro il 2012 (più precisamente tra il 2008 e il 2012) a un pò meno del 95% del livello complessivo del 1990. In ogni caso, comunque lo si giudichi, il Protocollo di Kyoto, anche se interamente applicato, avrebbe risultati poco significativi, visto che la richiesta riduzione della CO₂ (che, tra l'altro, non è il principale gas serra, tenuto conto del vapor d'acqua e del metano, ad esempio) avrebbe l'effetto di spostare solo di qualche anno (e di qualche punto percentuale) l'entità del riscaldamento globale, qualunque ne sia l'origine, eventualmente prevista per il 2100.

L'Europa è all'avanguardia nel propugnare il Protocollo di Kyoto. Tuttavia lo zelo europeo non è confortato da politiche virtuose, visto che solo 4 paesi (Germania, Svezia, Regno Unito e Francia) sembrano in grado di arrivare a rispettare tali limiti, mentre per il resto, Italia compresa, si è già abbondantemente al di sopra (mediamente più del 7-8%) (vedi fig. 16).

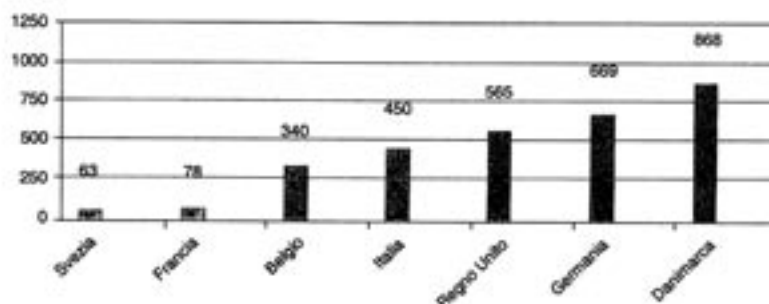


Figura 16 - Emissioni di CO₂ in tonn/kWh in vari Paesi europei.

Non è strano che tra i paesi più virtuosi vi siano quelli che usano in modo consistente l'energia nucleare (vedi Svezia e Francia rispetto per esempio alla Danimarca) l'unica fonte *su larga scala*, esente da emissioni. Sarà pertanto problematico il raggiungimento dell'obiettivo del 5,8% per l'Unione Europea.

Quali sono dunque le possibili vie da intraprendere? Secondo il Consiglio Mondiale dell'Energia: «*Tutte le nazioni industrializzate si rendono conto che la diversificazione dei combustibili nella produzione di energia elettrica significa semplicemente che si dovranno usare più carbone e più nucleare e che nessuna fonte dovrà essere trascurata per arbitrarie ragioni politiche*».

È questo il motivo strategico di fondo per cui occorrerà considerare, scientificamente oltretutto economicamente, tutte le fonti energetiche disponibili e potenziali, senza discriminazione o emarginazione di alcuna, tramite un confronto oggettivo dei costi e dei benefici corrispondenti.

E veniamo al punto. Per far fronte ai fabbisogni energetici di tutta la società umana, sempre più legati all'evoluzione dei paesi in via di sviluppo, si dovrà prendere in conto ogni possibile soluzione derivante da una lista completa delle sorgenti di energia che l'umanità potrà spillare *a una scala significativa* durante il secolo.

Appendice. Digressioni su possibilità future

Si è accennato, come altra possibilità di sfruttare l'energia nucleare, alla fusione. Come si è visto, il principio della *fusione nucleare* è opposto alla *fissione* e consiste nel processo di sintesi di due *nuclei leggeri* (per esempio Deuterio e Trizio) per formarne uno più pesante (tipicamente Elio) liberando energia. Tali sono le *reazioni termonucleari* che avvengono nel sole a temperature elevatissime (decine di milioni di gradi) che ne fanno una fornace (dal cui calore dipende la vita sulla terra) che, tra l'altro, dopo qualche altro miliardo di anni, si spegnerà quando tutto l'idrogeno sarà bruciato e trasformato in Elio.

Per avere un'idea di quanta energia si potrebbe liberare si pensi che «*bruciando*» un Kg di deuterio si ottiene un'energia equivalente a 100 milioni di volte quella ottenibile (chimicamente) da 1 Kg di carbone o petrolio. D'altra parte, 1 Kg di uranio corrisponde a circa 20 milioni di Kg di petrolio.

È chiaro quindi l'interesse (e la speranza) per arrivare a sfruttare questa fonte di energia che sarebbe del resto *inesauribile* (il deuterio si trova in abbondanza in natura e il trizio si ottiene dal Litio pure abbondante) e con minori problemi relativi alla sicurezza e alle scorie radioattive. Tuttavia, per produrre in laboratorio un simile processo, e quindi dimostrare la *fattibilità* di un *reattore a fusione*, occorrono condizioni estreme di temperatura e di pressione perchè una miscela di nuclei leggeri (*plasma*) opportunamente *confinati* possono avvicinarsi superando la *repulsione* dovuta alla loro carica elettrica positiva, in modo da fondersi e liberare energia *controllabile* (come avviene per la fissione), il che costituisce però ancora una barriera cui ci si è man mano avvicinati senza però superarla.

Ciò peraltro avviene ma in *modo rapido ed esplosivo* nella bomba termonucleare (bomba H).

La fusione nucleare può avvenire in diversi modi. Due sono gli approcci più significativi: il «*confinamento magnetico*» e il «*confinamento inerziale*». Nel primo caso (il più classico e il più noto) il plasma di deuterio e trizio viene confinato entro un «*Tokamak*» (anello toroidale sede di un intenso campo magnetico) ad altissima temperatura (10-20 milioni di gradi) per tempi sufficientemente lunghi (dell'ordine del secondo, vedi fig. 17).

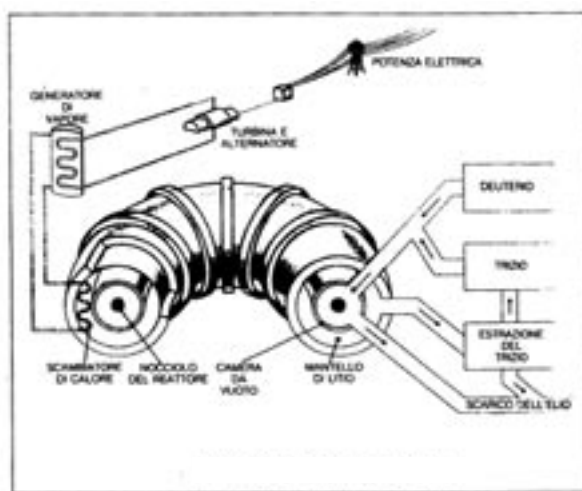


Figura 17 - Schema ideale di un reattore a fusione.

Dopo una serie di esperimenti culminati con il reattore sperimentale europeo JET (Joint European Torus) a Culham (Inghilterra), con la prima dimostrazione di innesco della reazione D+T, anche se non continua, gli sforzi internazionali si sono concentrati nella realizzazione del reattore ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) che verrà installato a Cadarache (Francia) e che dovrebbe dimostrare la fattibilità ingegneristica di un reattore di potenza propedeutico al possibile sfruttamento dell'energia di fusione.

Il metodo di confinamento inerziale consiste nel fare *implodere* bersagli adeguati di deuterio e trizio (o deuterio e deuterio) e cioè *microcapsule* («pellets») bombardate da

radiazioni elettromagnetiche (per esempio fasci laser di grande potenza) o da fasci di ioni accelerati che producono raggi X, al fine di comprimerle a grandissime pressioni (circa 1000 volte quella di un liquido) fino a dar luogo a microesplosioni termonucleari.

La fisica di tale processo è disgiunta dall'ingegneria del reattore e quindi sarebbe di più facile investigazione. Tuttavia vi sono stati e vi sono tuttora, anche se molti dati sono stati ormai resi noti, problemi di segretezza dovuti ad aspetti tecnici d'interesse militare.

Comunque non appare realistico fare assegnamento sulla fusione nucleare per far fronte, almeno per buona parte di questo secolo, alla necessità di sostituzione dei combustibili fossili.

Possibilità tecnologiche future dell'energia nucleare da fissione sono invece i reattori veloci e i reattori sottocritici.

I *reattori veloci* utilizzano neutroni veloci che mantengono la loro velocità, ca. 20.000 Km/sec.) senza essere rallentati come avviene invece nelle normali centrali nucleari già descritte. Questi neutroni vengono assorbiti dall'uranio naturale che si trasforma in plutonio 239, che è *fissile* e quindi capace di scindersi e avviare la reazione a catena.

In altre porole nel reattore si produce «*nuovo combustibile*». Per questo motivo questi reattori vengono detti *autofertilizzanti*. Ve ne sono in fase sperimentale in vari paesi, come la Francia, il Giappone, la Russia e gli Stati Uniti, anche se per ora, trattandosi di reattori sperimentali, non risultano economicamente convenienti e con qualche problema tecnico e di sicurezza. Il loro sviluppo è ovviamente rallentato dalla concorrenza dei reattori convenzionali (a neutroni termici) e dall'attuale grande disponibilità di plutonio proveniente dallo smantellamento degli arsenali militari russi e americani.

Osserviamo che, come a suo tempo proposto da Edoardo Amaldi e Mario Silvestri, l'unico modo per eliminare le testate nucleari è quello di bruciarle come prezioso combustibile nelle centrali per la produzione di energia.

I *reattori sottocritici* sono sistemi «*ibridi*», costituiti da un insieme *acceleratore di particelle-reattore a fissione* (*Accelerator Driven System ADS*), come per esempio propugnato da Carlo Rubbia. Si tratta di accelerare protoni (con un apposito acceleratore di particelle) a circa 1000 MeV, che vengono fatti incidere su piombo (o bismuto) liquido nel quale si generano neutroni veloci che possono essere iniettati in una struttura moltiplicante *sottocritica* (cioè sotto la soglia di criticità della fissione nucleare), dove possono *fertilizzare* bersagli di uranio e torio naturale trasformandoli in materiali fissili che avviano la reazione a catena. Questi sistemi sono interessanti perchè possono distruggere nuclidi ad altissima radioattività e servire quindi come «*inceneritori di scorie radioattive*».

Va aggiunto inoltre che, per quel che riguarda i reattori a fissione, vi è ormai una notevole attività per la progettazione e costruzione di reattori di *nuova generazione*. Ne fanno parte il reattore EPR (European Pressurized Reactor) da 1600 MW già in fase di installazione con due prototipi in Finlandia e in Francia ed altri tipi di reattori

americani (terza generazione), nonchè i reattori di quarta generazione. Questi ultimi fanno parte di un'iniziativa (*Generation IV International Forum GIF*) avviata nel gennaio 2000 da un Consorzio Internazionale per la costruzione di sistemi termici ad acqua che dovranno assicurare: a) il più elevato livello di sicurezza, sia per incidenti tecnico-operativi che per atti di terrorismo; b) massima riduzione dei residui radioattivi; c) maggior sfruttamento dei materiali fissili e fertili; d) capacità di produrre direttamente idrogeno per scissione termica.

E concludiamo appunto con due parole sull'idrogeno.

L'idrogeno *molecolare* è un ottimo combustibile, non è tossico, non inquina bruciando e, combinato elettrochimicamente in una cella combustibile, produce elettricità con la sola emissione di vapore acqueo. Purtroppo esso non esiste sulla terra e bisogna produrlo da composti che contengono idrogeno (per esempio l'acqua mediante elettrolisi). La produzione deve naturalmente procedere attraverso una tecnologia che non introduca gli stessi inquinanti che vogliamo evitare, per esempio non possono essere utilizzate energie primarie come i combustibili fossili nè processi di estrazione come quelli che utilizzano il metano (CH_4) che, interagendo con acqua, produce idrogeno e anidride carbonica.

Restano i processi in cui l'energia primaria proviene dal solare, dall'eolico o dal nucleare. Tuttavia i processi per via *elettrolitica* (elettrolisi dell'acqua) richiedono un'energia maggiore di quella che si ottiene alla fine e pertanto sono solo giustificati per la produzione di carburante non inquinante. Il modo migliore per la produzione di idrogeno è quello di utilizzare centrali nucleari ad alta potenza in modo da ottenere sufficiente calore per scindere, per via termica, la molecola d'acqua in idrogeno e ossigeno.

In ogni caso l'idrogeno *non è una fonte di energia* ma un *vettore energetico* conveniente per altri motivi (trasporti) solo se si riesce a produrlo a basso costo (ovvero dal nucleare).

Infine occorre tener presente, a parte non facili problemi di immagazzinamento (ad alta pressione) e di trasporto (l'idrogeno è un gas altamente infiammabile) che a) per produrre un m^3 di idrogeno per via elettrolitica si avrebbe un costo del 30% superiore a quello del metano; b) l'idrogeno ha un potere calorifico pari a un terzo di quello del metano; c) l'energia necessaria per produrre idrogeno per via elettrolitica è 1,5 volte quella che si può ottenere dalla sua combustione.

NOTE

* Il testo corrisponde alla conferenza tenuta a Firenze, nell'ambito di Pianeta Galileo, il 27 ottobre 2006, presso l'Auditorium del Consiglio regionale della Toscana.

¹ I prefissi usati indicano i seguenti multipli: K (Kilo) = 1.000 = 10^3 , M (Mega) = 1.000.000 = 10^6 , G (Giga) = 1 Miliardo = 10^9 .

² Ovviamente, l'uso del carbon fossile (così come poi con il petrolio e il gas) aggiunge nuove possibilità di inquinamento: zolfo e catrami liberati nella combustione sotto forma di fumi e anidride solforosa, oltre all'anidride carbonica, gas non inquinante ma tra gli artefici dell'effetto serra. Reazioni sociali comunque non si fecero attendere, anche violente seppure inefficaci. Nel Settecento, a Londra, furono emessi editti per proibire l'uso industriale del carbone, pena la morte. E tuttavia il consumo dei carbone crebbe esponenzialmente (v. curva logistica di fig. 5), sostituendo progressivamente la legna. La società del resto funziona come un grande sistema autoregolantesi, che procede per azioni e reazioni cercando di compensare gli eccessi con circuiti di controllo: l'animismo delle antiche religioni che ammoniva a non tagliare gli alberi abitati dagli spiriti; l'avvento di leggi e tecnologie di controllo con il *cristianesimo* e il *rinascimento*. In Inghilterra l'aumento del consumo di carbone non peggiorò la situazione grazie a migliori tecniche di combustione, scelta dei carboni e uso di alti camini.