LINO MATTAROLO

LE CONQUISTE DELLA TERMODINAMICA E L'IMPATTO DELLA ESPLOSIONE TECNOLOGICA NELL'UOMO MODERNO *

1. La termodinamica

A chi è avanti con gli anni, e ha trascorso la propria vita di studio e di ricerca nel campo della scienza e della scienza applicata, appare normale soffermarsi a meditare come, attraverso quali dibattiti e quali difficoltà, siano state chiarite e definite, nei tempi passati, tante leggi della natura che sembrano a noi oggi così semplici e chiare.

Constatiamo che la scoperta di tali leggi ha trovato negli ultimi 150 anni applicazioni sempre più estese a vantaggio della vita fisica degli uomini ed ha portato un cambiamento totale della struttura del mondo in cui viviamo. Siamo passati da un mondo rurale a un mondo caratterizzato da uno sviluppo industriale e ci accingiamo a vivere in un mondo in cui la informatica ha il sopravvento. E questo ci obbliga a modificare non solo il nostro modo di vivere ma anche il nostro modo di pensare.

Ho passato i cinquant'anni della seconda metà del secolo scorso nella ricerca e nell'insegnamento nel settore dell'ingegneria meccanica e della energetica, in particolare nel settore affascinante della termodinamica e della termodinamica applicata.

Il mio discorso riguarderà questo settore, al di fuori di ogni incursione nel campo della biologia, che è al di là delle mie competenze. Più precisamente farò riferimento alle conseguenze che le conquiste della termodinamica hanno portato nell'uso razionale delle sorgenti di energia che la natura a noi offre e il cui crescente impiego caratterizza, più di ogni altro aspetto, il cambiamento cui si è fatto cenno.

Siamo arrivati, dopo secoli di stasi, quasi d'improvviso a quello che si dice «era tecnologica». Cosa succederà nei prossimi decenni?

Cominciamo da alcune definizioni: scienza, tecnica e tecnologia.

Una distinzione fra scienza e tecnica è stabilita in base alle diverse funzioni specifiche: funzione della scienza è l'acquisizione di conoscenza; funzione della tecnica è la realizzazione di certi procedimenti e

* Conferenza tenuta il 6 maggio 2002 nell'Odeo Olimpico.

prodotti. La scienza come ricerca di verità, la tecnica come attuazione di qualche cosa di utile.

Oggi assistiamo a una relazione strettissima fra le due: da una parte le conoscenze scientifiche finiscono sempre per essere sfruttate direttamente o indirettamente dalla tecnica; e caratteristica della nostra epoca è che l'intervallo di tempo fra una scoperta scientifica e la sua applicazione pratica si accorcia sempre di più; e d'altra parte la scienza nel suo progredire si avvale dell'uso di strumenti che la tecnica propone. Possiamo esemplificare. Nel 1939 si scopriva la fissione nucleare, quel fenomeno per cui i nuclei di un elemento pesante, l'uranio, opportunamente bombardati da neutroni, si possono scindere in due parti ove la somma delle masse dei due elementi ottenuti è inferiore alla massa dell'elemento di partenza. La differenza si trasforma in energia secondo la famosa equazione di Einstein che dice che l'energia ottenuta è eguale al prodotto della massa mancante moltiplicata per il quadrato della velocità della luce. Tre anni dopo, nel 1942, Enrico Fermi costruiva la prima pila atomica; sei anni dopo, nell'estate del 1945, scoppiava la prima bomba atomica in Giappone.

Di converso la tecnica di questi ultimi decenni ha costruito calcolatori elettronici di enorme potenza e di incredibili possibilità. La scienza se ne avvantaggia per indagini prima impensate sul comportamento della materia.

Un tempo non era così: la relazione fra scienza e tecnica non era così stretta. Si può dire al limite che il rapporto fra scienza e tecnica non esisteva. Se consideriamo lo stato della nostra civiltà a partire da cinque secoli avanti l'inizio dell'era cristiana, troviamo a quali livelli era arrivato il mondo classico nel campo della letteratura, della filosofia, delle arti figurative e drammatiche, dell'astronomia, della geometria e della matematica. Ma l'idea di una scienza che potesse essere messa al servizio della pratica era estranea alla sensibilità culturale classica. Lo studio della natura era volto a indagare le cose nella loro intima essenza sul piano filosofico e religioso. Durante il periodo della civilizzazione greca e romana l'atteggiamento dell'uomo che investigava sulla natura era piuttosto contemplativo e disinteressato. La natura era considerata un oggetto di conoscenza e non una realtà suscettibile di trasformazioni e manipolazioni.

La tecnica, per la sua parte, era intesa come un insieme di procedure operative, messe insieme da pionieri o da geniali inventori per il raggiungimento di fini particolari: procedure operative che si miglioravano attraverso l'esperienza, sapendo come si fanno certe cose, senza domandarsi il perché. E si puo tracciare una storia della tecnica prescindendo quasi completamente dalla storia della scienza.

In linea generale questa ultima affermazione può apparire troppo

drastica. Vi è un bel volume di L. Russo (uscito da Feltrinelli pochi anni fa) *La rivoluzione dimenticata*, in cui l'autore, facendo riferimento soprattutto al periodo dell'ellenismo, dalla morte di Alessandro Magno nel 323 a.C. alla conquista romana dell'Egitto nel 30 a.C., tenta di retrodatare la nascita della «scienza moderna» di duemila anni. Si ricordano per lo più, nel periodo ellenistico, scienziati come Euclide e Archimede: essi non furono eroi e non furono solitari, ma elementi di spicco di una schiera avanzatissima di scienziati (ricordiamo per esempio Aristarco di Samo che aveva già ideato la concezione eliocentrica dell'universo, assegnando alla terra la natura di pianeta). Certo molti lavori prodotti dalla civiltà ellenistica andarono perduti. L'estendersi dell'impero romano, caratterizzato sopratutto dalla organizzazione militare e dallo sviluppo del diritto, fu la causa di queste perdite.

A noi moderni comunque questa stasi nell'avanzamento e nella razionalizzazione della tecnica appare strana. E non è vero che il contadino di cento anni fa usava per i suoi lavori delle stesse tecniche e degli stessi mezzi di oltre duemila anni fa?

Si rifletta in particolare sul tema che qui interessa: lo sfruttamento delle sorgenti naturali di energia. Nell'antichità questo sfruttamento (ai fini beninteso della produzione di energia meccanica) era quasi nullo, salvo sporadiche utilizzazioni dell'energia eolica e dell'energia idraulica. L'energia era fornita dalla fatica fisica dell'uomo e degli animali. Forse che la presenza degli schiavi è stata la causa che ha ritardato il progresso in questo campo?

Per non dilungarci arriviamo alla rivoluzione galileiana all'inizio del XVII secolo. Essa ha invitato gli uomini a un nuovo tipo di conoscenza della natura: al posto di considerare le cose dal punto di vista filosofico e religioso *indaghiamo come le cose si comportano e questo con l'aiuto della matematica e del metodo induttivo*. E questo invito di Galileo è stato di una portata enorme. La tecnica ha approfittato di questo nuovo tipo di sapere offerto dalla scienza arrivando a capire le ragioni del suo operare efficace. E con cio è nata la tecnologia: *tecnica supportata dalla conoscenza scientifica*. È questa la definizione del terzo termine che abbiamo sopra considerato.

Una tale diversificazione fra tecnica e teenologia sarà adottata nel seguito di questa nota, anche se su ciò non tutti concordano, come non vi è accordo nelle diverse lingue. In inglese per esempio prevale il termine technology che ricopre il significato di tecnica e tecnologia insieme; in francese prevale il termine technique ed anche in Italia i due termini sono spesso usati in modo intercambiabile. Mi rifaccio in questa distinzione a un lucido testo di E. Agazzi apparso una diecina di anni fa: *Il bene e il male e la scienza*, testo cui faccio riferimento in altri punti di questa mia relazione.

Il proclama lanciato da Galileo nel primo decennio del seicento doveva faticare prima di dare frutto: prima che la visione della natura si razionalizzasse e che all'alchimia si sostituissero le leggi delle reazioni chimiche e si definissero le leggi del comportamento dei gas e in specie venissero fissati i principi della termodinamica.

Possiamo dire che, per quanto riguarda il nostro tema delle trasformazioni termodinamiche, il periodo cruciale si ebbe nella prima metà dell'ottocento con le faticose disquisizioni sul primo e sul secondo principio e con i dibattiti sulla definizione di cosa debba intendersi per «calore».

Si è soliti fissare l'inizio della termodinamica nell'anno 1824, quando Leonard Sadi Carnot pubblicava a Parigi un limpido saggio: *Reflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance.*

Sadi Carnot era allora ventottenne, aveva frequentato l'Ecole Polytechnique, quella straordinaria istituzione, fondata da Napoleone nel 1795 che sarà poi la fucina dove si formeranno nei decenni successivi una meravigliosa fioritura di ingegni mai conosciuta da alcuna altra scuola: Lagrange, Fourier, Biot, Poisson, Gay Lussac, Arago, Cauchy, Navier, Fresnel, Regnault, Poiseuille, Clapeyron ed altri ancora.

Sadi Carnot apparteneva ad una eccezionale famiglia: il padre Lazzaro, uomo politico e generale sotto Napoleone, aveva lasciato tracce non trascurabili di scritti di matematica; il nipote di Sadi, figlio del fratello Hippolyte, di nome Marie François, diverrà presidente della Repubblica Francese e morirà tragicamente nel 1894 vittima di un attentato.

Purtroppo la vita di Sadi Carnot doveva concludersi anzitempo: egli moriva nel 1832 a soli 36 anni vittima di una epidemia di colera. Se egli fosse vissuto, probabilmente più rapido sarebbe stato il progresso della scienza che egli aveva fondato.

Una breve digressione a proposito delle *Reflexions*. Quelle parole «puissance motrice du feu» fanno pensare. Per millenni l'umanità aveva utilizzato la potenza riscaldante e la potenza illuminante del fuoco ma non aveva costruito sistemi per utilizzare sistematicamente la potenza motrice e tanto meno aveva formulato teorie al riguardo. E dovevano passare poi quasi due secoli, dai primi del seicento ai primi dell'ottocento prima che l'avvio di Galilei trovasse sviluppo: da una parte nelle scoperte o nelle invenzioni di strumenti per opera di pionieri che, sprovvisti di teoria, costruivano una tecnica e d'altra parte nel faticoso impegno di ricercatori e scienziati che ricavavano le leggi razionali che reggono il mondo fisico e costruivano una scienza.

Oggi questa tecnologia, dominio razionale della natura e sfruttamento delle sue risorse per il miglioramento delle condizioni di vita

degli uomini, presenta un crescendo impressionante. I 9 miliardi di petrolio equivalente che si consumano annualmente nel nostro pianeta, corrispondono a una disponibilità media giornaliera di 50 chilowattora per ogni abitante. Questo equivale al lavoro muscolare di 50 operai. (Vi è tuttavia un enorme squilibrio fra le viarie nazioni: uno statunitense dispone del lavoro di 200 operai; un italiano dispone di 80 operai; un cinese o un africano di circa 15-20 operai). Si può pensare che gli antichi, per la disponibilità di mano d'opera a costo nullo, con l'impiego degli schiavi, non erano pressati dal bisogno dello sfruttamento di risorse di energia artificiali.

Ritornando a Sadi Carnot è da rilevare che nello scrivere le sue *Réflexions* egli non aveva uno scopo scientifico generale; la sua trattazione era scevra da complicazioni matematiche e mirava piuttosto a contribuire al miglioramento della macchine a vapore nelle quali la Francia si trovava nettamente in ritardo rispetto alla Gran Bretagna.

Nel suo saggio tuttavia Carnot fissava due punti che costituiscono l'essenza del secondo principio della termodinamica:

1. Per ottenere lavoro dal calore occorre che il calore passi da una temperatura più elevata a una temperatura più bassa;
2. La potenza motrice del calore è indipendente dagli agenti impiegati ed è massima se il processo è reversibile.

Carnot non aveva idea della trasformabilità del calore in lavoro ed ammetteva espressamente l'analogia di una macchina termica con una macchina idraulica ove è solo la caduta dell'acqua da un livello più alto a uno più basso che produce energia meccanica. A quel tempo il calore era generalmente definito come un fluido imponderabile e indistruttibile: il principio della conservazione dell'energia era lontano dall'essere affermato.

Carnot per vero intuiva che qualche cosa non andava in quella analogia idraulica pur così chiara ed efficace e feconda. In alcune note egli dimostrava di aver intuito il principio di equivalenza fra calore e lavoro ma, come si disse, la morte lo colse prima che potesse rendere di pubblica ragione questi risultati.

La disputa sull'entità del calore, se esso consistesse in una sostanza o se dovesse essere considerato uno stato dei corpi, costituirà un grande elemento di contrasto della fisica nella fine del Settecento e nella prima meta dell'Ottocento. Predominava all'inizio una formulazione in certo senso moderna della prima ipotesi, che sosteneva la natura sostanziale del calore attraverso la teoria del «calorico», un fluido materiale permeante gli spazi intramolecolari, che scorre dai corpi caldi a quelli freddi. La teoria era in analogia con la teoria del flogisto in chimica: ipotesi entrambe errate, come fu riconosciuto in seguito, ma capaci di essere utili ad un certo stadio

della ricerca per interpretare i risultati che uscivano dal guadro precedente.

Non mancarono nel Settecento esperimenti diretti a verificare l'esistenza del calorico, pesando i corpi prima e dopo un riscaldamento e un raffreddamento nella speranza di trovare una differenza. L'esito negativo condusse i sostenitori del calorico a parlare di un fluido privo di peso.

E d'altra parte B. Thompson, osservando per esempio il processo di alesatura della canna dei cannoni, alla fine del settecento poteva constatare che i corpi potevano perdere per attrito una quantità indefinita di calore, fornendo supporto agli avversari del calorico. Ma la discussione doveva trascinarsi a lungo nel secolo successivo. Nomi di scienziati sommi sono da ricordare a cavallo dei secoli diciottesimo e diciannovesimo quali P. Laplace, J. Fourier, autore di un'opera fondamentale *La théorie analitique de la chaleur* e ancora E. Clapeyron autore di una famosa nota nel 1834 *Memory on the motive power of heat* che richiamava le idee troppo dimenticate esposte da Carnot.

Fu tra il 1840 e il 1850 che una serie di esperimenti e di interpretazioni dei risultati raggiunti fornì un complesso di argomenti atto a demolire finalmente la teoria del calorico.

Citiamo i nomi dei principali scienziati, tutti vissuti nel diciannovesimo secolo, che stabilirono l'essenza della termodinamica quale oggi ci appare nella sua chiareza: J.P. Joule, inglese, sperimentatore finissimo che arrivò alla determinazione dell'equivalente meccanico della caloria ed enunciò la legge generale della conservazione dell'energia; J.R. Mayer, tedesco che giunse alle medesime conclusioni pur senza l'indagine rigorosamente sperimentale di Joule; «il riscaldamento di un dato peso di acqua da 0 a 1 °C corrisponde alla caduta di un eguale peso dall'alteza di 365 metri».

Tuttavia il principio di equivalenza fra lavoro e calore non poteva essere accettato facilmente. Anzitutto le misure di Joule erano assai delicate, eseguite ai limiti dell'errore sperimentale; il rifiuto del calorico poi, sulla cui esistenza si basavano le teorie termiche, non era facile. E ancora la interpretazione di Joule partiva dall'ipotesi che la struttura della materia fosse di tipo molecolare; molti studiosi obbiettavano che non si avevano prove dirette dell'esistenza di molecole e di atomi.

Ma l'ostacolo maggiore che si presentava alla fine di quel decennio era l'apparente impossibilità di conciliare il principio di Joule e le idee espresse da Carnot nelle «Reflexions» che proprio in quegli anni erano state riscoperte e riproposte. Secondo Joule vi è completa equivalenza fra lavoro e calore; secondo Carnot tale equivalenza non è possibile in quanto il calore non può essere integralmente trasformato in lavoro meccanico.

Nel travaglio di queste idee compaiono sulla scena in quel decennio geni fra i massimi fisici e matematici dell'Ottocento. Cominciamo dai primi tre: W. Thomson, irlandese (1824-1906), R. Clausius, tedesco (1822-1888) e H. Helmholtz, tedesco (1821-1894).

Il primo W. Thomson, nominato poi Lord Kelvin e con tale nome più frequentemente citato, sviluppò una attività intensissima e sbalorditiva nel decennio dal 1846 al 1856; il suo influsso fu dominante nello sviluppo della fisica in tutta la seconda metà del secolo. Ancora legato al concetto del calorico egli esprimeva dubbi sulle deduzioni di Joule: «Le sue esperienze – egli diceva – sembrano indicare una conversione effettiva di effetto meccanico in calore; non viene però riportato alcun esperimento durante il quale venga mostrata l'operazione inversa; ma bisogna confessare che ancora oggi c'è molto di misterioso per quanto riguarda questi problemi di filosofia naturale». E Kelvin non arrivava a discutere del calore come movimento a livello molecolare. Se si accettava la tesi di Joule sulla conservazione dell'energia, come mai scompariva la capacità del calore a produrre effetti meccanici allorquando il calore passava da un mezzo a certa temperatura ad un mezzo a temperatura inferiore, se tale passaggio avveniva senza l'intervento di una macchina termo-dinamica?

Il secondo, Clausius, dette un contributo essenziale alla fondazione della termodinamica, alla fisica molecolare, alla teoria cinetica dei gas. È sua una fondamentale memoria del 1850 dal titolo: *La forza motrice del calore e le leggi che da essa sono deducibili in relazione alla natura del calore stesso*. In questa nota, forse una delle più affascinanti e decisive note comparse in quegli anni, Clausius si proponeva di superare le divergenze fra Carnot e Joule: accoglieva l'ipotesi della natura meccanica del calore, non tanto fondata su un particolare modello del tipo di moto che avesse luogo nei corpi, quanto su una ipotesi generale che le particelle dei corpi sono in moto e che il calore deve essere inteso come la misura della loro «vis viva». Clausius sosteneva che non era necessario rifiutare la teoria di Carnot: bastava eliminare ogni proposizione sulla costanza della quantità di calore ed accettare che ogniqualvolta il lavoro è prodotto per mezzo del calore, si consuma una quantità di calore proporzionale al lavoro fatto. Era in pratica la definizione del principio della conservazione dell'energia. In realtà su questo principio fondamentale vari grandi scienziati fra il 1840 e il 1850 avevano espresso idee con formulazioni più o meno felici e una priorità non si può stabilire. Forse l'autore che per la prima volta la descrisse in tutta la sua generalità in termini matematici, fu Helmholtz in un suo saggio del 1847: *Sulla conservazione dell'energia*.

Kelvin finiva per accettare le tesi di Clausius e pubblicava nel 1851 una sua più ampia monografia: *La teoria dinamica del calore in relazio-*

ne ai risultati numerici dedotti dall'equivalente di Joule per l'unità termica.

Un anno dopo nel 1852 Kelvin che nel frattempo aveva conosciuto il citato contributo di Helmholtz del 1847, arricchiva la tematica della conservazione dell'energia con uno scritto intitolato: «Una tendenza generale della natura verso la dissipazione dell'energia meccanica».

Limitiamoci per brevità alle seguenti conclusioni generali:

1. Esiste nel mondo materiale una tendenza universale verso la dissipazione dell'energia meccanica.

2. Nei processi materiali ed inanimati è impossibile la reintegrazione di energia meccanica senza la dissipazione di una quantità di energia maggiore di quella reintegrata.

Il quadro quindi si chiudeva. La legge della conservazione dell'energia veniva accettata e si affermava che i sistemi fisici dovevano essere considerati come tendenti a condizioni di equilibrio seguendo una direzione precisa; l'irreversibilità dei fenomeni naturali si estendeva così a tutto l'universo, ristrutturando il quadro teorico di una natura soggetta ad una inarrestabile evoluzione.

Nel frattempo Clausius proponeva una diversa descrizione del sistema fisico affidandosi a un parametro legato all'energia e a un secondo parametro connesso alla configurazione molecolare dei sistemi che doveva diventare uno dei nodi di maggiore problematicità dell'ottocento: l'entropia.

Non possiamo in questa sede dilungarci oltre. Ci limitiamo ad esprimere in forma semplice le leggi dell'universo che corrispondono alle due leggi fondamentali della teoria meccanica del calore:

1. L'energia dell'universo e costante.

2. L'entropia dell'universo tende a un massimo.

Ma un ultimo paradosso si presentava: era relativo ai tentativi che si facevano nella trattazione del moto delle molecole nei corpi. Le equazioni differenziali del moto delle molecole in un gas erano simmetriche rispetto al tempo. Ciò implicava la perfetta simmetria dei sistemi meccanici rispetto al passato e al futuro. Come si poteva conciliare questo aspetto di analisi microscopica del comportamento della materia con i risultati della analisi macroscopica che aveva portato al concetto di irreversibilità dei fenomeni termodinamici, elaborato in termini matematici con la introduzione del potenziale entropia, per cui la completa simmetria rispetto al tempo veniva spezzata e l'universo si modificava secondo una freccia privilegiata, la freccia termodinamica del tempo, e tutto si evolveva dall'ordine al disordine?

Questo paradosso costituì uno dei termini dominanti la fisica teorica della seconda metà dell'ottocento. Due figure di scienziati si elevano in quel periodo: l'inglese J. Maxwell (1831-1879) e l'austriaco L.

Boltzmann (1844-1906). Come il secondo sia riuscito a risolvere la questione, valorizzando la trattazione maxwelliana della distribuzione delle velocità molecolari e basando l'intera argomentazione sul calcolo delle probabilità, è cosa che qui non si può spiegare. Boltzmann affermava che la suddetta tendenza al disordine nei sistemi chiusi corrisponde al passaggio da configurazioni meno probabili a configurazioni sempre più probabili. Collegava cioè l'entropia alla probabilità.

Nel cimitero di Vienna sulla tomba dove è sepolto Boltzmann, forse il più grande fisico dell'ottocento, morto nel 1906, vi è una lapide sulla quale l'epitaffio è una semplice equazione:

$$S = k \cdot \log w.$$

L'entropia S è proporzionale, secondo una costante k (una costante fondamentale della natura, la costante di Boltzmann appunto) al logaritmo di una grandezza w che misura lo stato del caos di un sistema o, in altre parole, della probabilità della sua configurazione. Essa è una delle formule più straordinarie, di maggior significato e di più generali implicazioni che mai siano state scritte a spiegare la realtà del mondo fisico in cui viviamo. È una formula famosa come l'equazione di Einstein $E = m \cdot c^2$.

Era questo, all'inizio del secolo scorso, il punto al quale era arrivata la termodinamica, sviluppo fra i più affascinanti che mai si siano avuti nel progresso della conoscenza delle leggi della natura. Mi è parso necessario accennare ai momenti salienti di questa storia perché, ai fini di quanto qui interessa, è solo sulla base della soluzione di quei problemi e della acquisizione del significato completo dei due fondamentali principi, che la termodinamica poteva presentarsi finalmente in grado di fornire lumi circa il comportamento delle sostanze e dei fluidi che si impiegano nei processi, in altre parole circa la possibilità di sfruttare al meglio le sorgenti naturali di energia che la natura a noi offre.

Le conquiste della termodinamica hanno indotto uno sviluppo della tecnologia esplosivo, inarrestabile e sempre più veloce; la nostra vita fisica è sempre più comoda, ma ci ha resi nel contempo meno liberi, fruitori e vittime di un progresso che sfugge al nostro controllo e ci fa guardare con sbalordimento a quello che succederà nei prossimi decenni.

Vogliamo accennare nella seconda parte di questa relazione a qualche cosa di più pratico tentando di prevedere il futuro delle nostre disponibilità energetiche e di esaminare i vantaggi e di correggere gli svantaggi di questo sviluppo tecnologico che tanto assorbe le nostre vite.

2. Lo sviluppo tecnologico e le sorgenti non rinnovabili dell'energia

Cominciamo da un primo parametro: l'accrescimento della popolazione mondiale. Gli abitanti del nostro pianeta nel 1830 erano circa un miliardo. Ci sono voluti cento anni, fino al 1930, per arrivare al doppio, a due miliardi. La progressione poi è stata fino ad oggi sempre più veloce. Si veda la fig. 1: nel 1960 la popolazione mondiale era arrivata a 3 miliardi e questa cifra si è raddoppiata in appena 40 anni. Oggi all'inizio del terzo millennio la popolazione mondiale è stimata essere di sei miliardi di individui. Nella seconda metà del secolo scorso l'aumento percentuale annuo della popolazione ha sfiorato il 2%, valore mai registrato in passato e che più non si ripeterà in futuro. (Se questo valore si mantenesse, esso corrisponderebbe ad un raddoppio della popolazione mondiale ogni trentacinque anni). I demografi prevedono un progressivo rallentamento di questo aumento relativo per arrivare probabilmente ad una stabilizzazione della popolazione mondiale intorno al valore di circa undici o dodici miliardi nell'ultimo quarto del secolo attuale.

Ma l'aspetto più preoccupante di questa situazione è il divario enorme fra l'aumento relativo di popolazione nei paesi in via di sviluppo (PVS) e quello dei paesi sviluppati (PS) (di norma si classificano come PS l'Europa, l'America del nord, Israele e Giappone). Inutile dire quanto questo divario possa incidere nelle previsioni di fabbisogno di energia nel mondo che poi si considereranno. In particolare nella fig. 2 si veda quale appare e quale si prevede il valore dell'aumento percentuale annuo dell'incremento demografico nel periodo 1950-2025 nel mondo, nei paesi sviluppati (PS), nei paesi in via di sviluppo (PVS) e in Africa.

Nelle figure n. 3 e n. 4 sono riportati gli andamenti del consumo energetico rispettivamente nel mondo e in Italia quali si sono avuti negli ultimi decenni del secolo scorso.

Il consumo mondiale, attualmente di 9 miliardi di tep (tonnellate di petrolio equivalente), è soddisfatto per il 31% dal carbone, per il 33% dal petrolio e per il 21% dal gas naturale. I combustibili fossili contribuiscono pertanto per l'85% del totale.

Più delicata è la situazione in Italia, ove si è avuto un aumento vertiginoso fra il 1960 e il 1973: da 50 milioni a 140 milioni di tep/anno. È stato il periodo dell'energia facile e a buon mercato con una incosciente disattenzione ai rendimenti dei processi. La guerra del Kippur in medio oriente nel 1973 con l'improvviso aumento in pochi mesi del costo del petrolio da 3 a 12 dollari per barile (e in Italia il petrolio rappresentava e rappresenta tuttora una prevalenza abnorme sui consumi totali) indusse quanti si interessavano di tali questioni a

previsioni catastrofiche sul futuro dell'energia. Ma le cose non andarono così: praticamente il consumo italiano nel decennio 1973-1983 si mantenne pressoché costante. Vi contribuirono una certa saturazione del mercato, il passaggio da una industria a forti consumi energetici come la siderurgia a una industria come l'informatica, assai meno energivora, e soprattutto l'impegno molto più attento che, attese le conquiste della termodinamica, poteva essere dedicato al rendimento dei processi.

Certo si è che l'Italia è stata e rimane tuttora poverissima di sorgenti naturali di energia; essa importa attualmente l'82% del proprio fabbisogno, in ciò eguagliata solo dal Giappone.

Entro quali limiti si possono fare previsioni per i prossimi decenni?

Partiamo da alcuni dati di fatto.

A. Fonti non rinnovabili di energia oggi accertate nel nostro pianeta (1 Gtep = 1 miliardo di tep):

Petrolio:	140	Gtep
Gas naturale:	120	Gtep
Carbone:	640	Gtep
Tot.	900	Gtep

Si aggiunge: Energia nucleare da fissione;
Energia nucleare da fusione.

B. Parametri:
crescita demografica,
industrializzanone nei PVS,
scoperta di nuove sorgenti.

Per quanto riguarda la disponibilità, le riserve oggi accertate (900 Gtep) sarebbero sufficienti per i prossimi cento anni se la domanda annua si mantenesse ai livelli attuali.

Facciamo riferimento ai tre parametri sopra indicati. È fuori di dubbio che questa domanda crescerà, essenzialmente in relazione al primo parametro, lo sviluppo demografico di cui si è detto, ma non crescerà in modo proporzionale a tale sviluppo. Nei PS, nei quali l'incremento demografico è modesto, saranno sviluppati programmi più sofisticati per maggiori richieste di benessere (per esempio il condizionamento estivo). Ma in base alle conquiste della termodinamica sarà incoraggiato un maggiore risparmio di energia e il suo uso razionale, riducendo gli sprechi. D'altra parte in questi paesi è già in atto, come si è accennato, un processo di dematerializzazione e deenergizzazione delle economie.

Più difficile risulta la previsione per gli altri paesi i così detti PVS o del terzo mondo, dove questi processi sono lontani da poter essere introdotti; e dove lo sviluppo demografico è quattro o cinque volte più

elevato che non nei PS. Per favorire il risparmio energetico nel terzo mondo, i paesi industrializzati dovrebbero provvedere a un massiccio trasferimento delle tecnologie più avanzate ed energicamente efficienti oggi disponibili, in particolare nel settore industriale e nei trasporti, a condizioni economiche vantaggiose per questi paesi. È questo secondo parametro, dell'industrializzazione dei paesi in via di sviluppo, la sfida che caratterizzerà i prossimi decenni.

Sia consentita a questo punto una breve parentesi a sottolineare l'entità di questa sfida. Oggi nel mondo poco più di un miliardo di persone nei paesi sviluppati (circa il 20% della popolazione mondiale) consuma quasi il 60% dell'energia utilizzata, mentre poco meno di cinque miliardi di persone nei paesi in via di sviluppo consumano il rimanente 40%. I due miliardi più poveri della popolazione mondiale (con un reddito annuo pro capite inferiore a 1000 dollari) consumano 0,2 tep pro capite l'anno, mentre la popolazione più ricca del pianeta (con un reddito annuo pro capite superiore ai 22.000 dollari) ne usa circa 25 volte di più, ossia 5 tep pro capite l'anno.

Senza dilungarci su tali questioni si può dire che, di qui al 2025, di fronte a un previsto aumento della popolazione mondiale di poco più del 30%, il consumo globale di energia potrà essere prossimo ad un raddoppio. Il che riduce molto il periodo di cento anni sopra indicato per poter stare tranquilli.

D'altro canto, per arrivare al terzo parametro, è molto probabile che le riserve di combustibili nel mondo, in particolare di petrolio, siano nettamente maggiori della quantità oggi accertata. Le correnti di pensiero al proposito hanno oscillato fra i pessimisti e gli ottimisti. Fra i primi l'AIE (Azienda Internazionale dell'Energia) sostiene che le riserve mondiali di petrolio saranno sufficienti per soddisfare la domanda energetica solo dei prossimi 20 o 30 anni. Fra gli ottimisti Thomas S. Ahlbrand della Geological Survey rileva che il consumo di petrolio è stato finora di cento miliardi di tonnellate e stima che si può contare su altri 140 sicuri più altri 93 probabili, senza contare che ulteriori ricerche potranno portare a scoprire altri 98 miliardi. Vale a dire che si potrà contare su un totale di 331 miliardi di tonnellate. Il che, contando l'apporto del gas naturale e del carbone, porterebbe a una disponibilità sufficiente per cento anni. La stima sembra eccessiva ai più. Ce n'è abbastanza tuttavia per concludere che è verisimile che le sorgenti tradizionali di energia possano soddisfare la domanda dell'umanità fino a verso la metà del secolo appena iniziato.

3. Un cenno sull'uso dell'energia nucleare

Richiamiamo brevemente alcune cose note.

Le centrali nucleari finora funzionanti sfruttano il processo della fissione, cioè della rottura in due parti dei nuclei dell'uranio, l'elemento più pesante esistente in natura, ottenuto mediante bombardamento di neutroni. L'uranio naturale è costituito da un nucleo avente carica elettrica pari a 92 volte quella del protone, il che significa che in esso sono contenuti 92 protoni (il numero di protoni del nucleo costituisce il «numero atomico» dell'elemento) e si presenta in due isotopi differenti. L'uranio naturale è costituito da due isotopi («isotopo» è sinonimo di «variante»), l'uno avente 92 protoni e 143 neutroni nel nucleo ed è l'uranio 235, l'altro avente 92 protoni e 146 neutroni nel nucleo ed è l'uranio 238.

L'uranio 235 può essere sottoposto al suddetto processo di fissione: è un elemento «fissile». Le due parti ottenute sono non molto diverse fra loro e animate da velocità elevatissime. La somma delle masse di questi due elementi è inferiore alla massa di partenza. La differenza di massa costituisce la energia che si libera secondo l'equazione di Einstein $E = m \cdot c^2$. Il processo di fissione libera anche due o tre neutroni. Basta mantenerne uno eliminando l'uno o i due restanti per generare una reazione controllata a catena. L'energia che si libera è così elevata che per ogni grammo fissilizato l'energia liberata è di 24.000 kWh ossia di 24.000 x 860 = 20.640.000 k cal. Poiché un grammo di petrolio ha un potere calorifico di 10 k cal, risulta che il rapporto fra il potere calorifico di un combustibile fissile e quella del petrolio è poco più di 2 milioni.

Naturalmente il processo di fissione nella centrale nucleare è quello che sostituisce il processo di combustione in una centrale termoelettrica. Uno scambiatore di calore consentirà di ottenere vapore acqueo a elevata temperatura e pressione per il ciclo termico ecc.

Occorre aggiungere che l'uranio 235, quello fissile, è contenuto nell'uranio naturale nella misura di solo il 0,7%, il restante, 99,3%, è uranio 238. Questo naturalmente è un grave svantaggio per l'innesco e lo sviluppo di una reazione nucleare a catena, cosicché si cerca generalmente di arricchire con procedimenti tecnologicamente molto complessi la percentuale di U235. I reattori nucleari oggi in funzione operano quasi tutti con uranio mediamente arricchito al 3% in U235.

Attualmente le centrali nucleari esistenti contribuiscono per circa il 17% sul totale di energia elettrica prodotta nel mondo. All'avanguardia sono la Francia ove il 75% di energia elettrica è prodotta per via nucleare. In altri paesi, dopo il malaugurato incidente di Cernobyl, che dette fiato agli ambientalisti e ai verdi, lo sviluppo rallentò alquanto. È

noto che l'Italia abolì completamente ogni centrale nucleare con danni economici rilevantissimi. In generale la fuga dal nucleare risultò eccessiva. Incidenti come a Cernobyl oggi non potrebbero assolutamente accadere; ma evidentemente la paura del nucleare indusse a costruire impianti con caratteristiche di sicurezza spinte all'estremo, con conseguente aumento dei costi. Un ritorno al nucleare tuttavia è assai probabile in futuro specie se il costo del petrolio non si manterrà ai bassi livelli attuali. E le centrali elettronucleari non presentano i pesanti inconvenienti che la combustione dei combustibili fossili inducono per l'emissione in atmosfera di grandi quantità di anidride carbonica e conseguenti problemi di inquinamento di cui si dirà in appresso.

Resta da accennare a un ultimo problema che le centrali nucleari comportano: lo smaltimento delle scorie ottenute dai processi di fissione dell'uranio: sono scorie radioattive, pericolose per l'uomo, su cui si è molto disquisito ma che non presentano problemi che l'attuale tecnologia non possa risolvere. Si tratta in genere di compattare, vetrificare o cementificare queste scorie e depositarle in appositi siti a certa profondità. Un impianto nucleare da 1000 MWe produce in un anno una quantità limitata di scorie radioattive (circa 500 t, 200 t, 25 t di scorie rispettivamente a bassa, media ed alta attività seconda certa classificazione Iaea) contro le 300-400 mila tonnellate di ceneri di un impianto equivalente a carbone, che contengono centinaia di tonnellate di metalli pesanti, altamente tossici come l'arsenico, cadmio, piombo, mercurio ecc.

Un brevissimo cenno infine sulla possibilità futura di produrre energia da processi di fusione nucleare anziché da fissione. Si tratta di realizzare una reazione fra elementi leggeri, il deuterio (isotopo due volte più pesante dell'idrogeno) e il trizio (isotopo tre volte più pesante). Si ottiene elio, più un neutrone, più energia cinetica di questi due prodotti. Il deuterio è abbondante in natura, il trizio è quanto mai raro e si ricava in certo modo dal litio. Per ottenere la reazione occorre raggiungere temperature elevatissime dell'ordine di circa 100 milioni di gradi su cui qui non è il caso di insistere.

Le ricerche sperimentali su tali processi si svolgono in alcuni laboratori specializzatissimi in alcune parti del mondo (una sede è pure a Padova). I progressi realizzati finora, nonostante le estreme difficoltà, sembra consentano di prevedere che il risultato sarà raggiunto e che l'applicazione dell'energia da fusione potrà costituire una realtà entro 30 o 40 anni. Potrebbe essere questa una "fonte inesauribile" di energia per l'uomo.

4. Le energie rinnovabili

I problemi dell'inquinamento atmosferico e i timori dell'esaurimento dei combustibili naturali invitano allo studio e all'impiego delle «energie rinnovabili».

A parte l'energia idraulica che contribuisce già per il 5% al totale della energia elettrica prodotta nel mondo, sono da considerare la energia solare, l'energia eolica e l'energia dall'idrogeno.

4.1. Energia solare e l'uso di collettori piani

Gli impianti per lo sfruttamento diretto dell'energia solare stentano a decollare. Il sole, la cui temperatura superficiale è prossima ai 6000 gradi Kelvin, irradia una potenza di $3{,}8\text{-}10^{26}$W. La terra, questo piccolo pianeta a distanza di 150 milioni di chilometri dal sole, intercetta poco meno di mezzo miliardesimo di questa potenza ossia 1,75 10^{17} W. È una potenza enorme. Se si fanno i calcoli (1 W = 1 joule/sec ossia 1/4186 kcal/sec e in un anno si hanno 31.536.000 secondi) si trova che tale potenza di 1,75 10^{17} W eguale a 131.827 Gtep per anno, ossia poco meno di 15.000 volte la potenza di 9 Gtep che costituisce l'attuale consumo annuale di energia per tutta l'umanità.

Tornando al valore suddetto di 1,75 10^{17} W si calcola che la potenza che arriva su un metro quadrato di superficie perpendicolarmente al di sopra dell'atmosfera è poco meno di 1400 W. Tale potenza, per l'assorbimento dell'atmosfera, nelle giornate serene, si riduce a livello della superficie terrestre a un massimo, se il sole è allo zenit, di circa 1000 W, ossia 1 kW per metro quadrato. Inutile dire che si tratta di una potenza assai diluita ai fini di uno sfruttamento diretto a scopi energetici (per esempio per ottenere energia elettrica).

Attesa l'alternanza del giorno e della notte e la presenza di nubi, tale potenza per metro quadrato di superficie terrestre perpendicolare ai raggi solari si riduce a un valore medio annuo alle nostre latitudini che varia fra 1 e 7 kW al giorno (un valore massimo per esempio nella Costa Azzurra).

L'utilizzo diretto di questa radiazione (al di fuori del mondo vegetale) può essere realizzato in primo luogo per il riscaldamento invernale di ambienti o per riscaldamento di acqua sanitaria mediante collettori piani con acqua che scorre entro i tubi fino alla temperatura di 50 °C. L'uso di tal tipo di collettori può trovare la sua convenienza economica rispetto al riscaldamento normale elettrico o per combustibili ed è ampiamente diffuso per esempio nei paesi dell'area mediterranea.

4.2. *L'energia solare e l'uso di collettori a concentrazione*

L'utilizzo di energia solare ai fini di realizzare impianti per la produzione di energia meccanica (e ovviamente elettrica) impone di ottenere temperature maggiori di quanto sopra, ossia dell'ordine di qualche centinaio di gradi centigradi. Al posto di collettori piani si deve ricorrere a sistemi per la concentrazione dei raggi del sole. Si sono realizzati sistemi a superfici paraboloidi con concentrazione sull'asse della superficie ove in un tubo scorre il liquido usato per il ciclo termodinamico. Gli impianti non sono frequenti.

Un notevole impianto sotto l'egida della Comunità Economica Europea è stato realizzato ad Adrano in Sicilia e si può definire a torre e campo-specchi. Si tratta di un insieme di specchi, per complessivi 6.000 metri quadrati, orientabili, che concentrano i raggi su un contenitore d'acqua a certa altezza che funge da caldaia; la temperatura dell'acqua è di circa 500 gradi. L'impianto, costosissimo, non ha mai funzionato a rendimento positivo ed ha dimostrato, come altri dello stesso tipo, di presentarsi lontano per ora, da ogni convenienza tecnica ed economica.

4.3. *Il solare fotovoltaico*

Lo sfruttamento dell'energia solare più promettente è costituito dalle celle fotovoltaiche. Si tratta di una tecnologia che consente di trasformare direttamente la luce solare in energia elettrica. L'uso di tale effetto, ad esempio nella misura della intensità della luce nell'esposimetro delle macchine fotografiche, è noto a tutti. L'introduzione dei semiconduttori, mezzo secolo fa, ha consentito di ottenere dispositivi nei quali il rendimento di conversione dell'energia luminosa in energia elettrica è più elevato; le prime esperienze su vasta scala si ebbero nei programmi dei veicoli spaziali.

Il materiale fondamentale per questi sistemi è il silicio. È questo un elemento che ha numero atomico 14 (quattordici protoni nel nucleo e quattordici elettroni periferici) e ha valenza chimica 4. In un batteria solare (fig. 5) il silicio è composto da due strati: il primo, quello esposto alla radiazione solare, dello spessore di circa mezzo micron, è «drogato» con il fosforo il quale ha valenza chimica 5 e quindi presenta una sovrabbondanza di elettroni liberi: si parla di un semiconduttore di tipo n perché ha un eccesso di cariche negative. L'altro strato è stato «drogato» con boro che ha una valenza chimica 3 e quindi presenta deficienza di elettroni ossia presenta, come si dice, delle «buche» con carica positiva: si parla di un semiconduttore di tipo *p*. Senza entrare in dettagli, quando un fotone di luce incide nello strato n, si costituisce

una corrente elettrica per cui gli elettroni liberi, attraverso un circuito esterno, arrivano alle buche dello strato p.

Teoricamente il rendimento di un dispositivo del genere è del 21%; praticamente non si può superare il 17%. Ci si deve accontentare spesso di valori nettamente più bassi. E si parla sempre di valore «di picco» (la potenza in watt si indica con Wp) intendendo con ciò quello che si può ottenere con sole allo zenit, con assenza di nubi e con superficie della cella perpendicolare ai raggi solari. È chiaro che un modulo fotovoltaico riuscirà a trovarsi in tali condizioni solo in poche delle 8.760 ore dell'anno, tenendo conto delle ore notturne, delle ore di pioggia, delle ore di cielo completamente coperto e del fatto che raramente la cella si trova esattamente perpendicolare ai raggi solari.

Tutte queste limitazioni portano a concludere che per l'Italia alle latitudini meridionali (solarmente le più favorite) la radiazione che raggiunge in un anno la superficie terrestre si può stimare in circa 1.600 kWh/m^2 (che corrispondono a 1600 ore equivalenti di massima potenzialità solare) su un piano orizzontale e un poco più su un piano inclinato di 30°. Assunto pari al 10% il rendimento complessivo di conversione relativo al sistema fotovoltaico, ne deriva una capacità produttiva di energia elettrica annuale di 160 kWh/m^2 per un piano orizzontale.

La fabbricazione di una batteria solare al silicio è oggi molto costosa, dell'ordine di 20.000 dollari per chilowatt di picco, in confronto al costo di costruzione di 500 dollari per chilowatt di una centrale termoelettrica. Ma l'energia solare non costa niente e la diffusione del voltaico si avrà pure nelle applicazioni spaziali e nei piccoli calcolatori, nelle telecomunicazioni, nella segnaletica terrestre e marittima, nella alimentazione elettrica di utenze isolate, nella elettrificazione rurale nei paesi in via di sviluppo (evitando i costosi processi di trasporto di energia elettrica). Si tenga conto poi di quanto il processo tecnologico potrà contribuire a migliorare gli sconsolanti confronti precedenti sui costi in genere di questi sistemi. A detta degli esperti e in relazione alle recenti disposizioni ministeriali per l'incentivazione delle energie rinnovabili è da pensare che il foltovoltaico giocherà un forte ruolo nella fornitura di energia nei prossimi decenni.

5. L'energia eolica

Lo sfruttamento della energia del vento è di norma affidato ad aerogeneratori prevalentemente ad asse orizzontale a due o, più generalmente, a tre pale che funzionano con velocità della corrente d'aria fra 6 e 20-25 metri al secondo. Le potenze, per ogni singolo apparec-

chio arrivano fino a oltre 1 MW e presentano diametri fino a 60 metri e più. Si stima che unità con potenza da 1 kW a 500 kW siano ora quelle economicamente più convenienti.

Nel mondo nell'anno 1999 la potenza eolica installata era di circa 13,300 MW con un tasso di crescita del 30% annuo negli ultimi anni. Nella Unione Europea si è varcata la soglia di 9.000 MW totali. I maggiori produttori sono la Germania, la Spagna, la Danimarca e, fuori dell'Europa, gli USA, il Canada e l'India.

Si calcola che le risorse mondiali tecnicamente sfruttabili possano essere di 300.000 GWh/a. La energia prodotta, contando su un funzionamento di 1500 ore l'anno sarebbe di 19.950 MWh/a il che corrisponde al 6,5 della possibilità totale suddetta. Vi è quindi modo di sfruttare più ampiamente questa sorgente rinnovabile di energia anche se la sua saltuarietà pone dei problemi.

6. Il futuro dell'idrogeno. Le celle a combustibile

L'idrogeno è il gas più leggero esistente in natura. Si trova poco allo stato libero, ma molto combinato nei composti chimici, soprattutto nell'acqua (H_2O). La sua massa volumica è 14,4 volte minore di quella dell'aria e vale 0,08987 kg/m^3. Lo si prepara con processi chimici da varie sostanze che lo contengono, in particolare per via elettrolitica dall'acqua. Presenta un elevato potere calorifico (H_i=28.700 kcal/kg; H_s = 33.890 kcal/kg). L'interesse principale dell'idrogeno come combustibile è dovuto al fatto che nella combustione esso si presenta come un gas "ecologico": produce vapor acqueo e non anidride carbonica come tutti gli altri combustibili, evitando quindi le gravissime preoccupazioni di cui si dirà in appresso. Di converso la combustione dell'idrogeno incontra grossi ostacoli fra i quali i principali sono:

- la sua pericolosità, per l'estesa gamma dei punti di infiammabilità;
- la bassissima massa volumica;
- il costo elevato di produzione;
- la difficoltà di stoccaggio che può avvenire o in bombole sotto pressione o mediante assorbimento in idruri metallici o liquefatto e conservato liquido a bassa temperatura; la sua temperatura critica è di –252,8 °C a 13 ata.

Tralasciamo altre difficoltà di impiego dell'idrogeno nella trazione stradale per l'iniezione nei motori di piccola taglia.

L'utilizzo ottimale dell'idrogeno è oggi assicurato dalla tecnologia delle celle o pile a combustibile (in inglese *fuel cell*) per le quali è previsto un grandissimo sviluppo in futuro.

Una cella a combustibile è un dispositivo elettrochimico che converte in modo diretto l'energia chimica di un combustibile e di un comburente in energia elettrica a corrente continua. L'elemento base della fuel cell è costituito da due elettrodi, catodo e anodo, separati da un elettrolita, che può essere un liquido trattenuto da una matrice o un solido (fig. 6). La reazione chimica utilizzabile in una cella è la formazione di acqua a partire dall'idrogeno secondo la reazione inversa a quella dell'elettrolisi:

$$H_2 + {}^1/_2\, O_2 = H_2\, O$$

Nel processo di elettrolisi si fornisce energia elettrica per scindere idrogeno e ossigeno partendo dall'acqua; nelle fuel cells si combinano insieme gli atomi delle due sostanze, producendo in questo modo acqua, corrente elettrica e calore. La figura mostra il funzionamento: l'idrogeno si ossida all'anodo liberando elettroni che, convogliati in un circuito elettrico, raggiungono il catodo dove vengono assorbiti dall'ossigeno che si riduce. Gli ioni di idrogeno viaggiano invece attraverso l'elettrolita. Il flusso di elettroni generato dalla reazione produce lavoro attraverso il circuito esterno. La differenza di energia tra il calore di reazione e il lavoro elettrico prodotto viene liberata sotto forma di calore che può essere recuperato.

Gli elementi base, come si è detto, per produrre la reazione sono ossigeno e idrogeno. Se il primo può essere tratto semplicemente dall'aria, il secondo può essere prodotto direttamente all'interno del sistema a partire da un combustibile fossile, generalmente metano per gli impianti fissi, metanolo o anche benzina per le fuel cells poste a bordo di veicoli. Su questo argomento basilare non ci possiamo qui soffermare. Le ricerche sono attivissime in varie parti del mondo, in USA, Giappone, Italia e Spagna. Fra gli innumerevoli articoli nella letteratura rimandiamo per un chiarimento a una nota di M. Vio sulla rivista «il Condizionamento dell'aria» del mese di ottobre 2000 dal titolo «Le celle a combustibile: impiego nel campo della cogenerazione».

Ci limitiamo a concludere che le celle a combustibile sono senz'altro la tecnologia emergente più promettente sia dal punto di vista energetico sia soprattutto da quello ambientale. Il premio Nobel prof. Rubbia ebbe a dichiarare che nei prossimi anni le celle a combustibile potrebbero cambiare la qualità della vita risolvendo parte dei problemi di inquinamento che affliggono oggi il mondo. Questa tecnologia potrà portare a raggiungere traguardi fino a poco tempo fa assolutamente impensabili.

7. Il problema dell'inquinamento. L'effetto serra e il protocollo di Kyoto

La superficie della nostra terra riceve i raggi del sole e riemette per radiazione il calore ricevuto. La temperatura superficiale è data dall'equilibrio fra il calore ricevuto (radiazioni da alta temperatura e quindi di piccola lunghezza d'onda) e il calore emesso (radiazioni da bassa temperatura e quindi di più elevata lunghezza d'onda). Se non vi fosse l'atmosfera (azoto, ossigeno e altri gas), la temperatura superficiale della terra si aggirerebbe intorno a –18 °C. La presenza dell'atmosfera consente il passaggio della radiazione solare (di piccola lunghezza d'onda), ma costituisce parzialmente una «trappola» per la radiazione riemessa (di elevata lunghezza d'onda). La temperatura superficiale della terra quindi si eleva a un punto di equilibrio che è attualmente di un valor medio di +16 °C. È quello che si dice un tipico «effetto serra».

Responsabili di questa trappola sono alcuni gas presenti nell'atmosfera, essenzialmente l'anidride carbonica, il metano, il protossido di azoto, i clorofluorocarburi... I processi di combustione dei combustibili fossili riversano nell'atmosfera enormi quantità di CO_2 dell'ordine di 20 miliardi di tonnellate l'anno. Parte di questa quantità viene assorbita dagli oceani, parte dai vegetali. Appare che negli ultimi 100 anni la percentuale di CO_2 presente nell'atmosfera sia aumentata da 290 a 360 ppm (parti per milione) e che la temperatura superficiale terrestre sia aumentata di 0,6 °C. La situazione (esposta pur in termini cosi semplificati) è ritenuta secondo alcuni assai allarmante. Con un andamento crescente, come la nostra tecnologia oggi impone, della CO_2 per i processi di combustione si arriva a stimare che la percentuale di tale gas nell'atmosfera possa arrivare a 550 ppm. Il conseguente scioglimento dei ghiacci, specialmente nel polo Sud, potrebbe portare a un aumento del livello degli oceani fino a 80 cm entro il 2100 con conseguenze inimmaginabili per le nostre coste e le nostre città costiere (si pensi ad esempio all'acqua alta di Venezia, gia oggi più frequente e notevole che in passato).

In verità occorre dire che non c'è concordanza fra gli esperti su queste previsioni. La comunità internazionale comunque si è occupata del problema: un accordo firmato da 84 paesi a Kyoto nel 1997 concerne l'impegno a una riduzione dell'emissione dei gas serra del 5,2 in media nel mondo entro 2012 rispetto al livello di emissione del 1990. L'accordo è parso in seguito troppo restrittivo e di difficile attuazione, a parte anche le dette incerteze da molti condivise sulla validità delle premesse. Gli USA si sono ritirati dall'accordo e Canada e Giappone si sono mostrati recalcitranti. Probabilmente un qualche compromesso si cercherà di realizzare nelle riunioni future.

8. Il bene e il male della tecnologia

Lo sviluppo esaltante della scieza durante il secolo scorso e in particolare di quel tipico prodotto della scienza che è lo sviluppo tecnologico, hanno, da una parte, profondamente modificato il comportamento del nostro essere sul piano fisico, personale e sociale ed hanno, d'altra parte, modificato il nostro mondo interiore, abituandoci a una nuova visione della realtà, con conseguenti difficoltà nuove sul piano etico e sul piano morale.

Possiamo dire che la scienza è completamente libera? I disastri che le conoscenze scientifiche hanno provocato nelle applicazioni (pensiamo ai disastri voluti, come la bomba atomica, o ai disastri non voluti, come gli effetti dell'inquinamento) consentono di sostenere la neutralità della scienza? Forse certe cose era meglio non saperle?

La risposta più ovvia sembra quella di sottolineare che non è tanto la scienza che si deve colpevolizzare, quanto la scelta delle applicazioni della scienza, cioè la tecnologia, che deve essere sorvegliata, in maniera che essa faccia buon uso delle conoscenze scientifiche. Del resto limitare la crescita della ricerca scientifica porterebbe anche a privarci delle possibilità di fare un uso buono delle conoscenze che essa potrebbe metterci a disposizione.

Vi e tuttavia la risposta che taluni propongono: essere la distinzione fra scienza e tecnologia non così chiara ed accettabile. La ricerca scientifica è mossa dal desiderio di risolvere problemi pratici ed è quindi animata dallo stesso spirito che anima la tecnica o la tecnologia; quindi ogni distinzione tra scienza e uso della tecnica, fra scienza e tecnica, è fittizia: si deve parlare senza infingimenti di un problema morale che riguarda la scienza senza ulteriori «distinguo».

Personalmente mi sembra piu chiara e accettabile la prima proposizione. Un esempio: Einstein stabilì la famosa formula: $E = m \cdot c^2$ che lega massaed energia e questo legame è il presupposto teorico che sta sotto la progettazione della bomba atomica. Ma si può dire che Einstein sia in qualche modo responsabile della costruzione della bomba atomica che avvenne qualche decennio dopo che egli scoprì quella formula? Questa applicazione ha richiesto una decisione e una scelta del tutto estranee al piano conoscitivo che aveva permesso la scoperta di quella formula. Per realizzare quell'arma era necessario disporre di adeguate conoscenze scientifiche, ma non era sufficiente; esse hanno offerto le condizioni di possibilità per realizzare quell'arma, ma il fattore determinante è stato una libera scelta umana. Appare difficile non riconoscere che scienza e tecnica, pur molto strettamente legate, non sono una medesima cosa. Alcuni affermano tuttavia che, dopo tutto, di fronte al male derivato dall'utilizzazione di certe conoscenze scientifi-

che «era meglio non conoscere certe cose». Ma tale osservazione, che sembra di profonda e umile saggezza, è soltanto la saggeza del senno di poi e avrebbe senso solo se fosse possibile prevedere con sufficiente approssimazione le applicazioni di una scoperta scientifica e valutare se fra queste sono preponderanti quelle buone o quelle cattive, dopo di che, se le cattive fossero prevalenti lo scienziato saggio dovrebbe rinunciare alla ricerca o rinunciare a rendere pubbliche le sue scoperte. Ma una situazione come quella qui ipotizata è assolutamente irrealizzabile, cosicché la presunta saggezza del «sarebbe meglio non conoscere certe cose» si tradurrebbe in un inconsapevole oscurantistico invito a rinunciare alla ricerca scientifica.

E d'altra parte di fronte ad alcune conseguenze disastrose non previste dall'uomo, ma generate dall'uso creduto innocuo di certe applicazioni della scienza, la nostra tecnologia ha trovato e troverà i mezzi per rimediare ai malanni (pensiamo per esempio all'effetto serra e al buco dell'ozono) e a stabilire delle regole generali di intervento.

Infine un'ultima osservazione che riguarda più direttamente il nostro impegno personale. L'era tecnologica che stiamo vivendo ci ha portato immensi benefici fornendo maggiori comodità per la nostra vita fisica (e tralasciamo le conquiste. impressionanti della biologia e della medicina), rendendo le cose più facili ed accessibili ed arricchendo l'uomo per quanto egli può fare, anche se ha indotto la scomparsa di una serie di abilità individuali, di capacità, di ingegnosità, di libertà decisionali che l'uomo pre-tecnologico possedeva. Ci ha reso meno indipendenti. Sul piano della vita pratica non possiamo opporci: siamo obbligati ad accettare tanti benefici e qualche svantaggio.

Ma non è solo sul piano della vita pratica che la tecnologia porta questi turbamenti. Essa rischia di imporre un nuovo atteggiamento mentale e di incidere in modo nefasto nello spirito di chi, immerso nello studio, nella progettazione, nel lavoro per favorirne il progresso, finisce per sentirsi assolutamente potente perché tanto domina la natura.

Ed allora considera la tecnologia come qualcosa di totalizzante, qualcosa che assume il ruolo di una ideologia. E di tecnologismo allora si tratta e non più di tecnologia. E analogamente di scientismo si tratta quando l'atteggiamento intellettuale è caratterizzato dalla convinzione che solo alle scienze positive spetti affrontare e risolvere i problemi dell'uomo, di qualunque ordine essi siano. L'uomo si impoverisce se preclude spazio e motivi di valutazioni superiori sul piano etico, morale, religioso, se si priva di criteri di giudizio esterni alla scienza stessa.

E questo atteggiamento, che trova totalizzante l'oggetto del proprio particolare impegno, costituisce impoverimento non solo nel nostro settore di scienziati e di tecnologi ma in tanti settori delle attività

umane e tocca il politico, l'economista, il magistrato, l'artista, il giornalista...

Ciascuno nel proprio ambito rivendica autonomia e libertà: indipendenza nei criteri di giudizio. E allora una azione può essere giudicata politicamente sostenibile nonostante sia svantaggiosa dal punto di vista economico; un comportamento può essere valutato economicamente proficuo nonostante sia moralmente criticabile; accade che il comportamento del giornalista debba essere sempre giustificato in base alla assoluta indiscriminata prevalenza dell'informazione.

L'uomo dell'età moderna rischia assai più che in passato per questa indipendenza nei criteri di valori. E forse questa indipendenza è più accentuata nell'impegno di studiosi, progettisti, costruttori, dominatori della natura nel settore che abbiamo considerato in questa nostra nota.

L'emergere di un tale aspetto totalizzante fa assumere, come abbiamo detto, all'impegno e al lavoro dell'uomo un carattere di ideologia; e l'ideologia manifesta dogmaticità, intolleranza e induce difficoltà di comprensione, di giustificazione e di collaborazione reciproca che la scienza e la tecnologia non possono avere.

La questione non è di poco conto e meriterebbe approfondimento. Chiedo scusa se ho fatto questa deviazione. Chi è alla fine della propria vita si trova facilmente attratto da questi pensieri.

Ci auguriamo che per tanti tecnologi l'accanita attività, pure ad altissimo livello praticata, lasci tempo a vivere di quei criteri di giudizio esterni di cui abbiamo fatto cenno sopra.

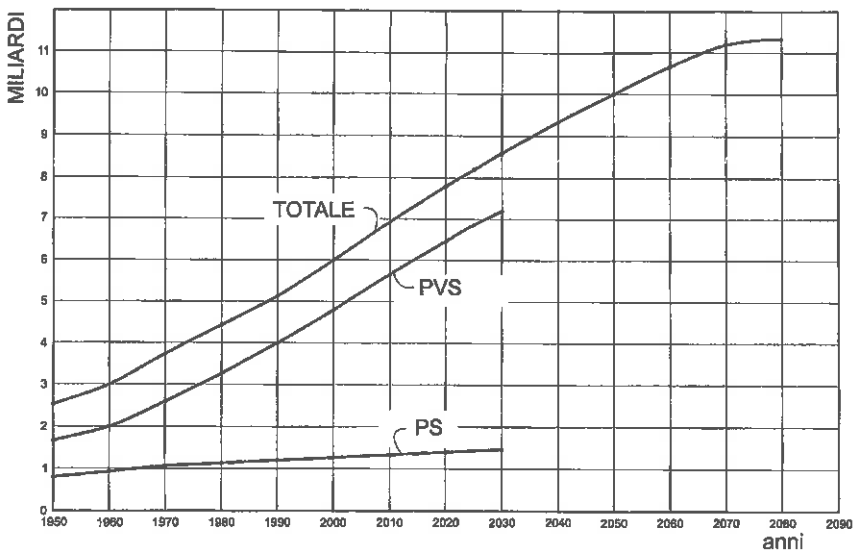

Fig. 1 Sviluppo demografico mondiale.

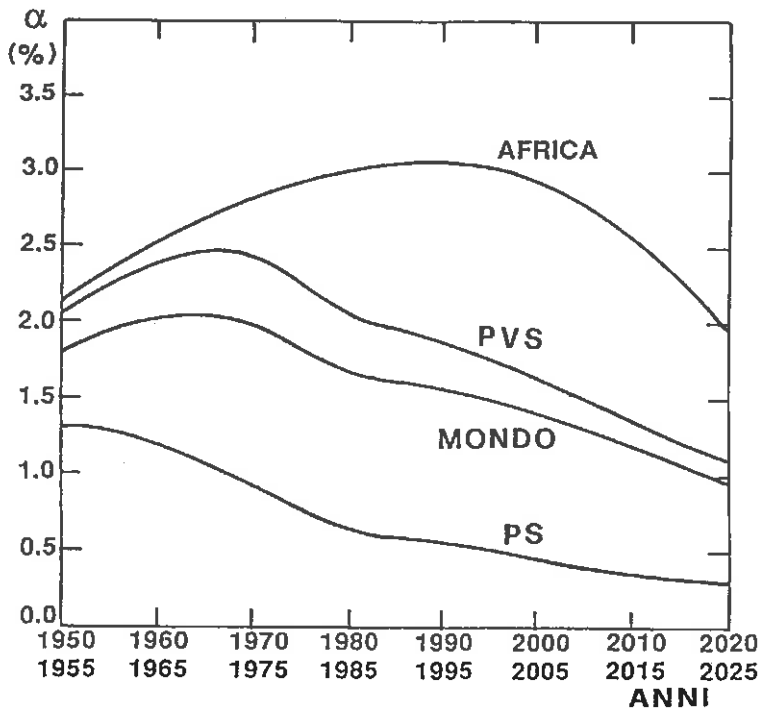

Fig. 2 Percentuale mondiale annua di incremento demografico.

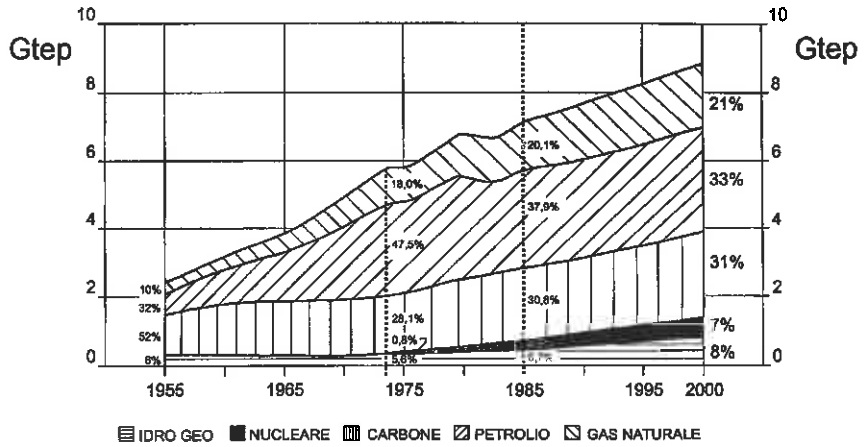

Fig. 3 Consumi mondiali di energia espressi in fonti primarie.

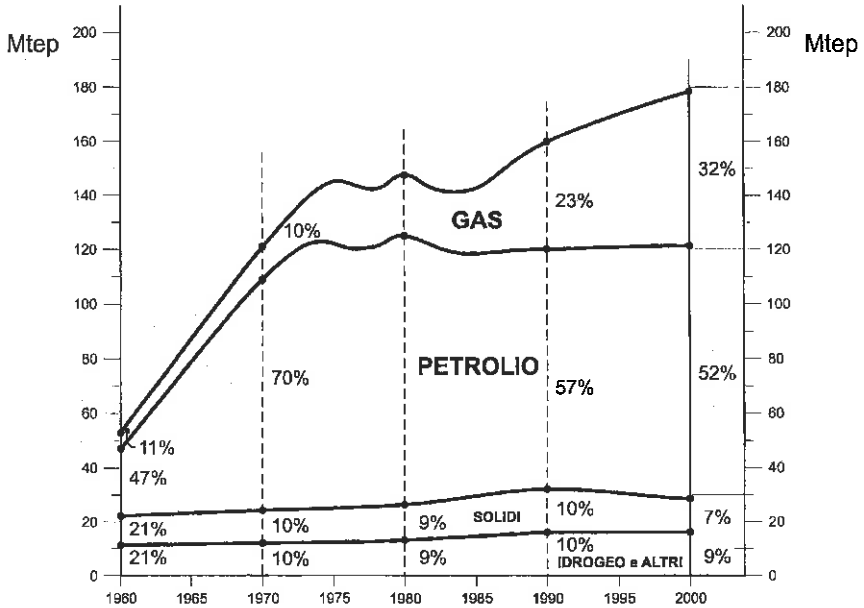

Fig. 4 Consumi di energia in Italia espressi in fonti primarie.

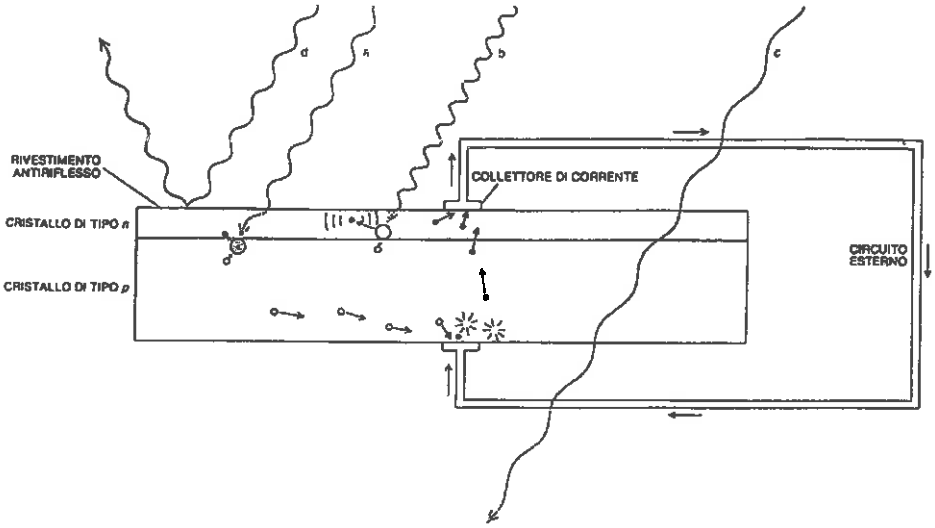

Fig. 5 Batteria solare al silicio.

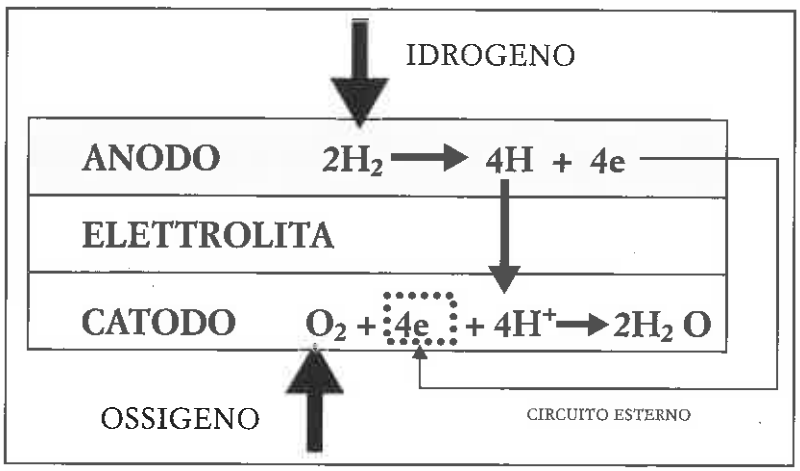

Fig. 6 Principio di funzionamento di una cella a combustibile.