



**OSSERVATORIO
PER L'ENERGIA
«MARIO SILVESTRI»**

di Gian Paolo Beretta *

IL CONTESTO ENERGETICO GLOBALE: PROSPETTIVE FUTURE

After a brief analysis of the history of global energy consumption, this paper discusses a plausible scenario of energy needs and related carbon emissions for the rest of the century. The global outlook and the probable evolution of several factors that impact on energy policy considerations – even on the local scale – demonstrate the great complexity and planetary dimension of the problems, as well as the almost certain sterility of out-of-context domestic energy-policy measures.

Dopo una breve analisi della storia dei consumi globali di energia, si discute un possibile scenario dei fabbisogni energetici e delle relative immissioni di carbonio in atmosfera per il resto del secolo. L'analisi del contesto globale e le prospettive di sviluppo dei diversi fattori imprescindibili per ogni valutazione di economia energetica, anche locale, indicano l'estrema complessità e la dimensione planetaria dei problemi, nonché la quasi certa inefficacia di misure locali di politica energetica adottate fuori contesto.

Fra i contributi che il mondo scientifico può fornire a quello politico in tema di energetica, anche in un contesto di mercato libero, vi sono sicuramente le analisi delle situazioni e delle prospettive di sviluppo delle diverse tecnologie allo stato attuale delle conoscenze, ma non deve mancare anche una costante lettura critica e sintetica delle numerose analisi di scenario che vari enti e ricercatori internazionali propongono periodicamente circa le previsioni di crescita dei fabbisogni delle diverse nazioni in relazione alle stime delle riser-

ve ed alle prospettive di sviluppo tecnologico. La complessità del tema non deve essere sottovalutata o offuscata da illusorie promesse di facili quanto improbabili soluzioni semplici dei problemi da affrontare. In questo articolo si propone un'analisi del quadro storico dei consumi energetici dell'umanità, anche in relazione ad altri fattori di sviluppo socio-economico. In base alle attuali stime delle riserve di combustibili convenzionali e non convenzionali, e tenuto conto delle inerzie intrinseche del sistema dimostrate dagli andamenti storici, si propone un possibile scenario energetico per il resto del secolo XXI sia della crescita dei fabbisogni globali, sia del possibile/plausibile mix di fonti che utilizzeremo per farvi fronte, sia delle conseguenti immissioni in atmosfera di gas serra.

1. I CONSUMI GLOBALI DI ENERGIA

I consumi globali di energia nell'ultimo trentennio del 2000 sono pressoché duplicati. Nel 2004 il consumo globale di fonti primarie è stato equivalente al potere calorifico di circa 11 mld. tep (11,5), con una media pro-capite di 1,75 tep/anno (in Europa 3,5). Il 77,8% del fabbisogno è coperto dai combustibili fossili

* Dipartimento di Ingegneria
Meccanica, Università di Brescia
E-mail: beretta@ing.unibs.it

(32,8% petrolio, 21,1% gas naturale, 24,1% carbone), il 5,4% dai combustibili nucleari, il 16,5% dalle fonti rinnovabili, di cui la principale è l'idrica (5,5%), mentre il restante 11% è costituito principalmente da biomasse non commerciali, cioè legno, fieno e altri foraggi che nei Paesi ad economia rurale costituiscono ancora la fonte principale. Queste biomasse «rurali» (si pensi al fieno per l'alimentazione degli animali) non vengono considerate nelle statistiche energetiche delle compagnie petrolifere, ma in un quadro globale corretto vanno considerate, in quanto almeno 2/3 dell'intera umanità vive in economie rurali-artigianali non molto diverse da quelle del nostro Medio Evo (Silvestri 1988). Ad esempio, negli Stati Uniti nel 1850 due terzi dell'energia meccanica proveniva dai cavalli, e ancora nel 1925 i cavalli erano circa 30 milioni. Senza contare questi 1,25 mld. tep/anno di biomasse rurali, la percentuale del fabbisogno energetico coperta dai combustibili fossili nel 2004 appare dell'87,7%, un dato spesso citato da varie fonti. L'utilizzo diretto dell'energia solare è stimato in circa 11 mil. tep (milioni, non miliardi), pari a meno di un millesimo del fabbisogno globale.

Prima di allargare l'orizzonte temporale, osserviamo il confronto fra l'attuale consumo di energia e il numero di abitanti nelle varie nazioni del pianeta. I dati sono tratti da un'analisi delle fonti più accreditate (BP-Amoco 2004, IEA 2002, WEC 2000). Nella Tab. 1 le nazioni sono divise in 10 gruppi omogenei per tipo di economia, di sviluppo industriale e di intensità di consumo di energia. Il consumo pro-capite varia molto da nazione a nazione, a causa di diversi fattori.

Tab. 1 - **FABBISOGNO, POPOLAZIONE E INTENSITÀ DI CONSUMO ENERGETICO NELL'ANNO 2000, AGGREGATI PER GRUPPI DI NAZIONI OMOGENEIE PER TIPO DI ECONOMIA E LIVELLO DI SVILUPPO INDUSTRIALE**

	Consumo mld. tep/anno	Popolazione mld. abit.	Consumo pro-capite tep/anno	kep/giorno
Nord America	2,4	0,3	7,9	21,7
Giappone, Australia, Nuova Zelanda	0,6	0,2	3,9	10,6
Europa OECD	1,6	0,5	3,5	9,6
Ex-URSS e Centro-Est Europa	1,3	0,4	3,1	8,4
America Latina	0,8	0,5	1,5	4,1
Medio Oriente	0,5	0,4	1,3	3,6
Est Asia	0,6	0,5	1,1	3,1
Cina	1,4	1,4	1,0	2,6
Africa	0,4	0,7	0,6	1,6
Sud Asia	0,6	1,4	0,4	1,2
Totale globale	10,3	6,2	1,7	0,6

Fonte: BP-Amoco (2004).

1.1. Il fattore geoclimatico

Fra questi fattori vi sono ad esempio le diverse condizioni geografiche e climatiche. Un clima rigido richiede un forte dispendio di energia per riscaldamento; una bassa densità di popolazione comporta spostamenti su grandi distanze e quindi elevati consumi per i trasporti; un'elevata umidità nei mesi estivi comporta alti consumi per la climatizzazione degli edifici.

Un altro fattore è l'efficienza tecnico-economica ed organizzativa nello sfruttamento delle fonti, che dipende dal sistema politico-economico interno alle singole nazioni. Ad esempio, la mentalità burocratica che domina o ha dominato nelle economie collettivizzate come l'ex-Unione Sovietica e la Cina, dove tutto è soggetto a meticolosa pianificazione centrale, è causa di forti dissipazioni, ma non si tratta di arretratezza tecnologica, né di mancanza di vivacità interna.

Al di là delle diversità geoclimatiche e politico-organizzative, però, il fattore principale che determina le differenze nel consumo energetico pro-capite è il livello di sviluppo e di industrializzazione, come è possibile dedurre dall'analisi dell'andamento storico (Tab. 2).

Negli ultimi duemila anni, il fabbisogno complessivo è aumentato di ben 70 volte, la popolazione è aumentata di 20 volte e il consumo pro-capite è poco più che triplicato (da 0,5 a 1,7 tep/anno). La transizione da fonti di energia rinnovabili (legno e fieno) all'impiego massiccio dei combustibili fossili ha accompagnato e consentito i processi di sviluppo e industrializzazione, che dove sono avvenuti hanno permesso profondi cambiamenti nella qualità della vita dell'umanità.

Tab. 2 - **EVOLUZIONE STORICA DEI CONSUMI PRO-CAPITE DI ENERGIA**

	tep/anno	
Alimenti per la sopravvivenza (3.000 kcal/giorno)		0,11
Umanità dopo scoperta fuoco (500.000 anni fa)		0,22
Neolitico - età bronzo e ferro		0,45
Economia rur.-artigian. greco-romana		0,50
1800 - Inghilterra		0,55
1900 - Inghilterra		2,8
2000 - Inghilterra		3,5
	Frazione agricola del PIL	tep/anno
<1900 - Italia	66%	0,50
1900 - Italia	50%	0,50
1913 - Italia	42%	0,55
1939 - Italia	28%	1,0
1981 - Italia	6,4%	2,5
2000 - Italia	3,3%	3,0
	Fabbis. globale mld. tep/anno	Popol. mil. ab. media pro capite
epoca greco-romana	0,15	300
2000 - intera umanità	10,3	6.200

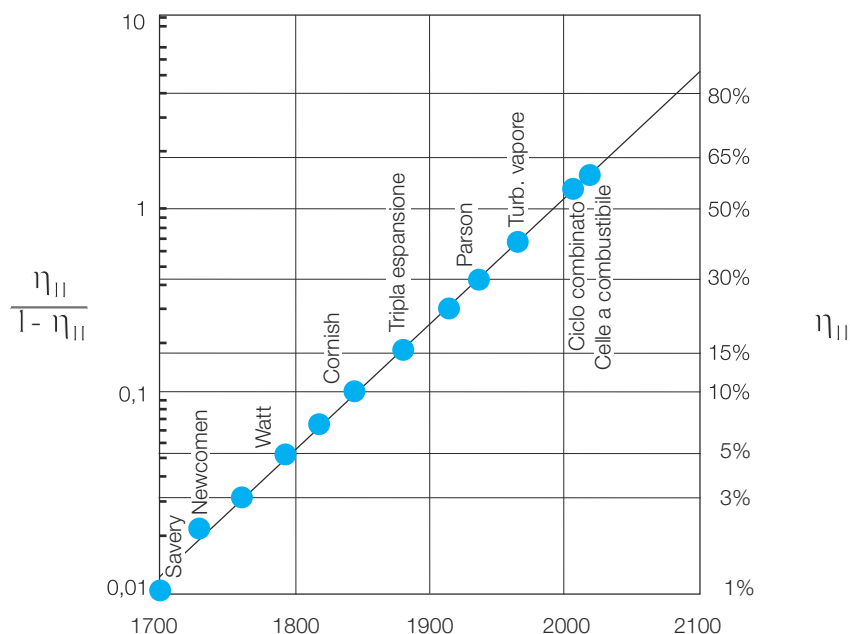
1.2. Il fattore tecnologico

In ogni periodo storico, il progressivo aumento di fabbisogno è sempre stato in parte contrastato da miglioramenti nell'efficienza di utilizzo dell'energia. La ricerca tecnico-scientifica ha determinato un progressivo miglioramento dell'efficienza delle macchine di conversione energetica.

È un processo che segue le leggi logistiche tipiche dell'apprendimento umano, come dimostra la Fig. 1 che mostra negli ultimi 300 anni la regolare crescita del rendimento termodinamico (leggibile a destra).

Le prime macchine a vapore per l'estrazione dell'acqua dalle falde delle miniere di carbone agli albori della rivoluzione industriale avevano un'efficienza di poco più dell'1%. Le moderne centrali a ciclo combinato e a celle a combustibile raggiungono oggi il 55-60%. L'andamento logistico dimostrato dalla crescita lineare del logaritmo di $\eta_{II}/(1-\eta_{II})$, dove η_{II} è il rendi-

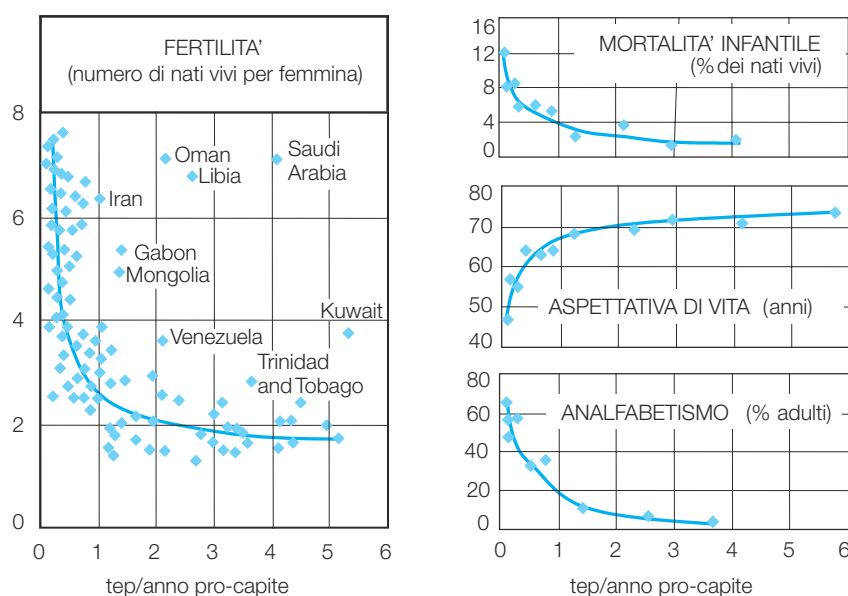
Fig. 1 - EVOLUZIONE DELL'EFFICIENZA TERMODINAMICA DI SECONDO PRINCIPIO DELLE MACCHINE DI CONVERSIONE DELL'ENERGIA NEGLI ULTIMI 300 ANNI



mento termodinamico di secondo principio (per la definizione si veda, ad es., Gyftopoulos e Beretta 2005), fa ben sperare nel continuo progresso dell'apprendimento scientifico anche in futuro, che porterà a raggiungere a fine secolo rendimenti di conversione energetica oltre l'80%.

Dal quadro dei consumi passati si osserva il forte incremento avvenuto nell'ultimo secolo e si può fare il conto delle risorse di fonti energetiche primarie sinora consumate (vedi Fig. 4 più avanti). Per stimare quali saranno i consumi in questo secolo, dobbiamo per prima cosa considerare il fattore demografico.

Fig. 2 - CORRELAZIONI FRA DIVERSI INDICATORI DI LIVELLO DI SVILUPPO SOCIO-ECONOMICO E CONSUMO PRO-CAPITE DI ENERGIA



Fonte: Sheffield (1998).

1.3. Il fattore demografico

È chiaro che non c'è spazio sulla Terra per una crescita indefinita della popolazione. Gli studi più attendibili concordano con la stima che un futuro sostenibile per il nostro pianeta richieda che il numero di abitanti del globo si stabilizzi intorno al doppio dell'attuale popolazione e che ciò avverrà sostanzialmente a fine secolo. Ma i tassi di crescita demografica varieranno molto da regione a regione del pianeta (Sheffield 1998, Duncan 2001).

I grafici di Fig. 2 evidenziano una forte correlazione inversa fra il consumo pro-capite di energia e il tasso di ferti-

lità e quindi di crescita demografica. L'energia infatti permette miglioramenti nello standard di vita, consente l'accesso alle cure mediche, all'uso dei contraccettivi, a un'aspettativa di vita più lunga, a servizi che accrescono il livello di alfabetizzazione e di accesso alle informazioni, alle opportunità di lavoro per le donne, a un minor bisogno di mettere al mondo figli che da adulti contribuiscano alla forza lavoro necessaria a garantire la sopravvivenza dei componenti improduttivi della famiglia, bambini e anziani. Il consumo pro-capite di energia è contemporaneamente un indice e uno strumento di sviluppo socio-economico. Paesi con elevato tenore di vita e alti consumi pro-capite di energia hanno tassi di crescita molto bassi o nulli. Paesi sottosviluppati hanno tassi di crescita elevati, a volte tanto da significare un raddoppio della popolazione ogni 25 anni. Un gradino importante nello sviluppo sembra essere il superamento della soglia di 1 tep/anno pro-capite. Le condizioni sociali migliorano, l'aspettativa di vita raggiunge i 70 anni, la fertilità diminuisce e il tasso di crescita si riduce, la crescita demografica rallenta.

2. UN POSSIBILE SCENARIO PER IL XXI SECOLO

Su queste basi, la Fig. 3 mostra, nella parte di destra, una previsione di crescita della popolazione per il resto del nuovo secolo, suddivisa negli stessi 10 gruppi di Paesi già visti. Passeremo da 6 a 11 miliardi di abitanti. La stabilizzazione dei Paesi più arretrati avverrà, ma con ritardo rispetto a quelli già in corso di sviluppo. Africa e Sud Asia che oggi accolgono un terzo

dell'umanità, fra un secolo ne accoglieranno la metà. Nord America, Giappone, Australia, Nuova Zelanda, ex-URSS ed Europa scenderanno dall'odierno 22% al 13% dell'umanità.

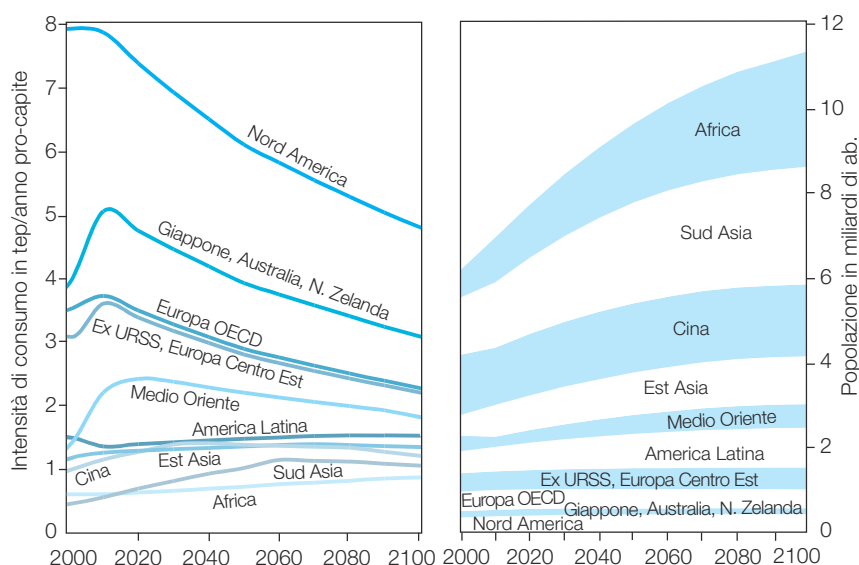
Contemporaneamente allo sviluppo socio-economico, continuerà anche lo sviluppo tecnologico, e migliorerà l'efficienza energetica, non solo dello sfruttamento delle fonti di energia, ma anche degli usi finali. La previsione è che a fine secolo l'efficienza complessiva sarà raddoppiata, così che l'attuale standard di vita oggi possibile con un consumo pro-capite di 3 tep/anno potrà essere mantenuto con solo 1,5 tep/anno.

La Fig. 3 mostra anche, nella parte di sinistra, l'andamento previsto per il consumo pro-capite nei 10 gruppi di Paesi (Grübler, Jefferson e Nakicenovic 1996). Diminuirà in quelli già industrializzati per effetto dell'incremento dell'efficienza; aumenterà in quelli in corso di sviluppo per consentirne il processo di industrializzazione e, complessivamente, si assesterà su un

valore medio globale di 1,4 tep (contro gli attuali 1,7 tep). Il prodotto dei due fattori rappresentati da questi due grafici, consumo pro-capite moltiplicato per la popolazione, fornisce il fabbisogno energetico annuo di ciascun gruppo di nazioni. Lo scenario che ne risulta è mostrato in Fig. 4, a sinistra. Il fabbisogno crescerà rapidamente ancora per pochi decenni, per poi stabilizzarsi a fine secolo su un valore di circa 16 mld. tep contro gli 11 di oggi. Il contributo dei Paesi più industrializzati crescerà ancora di poco nel primo ventennio per poi ridursi a fine secolo a 3/4 circa del loro fabbisogno attuale. Rapportata al fabbisogno mondiale, però, l'incidenza dei Paesi oggi più industrializzati scenderà dal 60 al 28%. Invece Africa e Sud Asia saliranno dal 10 al 33%.

Sono stati studiati con molto dettaglio anche diversi possibili scenari di come evolverà il mix delle fonti energetiche che verranno utilizzate per soddisfare il fabbisogno previsto. I diversi scenari dipendono da moltissime varia-

Fig. 3 - PREVISIONE DI CRESCITA DEMOGRAFICA PER IL XXI SECOLO (A DESTRA) E DI VARIAZIONE DEI CONSUMI PRO-CAPITE (A SINISTRA) PER GRUPPI DI NAZIONI OMOGENEE PER TIPO DI ECONOMIA E DI LIVELLO DI SVILUPPO INDUSTRIALE



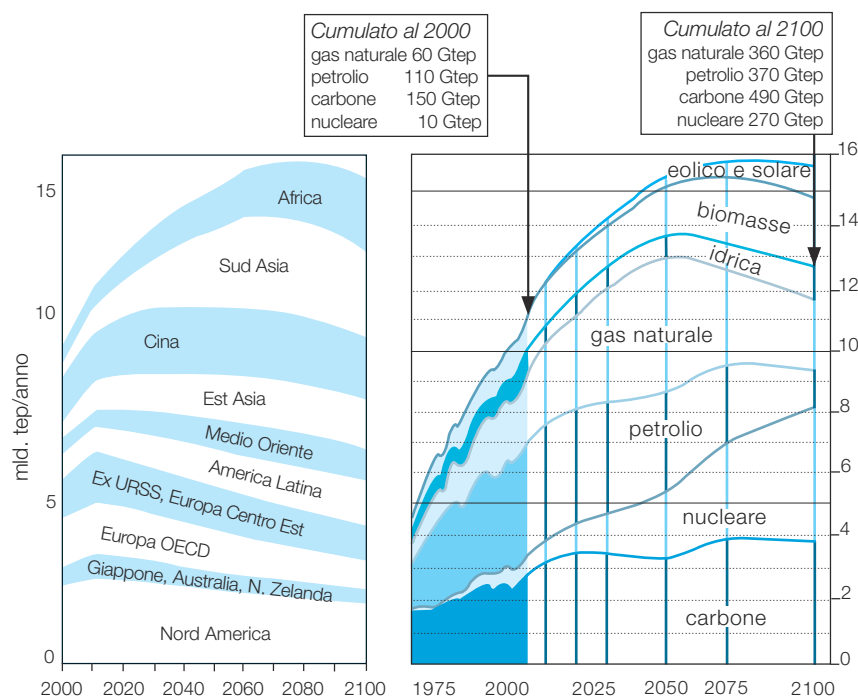
bili, soprattutto dal contesto geopolitico che si svilupperà. Se ne presenta qui uno solo (Fig. 4), molto equilibrato, pur essendo per certi versi ottimistico.

Il consumo di carbone continuerà a crescere perché verrà utilizzato con tecnologie sempre più pulite; il nucleare fra 20-25 anni riprenderà a crescere nell'ipotesi (ottimistica) che il contesto geopolitico si assesti e si stabilizzi in modo da consentire di gestire i rischi militari, e che la tecnologia evolva in modo da risolvere i problemi della sicurezza ambientale e della gestione delle scorie radioattive; il consumo di petrolio raggiungerà il suo massimo intorno al 2020 e poi inizierà lentamente a diminuire, col progressivo esaurirsi dei pozzi, lasciando spazio al gas naturale che diventerà la fonte predominante del secolo, insieme al carbone «pulito» e forse ai combustibili fossili non convenzionali (sabbie petrolifere, bitumi e scisti catramosi, greggi pesanti, idrati di metano, etc.); le fonti rinnovabili aumenteranno la loro quota di mercato, grazie a forti incrementi nell'utilizzo sostenibile delle biomasse, all'idroelettrico e in piccola parte al solare e alle altre fonti rinnovabili.

3. LE RISERVE

Dato questo scenario, è possibile calcolare i consumi cumulati alla fine del 2100 per confrontarli con le riserve disponibili di combustibili fossili e nucleari (Tab. 3) (Grübler, Jefferson e Nakicenovic 1996). Le prime tre righe riportano: i consumi cumulati alla fine del secolo passato (è quanto abbiamo già consumato); quelli previsti per il secolo appena iniziato; le riserve convenzionali accertate e pre-

Fig. 4 - SCENARIO STIMATO DEI FABBISOGNI GLOBALI DI ENERGIA PER IL XXI SECOLO ⁽¹⁾



⁽¹⁾ A sinistra, con ripartizione per gruppi di nazioni omogenei per tipo di economia e di livello di sviluppo industriale. A destra, con una plausibile ripartizione per fonti.

sunte. I dati sulle riserve derivano dalle stime riportate dalle compagnie petrolifere, e andrebbero controllati da un qualche organismo internazionale super partes, poiché a detta di alcuni geologi addetti ai lavori è molto probabile che le cifre siano state deliberatamente inflazionate dalle compagnie per poter accedere, secondo le regole dell'OPEC, a maggiori quote di esportazione (Campbell e Laharrère 1998). Per contro, bisogna dire che nella ricerca di nuovi pozzi petroliferi, la maggior parte dei fondi oceanici è ancora inesplorata. In ogni caso, si vede come solo le riserve di carbone sono ab-

bondanti, mentre le riserve delle altre fonti verrebbero invece praticamente esaurite dal consumo previsto nel secolo in corso. E ciò vale anche per il nucleare, se continueremo ad avvalerci dell'attuale tecnologia, cioè la fissione non autofertilizzante.

D'altra parte, occorre considerare anche metodi e fonti oggi considerati non convenzionali ma che presumibilmente nell'arco temporale che stiamo considerando potranno svilupparsi tecnologicamente e competere economicamente con le risorse convenzionali in esaurimento. Il quadro in Tab. 3 si completa così con l'aggiunta delle riser-

Tab. 3 - **STIMA DEI FABBISOGNI GLOBALI DI ENERGIA PER IL XXI SECOLO E RISERVE ACCERTATE, PRESUNTE E PROBABILI DI FONTI NON RINNOVABILI CONVENZIONALI E NON CONVENZIONALI** (mld. tep)

	Petrolio	Gas naturale	Carbone	Nucleare
Consumi cumulati al 2000	111	58	148	10
Previsione consumo cumulato 2000-2100	263	298	347	256
Riserve convenzionali accertate + presunte	295	420	3.400	260
Ulteriori riserve convenzionali probabili			3.000	150
Riserve non convenzionali accertate + presunte	525	450		15.560
Ulteriori riserve non convenzionali probabili	1.900	400		8.900

ve non convenzionali accertate, presunte e probabili di combustibili fossili (bitumi, scisti oleosi, idrati di metano e altre fonti fossili ritenute accessibili anche se a costi elevati) o nucleari (fissione autofertilizzante e ciclo del Torio).

Si tenga presente però che i consumi di energia associati all'estrazione e al trasporto delle fonti non convenzionali, così come di petrolio, carbone e gas naturale da giacimenti in esaurimento, sono molto elevati, così che l'energia netta utilizzabile può essere molto inferiore al contenuto energetico della riserva. Quando lo sfruttamento consuma più energia di quanta se ne ricavi, il giacimento perde il suo valore energetico, anche se talvolta l'estrazione continua grazie a sussidi economici sbagliati.

La fusione nucleare qui non è considerata come opzione, date le difficoltà che sta incontrando in laboratorio ed i tempi che comunque saranno necessari dalla dimostrazione in laboratorio allo sviluppo industriale. In ogni caso le riserve per la fusione sarebbero abbondantissime.

Vi sono infine le energie rinnovabili, presenti in Natura in quantità molto abbondanti, ma estremamente diluite sulla superficie del pianeta e non disponibili con costanza nel tempo, tanto da richiedere grande dispendio di materiali e di energia per essere raccolte, e per questi motivi finora scarsamente competitive e destinate anche in questo secolo a mantenere un ruolo importante ma quantitativamente marginale nel contesto globale.

Le riserve di fonti primarie comunque non scarseggeranno in misura tale da impedire lo sviluppo socio-economico previsto: quando una risorsa scarseggia i mercati si aggiu-

stano e non resteremo a corto di energia per lunghissimo tempo. Tuttavia, il fatto che nel lungo termine il combustibile convenzionale più abbondante è il carbone desta qualche preoccupazione ambientale alimentata dall'ipotesi che i gas ad effetto serra immessi in atmosfera dalle attività antropiche possano influire sull'equilibrio termico del nostro pianeta. Pur non essendo confermata scientificamente, questa ipotesi spinge verso ulteriori consumi di energia per sequestrare e confinare una parte della CO₂ liberata dall'impiego di combustibili fossili.

4. LE IMMISSIONI DI CO₂ IN ATMOSFERA: EFFETTO SERRA

In effetti, per ogni tep di energia ottenuta per combustione, una stima grossolana dell'immissione in atmosfera di anidride carbonica è di 4,6 tonnellate per il legno, 4 per il carbone, 3,1 per il petrolio e 2,3 per il gas naturale (una stima più precisa si otterrebbe considerando l'intero ciclo di vita della filiera dall'estrazione all'uso finale di ciascuna fonte primaria). In ogni caso, fra le fonti fossili il carbone, a parità di energia, libera la maggiore quantità di CO₂. Nella Tab. 4 riportiamo lo scenario di immissioni di CO₂ che deriva (per semplicità e indisponibilità di stime più corrette basate sull'intero ciclo di vita delle diverse fonti) applicando le citate emissioni specifiche allo scenario di

fabbisogno e di mix di fonti energetiche ipotizzato in Fig. 4 (Nakicenovic 1996, Grubler e Nakicenovic 1996): al 2000, petrolio 110 mld. tep x 3,1 mld. tonn. CO₂/mld. tep, gas naturale 60 x 2,3, carbone 150 x 4, totale 1.100 mld. tonn. CO₂, ossia 300 mld. tonn. di carbonio; al 2100, petrolio 370 x 3,1, gas naturale 360 x 2,3, carbone 490 x 4, totale 3.900 mld. tonn. CO₂, ossia 1.100 mld. tonn. di carbonio.

Se nell'ultimo secolo l'umanità ha complessivamente liberato 1.100 mld. tonn. CO₂, nel secolo in corso ne libererà almeno altri 2.800 miliardi, e saranno di più se l'ipotesi ottimistica di una risoluzione accettabile dei problemi del nucleare non si avvererà. A queste si aggiungono altre quantità di gas serra da altre attività umane (produzione del cemento, perdite di gas naturale dai gasdotti, rilascio di clorofluorocarburi e altri gas ad effetto serra). Per analizzare queste quantità in prospettiva occorre considerare le quantità di carbonio (C), anziché di CO₂, poiché l'anidride carbonica è solo uno dei composti intermedi nei complessi meccanismi naturali che regolano la vita delle masse di materia organica vegetale e animale. Le immissioni antropiche di carbonio sono oggi di circa 7 mld. tonn./anno, e finora l'apporto cumulato è di 300 mld. tonn., che diventeranno 1.100 entro fine secolo, nello scenario ipotizzato, con un'immissione di ulteriori 800 mld. tonn. in 100 anni (8 mld. tonn./anno). Queste enormi quantità di carbo-

Tab. 4 - SCENARIO STIMATO DELLE IMMISSIONI DI GAS SERRA DOVUTE AI CONSUMI ENERGETICI NEL XXI SECOLO ⁽¹⁾

	mld. ton. CO ₂ /anno	mld. tonn. C/anno
Immissioni non rinnovabili cumulate al 2000	1.100	300
Previsione immissioni cumulate al 2100	3.900	1.100
Differenza: previsione immissioni 2000-2100	2.800	800

⁽¹⁾ Come stimati in Fig. 4.

Tab. 5 - **RAPPORTO FRA LE IMMISSIONI ANTROPICHE STIMATE PER IL PROSSIMO SECOLO E GLI SCAMBI E ACCUMULI NATURALI DI CARBONIO SULLA SUPERFICIE TERRESTRE**

<i>Quantità di carbonio scambiate</i> (mld. tonn./anno)	
Immissioni antropiche da uso di combustibili fossili	8
Scambi naturali fra superficie terrestre e atmosfera	60
Scambi naturali fra superficie oceani e atmosfera	90
Scambi naturali fra profondità e superficie oceani	100
Rapporto fra stima immissione antropica annuale media 2000-2100 e scambi naturali fra superficie globo e atmosfera = $8/(60+90) \sim 5\%$	
<i>Quantità di carbonio immagazzinate</i> (mld. tonn.)	
Immissioni antropiche da uso combustibili fossili	800
CO ₂ nell'atmosfera	750
CO ₂ negli oceani (strati superficiali)	1.000
CO ₂ sulla superficie terrestre	2.200
CO ₂ negli oceani (strati intermedi e profondi)	38.000
Rapporto fra stima immissioni antropiche cumulate 2000-2100 e quantità naturali immagazzinate = $800/(38000+2200+1000) \sim 2\%$	

nio, che l'umanità sta liberando in un paio di secoli, sono state laboriosamente accantonate dalla Natura per oltre cento milioni di anni mediante la lentissima conversione in combustibili fossili di meno di un milionesimo della biomassa prodotta dall'energia solare grazie alla fotosintesi sulla terra e negli oceani.

La Tab. 5 mostra in che rapporto stanno gli 8 mld. tonn./anno di immissioni antropiche da uso dei combustibili fossili con le quantità scambiate nei cicli naturali del carbonio, regolati dalla produzione di biomasse per fotosintesi, dalla decomposizione delle biomasse vegetali e animali e dagli scambi di massa che accompagnano le variazioni stagionali di temperatura. Annualmente l'atmosfera scambia 60 mld. tonn. di carbonio con la superficie terrestre e 90 mld. tonn. con gli strati superficiali degli oceani. Il contributo antropico è pertanto di poco superiore al 5% (un ventesimo) di questi scambi naturali. Un ulteriore scambio di 100 mld. tonn. all'anno avviene fra gli strati profondi e intermedi degli oceani e gli strati superficiali, ed è importante perché l'anidride carbonica, che è più pesante dell'aria e dell'acqua, si accumula e stratifica in grandi quantità nelle profondità oceani-

che. Se infatti l'atmosfera contiene 750 mld. tonn. di carbonio, gli strati superficiali degli oceani 1.000 e la superficie terrestre 2.200, ben 38.000 sono contenuti nelle profondità degli oceani. Le immissioni antropiche cumulate previste per il prossimo secolo, 800 mld. tonn., saranno pertanto di poco inferiori al 2% (un cinquantesimo) della quantità accumulata nei serbatoi naturali di carbonio.

Queste cifre ci fanno capire che le immissioni antropiche sono di entità non trascurabile, ma si inseriscono in un complesso di scambi, equilibri ed accumuli di carbonio in cui le quantità in gioco sono almeno venti volte maggiori e in cui molti sono i meccanismi naturali da cui dipende la concentrazione di CO₂ nell'atmosfera, che nell'ultimo secolo ha registrato un aumento del 22%, da 295 a 360 ppm. Nello stesso periodo si è registrato un aumento di 0,6 °C della temperatura media sulla superficie terrestre. Non esiste tuttavia ancora la certezza scientifica che le variazioni climatiche siano di origine antropica o comunque siano da addebitare per intero all'umanità. Permane anzi il dubbio che gli enormi costi e sforzi umani necessari ad una significativa riduzione delle emissioni di gas serra possa-

no facilmente venire annullati da piccole fluttuazioni nei grandi meccanismi naturali che da sempre regolano l'equilibrio termico del nostro pianeta, fra i quali vanno considerate: le fluttuazioni nella radiazione solare, nel campo magnetico solare e nei venti solari; le particelle, fuliggine e aerosol stratosferici da eruzioni vulcaniche; le variazioni nel tasso di crescita e di perdita di umidità della vegetazione conseguenti all'aumentata concentrazione di CO₂.

5. IL FATTORE GEOPOLITICO

Le riserve di petrolio e gas naturale non scarseggiano ma sono dislocate in modo non uniforme. La dislocazione geografica ha grande importanza nel determinare i diversi possibili scenari di sviluppo socio-economico. I Paesi oggi in via di sviluppo richiederanno nei prossimi decenni quantità sempre maggiori di energia, finché la loro crescita demografica non si arresterà (e, paradossalmente, ciò avverrà tanto prima quanto più rapidamente cresceranno i loro consumi energetici pro-capite). Il futuro dipenderà dallo scenario geopolitico che l'umanità sarà capace di realizzare di fronte a questi problemi.

Uno scenario auspicabile ma forse utopico è quello dello sviluppo di un libero mercato in un clima internazionale pacifico e sicuro, in cui ogni Paese si faccia carico di questi problemi secondo le proprie capacità in un'ottica globale, in cui le garanzie di sicurezza e stabilità siano tali da consentire ai Paesi avanzati di investire nelle infrastrutture di quelli in via di sviluppo, per renderne rapida la transizione e limitarne al più presto la crescita demografi-

ca. In questo contesto pacifico la fonte nucleare potrebbe svilupparsi rapidamente, con vantaggi economici e anche di riduzione delle emissioni di gas serra. Tuttavia, conoscendo la natura umana, è difficile escludere che si realizzi invece uno scenario opposto, in cui si ripeta nel futuro l'attuale spirito di antagonismo, egoismo e fanatismo, man mano che si delineano nuovi assetti, nuove coalizioni economiche e nuove ostilità. La speranza è che la consapevolezza che si è sviluppata negli ultimi anni sui problemi ambientali possa concretizzarsi nel prossimo futuro nella ricerca di un equilibrio globale che dia la stabilità necessaria a raccogliere i vantaggi ed i risparmi, anche energetici, di una vera globalizzazione.

6. L'INERZIA DEL SISTEMA ENERGETICO

L'analisi degli andamenti storici delle quote di mercato delle varie fonti primarie, insieme allo scenario futuro che deriva dal fabbisogno e dal mix di fonti energetiche ipotizzato in Fig. 4, evidenzia come le leggi del mercato abbiano comportato la graduale sostituzione e competizione delle fonti, dalle biomasse rurali al carbone, dal carbone al petrolio, all'attuale mix di fonti. Le dinamiche storiche ammontano chiaramente circa l'entità delle inerzie del sistema economico-energetico-tecnologico. Occorrono decine di anni perché una nuova fonte raggiunga una quota di mercato significativa. La vita stessa degli impianti di produzione va dai 20 ai 40 anni. È evidente che l'inerzia del sistema comporta tempi lunghi di risposta e di ritorno degli investimenti. Interventi sconsiderati di politica energetica

locale e piani energetici non ben ponderati e condivisi a livello internazionale, non sono in grado di far cambiare rotta al sistema in tempi brevi e, oltre che inefficaci e dissipativi, rischiano di ridurre la fiducia degli operatori nella stabilità del contesto economico-normativo in cui sono chiamati ad investire.

7. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Le fonti non rinnovabili sono un vero e proprio «capitale» di energia che la Natura ha messo da parte per milioni di anni e che solo dalla fine del secolo XVIII l'uomo sta ampiamente e rapidamente «investendo» per avviare e sostenere la propria industrializzazione ed il rapido e continuo sviluppo di nuove tecnologie in tutti i campi. Questo capitale di risorse naturali durerà ancora molto tempo, ma va utilizzato sapientemente, per sviluppare tempestivamente le tecnologie energetiche necessarie a sostituire le fonti in esaurimento con altre.

Lo scenario proposto per il XXI secolo è sicuramente questionabile soprattutto perché è impossibile prevedere le tecnologie che esisteranno fra 50 anni. Ma, sostenibili o no, lo sviluppo e l'incremento demografico ci saranno. L'analisi del contesto energetico storico e globale e le prospettive di sviluppo socio-economico nelle diverse regioni del pianeta evidenziano molto bene l'entità delle inerzie del mercato energetico, le proporzioni relative dei ruoli delle varie fonti, e le dimensioni dell'impatto ambientale di origine antropica rispetto ai fenomeni naturali. Tutti questi fattori, imprescindibili per ogni valutazione di economia energetica anche locale, indicano

l'estrema complessità e la dimensione planetaria del problema e segnalano la quasi certa inefficacia di misure locali adottate fuori contesto.

Una buona dose di incertezza del futuro dell'energia dipende dallo scenario geopolitico che le nazioni sapranno darsi e, di conseguenza, dallo scenario di sviluppo economico e demografico che si delineerà, soprattutto per i Paesi in via di sviluppo o di transizione. Dipenderà dalla forza con cui l'umanità saprà guardare insieme al proprio futuro.

L'incertezza non sta nella scarsità delle riserve, che sono sufficienti a consentire lo sviluppo globale in corso, né sull'ordine di grandezza dei consumi di combustibili tradizionali. Il contributo delle rinnovabili, delle biomasse rurali e non rurali, e della termovalorizzazione dei rifiuti crescerà sì in modo importante ma (nello scenario ottimistico ipotizzato) difficilmente supererà il 25% a fine secolo (a fronte dell'attuale 16%, che tiene conto delle biomasse rurali).

Ma anche in questo secolo la quota preponderante dei fabbisogni di energia sarà soddisfatta da petrolio, gas naturale, carbone e nucleare, pur con proporzioni relative diverse dalle attuali. Il consumo di fonti non rinnovabili nel XXI secolo difficilmente sarà inferiore a 1.000 mld. tep, tre volte quanto consumato nel XX secolo, poco meno di due terzi da ascrivere ai Paesi oggi meno industrializzati.

È importante che il legislatore, i politici, i media, e in ultima analisi la popolazione, non si lascino disinformare e condizionare da false promesse di facili soluzioni del complesso problema energetico.

È un errore proporre, come avviene da qualche tempo anche a livello europeo, un quadro di investimento in ricer-

ca fortemente sbilanciato sulle fonti rinnovabili o sull'uso dell'idrogeno come (ipotetico quanto lontano ed improbabile) vettore e accumulatore energetico (sull'idrogeno si veda Beretta e Pedrocchi 2005). Migliori ritorni si avrebbero investendo «cum grano salis» in ricerche su fronti più maturi e con maggior incidenza in termini di risparmio energetico e ambientale:

- sulle tecnologie mature di estrazione, sfruttamento, trasporto e conversione delle fonti fossili, per migliorarne l'efficienza e la sostenibilità ambientale;

- sulla reintroduzione non di centrali nucleari in Italia ma di attività di ricerca e sviluppo industriale tese a reintrodurre l'industria nazionale nel settore delle tecnologie nucleari;

- sullo sviluppo degli usi puliti ed efficienti del carbone (e in prospettiva delle fonti fossili non convenzionali), compresi i metodi di produzione di combustibili liquidi sintetici per autotrazione;

- sulle tecnologie di distribuzione elettrica, anche per adeguare, potenziare e stabilizzare le reti elettriche come necessario per far fronte alle nuove esigenze introdotte dalla liberalizzazione del mercato energetico, in particolare dall'esigenza di assorbire il surplus della generazione distribuita;

- su sistemi e modelli gestionali e di effettivo controllo continuo e capillare che garantiscano la qualità anche ambientale degli usi finali dell'energia, oltre che della produzione;

- su sistemi di teleriscaldamento e teleraffreddamento residenziale nei centri fortemente antropizzati;

- sull'efficienza energetica nell'autotrasporto, ad esempio mediante propulsori ibridi e sistemi di recupero dell'energia di rallentamento e di frenata.

Infine, sarebbe auspicabile escogitare meccanismi virtuosi di professionalità che inducano il mondo politico, prima di assumere decisioni nel settore energetico, a raccogliere ed esaminare i pareri di esperti «super partes» di settore, rispettati dal mondo tecnico-scientifico, individuati mediante il criterio del merito scientifico e il metodo della «peer review».

Brescia, Gennaio 2006

BIBLIOGRAFIA

BERETTA G.P., PEDROCCHI E. (2005), *Confronto fra i vettori elettricità e idrogeno*, in «Energia», vol. 26, n. 2, 72.

BP-Amoco (2004), *Statistical Review of World Energy*.

CAMPBELL C.J., LAHARRÈRE J.H. (1998), *The end of cheap oil*, in «Scientific American», Marzo.

DUNCAN R.C. (2001), *World Energy Production, Population Growth, and the Road to the Olduvai Gorge*, in «Population and Environment», vol. 22.

GYFTOPOULOS E.P., BERETTA G.P. (2005), *Thermodynamics. Foundations and Applications*, Dover Publications, New York.

GRÜBLER A., NAKICENOVIC N. (1996), *Decarbonizing the global energy system*, in «Technological Forecasting and Social Change», vol. 53, 97.

GRÜBLER A., JEFFERSON M., NAKICENOVIC N. (1996), *Global energy perspectives: a summary of the joint study by the IIASA and WEC*, «Technological Forecasting and Social Change», vol. 51, 237.

IEA (2002), *World Energy Outlook*, Paris.

NAKICENOVIC N. (1996), *Decarbonization: doing more with less*, «Technological Forecasting and Social Change», vol. 51, 1.

SHEFFIELD J. (1998), *World population growth and the role of annual energy use per capita*, in «Technological Forecasting and Social Change», vol. 59, 55.

SILVESTRI M. (1988), *Il futuro dell'energia*, Bollati Boringhieri, Torino.

WEC (2000), *Energy for Tomorrow's World: Acting Now*.