



Discussion Papers

Collana di

E-papers del Dipartimento di Scienze Economiche – Università di Pisa



Tommaso Luzzati e Alessandro Franco

Idrogeno, fonti rinnovabili ed eco-efficienza

Quale approccio alla questione energetica?

Discussion Paper n. 45

2004

Discussion Paper n. 45, presentato: **dicembre 2004**

Indirizzo dell'Autore:

Dipartimento di Scienze Economiche, via Ridolfi 10, 56100 PISA – Italy

tel. (39 +) 050 2216 329

fax: (39 +) 050 598040

Email: tluzzati@ec.unipi.it

© Tommaso Luzzati Alessandro Franco

La presente pubblicazione ottempera agli obblighi previsti dall'art. 1 del decreto legislativo luogotenenziale 31 agosto 1945, n. 660.

Si prega di citare così:

Luzzati T. Franco A. (2004), "Idrogeno fonti rinnovabili ed eco-efficienza: quale approccio alla questione energetica?", *Discussion Papers del Dipartimento di Scienze Economiche – Università di Pisa*, n. 45 (<http://www-dse.ec.unipi.it/ricerca/discussion-papers.htm>).



Tommaso Luzzati e Alessandro Franco

Idrogeno, fonti rinnovabili ed eco-efficienza Quale approccio alla questione energetica?

Hydrogen, Renewable Energies and Eco-efficiency

Abstract

The paper is about the nature of the relationships among energy economy and society. Economic growth and development was fostered by an increasing use of fossil energy. Its exhaustion has always been a major worry. Furthermore, the abundance of energy has been made possible to move huge amounts of matter and has given rise to major disturbances to eco-systems and costly feedbacks on humans. We will see that the European Union is very concerned of both sides of the problem and acknowledges that the supply side (also renewable energies) will not offer relevant contributions. The analysis of the technological frontier in this field will illustrate the main reasons for this position and show that the hydrogen society is not just round the corner.

Among those reasons there is also our difficulty of acceptg the multidimensional nature of the problems. A multidimensional non-reductionist approach allows 1) to better assess the different energy sources, 2) to avoid the illusion, also contained in the vision of the EU, of being able to reduce energy demand by increasing efficiency, 3) to view absolute dematerialisation and reduction of energy demand as a necessary condition for sustainability. Finally we tackle the issue of the importance of how we look, perceive and process our environment - importance that has been emphasised by the film director Wim Wenders and the 1978 Nobel Prize for economics Herbert Simon.

Keywords: hydrogen, fossil fuels, eco-efficiency, dematerialisation, multidimensionality, vision

Indice

1.	Introduzione	2
2.	L'energia, la crescita economica, l'ambiente	4
3.	Situazione e prospettive in Europa	5
4.	Il mito dell'economia all'idrogeno	6
5.	L'utilizzazione dell'idrogeno a fini energetici	10
6.	Spunti di riflessione critica: un approccio multi-criteriale all'energia nucleare e alle fonti 'pulite'	15
7.	L'eco-efficienza: strumento per l'insostenibilità ambientale?	19
8.	La via da percorrere: la riduzione dei flussi di energia e di materia	23
9.	La visione e le illusioni	27
10.	Troppi rifiuti o troppa energia?	30
11.	Bibliografia	32

Idrogeno fonti rinnovabili ed eco-efficienza: quale approccio alla questione energetica?¹

Tommaso Luzzati
Dipartimento di Scienze Economiche, Facoltà di Economia - Università di Pisa
V. Ridolfi 10, 56124 Pisa,
tluzzati@ec.unipi.it

Alessandro Franco
Dipartimento di Energetica "Lorenzo Poggi", Facoltà di Ingegneria,
Università di Pisa
V. Diotallevi 2, 56126 Pisa
alessandro.franco@ing.unipi.it

1. Introduzione

Queste pagine intendono offrire qualche spunto di riflessione sulla natura dei rapporti che oggi intercorrono tra energia economia e società, sulla loro potenziale evoluzione, nonché sulle possibili linee da seguire nella

¹ Il presente lavoro è frutto di un'intensa collaborazione tra i due autori. Ciononostante la stesura dei paragrafi 2, 3, 7, 8, 9 è attribuibile a T. Luzzati mentre quella dei paragrafi 4, 5, 6 ad A. Franco. Desideriamo ringraziare Mario Giampietro e Giuseppe Munda che, almeno in parte, hanno ispirato molto di quanto esposto nel presente lavoro. Le idee qui presentate riflettono tuttavia esclusivamente le nostre opinioni e ogni errore e imprecisione rimane nostra responsabilità.

formulazione delle politiche. Per molti aspetti la questione energetica è da sempre al centro della nostra vita e delle nostre società. Non occorre dire che uno dei temi più rilevanti riguarda la disponibilità delle fonti energetiche. Un'intensa discussione, ad esempio, sull'esaurimento del carbone si ebbe nell'Inghilterra della seconda metà dell'ottocento (v. ad es. Jevons 1906 [1865]). Il problema delle fonti energetiche si è riaffacciato con enfasi con le crisi petrolifere degli anni '70; è più o meno esplicito in varie situazioni di conflitto - dalle guerre del golfo alla situazione cecena; acquista oggi estremo rilievo di fronte, da un lato, a riserve di petrolio e gas naturale che, nonostante le previsioni catastrofiche fino ad oggi sempre smentite, sembrano aver iniziato la fase discendente (v. ad es. Laherrère 1999), dall'altro, ad una domanda in crescita sempre più rapida². Da ormai più di 40 anni, infine, si innesta nel quadro complessivo la questione ambientale - questione che per la sua complessità va ben oltre le emissioni di anidride carbonica e il connesso effetto serra.

Il lavoro è articolato come segue. Si cercherà innanzitutto di inquadrare in modo schematico le questioni in campo per poi riassumere lo stato e le prospettive secondo la visione dell'Unione Europea. Il discorso in particolare trae spunto dal recente entusiasmo sulle prospettive dell'idrogeno come "fonte energetica innovativa" (Rifkin, 2002). Dopo aver ricordato le principali caratteristiche dell'idrogeno e dei suoi modi di produzione, si esamineranno le incongruenze che sono alla base della visione salvifica di una prossima economia all'idrogeno. Nel paragrafo successivo si proporranno alcuni spunti relativi ai metodi di valutazione, che non possono essere che multi-dimensionali. In questa prospettiva, si tenterà di fornire alcuni elementi di valutazione per il nucleare e per le cosiddette fonti 'pulite'.

Nel complesso si potrà intuire come non esistano, almeno nel breve periodo, grossi spazi sul lato dell'offerta, tant'è che l'Unione Europea punta decisamente sulla domanda. La via individuata dall'Unione, ampiamente condivisa a tutti i livelli, è soprattutto quella dell'eco-efficienza -la riduzione

² La crescita della domanda di energia è dovuta non solo agli aumentati fabbisogni di paesi economicamente emergenti quali la Cina e l'India, ma anche per via dei paesi economicamente avanzati che sono sempre più energivori.

dei consumi in termini relativi. Vedremo che questa costituisce una buona strategia in linea di principio, potrebbe tuttavia produrre risultati opposti a quelli sperati se non viene accompagnata da politiche di contenimento dei consumi in termini assoluti. La riduzione dei consumi energetici, si vedrà in un breve paragrafo successivo, sarebbe peraltro l'unica via per ridurre effettivamente il nostro impatto sull'ambiente. Il lavoro si conclude con alcune spunti - che si ispirano al regista W. Wenders e al premio Nobel per l'economia H. Simon - sulle nostre difficoltà a "vedere" nitidamente le questioni, premessa indispensabile per un corretto processo di razionalizzazione, premessa a sua volta per una effettiva libertà.

2. L'energia, la crescita economica, l'ambiente

La questione energetica consiste essenzialmente dei nessi esistenti tra energia economia e ambiente. Essa può essere riassunta in molto semplice e schematico:

- (1) La crescita economica iniziata con la rivoluzione industriale è stata possibile grazie ad un grande, e sempre crescente, uso di energia esosomatica³, ottenuta inizialmente da legno e carbone e poi, soprattutto, da petrolio, gas naturale, combustibili nucleari.
- (2) Sia la produzione che l'utilizzo dell'energia esercitano profondi impatti sull'ambiente di cui facciamo parte.

Di conseguenza la questione energetica si lega a filo doppio sia con la questione economica sia con i tentativi di perseguire uno sviluppo meno insostenibile. Su questi due fronti emergono pertanto le preoccupazioni circa

- (1) la disponibilità di fonti energetiche
 - a) **in misura sufficiente** a mantenere gli attuali livelli di consumo (che sono peraltro previsti in crescita!) (*sicurezza dell'approvvigionamento*)

³Il termine esosomatico ('al di fuori del corpo'), contrapposto a endo-somatico, sottolinea la capacità dell'uomo di costruire e di utilizzare strumenti e macchine; introdotto tra il 1910 e il 1920 dal chimico, demografo, ecologo e matematico Alfred James Lotka (1880-1949) (Lotka 1925), viene poi ripreso da Georgescu Roegen (v., ad es., Georgescu 1971, 307).

⁴ Il Libro Verde è consultabile sul sito http://europa.eu.int/comm/energy_transport/it/lpi_lv_it1.html

- b) **a costi** che consentano di mantenere la competitività economica internazionale. (*competitività*);
- (2) le conseguenze negative sull'ambiente (*tutela dell'ambiente*). Preoccupano in particolare gli impatti, locali e globali, generati dalla maggior parte dei sistemi energetici.

3. Situazione e prospettive in Europa

Nel giugno 2002 l'Unione Europea ha pubblicato il libro verde sull'energia, "Verso una strategia europea di sicurezza dell'approvvigionamento energetico"⁴. Da tale rapporto si traggono, tra l'altro, le seguenti conclusioni:

- a) i consumi sono crescenti, le risorse in declino. Ciò implica una **crescente dipendenza energetica**.
- b) Nessuna opzione energetica **da sola** può soddisfare il fabbisogno dell'Unione.
- c) Le fonti rinnovabili potranno dare, anche nel medio termine, un contributo modesto.
- d) Il margine di manovra dell'Unione sull'offerta di energia è limitato.

In termini di politiche energetiche risultano pertanto necessarie

- *diversificazione energetica* (che comprende lo sviluppo rinnovabili);
- politiche della domanda: *eco-efficienza* e risparmio energetico (nel settore civile, industriale e dei trasporti)

Di tenore analogo alle linee tracciate nel libro verde sono le considerazioni che informano il VI programma quadro per la ricerca e lo sviluppo tecnologico (2002-2006)⁵ e l'iniziativa di supporto per azioni non tecnologiche in campo energetico EIE (Energia Intelligente Europa, 2003-2006).

⁵ V. http://europa.eu.int/italia/index.jsp_section.research_develop-level.det_prog-content.142261.html

Nel VI programma una delle sette priorità (v. <http://europa.eu.int/comm/research/rtdinfo/en/special-fp6/index.html>) della politica scientifica dell'Unione è lo sviluppo sostenibile (v. <http://europa.eu.int/comm/research/news-centre/en/env/02-11-env02.html>), cui è assegnato un budget (v. <http://www.cordis.lu/fp6/budget.htm>) di circa 2400 milioni di euro sui circa 18000 totali. Gli elementi cruciali sono i cambiamenti globali e gli ecosistemi (769 mil.), la mobilità sostenibile (670 mil.) e i sistemi energetici sostenibili (890 mil.) L'energia, peraltro, è elemento cruciale anche rispetto alla "*key strategic dimension of 'energy independence'*" (European Commission 2002, p.26).

E' ad esempio interessante leggere direttamente alcuni passi di EIE⁶ proprio per l'efficacia con cui è riassunta la posizione dell'Unione Europea in campo energetico (enfasi aggiunta)

“Obiettivi: il presente programma favorisce lo sviluppo sostenibile nel contesto dell'energia, apportando un contributo equilibrato al conseguimento dei seguenti obiettivi generali

- 1) sicurezza dell'approvvigionamento energetico,
- 2) competitività
- 3) tutela dell'ambiente

Mira, inoltre, alla **coesione economica e sociale** e intende rafforzare la **trasparenza**, la **coerenza** e la **complementarità** di tutte le azioni e altre misure pertinenti adottate nel settore dell'energia, favorendo in tal modo” integrazione con altre politiche

Obiettivi specifici

- a) fornire gli elementi necessari
 - per la promozione **dell'efficienza energetica**,
 - per il maggior ricorso alle **fonti energetiche rinnovabili e la diversificazione energetica**, mediante ad esempio nuove fonti di energia in fase di sviluppo e fonti di energia rinnovabili, **anche nei trasporti**,
 - per il miglioramento della sostenibilità e per **lo sviluppo del potenziale delle regioni**, in particolare delle regioni ultraperiferiche e delle isole, ...
- b) **sviluppare mezzi e strumenti [...] per controllare, monitorare e valutare l'impatto delle misure adottate** a livello della Comunità e dei suoi Stati ...
- c) **promuovere modelli efficaci e intelligenti di produzione e consumo di energia** su basi solide e sostenibili, sensibilizzando **l'opinione pubblica**
- d) **sostenere azioni destinate a stimolare gli investimenti nelle tecnologie emergenti** e incoraggiando la diffusione delle **migliori pratiche”**

Si può inoltre notare l'ampio spettro delle problematiche sollevate, e l'ambizione degli obiettivi, alcuni dei quali anche in contrasto tra loro. Ciò riflette il clima di eccessiva fiducia che spesso prevale quando si affrontano i temi dello sviluppo di nuove fonti (idrogeno e rinnovabili) e delle politiche della domanda (eco-efficienza e risparmio energetico). Nella realtà il quadro è più problematico di quanto non appaia: da un lato non è detto che alcuni aspetti tecnologici siano del tutto superabili, dall'altro non sempre si può applicare ad un livello gerarchico superiore ciò che sembra valido su piccola scala.

4. Il mito dell'economia all'idrogeno

In una società in cui l'irrazionalismo è sempre più emergente -forse per via della velocità cui viviamo che non ci lascia troppi spazi di riflessione- ci

⁶ V. <http://europa.eu.int/scadplus/leg/it/lvb/l27046.htm>

illudiamo che grandi novità, prodotte dalla nostra bravura, possano d'improvviso risolvere i lati negativi ed i problemi connessi al benessere da noi, paesi economicamente avanzati, raggiunto.

Sono purtroppo illusioni che svaniscono in fretta, e che tuttavia vengono subito rimpiazzate da altre. E' quanto accaduto con la tanto enfatizzata "rivoluzione" delle nuove biotecnologie. La conoscenza dei principi di base del funzionamento della natura ne lasciava facilmente prevedere i limiti, sia in termini di applicazioni possibili che di utilità per la risoluzione dei problemi dell'umanità.

Non si vuol dire con questo dire che le nuove biotecnologie non abbiano delle importanti conseguenze -valutabili positivamente o negativamente- ma piuttosto che ne è stata senza dubbio esagerata la portata "rivoluzionaria". Siamo passati allora, di nuovo come per le biotecnologie anche grazie al contributo di Jeremy Rifkin, all'illusione di una prossima ventura "Economia all'idrogeno" (Rifkin, 2002), un'economia che grazie all'idrogeno, "combustibile pulito", diviene finalmente rispettosa della natura e che nell'idrogeno potrebbe addirittura trovare la soluzione al problema dell'approvvigionamento energetico⁷. Dopo i primi entusiasmi, peraltro riscontrabili anche nella recente passato⁸, subito amplificati dai media -che ormai non sopravvivono senza eventi sensazionali- iniziano ad emergere le incongruenze di una simile visione che tuttavia non devono portare a preconcetti di senso opposto.

Le incongruenze legate ad alcune visioni troppo ottimistiche dell'idrogeno sono evidenti non appena si acquisiscano alcune informazioni di base circa l'idrogeno stesso.

⁷ L'idea di utilizzare l'idrogeno come combustibile è molto vecchia e può essere riconducibile temporalmente a Henry Cavendish nel 1766. La prima forma di cella a combustibile è riconducibile agli esperimenti di W.R. Grove nel 1839. L'idea di utilizzare l'idrogeno come combustibile è riscontrabile anche in Jules Verne. Nell'Isola Misteriosa del 1874 (Parte 2 Capitolo 11) si dice che "Sì cari amici, credo che un giorno si utilizzerà l'acqua come carburante e che l'idrogeno e l'ossigeno che la costituiscono, usati singolarmente o combinati, forniranno una fonte inesauribile di calore e luce.....Finché la terra sarà popolata, essa sarà in grado di fornire ciò di cui hanno bisogno i suoi abitanti e non mancherà luce e calore" (www.literature-web.net/verne/mysteriousisland/33)

⁸ A livello scientifico un forte impulso, ed entusiasmo, allo studio dell'idrogeno e delle problematiche connesse si ebbe in seguito della prima crisi petrolifera. Nel 1974 a Miami, fu organizzata la prima conferenza internazionale sull'idrogeno (THEME: The Hydrogen Economy Miami Energy Conference) da cui ebbe origine International Association for Hydrogen Energy (IAHE).

- (1) Come è noto l'idrogeno è un elemento molto abbondante sulla superficie terrestre. Legato all'ossigeno è presente sotto forma di acqua, è legato al carbonio negli idrocarburi, all'ossigeno e al carbonio nelle biomasse.
- (2) Dato che non si trova libero in natura, l'idrogeno va "prodotto", isolandolo dagli elementi con cui si trova legato. Per questo motivo l'idrogeno è considerato non una "fonte" di energia, bensì un "vettore energetico", una sorta di contenitore nel quale immagazzinare energia.
- (3) Una volta rotti i legami, si ottiene un gas infiammabile che può fornire energia o per combustione diretta o -nelle cosiddette celle a combustibile- tramite trasformazioni chimiche.
- (4) L'aspetto essenziale è che il processo di produzione necessita di energia anche per lo stoccaggio e per la distribuzione. L'idrogeno è infatti molto poco denso e necessita pertanto di essere compresso o addirittura liquefatto, stato quest'ultimo il cui mantenimento è energeticamente dispendioso. Solo per avere un'idea, si consideri che l'idrogeno ha una temperatura critica di circa 33 K (quindi -240°C) a fronte di una temperatura ambiente dell'ordine di 290-300 K.
- (5) Da un punto di vista tecnologico esistono poi numerosi problemi legati alla sicurezza del trasporto e dell'uso finale.

A questo punto anche coloro che non sono esperti rimangono perplessi di fronte agli entusiasmi incondizionati per l'economia all'idrogeno. Il dubbio riguarda la discrasia tra la natura di vettore dell'idrogeno ed i problemi che più ci preoccupano, ossia l'approvvigionamento/esauribilità delle fonti energetiche e l'impatto ambientale dell'uso delle stesse. Perché non impiegare direttamente le nostre scarse fonti energetiche, anche quelle rinnovabili, anziché "sprecarne" una parte per trasformarle in idrogeno? Peraltro tale via necessita anche di costi aggiuntivi in termini di materia per le strutture per la produzione e la distribuzione dell'idrogeno.

Ristabilito pertanto il principio generale che tutto ha un costo, potrebbe comunque valere la pena produrre l'idrogeno⁹ quando vi siano degli adeguati vantaggi. Questi potrebbero emergere per tre aspetti.

- (1) Innanzitutto per lo **stoccaggio dell'energia**. E' questo il caso che abbiamo quando la fonte energetica è disponibile in eccesso rispetto alle nostre capacità di utilizzo¹⁰. Un'altra possibilità è di sfruttare l'idrogeno per ottenere il livellamento dei carichi delle centrali convenzionali laddove si abbia un surplus di energia elettrica prodotta, caso per niente improbabile nell'ottica della crescente liberalizzazione del mercato elettrico.
- (2) L'idrogeno potrebbe poi dare un contributo all'ambiente qualora permettesse un **uso più pulito delle fonti fossili**. L'uso finale dell'idrogeno infatti, com'è noto, è caratterizzato da emissioni sostanzialmente "pulite". Se impiegato direttamente come combustibile darebbe luogo solo a vapor acqueo ed ossidi di azoto.
- (3) Vi è infine la speranza di riuscire, prima o poi, di **convertire direttamente l'energia solare in idrogeno**. Si tratta tuttavia di processi che necessitano ancora di lunghi sviluppi di ricerca (almeno 30-40 anni, se si accettano le previsioni strategiche USA contenute nel documento (US Department Of Energy, 2002). E' chiaro che però la produzione di idrogeno su vasta scala non potrà essere sostenuta dalle sole fonti rinnovabili, che, se da una parte non pongono il problema della emissioni di inquinanti tipo la CO₂, dall'altra sono caratterizzate da bassa densità energetica (l'intensità della fonte solare non può notoriamente superare i 1000 W/m²).

⁹ Come è noto, la fonte energetica oggi maggiormente impiegata per la produzione di idrogeno è il gas naturale, con processo di *reforming*, (utilizzato anche per il petrolio), in cui si ottiene l'idrogeno in parte dal metano e in parte dal vapore (*steam methane reforming*, SMR). Il carbone viene impiegato con processi (detti di gassificazione) che ottengono l'idrogeno quasi interamente dall'acqua. L'elettrolisi è un'altra tecnologia matura, benché dispendiosa. Essa separa l'idrogeno e l'ossigeno dell'acqua mediante energia elettrica. I modi di produzione di quest'ultima, ovviamente, determinano l'impatto ambientale dell'idrogeno da elettrolisi.

¹⁰ Si pensi ad esempio alle centrali idroelettriche che, come noto, utilizzano gli eccessi di energia elettrica prodotta (per lo più notturni) per ripompare l'acqua in alto e procrastinarne l'utilizzo. Tali eccessi possono essere utilmente impiegati -soprattutto in quei paesi, ad esempio quelli scandinavi, in cui il settore idroelettrico ha dimensioni rilevanti- per la produzione del "veicolo" idrogeno. In Islanda, ad esempio, la ricchissima presenza di energia geotermica ed idrica si potrà veramente ottenere grandi quantità di idrogeno in maniera pulita. Ma questi casi sono purtroppo rarissime realtà.

5. L'utilizzazione dell'idrogeno a fini energetici

L'esame della letteratura tecnica specializzata rivela che i processi base per la produzione dell'idrogeno sui quali attualmente converge il maggior interesse risultano essere lo steam reforming del metano, la termoscissione del metano, la gassificazione del carbone e l'elettrolisi dell'acqua. Processi di minor rilievo a livello sperimentale ma di particolare interesse risultano oggi la dissociazione del metanolo e dell'ammoniaca e la fotoelettrolisi (Momirlan, Veziroglu 2002).

Processo produttivo	Stato
Steam reforming of natural gas	Mature
Catalytic decomposition of natural gas	Mature
Partial oxidation of heavy oil	Mature
Coal gasification	R and D – Mature
Water electrolysis	Mature
Advanced water electrolysis process	R and D
Steam-iron coal gasification	R and D
Thermochemical water decomposition	R and D
Photochemical processes	Early R and D
Photoelectrochemical processes	Early R and D
Photobiological processes	Early R and D

Tabella 1: Tecnologie di conversione dell'idrogeno e stato corrente (elaborazione da Rosen 1996 e Momirlan, Verizoglu 2002)

L'unico processo che permette di svincolarsi dalla futura disponibilità di combustibili fossili dai problemi comunque connessi con il sequestro della CO₂ è l'elettrolisi dell'acqua, che potrebbe essere fatta usando energia elettrica prodotta da impianti termonucleari o da fonti rinnovabili come il solare (fotovoltaico/termico).

Sospendiamo per il momento l'attenzione sull'uso dell'energia solare e dell'energia nucleare, che approfondiremo in seguito, concentrandoci sulla produzione dell'idrogeno da fonti fossili. Attualmente infatti si ritiene che, almeno per i prossimi tre o quattro decenni, si debba puntare sui combustibili fossili quale molla di partenza per lo sviluppo commerciale dell'idrogeno.

Ogni fonte energetica primaria può essere convertita in idrogeno attraverso un processo termochimico preciso. Lo *steam reforming* del gas naturale è oggi il processo industriale più sviluppato e commercializzato per la produzione di idrogeno. Lo *steam reforming* consiste in una gassificazione

di un idrocarburo utilizzando come agente ossidante vapore acqueo ad alte temperature. Con lo *steam reforming* del metano si può produrre idrogeno con elevata purezza; l'efficienza del processo in termini energetici varia tra il 65 e l'85%.

Un altro metodo per la produzione di idrogeno è la termoscissione del metano (TDM, *Thermal decomposition of methane*); esso si basa sul concetto che quando il metano è scaldato ad alte temperature si decompone (cracking) in carbonio e idrogeno. Sono necessarie tuttavia temperature superiori a 700°C e questo compromette l'efficienza del processo che risulta attualmente di poco superiore al 50%.

Vi è poi la gassificazione del carbone - tecnica considerata con grande interesse data la larga disponibilità di questo combustibile. L'efficienza in termini energetici di tale processo è tuttavia inferiore al 60%.

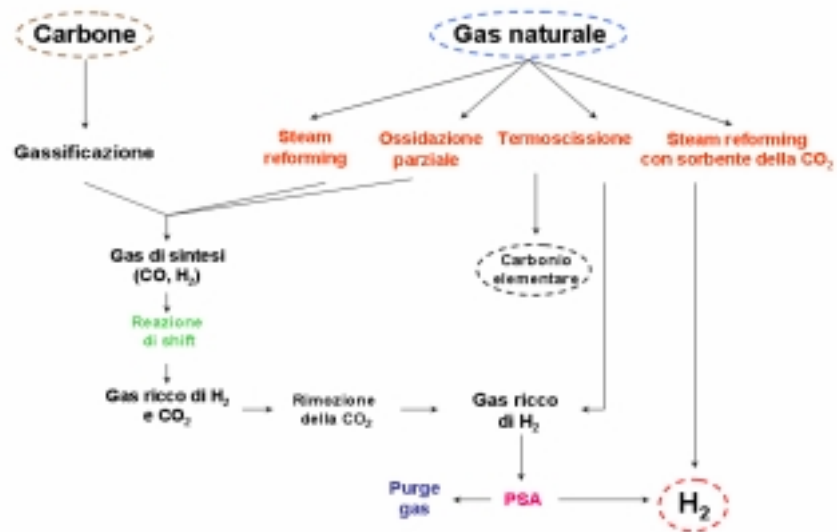


Figura 1: Tecniche per la produzione di H₂ da combustibili fossili

Una volta prodotto l'idrogeno può essere utilizzato come combustibile in sistemi ed impianti di diversa tipologia e taglia. Più precisamente in motori a combustione interna, nelle celle a combustibile per applicazioni che non richiedano più di qualche centinaio di kW (generazione distribuita), oppure in

centrali termoelettriche, principalmente cicli combinati o turbogas ma anche in impianti a vapore, per la produzione di media e grande taglia (fino a qualche centinaio di MW).

Le celle a combustibile, che teoricamente convertono l'energia chimica del combustibile direttamente in energia elettrica ($E_{ch} \rightarrow E_{el}$), senza passare per l'energia termica e l'energia meccanica ($E_{ch} \rightarrow E_{th} \rightarrow E_{mec} \rightarrow E_{el}$), permettono allo stato attuale una efficienza di trasformazione dell'energia chimica dell'idrogeno in elettricità che oscilla tra il 40 e il 60%, che si prevede si possa estendere al 70% solo se saranno superati i problemi tecnologici attuali. (v. Vellone 2003)

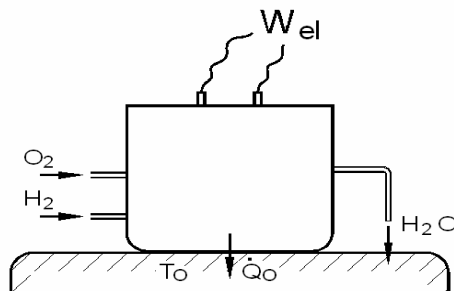


Figura 2. Schema fenomenologico di funzionamento di una cella a combustibile e confronto con la produzione di energia elettrica da combustibile fossile

La tecnologia di conversione che utilizza l'idrogeno quale combustibile, nelle sue versioni più avanzate, fino ad ora concepita solo a livello teorico, vede invece un rendimento massimo di conversione dell'idrogeno in energia elettrica del 70%, che si realizzerà nel caso in cui le temperature massime del ciclo termodinamico, corrispondenti alla temperatura d'ingresso in turbina (TIT) siano portate al livello di 1700°C (v. Hijikata 2002). Questo è tuttavia subordinato alla soluzione di problemi tecnologici ancora irrisolti. Se non si apriranno nuovi scenari nell'ambito dell'energia nucleare (che in effetti potrebbe risolvere almeno in parte i problemi, creandone inevitabilmente degli altri), l'idrogeno dovrà essere prodotto da combustibili fossili, in primo luogo gas naturale e carbone. (Chiesa et al. 2003). Alla luce della precedente considerazione, la possibilità di un uso più pulito delle fonti fossili necessita di

qualche approfondimento. Le fonti fossili sono alla base della tecnologia oggi prevalente per la produzione di idrogeno e lo dovranno probabilmente rimanere anche in un'ottica di medio periodo. E' da tenere tuttavia presente che l'uso dell'idrogeno così prodotto -dato che implica sia perdite energetiche che co-produzione di scarti che contengono carbonio e tutti quegli altri elementi inquinanti (quali lo zolfo) contenuti nelle fonti fossili- potrebbe risolvere il problema dell'inquinamento locale, a spese tuttavia di un maggiore inquinamento sia nei luoghi di produzione sia a livello globale.

Da questo punto di vista è bene chiarire che la produzione di **idrogeno da gas naturale** risulta **poco attraente** se confrontata con l'utilizzazione diretta del gas naturale, senza complessi processi di trasformazione, direttamente negli impianti a ciclo combinato (che si evolveranno nei prossimi anni e che già ora presentano efficienze di conversione al limite del 60%). Con le turbine a gas attualmente in commercio il rendimento di un ciclo che utilizza idrogeno supera di poco il 50%. Considerando anche il rendimento di conversione del gas naturale o del carbone in idrogeno, il rendimento complessivo del processo può superare di poco il 40% e anche in prospettiva potrebbe solo avvicinarsi al livello del 60% (Tabella 2).

Nonostante le minori efficienze termodinamiche complessive del processo (comunque difficilmente superiori al 45%), l'idrogeno potrebbe aprire la strada ad un uso più generalizzato del **carbone**. Gli impianti alimentati ad idrogeno prodotto a partire dal carbone sembrano molto interessanti, perché risultano, rispetto agli impianti avanzati a carbone **in fase di studio (tipo IGCC ovvero Integrated Gasifier Combined Cycle)**, di **complessità paragonabile**, ma con prospettive di minori impatti ambientali ed efficienze anche superiori.

Cicli alimentati ad H ₂				Cicli convenzionali		
Rendimento di produzione di H ₂ con sequestro di CO ₂	Rendimento elettrico di cicli ad H ₂	Rendimento totale conversione	Rendimento delle attuali tecnologie (e sviluppo previsto ¹¹)			
Gas naturale (steam reforming) 77-80%	1) Turbogas (cogenerativo) a ciclo aperto (TIT=1300°C)	42%	34%	Gas naturale in impianti a ciclo combinato (NGCC)	58 (65) %	
	2) "Turbogas" + GVR ¹² a 180 bar a ciclo chiuso (TIT ¹³ =1460°C)	61%				49%
	3) "Turbogas" + GVR a 194 bar a ciclo chiuso (TIT=1700°C)	70%				56%
Carbone (gassificazione) 57-60%	1) Turbogas (cogenerativo) a ciclo aperto (TIT=1300°C)	42%	25%	Carbone in impianti combinati a gassificazione (IGCC)	42 (46) %	
	2) "Turbogas" + GVR a 180 bar a ciclo chiuso (TIT=1460°C)	61%				37%
	3) "Turbogas" + GVR a 194 bar a ciclo chiuso (TIT=1700°C)	70%				42%

Tabella 2. Rendimenti complessivi per la produzione di energia elettrica da fonti fossili: confronto tra cicli alimentati ad idrogeno e cicli convenzionali. (nostra elaborazione). 1) Tecnologie praticabili. 2) Tecnologie possibili ma con ulteriore ricerca e adattamenti tecnologici. 3) Tecnologie proposte in letteratura (Hijikata 2002)

L'idea di separare la produzione dell'idrogeno dalla sua utilizzazione potrebbe infatti risultare molto vantaggiosa in quanto si potrebbero localizzare gli sforzi per l'abbattimento delle emissioni inquinanti. L'obiettivo dovrà essere pertanto quello di riuscire a sviluppare tecnologie capaci di imprigionare e confinare ("sequestrare") gli scarti inquinanti.

In questa ottica sarà quindi necessario che l'attenzione della ricerca e della tecnologia sia rivolta verso la messa a punto di tecniche idonee per la separazione dell'anidride carbonica prodotta nella trasformazione dei combustibili fossili in idrogeno e al sequestro (o confinamento) della stessa. Molte sono le soluzioni prospettate (in particolare confinamento geologico in acquiferi salini e giacimenti esauriti di metano o petrolio), ma gravi rimangono i problemi aperti, tra i cui le fortissime incertezze circa la durata dell'eventuale sequestro.

¹¹ V. Franco e Casarosa 2002.

¹² GVR acronimo per Generatore di Vapore a Recupero.

¹³ TIT acronimo per Turbine Inlet Temperature: rappresenta la massima temperatura operativa dell'impianto e identifica quindi il limite tecnologico.

Riassumendo, l'idrogeno non è una fonte di energia, bensì un vettore. L'idrogeno può cioè costituire un metodo di stoccaggio e conservazione dell'energia prodotta a partire da una fonte energetica, sia essa rinnovabile (solare, eolico, biomasse) sia fossile (carbone, petrolio, gas). In ogni caso la produzione di idrogeno è dispendiosa in termini energetici, materiali ed economici.

In quanto vettore, l'idrogeno non sembra quindi in grado di risolvere in maniera soddisfacente il problema energetico. Potrebbe tuttavia permettere di ridurre l'impatto ambientale delle fonti fossili qualora si riuscissero a confinare in modo efficace e duraturo le emissioni conseguenti la trasformazione di tali fonti in idrogeno.

Altra prospettiva, da mantenere sempre aperta è quella dell'utilizzazione dell'idrogeno come vettore per il livellamento dei carichi.

Più lontane, sono quelle soluzioni - positive sia per l'ambiente che per il problema della scarsità delle fonti - di produzione di idrogeno direttamente dall'energia solare (ad esempio fotolisi). Per quanto riguarda l'impiego di energie "pulite", sulle quali ci soffermeremo in seguito, occorre tener presente che allo stato attuale sembrerebbe spesso più opportuno immettere direttamente nella rete l'energia elettrica prodotta piuttosto che utilizzarla, con le relative perdite energetiche, per l'elettrolisi dell'idrogeno. E' tuttavia auspicabile che, a differenza che nel passato, venga in questa fase storica approfondita la ricerca su alcune delle tecnologie legate all'idrogeno, pur se dopo aver fatto una corretta valutazione preliminare di quelli che possono essere pregi e difetti delle varie soluzioni.

6. Spunti di riflessione critica: un approccio multi-criteriale all'energia nucleare e alle fonti 'pulite'

Ad oggi la produzione di idrogeno implica elevati impatti, vuoi per le emissioni di anidride carbonica e di altri inquinanti, vuoi per l'energia, materia e spazio fisico impiegata nelle strutture di produzione. L'idea di un'economia all'idrogeno, eppure, ha conquistato molti. Questo è ben spiegato, a nostro avviso, dalla oggettiva difficoltà di avere una visione complessiva e non riduzionista. Ci si concentra, ad esempio, su una visione

end-of-the-pipe, si tende a vedere cioè solo a che cosa esce “alla fine del tubo”, dimenticando sia quello che c’è dietro che quello che c’è intorno. L’enfasi sulle emissioni dirette è testimoniato dai numerosi programmi o dichiarazioni che mirano alle “emissioni zero”. (ad es. il programma ZEV della California¹⁴) L’esempio per antonomasia di emissioni (dirette!) zero è l’auto elettrica!

Anche per l’idrogeno è il lato emissioni che affascina maggiormente: solo vapore acqueo. Ci si dimentica però del resto: non solo degli ossidi di azoto prodotti in ogni processo di combustione, (e quindi anche quando viene bruciato l’idrogeno) e non solo di tutte le emissioni del processo di produzione dell’idrogeno, ma anche di tutte le emissioni necessarie a produrre, a mantenere nel tempo e a smaltire a fine vita le strutture di tutto il sistema di trasformazione.

Il conto non si esaurisce tuttavia alle emissioni complessive. Non si può prescindere dal considerare la materia impiegata, la cui estrazione genera forti impatti sugli uomini e sugli ecosistemi - impatti che sono spesso incommensurabili tra loro e che per questo non possono essere contabilizzati con un’unica unità di conto!

Non si vuole dire che non vengono effettuate delle serie analisi su tutto il ciclo di vita, ma piuttosto evidenziare come nella *vulgata* - in quello cioè che si sente e si legge sui *media* e sulle opere divulgative - si ignora spesso la natura multi-dimensionale dei problemi. Eppure non ignoriamo la multi-dimensionalità nel piccolo della nostra vita di ogni giorno. Nell’esperienza quotidiana mostriamo infatti consapevolezza del fatto che le nostre scelte non sono mai ottimali rispetto a tutti i profili¹⁵, bensì delle soluzioni di compromesso, quale ad esempio quello tra qualità e prezzo dei nostri acquisti o quello tra efficienza energetica, costo della produzione ed impatti ambientali di un sistema energetico.

Questa premessa serve a proporre, molto modestamente, alcuni spunti critici di riflessione sia sul nucleare che sulle cosiddette fonti pulite la cui

¹⁴California Air Resources Board: Zero emission vehicles (ZEVs) all’indirizzo:
<http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/zevprog.htm> oppure Union of Concerned Scientists Clean Vehicles su http://www.ucsusa.org/clean_vehicles/advanced_vehicles/page.cfm?pageID=206

¹⁵ Per approfondire gli aspetti legati alla multidimensionalità e all’esigenza di una valutazione integrata si veda ad es. Giampietro 2003 e Munda 2004.

riutilizzazione massiccia (nucleare) o il definitivo lancio (solare) sono visti collegati con l'affermarsi dell'utilizzazione dell'idrogeno. Nell'immaginario collettivo il nucleare è, almeno per molti, un tabù per due motivi, per i possibili rischi in termini di incidenti (specie in seguito a *Three Miles Island* e *Cernobyl*), per la radioattività delle scorie. Si tratta di elementi che sembrano appartenere alla dimensione tecnologica: il problema centrale sarebbe pertanto quello di raggiungere una sicurezza tecnologica e convincerne gli scettici. Considerato che il petrolio e il gas naturale cominciano a scarseggiare, con conseguenti aumenti di prezzo, sembra prevedibile che l'energia nucleare - che peraltro non produce gas serra - inizi una fase di consistente espansione.

Questa visione, tuttavia, è di nuovo palesemente parziale. Innanzitutto non è ben chiaro quali siano gli effettivi costi economici del nucleare (v. ad es. Goldsmith 2004, Argue 1997), in considerazione degli elevatissimi costi di costruzione, di smaltimento finale delle centrali, dell'incertezza sulla loro vita, del costo dello smaltimento delle scorte e degli eventuali incidenti.

Inoltre, sul piano ambientale ci si dimentica spesso dell'acqua utilizzata ai fini del raffreddamento e le numerose emissioni nei "corpi idrici". Inoltre, dal punto di vista termodinamico e tecnico, la tecnologia nucleare è complessivamente ferma ad efficienze inferiori al 40% (grossomodo siamo oggi al livello degli anni '70). Quindi, siamo ben lontani dai livelli di sviluppo tecnologico che si sono raggiunti con gli impianti combinati alimentati a gas naturale, che oggi arrivano vicini al 60% di efficienza.. E' chiaro quindi che oltre il 60% dell'energia di scarto della centrale nucleare viene "trasferita" all'ambiente ed in particolare all'acqua. Quindi un reattore nucleare a fissione richiede grandi quantitativi di acqua a disposizione e la restituisce in forma "alterata" -aspetto per niente marginale! Si capisce quindi che né le emissioni né l'aspetto termodinamico pongono l'energia nucleare al di sopra di ogni sospetto. L'unico aspetto veramente a suo vantaggio è l'elevato potere calorifico del combustibile che viene utilizzato e la sua relativa disponibilità.

In ogni caso non può essere tralasciata la dimensione sociale. Anche se venissero realizzati impianti tecnologicamente affidabilissimi, rimarrà tuttavia il problema della loro gestione, cioè del mancato rispetto degli standard di sicurezza fissati dalla tecnologia vuoi per il cosiddetto errore umano, vuoi per

disorganizzazione, vuoi, peggio, per esigenze di risparmio economico. Allo stesso modo, soprattutto sociale è il problema delle scorie, trafugate e circolanti in tutto il mondo per gli arsenali bellici.

Spostando il discorso alle fonti “pulite” si può ricordare come già negli anni '70, l'economista rumeno Nicholas Georgescu Roegen (1906-1994), che ne era entusiasta sostenitore, aveva invitato alla prudenza evidenziando il rischio che queste siano energie parassite delle fonti fossili - ossia di non riuscire a ripagare gli investimenti di energia e di materia effettuati per le strutture di produzione di energia da fonte rinnovabile (Georgescu Roegen, 1979, §8). Il motivo fondamentale di ciò è insito nella natura stessa delle energie “pulite”, una densità energetica bassissima quando comparata a quella delle fonti fossili. E' questo stesso motivo - e non soltanto congiure e manovre delle “sette sorelle” e degli interessi forti dell'economia - che è così difficile competere economicamente con le fonti fossili. L'uso del suolo, necessario alle strutture di produzione dell'energia, ad esempio, è assolutamente indicativo per rendersi conto dell'enorme differenza in termini di densità.¹⁶

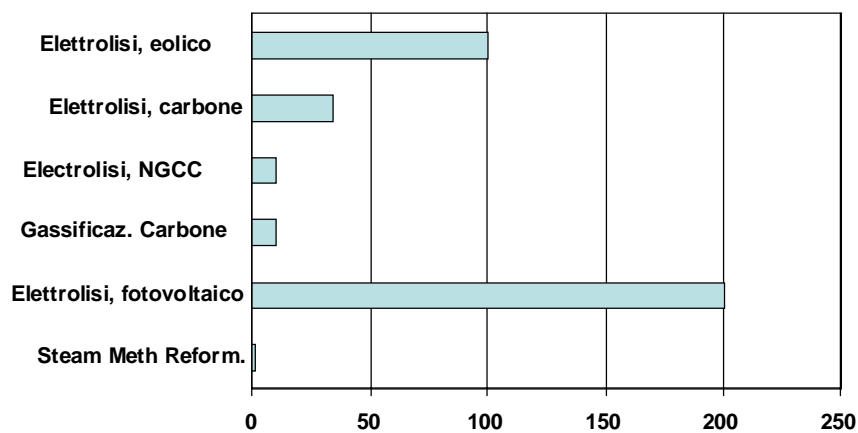


Figura 3. Impatto relativo (*Steam Methane Reforming*=1 utilizzato come riferimento) in termini di suolo per la produzione di idrogeno (tratto da Leveen 2004)

Peraltro l'uso del suolo è essenziale non solo in termini assoluti, ma anche per valutare le dimensioni relative del contributo all'offerta energetica che le fonti pulite potrebbero dare. Risulta allora evidente che per soddisfare la smisurata domanda del Nord del mondo, sarebbero necessarie porzioni

¹⁶ Non occorre dire che dati analoghi, quanto a differenze negli ordini di grandezza, si ottengono per qualsiasi prodotto energetico finale e non solo per la produzione di idrogeno.

rilevanti dei nostri territori!¹⁷. D'altronde, anche a livello ufficiale (il citato libro verde dell'Unione Europea) si dichiara che il contributo delle fonti pulite al nostro fabbisogno non può essere che modesto.

7. L'eco-efficienza: strumento per l'insostenibilità ambientale?

Seguendo il percorso fin qui tracciato si giunge alle medesime conclusioni del libro verde dell'Unione Europea: scarsi spazi di manovra sul lato dell'offerta, necessità di integrazione tra le varie fonti e soprattutto politiche della domanda. L'aspetto singolare è che queste – sia nel libro verde che nel dibattito a tutti i livelli – vengano declinate in un'accezione assai ristretta: identificate, per lo più, con politiche per l'eco-efficienza, mirano ad incidere sugli impieghi energetici, sui modi in cui usiamo l'energia, ma non direttamente sulla nostra domanda di energia. Con questo termine si intende il miglioramento delle nostre “*performance* ecologiche” in termini relativi. La nostra attenzione, cioè, è rivolta ad indicatori e indici non assoluti ma rapportati ad altre variabili: la quantità chilometri che un'auto percorre con un litro di benzina, la quantità di materia impiegata per realizzare un bene rispetto al servizio prodotto dal bene stesso (MIPS), la quantità di luce per unità di energia (si pensi alle lampadine a risparmio energetico), le emissioni di CO₂ per unità di PIL, la quantità di energia impiegata per unità di PIL, e così via.

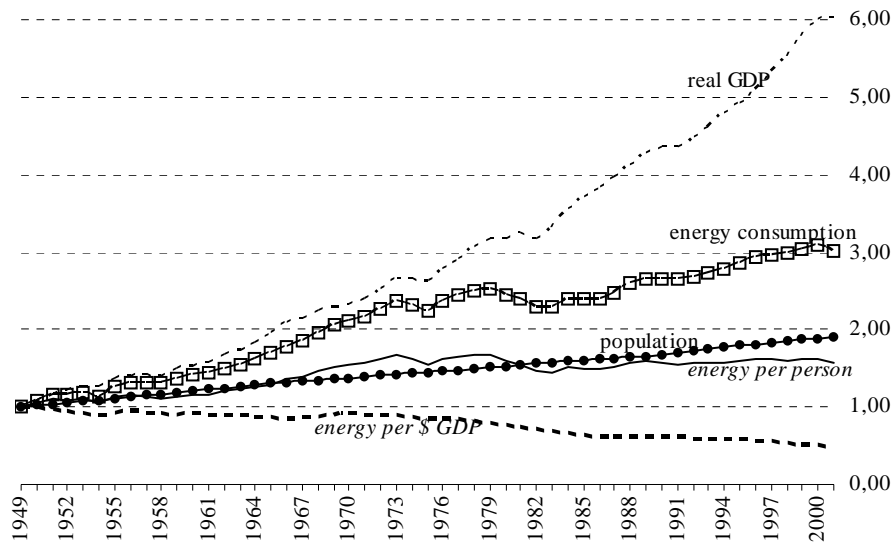
La forte enfasi sull'eco-efficienza cui oggi assistiamo, tuttavia, mette in secondo piano la reale sfida cui ci troviamo di fronte, la riduzione in termini

¹⁷Un esempio eclatante in proposito sono i biocombustibili da biomassa, visti spesso con speranza come fonte di energia pulita. In primo luogo occorre rilevare che in alcuni casi non costituiscono nemmeno una fonte di energia dato che la resa energetica netta è spesso negativa (ad es. etanolo). Inoltre anche quando ci si trovi di fronte a rese energetiche positive, la valutazione complessiva diviene poco favorevole se se ne ipotizza un loro uso su larga scala. (Giampietro, Ulgiati, Pimentel 1999). In grande sintesi, le conclusioni dello studio dimostrano che una produzione su larga scala non è possibile 1) biofisicamente (in termini di terra e acqua necessaria per produrre le biomasse), 2) socialmente (in termini di forza lavoro disposta a queste produzioni) 3) ambientalmente (in termini di degrado ambientale). Peraltro risulterebbe singolare dedicare terra e risorse idriche alla produzione di biocombustibili piuttosto che al cibo, incrementare il lavoro in settori che storicamente ne hanno registrato quasi la scomparsa, ed infine creare seri casi di inquinamento. È importante sottolineare come ciò non significhi abbandonare gli sforzi tesi alla ricerca di un uso efficiente delle biomasse. Ciò di cui dobbiamo essere consapevoli è che dalle biomasse non arriverà possano un grosso contributo alle nostre fonti energetiche! (Per la produzione di energia da biomasse v. anche A. Franco, T. Parabita, 2004).

assoluti dei flussi di materia che attraversano la nostra società. L'eco-efficienza da sola infatti non necessariamente riduce tali flussi, da cui dipendono in buona sostanza i nostri impatti sull'ambiente naturale. Un esempio chiarirà subito una simile affermazione. Auto dai bassi consumi sono sicuramente efficaci nella tutela dell'ambiente a patto che non aumentino troppo i km complessivamente percorsi. La sola riduzione dei consumi di carburante, tuttavia, incoraggia in assoluto la mobilità, nonché rende più conveniente la modalità di trasporto automobile, cosicché risulta ingenuo pensare che non aumentino i km percorsi nel complesso. Non è allora così scontato che il consumo di carburante si riduca: l'esito finale è ambiguo e dipende dalla complessa catena di effetti e retroazioni che un miglioramento tecnologico di questo genere innesca.

Se poi si vuole ricercare una tendenza generale - nella storia dell'uomo ma anche in altri campi - si scopre addirittura che assai spesso vi è una correlazione positiva tra efficienza e dimensioni. Come esempio pratico si analizzi all'andamento nel tempo dei consumi energetici e della popolazione negli Stati Uniti. Se guardiamo all'intensità energetica del PIL (energia per \$ di GDP) siamo confortati dal trovarla dimezzata rispetto agli anni 50: la nostra eco-efficienza è raddoppiata. Eppure sono anche circa raddoppiati i consumi di energia in termini assoluti¹⁸. Si comprende immediatamente il motivo della riduzione dell'intensità energetica: si è ridotto perchè il numeratore, il PIL, è cresciuto più rapidamente del denominatore, i consumi energetici! Gli USA sono diventati progressivamente più eco-efficienti ma anche più energivori e, conseguentemente, anche più grandi quanto a scala materiale.

¹⁸ Peraltro anche l'energia pro-capite è aumentata, sia pur in minore proporzione e con un andamento più ondivago.



Fi

gura 4. Pil, consumi energetici e popolazione negli USA dal 1949 ad oggi: variabili estensive ed intensive (Nostra elaborazione su dati EIA)

Un'economista inglese della seconda metà dell'800, W.S. Jevons¹⁹ - pioniere della teoria economica odierna - delineò in modo chiaro l'effetto paradossale che incrementi di efficienza possono produrre. In un libro del 1865 che lo rese famoso, *"The Coal Question"*, Jevons prevede una forte crisi dovuta al problema dell'esauribilità del carbone, sottostimando largamente i futuri sviluppi delle fonti alternative energia idroelettrica e petrolio. Quello tuttavia che qui rileva è la correlazione positiva tra efficienza e scala evidenziata nel capitolo 7 *'The economy of Fuel'*. Jevons infatti afferma che

It is wholly a confusion of ideas to suppose that the economic use of fuel is equivalent to a diminished consumption. The very contrary is the truth. As a rule, the new modes of economy will lead to an increase of consumption according to a principle recognized in many parallel instance.(140) [...] Now the same principle apply, with even greater force and distinctness, to the use of such a general agent as coal. It is the very economy of its use which leads to its extensive consumption. It has been so in the past, and it will be so in the future. Nor it is difficult to see how this paradox arises." (141) (enfasi originale)

La spiegazione del paradosso è in effetti semplice: i miglioramenti di efficienza riducono i costi, aumentano sia l'offerta che la domanda e si ripercuotono lungo l'intera filiera produttiva fino ad estendersi all'economia nel suo complesso. L'effetto paradossale analizzato da Jevons ha natura sistemica: non è tanto il singolo ad usare più carbone in seguito ad aumenti di efficienza quanto l'intera economia.

¹⁹ William Stanley Jevons (1835-1882).

Un esempio eclatante è offerto dalla storia del motore a vapore. Jevons, facendo riferimento agli studi dell'epoca, evidenzia (145 e segg.) come dal motore di Watt del 1768 nel giro di meno di un secolo l'efficienza dei motori sia aumentata di circa 10 volte. Eppure

every such improvement of the engine when effected, does but accelerate anew the consumption of coal. Every branch of manufacture receives a fresh impulse-hand labor is still further replaced by mechanical labor, and greatly extended works can be undertaken which were not commercially possible by the use of the more costly steam-power... (152-3)

In effetti risulta interessante notare che quanto afferma Jevons si è ancor più accentuato tra quando pubblica la prima edizione e i primi del novecento, come si rileva facilmente dalla figura successiva.

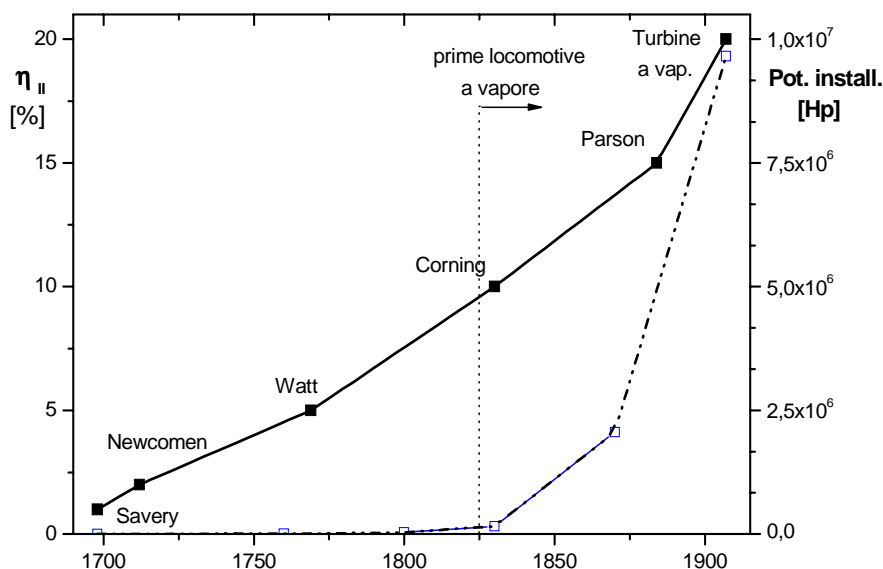


Figura 5. Incremento del rendimento di secondo principio (linea continua) delle macchine a vapore e della potenza installata (linea tratteggiata) in Inghilterra tra il 1700 e il 1910²⁰

L'effetto di Jevons²¹, oggi noto anche con il termine effetto *rebound*²², continua ad essere oggi di estrema rilevanza. Pensiamo ad esempio al fatto che gli aumenti di efficienza energetica nelle automobili registrati alla fine degli anni settanta non si sono tradotti in ridotti consumi di carburante, o ancora all'aumento dei consumi di carta per ufficio nonostante (o a causa!) della diffusione del PC - questi e molti altri casi suggeriscono che paradosso

²⁰ Il dato relativo alla potenza installata è tratto da Castaldi e Nuvolari 2003

²¹ Sull'effetto Jevons v. ad esempio, Giampietro e Mayumi (1998) e Foster (2000)

²² Per l'energia si parla di postulato di Khazzom-Broke (v. Herring 1999).

di Jevons può essere utile per riflettere sull'effettiva possibilità che le nuove tecnologie da sole possano consentire di ridurre il nostro impatto sull'ambiente naturale, il raggiungimento, cioè, di un'economia meno materiale.

E' forse interessante concludere ricordando (v. Giampietro 2003) come anche in natura vi sia una relazione positiva tra dimensioni ed efficienza²³, relazione evidenziata dai fisiologi almeno sin dalla fine del 1800. Più in particolare, chi si occupa di bioenergetica si trova a doversi confrontare con una relazione empirica, evidenziata da Kleiber nel 1932, per cui²⁴ il tasso di metabolismo basale dipende dalla massa dall'animale elevata alla $\frac{3}{4}$, ossia $\Delta E/\Delta t = kM^{3/4}$ (v. ad es. Blaxter 1989, Kleiber 1975, Miller 1986).

L'esempio classico diviene allora il confronto tra un topolino ed un elefante²⁵. Considerando un topolino di 20-40 gr e un elefante da 5000 kg, il tasso di metabolismo basale del primo richiede una potenza di 0,2-0,3 W mentre quello dell'elefante di circa 2000 W (il che equivale ad un fabbisogno di 4-6 kCal al giorno contro circa 41.000²⁶). Se andiamo tuttavia a vedere le cose rispetto all'unità di massa vediamo che "un grammo di topolino" consuma per il metabolismo basale dalle 20 alle 25 volte in più rispetto ad "un grammo di elefante", cioè 8-10 W/kg contro 0,4 W/kg.²⁷ Un elefante è, in definitiva, un ottimo esempio di "dematerializzazione" in termini relativi, non lo è affatto se si considera il suo impatto complessivo!

8. La via da percorrere: la riduzione dei flussi di energia e di materia

Il paradosso di Jevons mostra senza equivoci la limitatezza delle politiche per l'eco-efficienza. Con queste, di nuovo, ci affidiamo all'illusione tecnologica, spostando le nostre speranze deluse dalla produzione ai modi di

²³ Per un esempio si veda <http://www.bio.georgiasouthern.edu/bio-home/harvey/dcom.html?list=6&pg=6&ccode=bg>

²⁴ Le cause di questa relazione, che peraltro si più o meno vera su 18 ordini di grandezza quanto a valori delle masse, dai microbi alle balene, costituiscono tuttora oggetto di intenso studio, v. ad es. Burness 2002 e Weibel 2002).

²⁵ I valori presentati sono esemplificativi dato che vi è una discreta variabilità sia nei valori delle masse che nell'efficienza energetica. (Per i roditori si veda ad es. Degen et al. 1998, tav. 1, p 68-69)

²⁶ Per l'uomo i valori si aggirano intorno alle 1500 Kcal.

²⁷ Per l'uomo il valore del tasso metabolismo basale per unità di massa è di circa 1,2 W/kg.

impiego dell'energia. Eppure è evidente che oggi l'insostenibilità ambientale deriva dall'enorme scala materiale delle economie del nord del mondo. Al di là dei sempre opportuni interventi sulla qualità dei rifiuti, l'obiettivo primario deve essere quello di ridurre sostanzialmente i prelievi complessivi di materia dalla natura! A tal fine non si può prescindere dalla riduzione, in termini assoluti e non rispetto al PIL, della domanda di materia e di energia da parte dei consumatori. Un obiettivo del genere è forse paradossale dato che il nostro sistema economico si fonda proprio sugli 'sprechi' di materia -sulla massimizzazione del *throughput* (passaggio) materiale- eppure una 'dematerializzazione' assoluta²⁸ è l'unica via efficace per riportarci su binari meno insostenibili²⁹.

La figura 6 riassume i vantaggi di un approccio a monte.



Figura. 6 Le politiche che si concentrano sui rifiuti (end-of the pipe) devono scontrarsi inevitabilmente con una incertezza radicale. Considerata l'enorme scala delle nostre economie è comunque necessario, e più efficace, agire alla fonte e ridurre i nostri prelievi di materia vergine

Un programma di riduzione dei prelievi di materia è più accettabile di quanto non possa apparire se si considera che ridurre la nostra domanda di

²⁸ Sulla necessità di un approccio che riduca a monte i prelievi di materia v. ad es. Hinterberger et al (1999).

²⁹ A dire il vero si stanno compiendo alcuni passi importanti in questa direzione. In Europa, ad esempio, ormai da qualche anno, è in corso il processo di inserimento della contabilità dei flussi di materia all'interno delle statistiche ufficiali.

²⁹ Come ci ricordano Todd e Gigerenzer (2003), nella concezione di Herbert Simon l'ambiente esterno e le capacità degli attori sono intimamente legate, come "le lame di due forbici".

materia e di energia non necessariamente incide sul nostro benessere, né, tanto meno, conduce a rifiutare la tecnologia o la modernità.

Non è facile, soprattutto in un'era come la nostra fortemente incentrata sull'individuo e sulla sua sovranità (forse apparente) di consumatore, parlare di sprechi in termini oggettivi senza dar l'impressione di voler limitare la libertà individuale. Eppure sono ampiamente condivise, almeno in senso astratto, sia la sensazione di assistere a degli inutili sprechi, sia l'idea che il benessere non è proporzionale alla quantità di materia, come è testimoniato dal crescente interesse verso indicatori diversi dal PIL.

Una prova intuitiva del fatto che è possibile ridurre i consumi energetici e di materia senza compromettere il nostro tenore di vita la offre il confronto tra consumi energetici pro-capite di nazioni che hanno tenore di vita analoghi. Al di là di possibili differenze dovute a fattori climatici i dati di cui al grafico successivo (tep/pro-capite) - ci si può rendere conto che almeno in parte alcuni consumi sono dei veri e propri sprechi. L'oggettività di molti sprechi - tra USA e Europa,

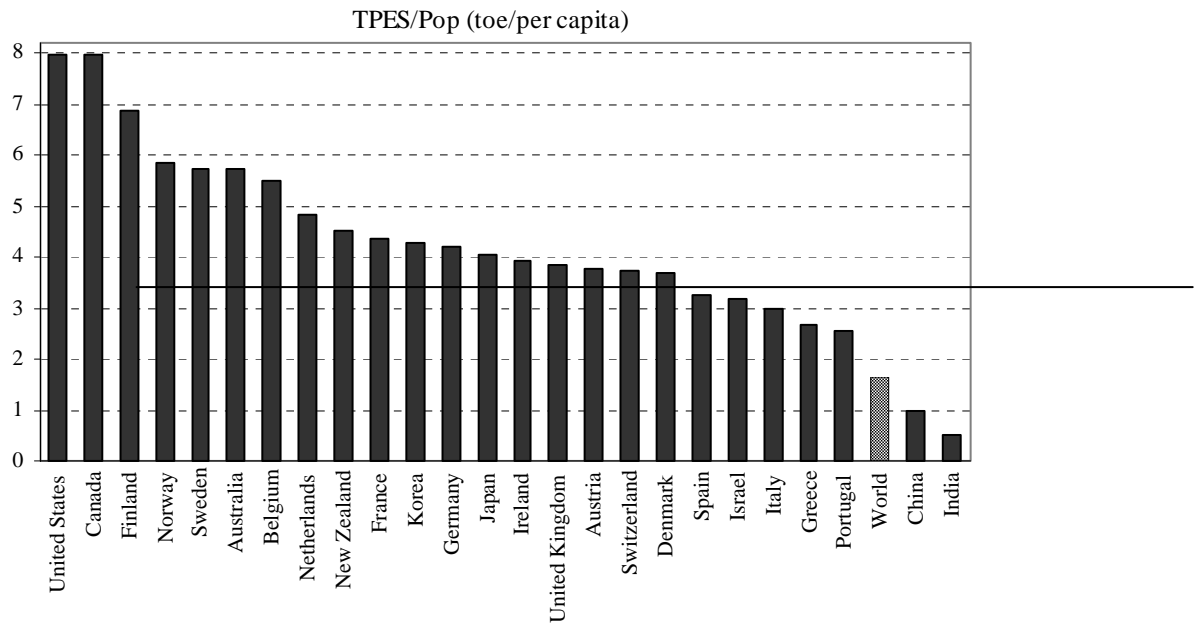


Figura 7. Consumi energetici pro-capite (dati in tonnellate equivalenti petrolio (nostra elaborazione su dati: IEA 2004, 48 e segg.)

Di esemplare lucidità è l'analisi di Georgescu Roegen - economista, già menzionato, che a partire dagli anni '60 ha insistito sugli materiali del

processo economico. La sua attenzione verso la materia e verso i processi entropici che la degradano motiva da un lato la sua prudenza verso la tecnologia, dall'altro la sua decisa contrarietà agli sprechi materiali- sprechi che non esita a definire come dei crimini bioeconomici.

Quanto alla cautela di Georgescu, un esempio lo abbiamo già proposto nel paragrafo 6 quando si è accennato al suo verso l'energia solare. Quanto alla sua posizione rispetto all'uso della materia, più efficace di qualsiasi commento è la semplicità dirompente della sua proposta, riassunta nel suo programma bioeconomico lanciato negli anni settanta che qui si riporta (nostra enfasi). (Georgescu Roegen, 1982, 73-75)

[...]

Un'economia basata essenzialmente sul flusso di energia solare eliminerà anche il monopolio della generazione presente sulle future. Questo non avverrà completamente, perché anche un'economia del genere dovrà attingere al patrimonio terrestre, soprattutto per quanto riguarda i materiali: si tratta di rendere minore possibile il consumo di tali risorse critiche. Le innovazioni tecnologiche avranno certamente un peso in tale direzione. **Ma è l'ora di smettere di insistere esclusivamente - come a quanto pare hanno fatto finora tutte le piattaforme - su un aumento dell'offerta. Anche la domanda può svolgere un compito, in ultima analisi perfino maggiore e più efficiente.**

Sarebbe sciocco proporre di rinunciare completamente alle comodità industriali dell'evoluzione esosomatica. Il genere umano non tornerà alla caverna o, meglio, all'albero. **Ma in un programma bioeconomico minimale si possono includere alcuni punti.**

Primo, la produzione di tutti i mezzi bellici, non solo la guerra, dovrebbe essere completamente proibita. È assolutamente assurdo (e ipocrita) continuare a coltivare tabacco se per ammissione generale nessuno intende fumare. **Le nazioni così sviluppate da essere le maggiori produttrici di armamenti dovrebbero riuscire senza difficoltà a raggiungere un accordo su questa proibizione se, come sostengono, hanno abbastanza saggezza da guidare il genere umano.** L'interruzione della produzione di tutti i mezzi bellici non solo eliminerebbe almeno le uccisioni di massa con armi sofisticate, ma renderebbe anche disponibili forze immensamente produttive senza far abbassare il tenore di vita nei paesi corrispondenti.

Secondo, utilizzando queste forze produttive e con ulteriori misure ben pianificate e franche, bisogna **aiutare le nazioni in via di sviluppo ad arrivare il più velocemente possibile a un tenore di vita buono (non lussuoso).** Tanto i paesi ricchi quanto quelli poveri devono effettivamente partecipare agli sforzi richiesti da questa trasformazione e accettare la necessità di un cambiamento radicale nelle loro visioni polarizzate della vita.

Terzo, il genere umano dovrebbe gradualmente, ridurre la propria popolazione portandola a un livello in cui l'alimentazione possa essere adeguatamente fornita dalla sola agricoltura organica. Naturalmente le nazioni che adesso hanno un notevole tasso di sviluppo demografico dovranno impegnarsi duramente per raggiungere risultati in tal senso il più rapidamente possibile.³⁰

Quarto, finché l'uso diretto dell'energia solare non diventa un bene generale o non si ottiene la fusione controllata, ogni spreco di energia per surriscaldamento, superraffreddamento, superaccelerazione, superilluminazione ecc. dovrebbe essere attentamente evitato e, se necessario, rigidamente regolamentato.

³⁰ Quando Georgescu_Roegen scrive è fortissimo il dibattito sulla esplosione demografica, sollecitato anche da un noto libro di Ehrlich del 1971, *The Population Bomb*.

Quinto, dobbiamo curarci **dalla passione morbosa** per i congegni stravaganti, splendidamente illustrata da un oggetto contraddittorio come l'automobilina per il golf, e per splendori pachidermici come le automobili che non entrano nel garage. Se ci riusciremo, i costruttori smetteranno di produrre simili "beni".

Sesto, dobbiamo liberarci anche della moda, quella "malattia della mente umana", come la chiamò l'abate Fernando Galiani nel suo famoso "Della moneta" (1750). È veramente una malattia della mente gettar via una giacca o un mobile quando possono ancora servire al loro scopo specifico. Acquistare una macchina "nuova" ogni anno e arredare la casa ogni due è un crimine bioeconomico. Altri autori hanno già proposto di fabbricare gli oggetti in modo che durino più a lungo (per esempio, Hibbard, 1968, p. 146). Ma è ancor più importante che **i consumatori si rieduchino da sé così da disprezzare la moda. I produttori dovrebbero allora concentrarsi sulla durabilità.**

Settimo (strettamente collegato al punto precedente), i beni devono essere resi più **durevoli** tramite una progettazione che consenta poi di **ripararli**. (Per fare un esempio pratico, al giorno d'oggi molte volte dobbiamo buttar via un paio di scarpe solo perché si è rotto un laccio.)

Ottavo (in assoluta armonia con tutte le considerazioni precedenti), dovremmo curarci per liberarci di quella che chiamo **"la circumdrome del rasoio", che consiste nel radersi più in fretta per aver più tempo per lavorare a una macchina che rada più in fretta per poi aver più tempo per lavorare a una macchina che rada ancora più in fretta, e tosi via, ad infinitum.** Questo cambiamento richiederà un gran numero di ripudi da parte di tutti quegli ambienti professionali che hanno attirato l'uomo in questa vuota regressione senza limiti. Dobbiamo renderci conto che un prerequisito importante per **una buona vita è una quantità considerevole di tempo libero trascorso in modo intelligente.**

Esaminate su carta, in astratto, queste esortazioni sembrerebbero, nel loro insieme, **ragionevoli** a chiunque fosse **disposto** a esaminare la logica su cui poggiano. Ma da quando ho cominciato a interessarmi della natura antropica del processo economico, non riesco a liberarmi di un'idea: **è disposto il genere umano a prendere in considerazione un programma che implichi una limitazione della sua assuefazione alle comodità esosomatiche?** Forse il destino dell'uomo è quello di avere una vita breve, ma ardente, eccitante e stravagante piuttosto che un'esistenza lunga, monotona e vegetativa. Siano le altre specie - **le amebe**, per esempio - che non hanno ambizioni spirituali, a ereditare una Terra ancora immersa in un oceano di luce solare.

9. La visione e le illusioni

Se passaggio inevitabile è ridurre i nostri consumi materiali, perché continuiamo ad aumentarli? Le risposte possono essere molteplici. Innanzitutto potrebbe essere una scelta consapevole, vivere al di sopra delle nostre possibilità e massimizzare il benessere presente. Una simile tesi sembra poco plausibile, contrasta ad esempio con l'ampio accordo sul fatto che non necessariamente aumenti di materia conducono ad aumenti di benessere. E' più semplice pensare che non ci si renda del tutto conto né delle dimensioni dei nostri consumi di materia né dei loro esiti, o, meglio, che ce se ne renda conto solo in modo frammentato senza una visione complessiva.

La tesi che abbozziamo in questo paragrafo mira a connettere degrado ambientale e visione, utilizzando a tal fine i contributi del regista tedesco Wim Wenders e del premio Nobel 1978 per l'economia Herbert Simon.

Per introdurre l'importanza della metafora della visione pensiamo a quando fissiamo lo sguardo su alcuni particolari: inevitabilmente perdiamo qualcos'altro che potrebbe interessarci. Sul piano pratico è quanto accade quotidianamente nel campo della tutela ambientale. Vediamo il piombo nelle nostre benzine e lo sostituiamo con marmitte catalitiche e benzene, senza preoccuparci troppo degli svantaggi di queste ultime. Ci concentriamo sulla CO₂, mettendo il resto in secondo piano...

Il regista tedesco Wim Wenders, soprattutto all'inizio della sua produzione, è quasi ossessionato dal problema del ritmo al quale l'occhio dello spettatore viene sottoposto.

"Quando c'è troppo da vedere, quando un'immagine è troppo piena o quando le immagini sono troppe non si vede più niente. Dal troppo si passa molto presto al nulla, come certo sapete. E conoscete anche un altro effetto: quando un'immagine è spoglia, povera, può risultare talmente espressiva da soddisfare interamente l'osservatore, e così dal vuoto si passa alla pienezza. [...] Quanto al cinema si possono fare considerazioni analoghe. Esistono film che sono come spazi chiusi: non lasciano il minimo spazio vuoto tra le singole immagini [...] non consentono agli occhi e ai pensieri di muoversi liberamente. In questo genere di shock visivi lo spettatore non può riversare nulla di proprio, nessun sentimento, nessuna esperienza. E si esce dal cinema con un senso di delusione. Solo i film che lasciano spazi vuoti tra le immagini raccontano una storia, ne sono convinto, perché una storia si produce innanzitutto nella testa dello spettatore o dell'ascoltatore (Wenders 1992)

In un contesto di razionalità delle scelte, l'elemento chiave è riuscire a costruire dei quadri rappresentativi più o meno coerenti capaci di anticipare i possibili esiti delle nostre scelte. Per far ciò è cruciale la capacità di "processare" gli stimoli (immagini/informazioni) che riceviamo. La situazione che oggi viviamo diviene allora paradossalmente sfavorevole. Siamo sottoposti ad un sovraccarico informativo e al tempo stesso si accorciano, per via dei nostri serrati ritmi di vita, i tempi che possiamo dedicare all'esame di tali informazioni. L'enfasi posta sul rapporto tra nostre capacità mentali e l'ambiente circostante costituisce un importante contributo di Herbert Simon. Considerati i limiti delle nostre menti a fronte della complessità dell'ambiente in cui viviamo, divengono rilevanti i modi con cui "processiamo" l'informazione e, più in generale, i modi con cui affrontiamo i nostri problemi

di scelta. In questo contesto la risorsa scarsa per eccellenza diviene l'attenzione mentale! Come scrive Simon in una citazione assai famosa (Simon 1971, 40-41)³¹:

“in an information-rich world, the wealth of information means a dearth of something else: a scarcity of whatever it is that information consumes. What information consumes is rather obvious: it consumes the attention of its recipients. Hence a wealth of information creates a poverty of attention and a need to allocate attention efficiently among the overabundance of information sources that might consume it.”

Possiamo allora proseguire immaginando che la serratezza dei ritmi abbia a sua volta avuto ripercussioni sul mondo dei media, nel senso di aver stimolato il confezionamento di pasti informativi pronti e veloci (ossia semplici) che poi finiscono per essere consumati da tutti, anche da chi avrebbe invece il tempo a disposizione per riflettere, con l'ulteriore conseguenza sistemica di creare nell'immaginario collettivo il bisogno di approcci ultra-semplificati, riducendo alla fine la capacità (e forse la voglia) di analisi e di processo degli input informativi.

E', tuttavia, interessante notare come il problema dell'elaborazione dell'informazione è oltremodo rilevante per via della crescente rottura tra nostro mondo artificiale (di cittadini del Nord) e quello naturale. L'informazione sull'ambiente che riceviamo è asettica, ci proviene dall'alto ed ha scarsa corrispondenza con i vissuti quotidiani. In altri termini, la visione e l'esperienza del mondo naturale è rara ed episodica nelle nostre vite. Non vediamo, non percepiamo e quindi non conosciamo le conseguenze delle nostre azioni.

Nasce così un problema etico, evidenziato da Wenders, che attiene alla libertà dell'uomo che, menomato nella sua capacità di auto-rielaborazione, perde autonomia e rischia di divenire manipolabile. Per Wenders

La televisione americana sfrutta ed eccita le capacità percettive al massimo, finendo in questo modo con il soggiogarle agli schemi della convenzione sociale e della convenienza economica. In questo contesto, il “vedere” non è più forma attiva di selezione e percezione, perché di fronte allo schermo televisivo non c'è più il *tempo e lo spazio fisio-psicologico* per formarsi una *propria* immagine interiore, una propria posizione, un proprio punto di vista.. [...] In condizioni di sforzo, pressione, costrizione o addirittura violenza, occhi e mente funzionano male, la vista si annebbia, la coscienza diventa manipolabile. Al contrario in condizioni di distensione e mobilità si può vedere e pensare in modo naturale, personale e chiaro. [Russo 1997, p51 e p62]

³¹ V. anche Simon 1978, p. 13.

10. Troppi rifiuti o troppa energia?

La tecnologia ha giocato un ruolo chiave nell'evoluzione delle società umane. Ancor più rilevante è divenuta la tecnologia quando ha permesso di controllare le enormi potenzialità energetiche derivanti dalle fonti fossili e di produrre miglioramenti inimmaginabili nelle condizioni materiali di milioni di persone, pur se con forti disparità tra nord e sud del mondo.

Tale processo di crescita tuttavia non è stato privo di conseguenze negative per l'ambiente che si sono a sua volta riflesse anche sull'uomo. Oggi, per di più, si affacciano nuovi e più complessi problemi - ivi incluso l'accesso all'energia e la rapida dissipazione di risorse "non rinnovabili" da parte di un sempre crescente numero di persone che rivendicano il raggiungimento di sostanziali miglioramenti nelle loro condizioni materiali. Si aprono pertanto nuovi e più ampi scenari che richiedono risposte sempre più articolate.

La proposta dominante a livello internazionale è l'ambizioso modello dello sviluppo sostenibile, uno sviluppo in modo che sia cioè continuo e duraturo, e perciò necessariamente compatibile con l'evoluzione dell'ambiente naturale, delle società e delle culture. In questo contesto il problema energetico non solo continua ad essere fondamentale, ma richiede un approccio più ampio e più articolato sia rispetto al passato, sia rispetto alle ricette spesso troppo semplicistiche che ci vengono proposte (idrogeno, ritorno diffuso al nucleare, uso a tappeto delle energie rinnovabili) e che tendono a vedere solo piccole parti del problema.

Occorre ad esempio chiedersi se effettivamente il problema della sostenibilità si possa porre soprattutto in termini di disponibilità di energie "alternative". La risposta è evidentemente negativa. I problemi ecologici che oggi ci troviamo a fronteggiare, non nascono tanto e soltanto dal versante emissioni - sul lato dei rifiuti - bensì soprattutto dalla nostra smisurata capacità di manipolare i nostri ambienti naturali, possibile solo grazie all'enorme quantità di energia che abbiamo a disposizione. Per avere un riscontro concreto, si pensi all'impoverimento drammatico di moltissime falde acquifere: una grande quantità di energia a disposizione consente di aumentare i prelievi d'acqua fino a provocare la rottura, di norma

irreversibile, dei normali processi di rigenerazione della falda stessa. L'ammontare di energia che l'uomo ha a disposizione può far attivare effetti soglia e spostare irreversibilmente i processi naturali al di fuori della loro finestra di stabilità, con conseguenze imprevedibili per il pianeta ma sicuramente negative per l'uomo stesso. Una delle questioni centrali per la sostenibilità non è allora né l'insufficienza delle fonti energetiche, né l'ottenimento di energia da fonti "pulite", quanto l'uso smisurato dell'energia che abbiamo a disposizione!

Di fronte alla ricchezza e complessità del nostro ambiente, in modo un po' paradossale, cerchiamo visioni semplicistiche concentrate ora su un singolo aspetto ora su un altro, evitando una visione più integrata e complessiva. Rivolgiamo le nostre speranze alla tecnologia e alla scienza, cui chiediamo in buona sostanza di ridurre tali rifiuti (ecoefficienza) e migliorarne la qualità. E' da tenere tuttavia presente che l'innovazione tecnologica non fa quasi mai miracoli: per portare a maturazione una tecnologia è necessario spesso iniziare con soluzioni di tentativo ed avventurarsi lungo un cammino faticoso e difficile, fatto di tentativi, di errori, di esperienze, di investimenti. E' necessaria inoltre la consapevolezza che non esiste una "soluzione" unica ai problemi, che molti elementi vanno considerati, che le opzioni si possono dimostrarsi più o meno valide a seconda del campo e delle circostanze.

Sono considerazioni ovvie, per di più sentite come ovvie nel piccolo delle nostre vite quotidiane - sappiamo che non esistono bacchette magiche, che ogni nostra possibile azione presenta sia aspetti positivi che negativi e che le nostre scelte rappresentano di norma dei compromessi tra i nostri molteplici obiettivi. Eppure le dimentichiamo, perdiamo la nostra saggezza, quando ci rivolgiamo a problemi di scala diversa!

E' bene comunque chiarire, per concludere, che la considerazione a largo spettro dei problemi, la complessificazione del quadro analitico, non implica la rinuncia a percorrere e ad approfondire le possibili vie di sviluppo scientifico e tecnologico. E' giusto il caso dell'idrogeno; in tale campo è però necessario procedere con attenzione ed umiltà, diffidando quanto più possibile di ricette semplicistiche, tentando di prevedere anche i possibili effetti negativi e non scoraggiandosi di fronte ad eventuali insuccessi. Sarà

probabilmente necessario, con un grande sforzo politico e tecnologico a lungo termine, procedere verso la diversificazione degli approvvigionamenti, verso la riduzione dell'intensità energetica e in termini più prettamente economici, al disaccoppiamento tra domanda energetica e crescita economica. Comunque inevitabile sarà una riduzione della scala materiale delle nostre economie.

11. Bibliografia

- Argue D, 1997, "A review of the economic cost of power in Ontario", *mimeo*, disponibile su http://www.newenergy.org/costofpower_report.html
- Blaxter K, 1989, *Energy metabolism in animals and man*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Burness GP, 2002, "Elephants, Mice, and Red Herrings", *Science*, 296 (5571), 1245-1247, 17/05/02
- Castaldi C., Nuvolari A., 2003, "Technological Revolutions and Economic Growth: Reconsidered The "Age of Steam", Paper presented at the Conference in honour of Keith Pavitt *What do we know about innovation ?*, Brighton, 13 - 15 November 2003.
- Chiesa P, Consonni S, Kreutz TG, Williams R.H., 2003, "Production of Hydrogen, Electricity and CO₂ from Coal using Commercially-Ready Technology", *Second Annual Conference on Carbon Sequestration Washington*, May 5-8, 2003.
- Degen AA, Kam M, Khokhlova IS, Krasnov B. R., Barraclough T. G., 1998, "Average daily metabolic rate of rodents: habitat and dietary comparisons", *Functional Ecology*, 12, 63-73
- EIA (Energy Information Administration), <http://www.eia.doe.gov/>
- European Commission 2002, "The priorities of the Sixth Framework Programme 2002-2006", *RTD info: magazine for European Research , special issue november 2002*, disponibile on-line http://europa.eu.int/comm/research/rtdinfo/pdf/rtdspecial-fp6_en.pdf
- Foster JB, 2000, "Capitalism's Environmental Crisis- Is Technology the Answer?" *Monthly Review*, 52 (7), <http://www.monthlyreview.org/1200jbf.htm>
- Franco A, Parabita T, 2004, "Biomasse per la generazione termoelettrica. Prospettive per un utilizzo più razionale", *La Termotecnica*, 4, 81-93.
- Franco A, Casarosa C, 2002, "On some perspectives for increasing the efficiency of combined cycle power plants", *Applied Thermal Engineering*, 22 (13), 1501-1518
- Georgescu Roegen N, 1979, "Energy analysis and Economic valuation", *The Southern Economic Journal*, 44, 1023-58 (tradotto in italiano in Georgescu

- Roegen, a cura di Bonaiuti M., 2003, *Bioeconomia*, Bollati Boringhieri, Torino)
- Georgescu Roegen N, 1982, *Energia e miti economici*, Bollati Boringhieri, Torino (ed orig. 1975)
- Georgescu-Roegen N, 1971, *The entropy law and the economic process*. Harvard University Press, Cambridge.
- Giampietro M, Mayumi K, 1998, "Another View of Development, Ecological Degradation, and North-South Trade", *Review of Social Economy*, 56 (1), 20-36
- Giampietro M, Ulgiati S, Pimentel D, 1997, "Feasibility of large-scale biofuel production", *BioScience* 47, 587-600.
- Giampietro M, 2003, *Multi-Scale Integrated Analysis of Agroecosystems*, CRC PRESS
- Goldsmith Z, 2004, "The real Price of Power", *The Nuclear Issue*, disponibile su <http://www.spectator.co.uk/bnfl/article10.html>
- Herring H 1999, "Does energy efficiency save energy? The debate and its consequences" *Applied Energy*, 63 (3), 209-226
- Hijikata T, "Research and development of international clean energy network using hydrogen energy (WE-NET)", *International Journal of Hydrogen Energy*, 27, 115-129.)
- IEA (International Energy Agency), 2004, *Key World Energy Statistics -- 2004 Edition*. <http://library.iea.org/dbtw-wpd/Textbase/nppdf/free/2004/keyworld2004.pdf>
- Jevons SW, 1906³ (1865¹, 1866²), *The coal question: an inquiry concerning the progress of the Nation, and the probable exhaustion of our coal-mines* (edited by A.W. Flux), MacMillan, New York
- Kleiber M, 1975, *The Fire of Life: An Introduction to Animal Energetics*, Robert E. Krieger Publishing Company Huntington, NY.
- Laherrère JH, 1999, "Reserve growth: technological progress, or bad reporting and bad arithmetic", *Geopolitics of Energy*
- Leveen L, 2004, "Water usage, Carbon Dioxide Emissions and Land Impacts Associated with Hydrogen Production - A study by SLS Partners Inc. on behalf of the World Resources Institute", *mimeo*, <http://istocrates.berkeley.edu/~rael/hydrogen.ppt> e <http://www.slspart.com/abwri.html>
- Lotka AJ, (1925). *Elements of physical biology*. Williams and Wilkins, Baltimore. [Reprinted in 1956: *Elements of mathematical biology*. Dover Publications, Inc., New York, New York].
- Miller AT, 1986, *Energy Metabolism*, F.A. Davis Company Philadelphia, PA.
- Munda G, 2004, "Social multi-criteria evaluation: Methodological foundations and operational consequences", *European Journal of Operational Research*, 158, (3), 662-677

- Momirlan M, Veziroglu TN, 2002, "Current status of hydrogen energy", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6, 141-179.
- Rifkin J, 2002, *Economia all'idrogeno*, Mondadori, Milano
- Rosen M.A., 1996, Thermodynamic Comparison of Hydrogen Production Process, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 21, pp. 349-365.
- Russo M, 1997, *Wim Wenders, percezione visiva e conoscenza*, Le Mani, Genova.
- Simon HA, 1978, "Rationality as Process and as Product of Thought", *American Economic Review*, 68(2), 1-16.
- Simon HA, 1971. "Designing organizations for an information rich world", in Greenberger, M. (ed.), *Computers, communications, and the public interest*, The Johns Hopkins University Press, Baltimore MD, p. 37-52. Ristampato in: Simon, H.A. *Models of bounded rationality*, 1982 *Vol. 2: Behavioral economics and business organization*. The MIT Press, Cambridge, Mass..
- Todd PM, Gigerenzer G, 2003, "Bounding rationality to the world", *Journal of Economic Psychology*, 24, 143-165.
- US Department Of Energy, 2002, *A national vision of America's transition to a hydrogen economy — to 2030 and beyond*
disponibile su
http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/vision_doc.pdf
- Vellone R, 2003, "Panoramica delle iniziative nel campo della produzione, trasporto/accumulo ed utilizzazione dell'idrogeno. Prospettive ed impatti economici come visti dal Gruppo consultivo costituito dalla Commissione Europea. Presentato alla conferenza *Nuove applicazioni dell'Idrogeno, Roma, 12 giugno 2003*, disponibile all'indirizzo: <http://www.aidic.it/idrogeno/pdf/Vellone.ppt>
- Weibel ER, 2002, "Physiology: the pitfalls of power laws", *Nature*, 417, 131-132 (09/05/02)
- Wenders W., 1992, "The urban landscape" in Wenders W., *L'atto di vedere*, Ubulibri, Milano.

Redazione:
Giuseppe Conti
Luciano Fanti – coordinatore
Davide Fiaschi
Paolo Scapparone

Email della redazione: [**Papers-SE@ec.unipi.it**](mailto:Papers-SE@ec.unipi.it)
