

ANALISI DELLA PENETRAZIONE DELL'IDROGENO NEL MERCATO ENERGETICO

Barbir, F., H.J. Plass, Jr., T.N. Veziroglu and H.T. Odum. 1992. Analisi della penetrazione dell'idrogeno nel mercato energetico. *Ambiente Risorse Salute* Oct. 1992, IX(10):20-25.

F. Barbir, H.J. Plass, Jr.*, T.N. Veziroglu* e H.T. Odum ***

Introduzione

La crescita economica delle moderne società industrializzate è principalmente il risultato dell'utilizzazione dell'energia contenuta nei combustibili fossili, carbone, petrolio e gas naturale. Questi combustibili sono prontamente disponibili e convenienti per l'uso. L'umanità ha imparato a sfruttarli per produrre i servizi energetici di cui necessitava.

Comunque, il consumo dei combustibili fossili è diventato una forza distruttiva, localmente a causa delle emissioni, degli sversamenti e dispersioni, regionalmente per la diffusione di inquinanti; e globalmente a causa dell'accumulo dell'anidride carbonica nell'atmosfera con conseguenze pericolose come il riscaldamento globale, i mutamenti climatici e l'innalzamento del livello dei mari. E' discutibile se l'attuale sistema energetico abbia accresciuto la portata della sua efficacia e se fornisca benefici netti alla società.

Con tale sistema energetico, fondato sui combustibili fossili, problemi come l'inquinamento, l'impoverimento delle risorse naturali, i conflitti internazionali, etc., stanno aumentando e probabilmente si aggraveranno nel futuro. Sono necessari pertanto lo sviluppo e la realizzazione di un nuovo sistema energetico: quello basato sull'utilizzazione delle fonti rinnovabili di energia, con l'idrogeno e l'elettricità come energie più diffuse, costituisce una valida scelta (1, 2, 3, 4). Il sistema energetico a idrogeno solare potrebbe dare essenzialmente gli stessi servizi forniti oggi dal sistema a combustibili fossili, ma in modo ambientalmente favorevole. E' adatto e quasi altrettanto economico per la produzione sia centralizzata che periferica di "forme concentrate di energia"; può utilizzare tutte le fonti primarie di energia disponibili e fornir-

sce le maggiori efficienze nella conversione energetica per gli usi finali. Come tale è un fondamentale sistema energetico.

Occorrerà del tempo perchè possa essere realizzato; sostituirà gradualmente le fonti e le energie correnti con delle nuove. Debbono ancora essere determinati i tempi di introduzione di tale sistema senza che vengano causati "stress" economici. Le analisi delle tendenze storiche del mercato energetico potrebbero fornire l'informazione necessaria per prevedere e valutare le scelte energetiche future.

Orientamenti storici del mercato energetico

Dall'inizio di questo secolo, la domanda di energia primaria è cresciuta di quasi dieci volte (una crescita annua pari a circa il 2,6%). L'energia nella società odierna è fornita da numerose fonti primarie. I combustibili fossili danno più dell'80%, e il resto è fornito da combustibili nucleari, da energia cinetica dei fiumi e da combustibili tradizionali (legno, scorie dei raccolti, letame) che sono particolarmente importanti nei paesi in via di sviluppo. Tra il 1932 e il 1974, il consumo dei combustibili fossili crebbe del 4,5% all'anno (5, 6) fornendo alla civiltà e alla tecnologia le basi per uno sviluppo senza precedenti. Dopo lo shock petrolifero all'inizio degli anni settanta, si ebbe un rallentamento nella crescita dei consumi dei combustibili fossili (probabilmente dovuto agli sforzi crescenti per un uso energetico più efficiente), ma negli anni più recenti ne è nuovamente cresciuto il ritmo.

La crescita globale è stata accompagnata da una generale sostituzione qualitativa di idrocarburi liquidi (petrolio e gas naturale) al posto del carbone

(fig. 1). Gli idrocarburi hanno superato l'apporto energetico del carbone nel 1960 e sin dal 1970 hanno fornito circa i due terzi di tutte le energie fossili. Sempre dalla fig. 1, si può dedurre che non c'è stata però sostituzione, poichè il consumo di tutti i combustibili è cresciuto in misura costante anche quando è stato introdotto nel mercato un nuovo combustibile. Ciò porta alla conclusione che i combustibili non sono in realtà in competizione fra di loro. Ogni combustibile ha sviluppato il proprio mercato e la propria domanda energetica. Ad esempio, il petrolio ha effettivamente creato il mercato del trasporto, che a sua volta ha determinato una domanda sempre crescente di combustibili per tale uso. Lo sviluppo dei moderni sistemi di trasporto (specialmente automobilistico ed aereo) sarebbe stato impossibile con il carbone come combustibile.

Se le frazioni che costituiscono il rifornimento energetico primario vengono rappresentate in funzione del tempo, le transizioni energetiche seguono curve abbastanza regolari (fig. 2). Le sostituzioni in fig. 2 sono più evidenti. Esse sono lente, con circa un secolo di tempo necessario perchè un particolare combustibile raggiunga la metà del mercato, ma sono sorprendentemente regolari. E' questa regolarità che ha spinto Marchetti ad applicare equazioni logistiche semplici per descrivere il comportamento del mercato dell'energia (7). Le curve logistiche sono incidentalmente le soluzioni delle equazioni generali di Lotka-Volterra che sono state originariamente usate per descrivere la competizione ecologica e la dinamica delle popolazioni (8). L'idea che le energie primarie competano sul mercato dell'energia come le varietà di una specie per le risorse di una nicchia,

* Clean Energy Research Institute, University of Miami, Usa

** Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida, Usa

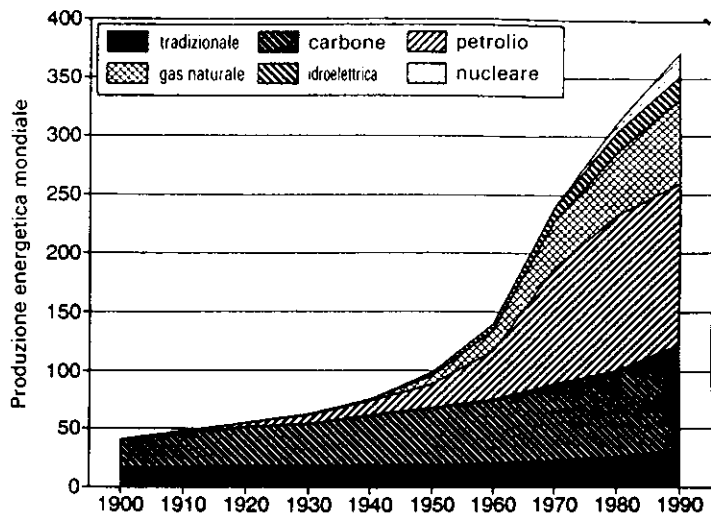


Fig. 1 - Tendenze nella produzione energetica mondiale

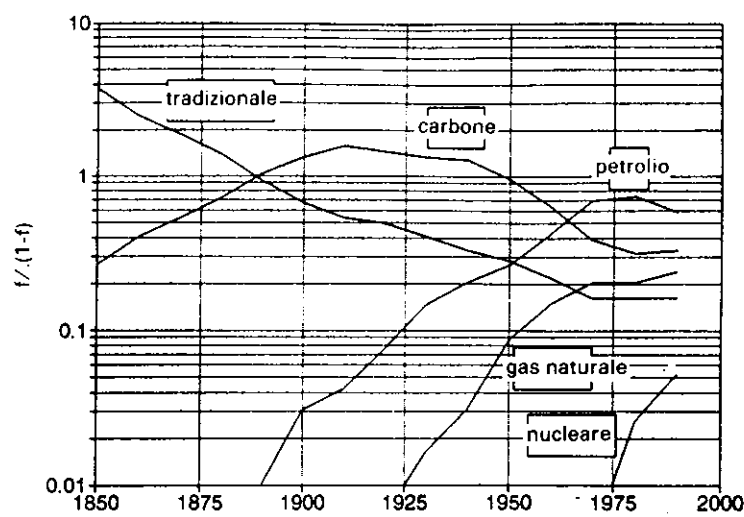


Fig. 2 - Mutamento globale dell'energia primaria (f = quota nel mercato energetico)

ha fornito una cornice concettuale ed una struttura matematica per trattare l'evoluzione del mercato energetico. Il modello basato su equazioni logistiche sviluppato all'IIASA si è rivelato idoneo a trattare i dati statistici per più di cento anni, ed è anche stato usato per le previsioni del mercato energetico (9).

Si può rilevare che sin dagli anni '70 c'è stato un appiattimento, nelle quote di combustibile, a sostegno del precedente argomento sulla competizione inesistente nell'odierno mercato energetico. La principale ragione può essere l'assenza di una nuova fonte di energia da introdurre nel mercato. L'energia nucleare ha avviato la penetrazione del mercato negli anni '60, è stata veramente promettente negli anni '70, ma, a causa delle crescenti preoccupazioni della pubblica opinione circa la sua sicurezza, ha rallentato la sua penetrazione negli anni '80, ed è azzardato ritenere che essa continuerà a penetrare nel mercato energetico negli anni '90, tanto pochi sono i nuovi progetti. Marchetti (8) ha suggerito che il rapido sviluppo iniziale dell'energia nucleare sia probabilmente dovuto al fatto che non ha dovuto installare proprie infrastrutture (rete di distribuzione).

Il mercato dell'energia è diviso in quattro settori, e cioè:

- trasporto,
- produzione di elettricità,
- industria,
- residenziale e commerciale.

Ciascun settore rappresenta attualmente un mercato separato con le proprie regole, prezzi e forme energetiche dominanti. L'idrogeno solare dovrà competere in ciascuno di questi mercati. E' ragionevole attendersi che il primo "campo di battaglia" sarà il settore

del trasporto. E' attualmente il settore di consumo energetico meno efficiente, usa infatti combustibili altamente raffinati e perciò molto costosi, e contribuisce con una significativa quota all'inquinamento atmosferico urbano.

L'applicazione di curve logistiche di previsione, senza analisi delle interazioni energia-economia, è limitata. Le curve logistiche sono proprio la conseguenza di alcune interazioni energia-economia, non la loro causa. Un modello che può descrivere le interazioni energia-economia e tenere conto della disponibilità e qualità dei combustibili, dovrebbe essere più utile ai fini dell'analisi del futuro mercato energetico.

Tecnica della rappresentazione attraverso modelli

Il linguaggio dei sistemi energetici è stato usato per sintesi, analisi e simulazione dei sistemi ecologici (10). Odum ha mostrato che questo metodo è anche applicabile per modelli dei sistemi socio-economici (11, 12, 13, 14). La società può essere rappresentata da modelli di un sistema energetico in quanto i maggiori comportamenti socio-economici sono il risultato finale dell'uso dell'energia. Ogni forma di energia primaria ha le sue origini nell'ambiente, cioè, fuori dal sistema socio-economico. C'è sempre uno scambio di energia e di materiali tra il sistema socio-economico e l'ambiente. Le dinamiche del processo economico sono perciò in definitiva vincolate alla disponibilità di energia nell'ambiente e alla sua accessibilità al consumo in termini economici.

Poiché la vitalità delle economie nazionali (e di quella mondiale) dipende dalla simbiosi tra risorse ambientali e comportamento economico umano, il linguaggio dei sistemi energetici è sta-

to adattato ai fini di sviluppare modelli generali a livello regionale, nazionale e mondiale (14). Questa tecnica di modellazione fornisce uno strumento per l'analisi del comportamento dei sistemi economici. I modelli possono essere usati per riprodurre schemi della società reale, e, allo stesso tempo, consentono la percezione intima della struttura del sistema che produce questi schemi, che non è possibile ottenere con modelli logistici. Nella costruzione di un modello di un sistema energetico-economico, vengono considerati solo mutamenti di lungo periodo nelle dinamiche del processo, come il consumo delle risorse ambientali e il loro uso nella costruzione e mantenimento di un'infrastruttura socio-economica. Non è possibile dar conto delle fluttuazioni di breve periodo.

Bodger e Baines (15) hanno applicato questa tecnica allo sviluppo di un modello che simula le penetrazioni di nuove fonti di energia primaria, ciascuna delle quali ha, successivamente, maggiore accessibilità e disponibilità. La disponibilità di energia in ogni settore rappresenta uno stock fisico disponibile per l'utilizzazione e conversione in forme utili di energia. L'accessibilità dell'energia è attualmente il rapporto di produzione dell'energia, cioè, la misura di quanto sforzo (espresso in energia "incorporata") è richiesto per procurarsi la quantità di energia e convertirla in forme energetiche utili. Bodger e Baines sono riusciti a riprodurre alcuni trend storici nei consumi di energia e nelle prestazioni del settore socio-economico. I risultati, se presentati in forma di quote nel settore energetico, hanno mostrato una buona corrispondenza con le curve logistiche di Marchetti.

Descrizione del modello.

Un modello simile a quelli proposti da Odum (11, 12, 13, 14), è stato sviluppato per analizzare le logistiche e gli effetti di penetrazione di nuove fonti energetiche e di nuove forme di energia, come l'idrogeno, nel mercato energetico su scala globale. Il modello mette in relazione il patrimonio totale mondiale e l'economia globale con la disponibilità di risorse rinnovabili e non rinnovabili in modo globale (vedi fig.3).

Il patrimonio mondiale, che nel modello è rappresentato come un deposito fisico "A", comprende tutte le strutture fisiche create dall'uomo, cioè trasporti, costruzioni, reti di comunicazione, hardware tecnologico, come pure l'accumulazione di manodopera qualificata, esperienza, conoscenze e cultura. E' l'accumulo di hardware e di software che è implicato nel processo economico e continuamente mantenuto, sostituito o aggiunto. Nelle dinamiche del processo esso ha un duplice ruolo:

- genera domanda per consumo di risorse ambientali,
- fornisce il feedback economico necessario per la produzione di beni e servizi.

Nel modello ci sono tre livelli di uso delle risorse che generano beni economici, ciascuno leggermente diverso. Ognuno in realtà rappresenta un diverso stadio dello sviluppo economico. Quello inferiore indica l'utilizzazione di risorse rinnovabili nel costruire e mantenere i beni mondiali (cioè, agricoltura, pesca, foreste, etc.); il successivo rappresenta le economie sviluppate che hanno acquisito vaste riserve di minerali e combustibili per fornire energia alle loro economie. L'utilizzazione di riserve di combustibili fossili (che nel modello sono rappresentati come un magazzino fisico "F") ha determinato la crescita delle attività economiche e incrementato in maniera clamorosa i beni mondiali, particolarmente nella seconda metà del secolo. Comunque, come già detto, ci sono perlomeno due generi di problemi collegati all'utilizzazione dei combustibili fossili:

- 1) le loro riserve sono limitate e perciò presto o tardi si esauriranno;
- 2) essi creano inquinamento a scala locale, regionale e globale.

Come misura dell'inquinamento, in questo modello, è stata usata l'anidride carbonica. Essa si accumula in un magazzino "P", e di conseguenza influisce sul patrimonio economico.

L'economia dell'idrogeno solare è considerata come un nuovo stadio nell'e-

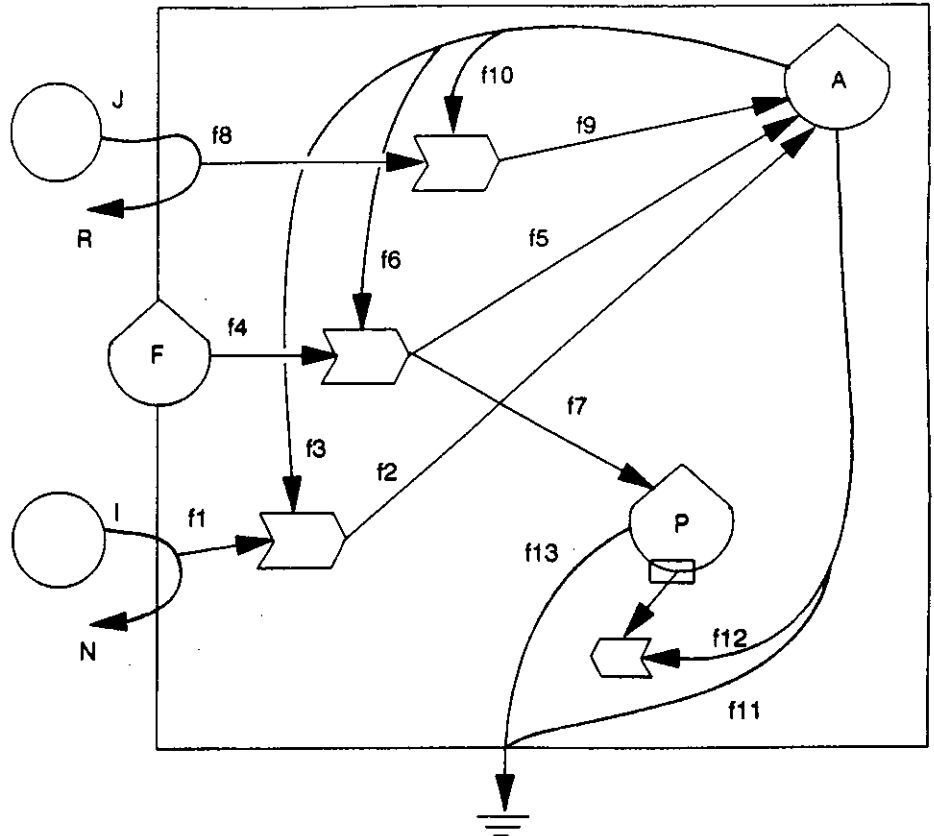


Fig. 3 - Diagramma del modello energetico mondiale (I, N, J, R sono fonti energetiche) f1 ... f13 energetici

voluzione e nello sviluppo della civiltà umana. Al modello è aggiunta una nuova fonte, che rappresenta l'energia solare disponibile nelle vaste aree desertiche del mondo. Questa energia solare non è stata usata dai sistemi economici dell'uomo, né direttamente né indirettamente. Attraverso l'idrogeno e l'elettricità essa può essere utilizzata nel processo economico per fornire essenzialmente gli stessi servizi offerti dai combustibili fossili.

I legami tra gli "stock" e le interazioni nel modello, mostrati in fig. 3, rappresentano i flussi di energia o di beni. Ciascun flusso è regolato per essere proporzionale ai valori immagazzinati che interagiscono.

Nel modello l'anno 1950 è stato scelto come anno iniziale. Alcuni valori iniziali (come le riserve di energia, il consumo energetico, i contenuti atmosferici di CO₂, le emissioni di CO₂, etc.) sono stati attinti dai dati statistici disponibili. A causa della loro forma altamente aggregata, i beni sono stati assunti sotto forma di un valore normalizzato (1 nel 1990). I flussi di beni risultanti (cioè produzione economica, deprezzamento naturale e deprezzamento dovuto all'uso dei beni in produzione) sono stati stabiliti per tentativi ed errori, così che la simulazione di modello riproduce i trend storici nel consumo di energia e nella produzione economica per il periodo 1950 - 1990 (per il quale sono

disponibili i dati statistici). La produzione economica è in effetti proporzionale al Prodotto Lordo Mondiale che è misurato in dollari, per quanto la moneta fluisca nella direzione opposta al flusso dei beni e dei servizi.

L'utilizzazione dell'energia solare attraverso l'idrogeno in qualità di vettore energetico è stata simulata a partire dall'anno 2000. La penetrazione nel mercato energetico è stata assunta in maniera logistica, secondo le osservazioni di Marchetti. Il periodo di tempo necessario per raggiungere il 50% del mercato energetico (th) è scelto uguale al tempo necessario per passare dal 10 al 90% del mercato, il cosiddetto "tempo di subentro" (to). Questo è stato arbitrariamente fissato in 40 anni, periodo che è più breve del "tempo di subentro" per la maggior parte dei combustibili o tecnologie energetiche nel passato. Comunque, esso è più lungo della durata di un impianto e di una infrastruttura energetica (che solitamente viene considerato come un tempo minimo necessario per una transizione indolore). La penetrazione in un periodo di tempo più breve non è probabile, a causa dello stress economico che insorgerebbe, in quanto la costruzione delle nuove infrastrutture energetiche avverrebbe perfino prima che le vecchie siano obsolete.

Risultati e discussione

La simulazione del modello per il periodo 1959 - 1990 ha dimostrato un buon accordo con le registrazioni storiche relative ai consumi di energia, al prodotto mondiale lordo (come misura dell'attività economica) e all'anidride carbonica nell'atmosfera (figg. 4, 5 e 6). Se l'economia mondiale è basata solamente sull'utilizzazione dei combustibili fossili (ciò significa che il settore dell'idrogeno solare è del tutto inattivo), il consumo di combustibili fossili inizierà il declino, più o meno a metà del prossimo secolo, dopo aver raggiunto un picco circa tre volte maggiore degli attuali livelli. Benché il modello non faccia differenze tra carbone, petrolio e gas naturale, è ragionevole aspettarsi che i combustibili liquidi (petrolio e gas naturale) si esauriranno

prima, dal momento che le loro riserve sono inferiori a quelle del carbone. Il declino nel consumo di energia sarà accompagnato da un analogo declino nelle attività economiche, che a sua volta si tradurrà in decremento dei beni economici mondiali, ma con un ritardo di 15-20 anni (fig. 7). È interessante il fatto che l'anidride carbonica contenuta nell'atmosfera continuerebbe a crescere fino alla fine del secolo raggiungendo 700 ppm (quasi il doppio di oggi). Ciò è dovuto alla relativamente lunga durata dell'eccesso di CO₂ nell'atmosfera - occorrerebbero circa cento anni perché una quantità rilasciata nell'atmosfera si riduca a circa un terzo del suo valore originale (16).

Nel caso in cui l'utilizzazione dell'energia solare e dell'idrogeno sia introdotta nel mercato energetico, i consumi di

energia continuerebbero ad aumentare, benché ad un ritmo più basso rispetto a quello registrato tra il 1950 e il 1990 (fig. 4). Conseguentemente, l'attività economica (fig. 5) ed i beni economici (fig. 7) continuerebbero anch'essi a crescere e a raggiungere eventualmente una situazione di stabilità, prima o poi, nel futuro. L'introduzione dell'idrogeno inciderebbe fortemente sull'anidride carbonica nell'atmosfera, che raggiungerebbe prima del 2050 un massimo di 520 ppm (fig. 6). Dal 2050, il livello dell'anidride carbonica nell'atmosfera continuerebbe a decrescere ed ipoteticamente a raggiungere il livello pre-rivoluzione industriale.

Le figure 8, 9 e 10 mostrano cosa potrebbe succedere se la transizione al sistema energetico dell'idrogeno sola-

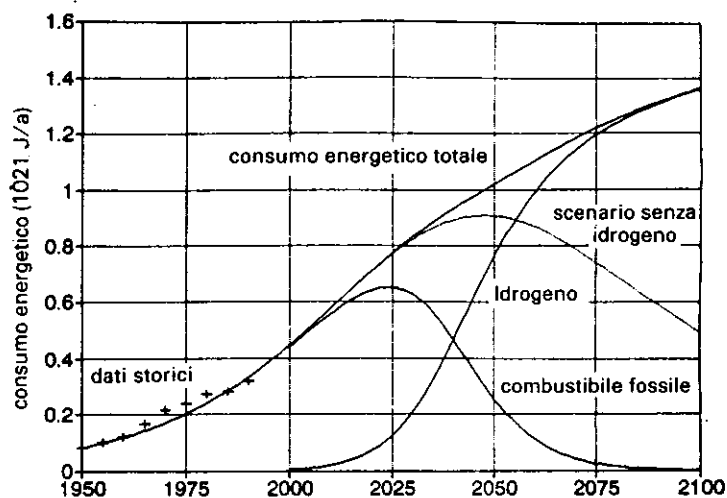


Fig. 4 - Risultati del modello di simulazione sul consumo energetico

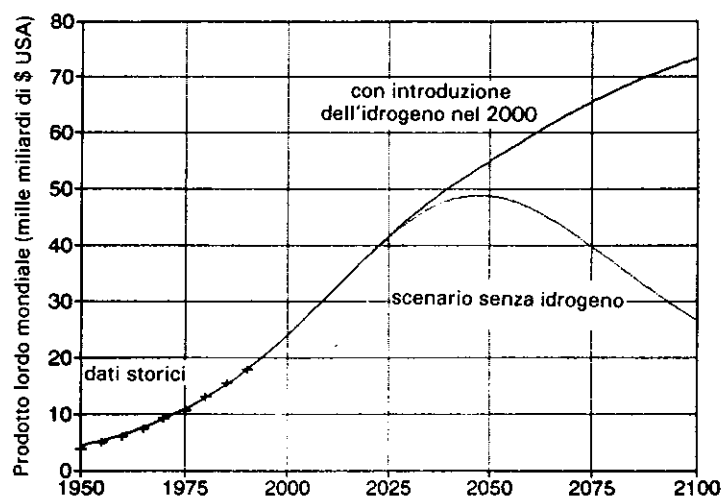


Fig. 5 - Risultati del modello di simulazione sul Prodotto Lordo Mondiale

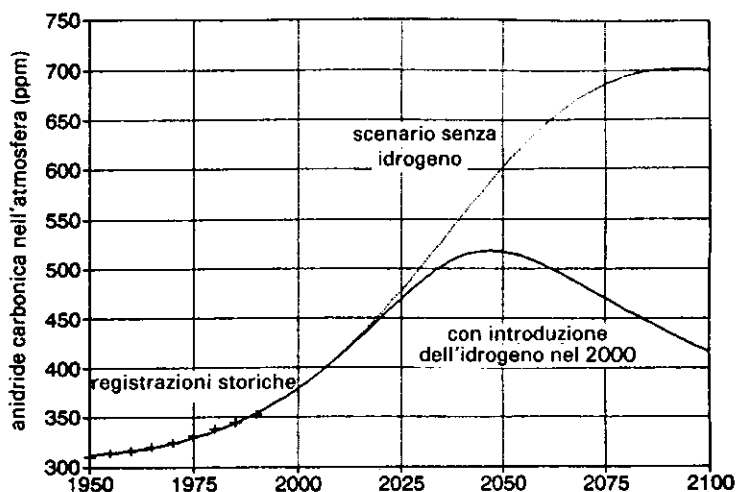


Fig. 6 - Risultati del modello di simulazione sull'anidride carbonica in atmosfera

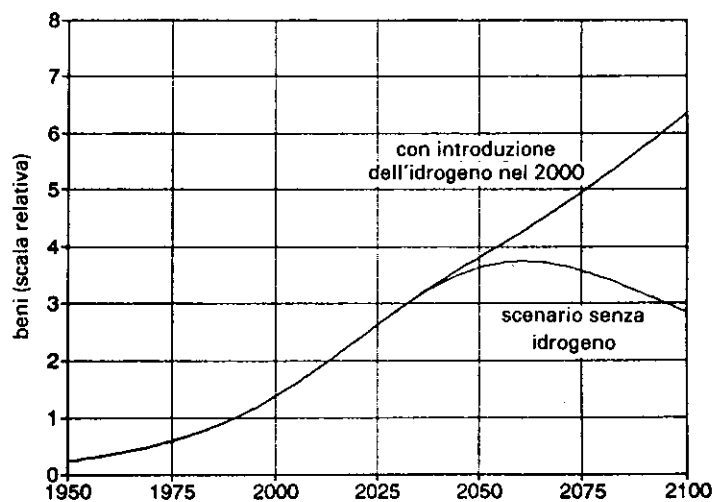


Fig. 7 - Risultati del modello di simulazione sui beni economici mondiali

venisse ritardata di 25 anni. Il consumo di energia (fig. 8) e l'attività economica (fig. 9) sarebbero più alti che nello scenario "senza idrogeno", ma molto più bassi che nel caso in cui l'idrogeno fosse introdotto nell'anno 2000. L'anidride carbonica continuerebbe ad incrementarsi fino a raggiungere 620 ppm approssimativamente nel 2070 (fig. 10). Ciò suggerisce che una rapida transizione a un sistema energetico a idrogeno solare beneficerebbe l'economia e l'ambiente nel lungo periodo. Winter (17) intuitivamente ha riconosciuto che il ritardo nella realizzazione dell'idrogeno solare potrebbe costituire un altro "momento storico perduto".

Il sistema energetico a idrogeno solare può essere progettato per fornire gli stessi servizi energetici di oggi, principalmente ad opera dei combustibili fossili. La sola differenza può esserci negli sforzi che sono richiesti per fornire questi servizi. Poiché l'idrogeno deve essere prodotto dall'energia solare è ragionevole aspettarsi che sarà richiesto maggiore sforzo per produrlo e usarlo di quanto necessario nel caso

di combustibili fossili, che sono già forme altamente concentrate di energia. Le figure 11, 12 e 13 mostrano il consumo energetico, il prodotto mondiale lordo e i beni mondiali in rapporto ai differenti sforzi richiesti. Questi sforzi possono essere rappresentati dal costo dell'idrogeno, non necessariamente in termini monetari, benché la moneta sia in qualche modo la misura degli sforzi. Sono stati usati tre differenti indici di costo (rapporti tra il costo dell'idrogeno e il costo dei combustibili fossili). Il livello di stabilità che potrebbe essere eventualmente raggiunto, è più basso, mentre cresce l'indice di costo (cioè, l'idrogeno è più costoso). Benché durante la stabilizzazione del sistema energetico a idrogeno solare, il Prodotto Mondiale Lordo e i beni mondiali possono essere più bassi rispetto allo scenario "senza idrogeno", nel lungo termine l'economia dell'idrogeno dovrebbe essere migliore anche se richiede sforzi produttivi tre volte maggiori. Finché ci sono benefici netti (o energia netta incorporata) provenienti dal processo economico, il sistema sarà capace di raggiungere la stabilità ad

un livello proporzionale ai benefici netti. Questi possono essere definiti come la differenza tra la produzione economica e il feedback (o sforzo) richiesto per mantenere l'attività economica.

Conclusioni

Il linguaggio dei sistemi energetici è stato impiegato per analizzare vari scenari della penetrazione dell'idrogeno nel mercato energetico. Con un modello relativamente semplice è stato possibile riprodurre alcuni trend storici e prevedere trend futuri nell'energia, nell'ambiente e nelle interazioni economiche.

Storicamente, l'era dei combustibili fossili potrebbe essere considerata un breve interludio tra il solare passato e il solare futuro (18). In questo breve periodo (circa 300 anni) i combustibili fossili hanno reso possibile un eccezionale sviluppo della civiltà umana. Tuttavia, se essi sono usati per sostenere la costituzione di un sistema permanente di energia come il sistema energetico a idrogeno solare, potrebbero essere considerati come una scintilla che ha fornito una transizione dal

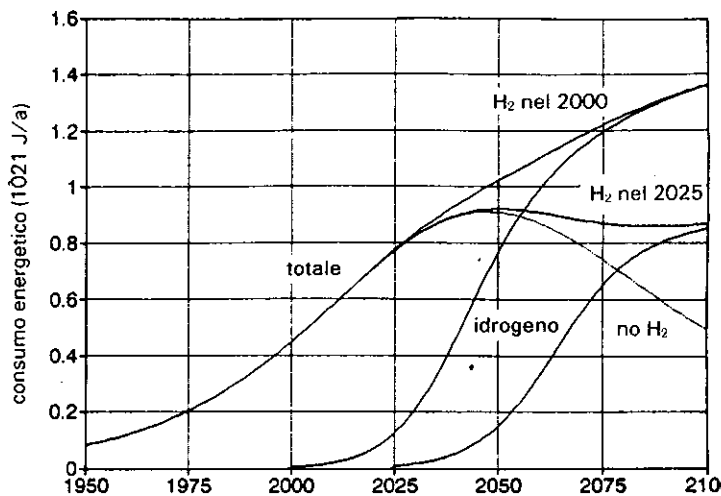


Fig. 8 - Effetti di differenti date di introduzione dell'idrogeno sul consumo energetico

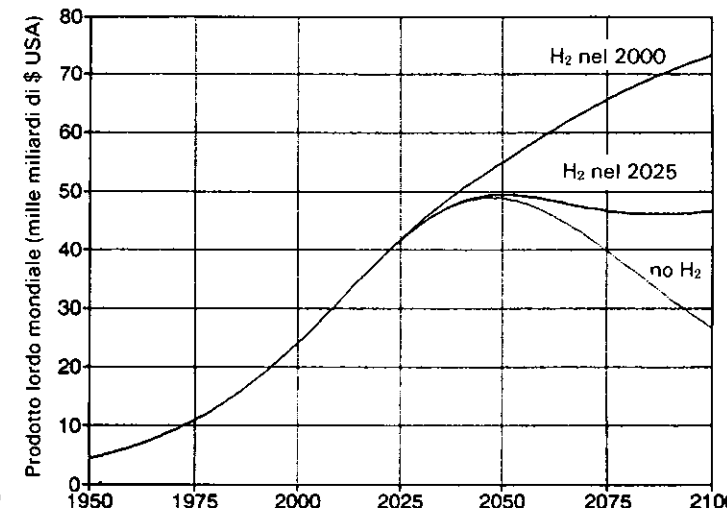


Fig. 9 - Effetti di differenti date di introduzione dell'idrogeno sul Prodotto Mondiale Lordo

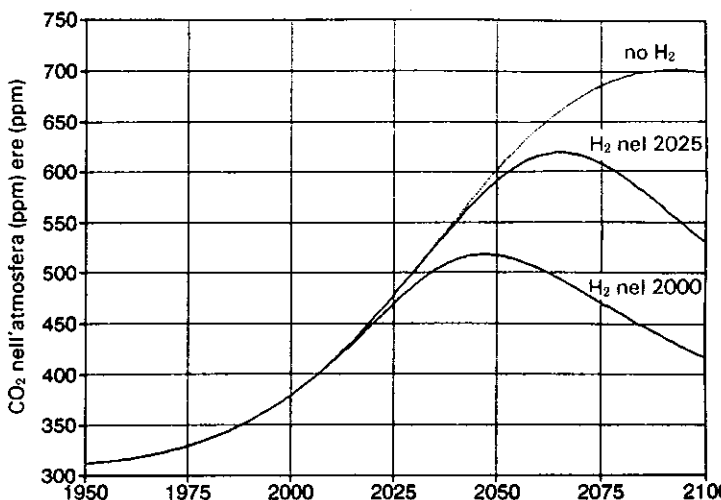


Fig. 10 - Effetti di differenti date di introduzione dell'idrogeno sul contenuto atmosferico di CO₂

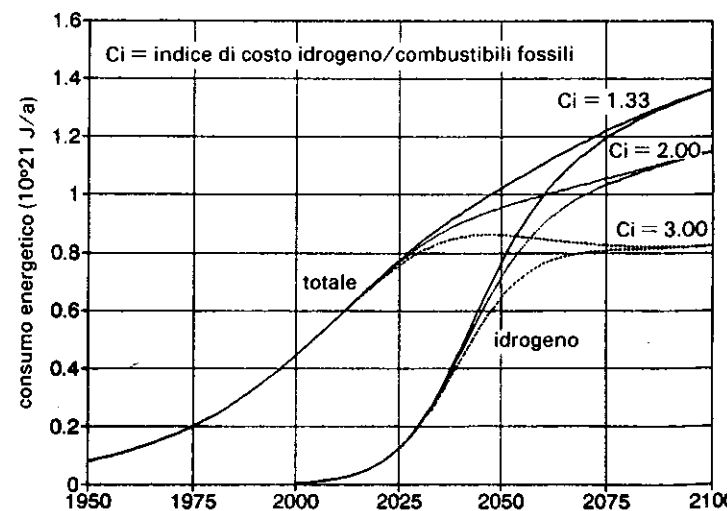


Fig. 11 - Effetti di differenti costi dell'idrogeno sul consumo energetico

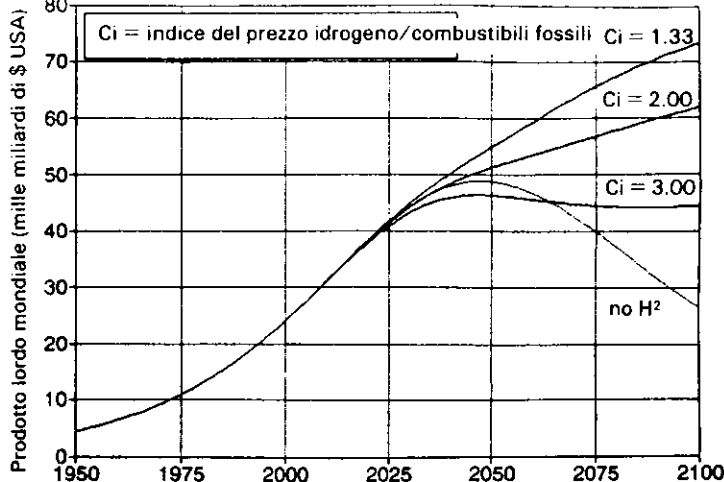


Fig. 12 - Effetti di differenti costi dell'idrogeno sul Prodotto Lordo Mondiale

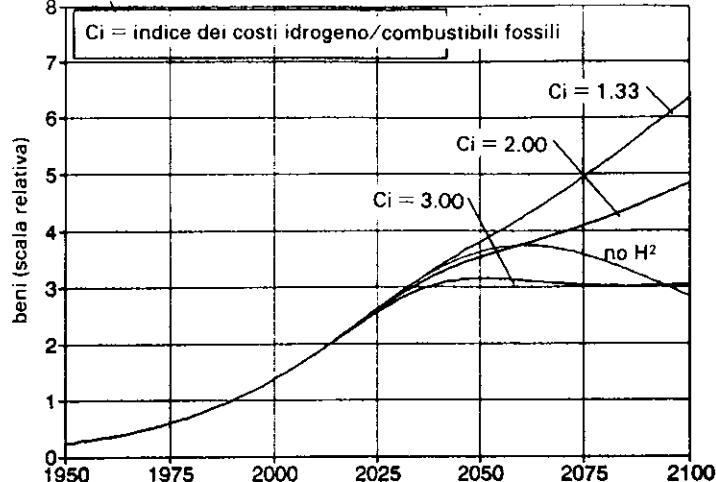


Fig. 13 - Effetti di differenti costi dell'idrogeno sui beni economici mondiali

basso livello dell'energia solare del passato al più alto livello dell'energia solare del futuro. Tale energia è stabilmente disponibile in una quantità che eccede i bisogni umani di parecchi ordini di grandezza.

Ogni sistema basato sull'utilizzazione di un flusso costante di energia in entrata deve raggiungere uno stadio di stabilità. Un'economia stabile è definita come un'economia con costanti stock di persone e prodotti, mantenuti a livelli di sufficienza accettabili, mediante i più bassi flussi possibili di materia ed energia. Se sviluppo economico significa ottenere più servizi per unità di materie impiegate, e la crescita economica è definita come incremento di servizi mediante l'incremento della dimensione degli stock, allora è chiaro che la stabilità economica costringerebbe infine lo sviluppo a pura crescita ma non lo ridurrebbe, e nei fatti, lo stimolerebbe (19). Il livello di stabilità che la civiltà umana può ottenere dipende dal grado di utilizzazione dell'energia solare disponibile e dagli sforzi richiesti per convertire l'energia solare in forme di energia più utili. Il sistema energetico a idrogeno solare è il sistema energetico ideale per una strategia favorevole allo sviluppo sostenibile futuro.

Le analisi basate sul modello descritto in quest'articolo hanno dimostrato che il sistema energetico a idrogeno solare potrebbe fornire gli stessi servizi qualitativi e quantitativi del sistema attuale fondato sui combustibili fossili. Poiché sarebbe basata su risorse rinnovabili e su fonti pulite di energia, l'economia dell'idrogeno solare non sarebbe soggetta a declino, come è il caso dell'economia fondata su combustibili suscettibili di esaurimento, la cui utilizzazione crea grandi turbative all'ambiente globale. Una transizione tempestiva al sistema energetico dell'idrogeno solare

fornirebbe benefici di lungo periodo all'economia e all'ambiente.

BIBLIOGRAFIA

1. J. O'M. BOCKRIS and T.N. VEZIROGLU
A Solar Hydrogen Economy for USA
Int. J. Hydrogen Energy, 8, 323-340 (1983)
2. J. O'M. BOCKRIS and T.N. VEZIROGLU
A Solar Hydrogen Energy System for Environmental Compatibility
Environmental Conservation, 12, 105-118 (1985)
3. F. BARBIR and T.N. VEZIROGLU
Solar Hydrogen Energy System: The Choice of the Future
Environmental Conservation, 18, 304-312 (1991)
4. F. BARBIR, H.J. PLASS, JR. and T.N. VEZIROGLU
Hydrogen and Electric Power Alternatives
presented at the AAAS Annual Meeting, Chicago (1992)
5. **Energy Statistic Yearbook 1989**
United Nations, New York, 1991
6. **Annual Energy Review 1990**
Energy Information Administration, Washington, D.C., (1991)
7. C. MARCHETTI
Primary Energy Substitution Models: On the Interaction between Energy and Society
Technol. Forecast. Soc. Change, 10, 345-356 (1977)
8. C. MARCHETTI
How to Solve the CO₂ Problem without Tears
Int. J. Hydrogen Energy, 14, 493-506 (1989)
9. C. MARCHETTI and N. NAKICENOVIC
The Dynamics of Energy Systems and the Logistic Substitution Model.
Research Report RR-79-13, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria (1979)
10. H.T. ODUM
Systems Ecology: An Introduction
John Wiley & Sons, New York (1983)
11. H.T. ODUM
Models for National, International, and Global Systems Policy

in L.C. Braat and W.F.J. van Lietrop (eds.)
Economic-Ecological Modeling
Elsevier Science Publishers Amsterdam, Holland (1987)

12. H.T. ODUM
Energy, Environment and Public Policy: A Guide to the Analysis of Systems
UNEP Regional Seas Report and Studies No. 95, United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya, (1988)
13. H.T. ODUM, E.C. ODUM, M.T. BROWN, D. LAHART, C. BERSOK and J. SENDZIMIR
Environmental Systems and Public Policy
Center for Wetlands, University of Florida, Gainesville, (1988)
14. H.T. ODUM
Simulation Models of Ecological Economics Developed with Energy Language Methods
Simulation, No. 8, pp. 69-75 (1989)
15. P.S. BODGER and J.T. BAINES
Dynamics of an Energy-Economic System Subject to an Energy Substitution Sequence
Energy Systems and Policy, 12, 167-178 (1988)
16. German Bundestag (ed.)
Protecting the Atmosphere: An international Challenge
German Bundestag, Publ. Sec., Bonn, Germany, (1989)
17. C.J. WINTER
Hydrogen and Solar Energy - Ultima Ratio Avoiding a "Lost Moment in the History of Energy" in
T.N. Veziroglu and P.K. Takahashi (eds.), *Hydrogen Energy Progress VIII*, Vol. 1, pp. 3-47, Pergamon Press, New York (1990)
18. M.K. HUBBERT
Survey of World Energy Resources
Can. Mining and Metallurgical Bull., 66, pp. 37-53, July (1973)
19. H.E. DALY
Steady State Economics
W.H. Freeman and Co. (1977)