

Sistemi energetici: dinamica ed evoluzione

Prof. Cesare Marchetti - IIASA (Int. Institute for Applied Systems Analysis) - Laxenburg - Austria

INTRODUZIONE

Un sistema energetico può essere definito come il complesso tessuto socio-economico che rende disponibile al consumatore finale, in forma adeguata, energia proveniente da una fonte primaria: legno, carbone, petrolio, gas naturale, idrica, nucleare, ecc. Si è usato di proposito il termine "socio-economico" poiché in esso il meccanismo di sviluppo prende forma.

Il punto di partenza per l'analisi della dinamica di un sistema energetico è estremamente semplice: l'introduzione del carbone o del petrolio al livello della società umana, o del sistema ferroviario inglese, o del cittadino di Roma, è un processo di apprendimento. I processi di apprendimento hanno, in generale, una dinamica temporale descrivibile mediante funzioni logistiche [1].

LA FUNZIONE LOGISTICA E LA DINAMICA DELLA SOSTITUZIONE

Il meccanismo di sostituzione di un vecchio con un nuovo modo di soddisfare ad una data necessità è stato oggetto di un gran numero di studi. Un dato osservato da tutti gli studi al riguardo è stato quello che tutti i processi di sostituzione binaria, espressi in termini frazionari, seguono caratteristiche curve a S che sono state usate per prevedere la successiva competizione fra due tecnologie o prodotti alternativi, e, infine, il sopravvento finale della nuova tecnologia o prodotto.

La maggioranza degli studi relativi ai meccanismi di sostituzione di una tecnologia con un'altra sono basati sull'uso della funzione logistica, del tipo:

$$\log \frac{F}{1-F} = at + b$$

dove t è la variabile indipendente, di solito rappresentante il tempo, a e b sono due costanti, e F è la frazione di mercato assorbita dal nuovo competitore, mentre $(1-F)$ è la frazione di mercato conservata dal vecchio. I coefficienti a e b sono sufficienti a descrivere l'intero processo di sostituzione: essi non possono essere

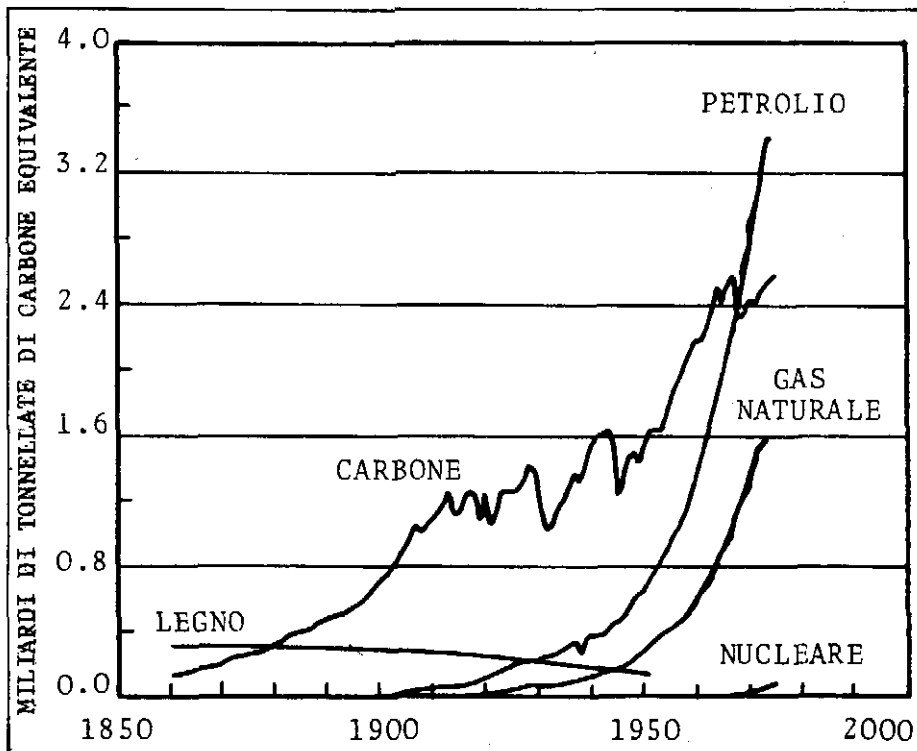


Fig. 1 - Consumo energetico totale nel mondo per fonte energetica primaria, in Tonnellate di Carbone Equivalente (TCE).

calcolati a priori, ma possono essere desunti dai dati storici dopo che la penetrazione ha raggiunto qualche percento del mercato.

IL SISTEMA ENERGETICO

Una peculiarità caratteristica dei sistemi energetici nel corso dell'ultimo secolo è quella di presentare allo stesso tempo più di due competitori che assorbono frazioni rilevanti del mercato. Per questa ragione, il semplice modello logistico utilizzato nel caso di due soli competitori deve essere modificato, in quanto il processo di sostituzione non è più logistico in tutte le sue fasi.

Lo sviluppo di ogni singola tecnologia passa attraverso tre distinte fasi di sostituzione: crescita, saturazione e declino. La fase di crescita è di tipo logistico, ma termina prima che sia avvenuta una completa sostituzione, ed è seguita prima da una fase di saturazione, che non è

logistica e che racchiude la fine della crescita e l'inizio del declino, e quindi da una fase di declino in cui la quota di mercato della tecnologia in oggetto procede nel suo declino in modo logistico. È ragionevole assumere che ad un dato tempo solo una tecnologia sia nella sua fase di saturazione, mentre le altre tecnologie perdono o acquistano quote di mercato secondo una legge logistica. Quando una data tecnologia ha terminato la fase di saturazione ed ha iniziato il declino secondo una legge logistica, la più vecchia delle successive tecnologie entra nella sua fase di saturazione ed il processo continua fino a quando tutte le tecnologie, ad eccezione dell'ultima, sono nella loro fase di declino.

Un sistema opportunamente organizzato di funzioni logistiche può essere impiegato per la descrizione del meccanismo di sostituzione tra le fonti di energia primaria nel mondo.

I dati storici relativi al consumo di carbone, petrolio, gas naturale ed energia nucleare dal 1860 al 1974 sono ricavati dal-

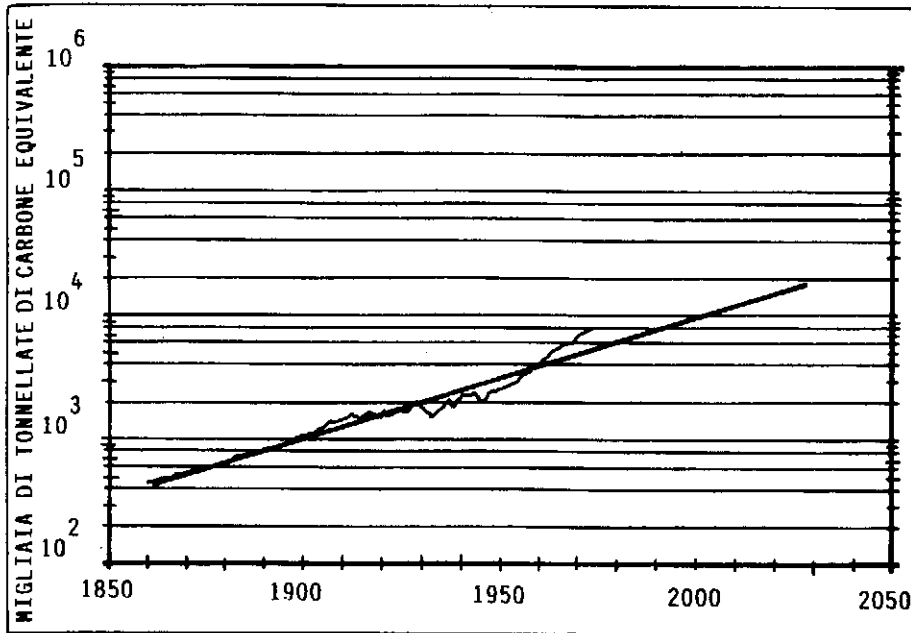


Fig. 2 - Consumo totale di energia nel mondo, in TCE.

la [2] e i dati relativi al consumo del legno come combustibile sono ricavati dalla [3]. Anche se i dati relativi al consumo del legno come combustibile negli anni successivi al 1950 non sono disponibili, eventuali errori introdotti sono piccoli poiché l'impiego del legno in questo periodo costituisce una piccola frazione del consumo totale di energia. Tutte le fonti di energia sono state espresse in TCE (Tonnellate Equivalenti di Carbone: $1 \text{ TCE} = 7 \cdot 10^8 \text{ kcal}$), e i relativi consumi sono riportati nella Fig. 1. L'incremento di energia totale consumata nel mondo (Fig. 2) è circa costante fino alla seconda guerra mondiale, con un tasso di crescita del 2,2% all'anno. Dopo il 1950 si nota un aumento del tasso di crescita che non solo fa riassorbire le perdite connesse al periodo della grande recessione del 1930, ma fa sopravanzare la curva reale rispetto a quella media storica. Ciò può essere causato dall'incremento del tasso di crescita della popolazione dopo la guerra; è comunque prevedibile un riassestamento del tasso di incremento di energia sulla linea media in seguito all'aumento del costo dell'energia.

Il contributo delle varie fonti di energia primaria espresso in termini di frazione del mercato totale di energia coperto da una singola fonte è rappresentato nella Fig. 3. Le curve di interpolazione sono essenzialmente funzioni logistiche come prima descritto: esse forniscono perfettamente l'andamento dei dati storici. È interessante osservare che curve molto vicine a quelle reali possono essere ricavate basandosi su un periodo corto di dati. Partendo dai dati storici compresi nel periodo 1900-1920 e usandoli per ricavare le funzioni logistiche, si ottiene il grafico di Fig. 4.

Come si può vedere, pur estraendo informazioni solo da un periodo di 20 anni, le curve rappresentano con notevole precisione l'andamento relativo a 150 anni. Poiché queste previsioni, basate

sul periodo 1900-1920, non potevano prevedere l'introduzione di una nuova fonte di energia primaria, l'energia nucleare non appare in queste proiezioni. Tuttavia l'assenza della fonte nucleare non porta alcuna conseguenza in un periodo di 50 anni successivo al 1920. Quale controprova di previsioni basate su pochi dati storici sono state ricavate le funzioni logistiche basandosi sui dati relativi agli anni successivi alla seconda guerra mondiale, anni che a molte persone piace considerare rivoluzionari e diversi dal passato, e sono state fatte proiezioni all'indietro ottenendo gli stessi precisi risultati.

Per ciò che riguarda gli anni futuri, nel grafico di Fig. 3 sono state contemplate due forme di energia per le quali non è stato possibile un completo adattamento

dei parametri. Per l'energia nucleare il livello di penetrazione attuale è ancora troppo piccolo per poter prevedere esattamente la velocità di penetrazione nel mercato energetico.

Per questa ragione, sulla base delle velocità storiche di penetrazione per il petrolio ed il gas naturale, è stato assunto un valore prudenziale di solo il 6% di frazione del mercato mondiale nell'anno 2000, anche se stime più ottimistiche lasciano prevedere il 10%. Per l'energia solare o per l'energia proveniente dal processo di fusione controllata (SOLFUS), qualunque di queste due forme di energia sarà economicamente disponibile, lo scenario è completamente ipotetico. È stato assunto come anno di inizio della penetrazione nel mercato (1% di penetrazione) il 2000, anche se una serie di considerazioni fa ritenere il 2025 come l'anno più probabile di inizio della penetrazione nel mercato. Inoltre, poiché la velocità di penetrazione per carbone, petrolio e gas naturale è stata approssimativamente la stessa, è stata assunta la stessa velocità di penetrazione anche per SOLFUS.

DINAMICA DEL SISTEMA ENERGETICO MONDIALE

La prima conseguenza insita nei risultati diagrammati nella Fig. 3 è quella di ridimensionare lo shock del petrolio. Una manipolazione oligopolistica del mercato del petrolio non può essere di certo più dirompente per l'evoluzione del sistema energetico mondiale della prima o della seconda guerra mondiale o della grande depressione: eppure nessuno di questi tre avvenimenti ha lasciato una traccia permanente nell'evoluzione se-

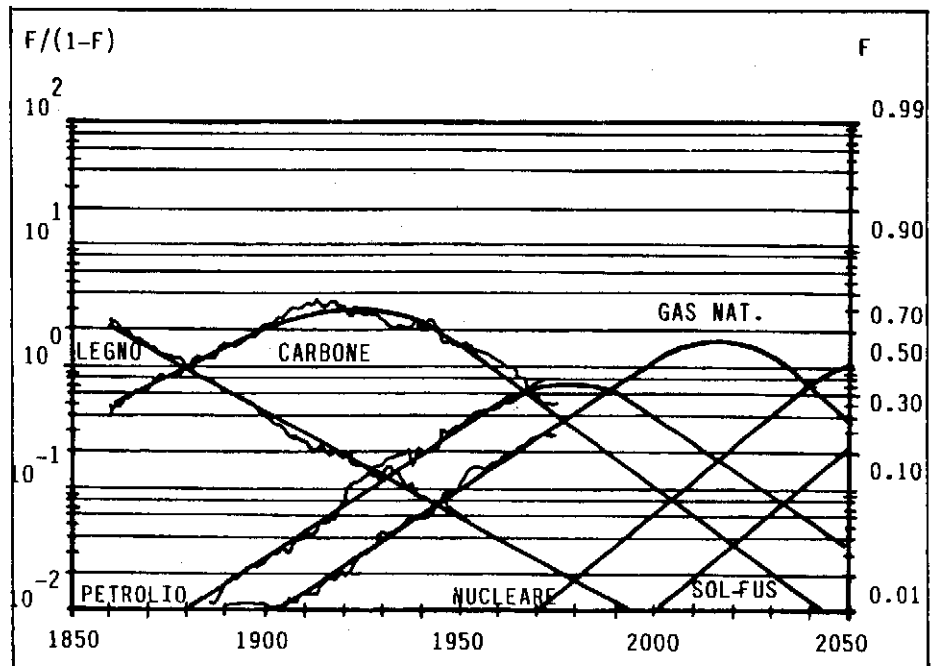


Fig. 3 - Sostituzione delle fonti di energia primaria, F = frazione di mercato.

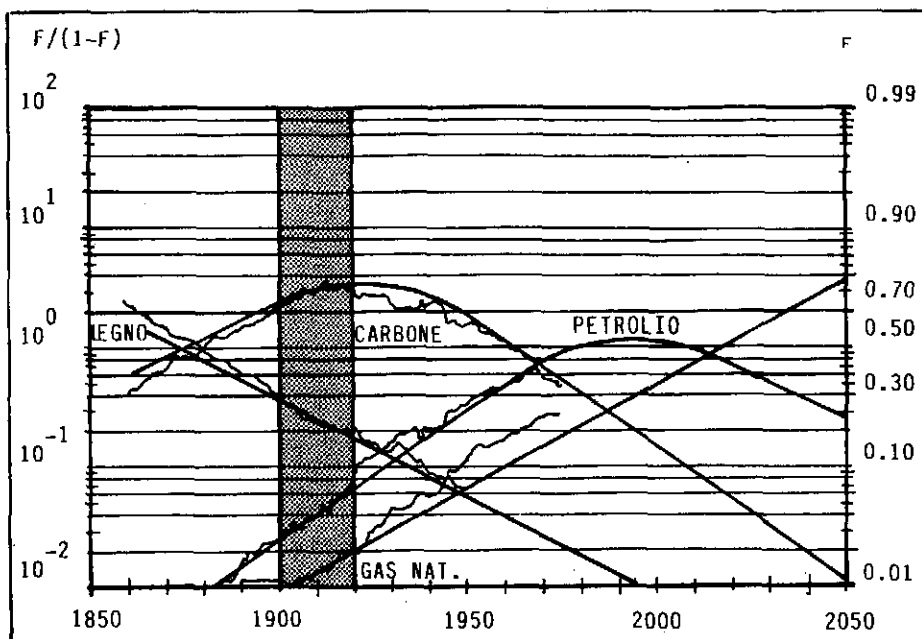


Fig. 4 - Sostituzione delle fonti di energia primaria (curve di interpolazione basate su dati relativi al periodo 1900-1920).

colare del sistema energetico mondiale. Inoltre, l'evoluzione del sistema energetico non ha mutato di rapidità dopo la seconda guerra mondiale per cui le previsioni per i prossimi 50 anni possono essere ritenute sufficientemente valide. Il diagramma della Fig. 3 mostra la crescita e la diminuzione delle varie fonti di energia primaria nel bilancio energetico ed è naturale chiedersi quali siano le cause del fenomeno. La parola d'ordine attuale è "esaurimento" - è questo un termine che presenta il vantaggio di essere di immediata comprensione: se la bottiglia di champagne è vuota, beviamo acqua minerale. Il termine "esaurimento" non ha però alcuna relazione coi fatti. Il petrolio sarebbe molto meno importante di quello che è se, per qualche ragione, dovesse essere trasportato sul dorso dei cammelli. La produzione primaria di legno da parte delle foreste mondiali possiede un contenuto energetico, in ordine di grandezza superiore a quello del consumo energetico mondiale; ma la tecnologia del trasporto sul dorso dei muli, al quale è legato il suo sfruttamento, relega il legno (oggi detto biomassa) a un ruolo molto secondario. Anche la diminuzione del ruolo del carbone nella produzione di energia primaria, iniziata negli anni venti, ben difficilmente può essere ascritta a una carenza di risorse.

È in genere difficile far assimilare questi concetti a persone abituate all'idea molto più semplice del serbatoio vuoto, per le quali è difficile pensare ad una situazione in cui non si abbia benzina disponibile quando il serbatoio non è ancora vuoto. Per meglio rendersi conto della realtà di questa situazione è utile ricorrere ad un esempio. Il trasporto su strada delle merci ha progressivamente sostituito il trasporto su rotaia nel corso degli ultimi 50 anni. Considerando la capacità del sistema ferroviario come una risorsa,

sa, si assiste ad una costante diminuzione del suo impiego nonostante che, sulla carta, il trasporto su rotaia sia molto più economico e il suo potenziale sia così grande. Il fatto è che, per ragioni storiche che tendono a ripetersi, le organizzazioni ferroviarie hanno progressivamente perso contatto col mondo esterno, prima a causa dell'insolenza che naturalmente deriva da una posizione monopolistica, poi a causa della negligenza indotta dalla apparente stabilità di un sistema che non può crescere e che invece lentamente degrada. Anche il petrolio può così porsi da solo al di fuori del mercato, ad esempio attraverso una insolente manipolazione dei prezzi o ignorando ogni forma di evoluzione.

Ciò che chiaramente risulta dal diagramma della Fig. 3 è la crescente importanza del gas naturale nel corso dei prossimi 50 anni. La principale causa di ciò va probabilmente ricercata nella implosione della popolazione nelle città, fenomeno questo diffuso a livello mondiale. Quando la densità spaziale di popolazione raggiunge un certo livello, la distribuzione mediante una rete diventa più vantaggiosa della distribuzione a punti e nel tempo la elimina completamente. Il consumo energetico diventa quindi principalmente concentrato nelle città e il gas è il solo combustibile perfettamente adatto alla distribuzione mediante una rete. È questo un fenomeno in corso in tutto il mondo. Come è stato osservato da W. Hafele e W. Sassin della IASA [4], il consumo spaziale di energia in una città è quasi indipendente dal livello di sviluppo dello stato al quale la città appartiene, poiché densità di popolazione maggiori compensano consumi unitari minori.

Una rituale domanda a questo punto è: "dove verrà trovato tutto questo gas naturale?", e la rituale risposta di chi scrive è: "sotto terra". Il gas naturale è ritrovato

più frequentemente in bacini profondi che, per ragioni economiche, sono stati meno esplorati e utilizzati. Le nuove tecnologie per l'utilizzazione dei bacini profondi sono pronte a livello di laboratorio e faranno sentire il loro impatto nel corso dei prossimi 20 anni [5]. Il gas naturale verrà seguito dall'energia nucleare, che ha già il suo piede nella porta e, quale risultato, il gas naturale incomincerà a ridurre la sua quota di mercato verso il 2010-2020 (Fig. 3).

Quando una tecnologia raggiunge il punto di saturazione vi sono cambiamenti rilevanti nei prezzi. Il costo del carbone americano raddoppiò improvvisamente verso il 1920 quando era al massimo della curva di penetrazione, e altrettanto fece il petrolio nel 1973 quando quadruplicò il suo prezzo. In base a questi dati storici si è portati ad affermare che un analogo sussulto nei prezzi del gas naturale si verificherà attorno al 2030.

L'energia nucleare non è ancora penetrata sufficientemente nel mercato per poter determinare con esattezza la sua rapidità di penetrazione in esso. In base alla previsione prudenziale di una frazione di mercato pari al 6% nel 2000, si ottiene che l'energia nucleare avrà una posizione dominante verso il 2050. Se si guarda dunque a lunga scadenza, allora si constata che l'energia nucleare fornisce una base più sicura del gas naturale. Una seconda domanda rituale è "quale sarà la sorte del carbone?".

Il carbone, nel classico modo di utilizzo, è chiaramente sulla via del tramonto e tutto il rumore fatto negli ultimi quindici anni relativamente al suo reimpiego non sembra aver lasciato il minimo segno sulla sua evoluzione nel mercato energetico. Il modello logistico però non prevede lo sviluppo di una nuova tecnologia che è un ingresso esterno al modello; conseguentemente è teoricamente sempre possibile che si sviluppi una nuova tecnologia basata sul carbone, anche se non se ne vede ancora il segno. La possibilità di sviluppo di una nuova tecnologia non può d'altra parte essere esclusa a priori. Dal punto di vista termodinamico è infatti possibile trasformare carbone in benzene, se solo fosse disponibile il giusto catalizzatore, o carbone e acqua in metano e anidride carbonica, nelle stesse condizioni, unicamente mescolando e agitando. Ciò che il modello logistico però afferma chiaramente è che se questa nuova tecnologia è introdotta su larga scala nel 2000, essa diventerà dominante non prima del 2100.

DINAMICA DEI SISTEMI ENERGETICI PARZIALI

I risultati dell'analisi logistica ora presentati si riferiscono al sistema energetico mondiale. Se si considerano i sistemi energetici parziali, costituiti dal mercato energetico di uno o più paesi, si notano

certe differenze rispetto al sistema energetico mondiale, causate da situazioni particolari locali (ad esempio: importanza dell'energia idroelettrica in paesi come l'Austria o la Norvegia) o da costanti di tempo diverse.

L'analisi logistica applicata al mercato energetico dei paesi europei aderenti all'OCDE* fornisce il diagramma riportato nella Fig. 5. Da questo diagramma si deducono due fatti. Il primo è che il gas naturale, con una rapidità di penetrazione nel mercato molto simile a quella del petrolio, appare la fonte primaria di energia nel 2000 riducendo il petrolio ad un livello del 10%. Il secondo è che l'energia nucleare, se non muterà il tasso di crescita, raggiungerà solo il 10% del mercato energetico nel 2000 lasciando l'Europa ancora completamente dipendente dagli idrocarburi, fondamentalmente metano.

Per gli Stati Uniti l'analisi logistica fornisce le curve riportate nella Fig. 6. È interessante notare che il raddoppio del prezzo del carbone americano nel 1920 ha portato a una immediata diminuzione del suo consumo, ma che dopo circa 20 anni, nel 1940, la curva effettiva si è portata di nuovo in corrispondenza della curva logistica; il sistema ha quindi riassorbito la perturbazione e ripreso il suo cammino secolare!

Contrariamente a tutte le altre previsioni, il gas naturale appare la fonte di energia predominante per i prossimi 50 anni, ciò che conduce direttamente alla domanda se gli Stati Uniti importeranno più gas naturale sotto forma di gas liqui-

* Austria, Belgio, Danimarca, Finlandia, Francia, Germania Occidentale, Grecia, Irlanda, Islanda, Italia, Lussemburgo, Norvegia, Paesi Bassi, Portogallo, Spagna, Svezia, Svizzera.

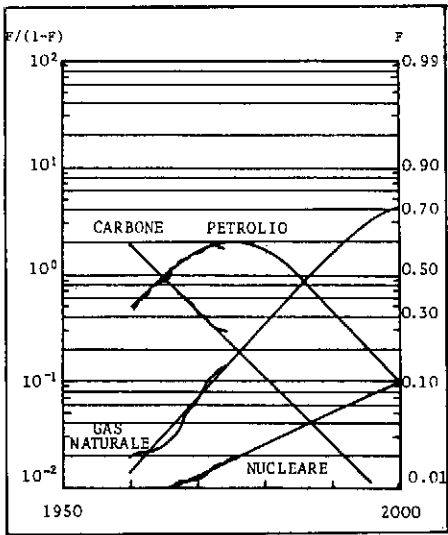


Fig. 5 - Sostituzione delle fonti di energia primaria per paesi europei dell'OCDE, F = frazione di mercato.

do, o se aumenteranno le loro importazioni da Canada e Messico, o se saranno sfruttati i giacimenti meno facilmente accessibili, ipotesi la più probabile visto il recente successo delle perforazioni al di sotto di 5000 metri, in varie parti degli USA. La frazione di mercato energetico assorbita dall'energia nucleare negli Stati Uniti era del 3% nel 1974 e del 5% nel 1977, questi dati non sono però sufficienti per determinare la rapidità di penetrazione a lungo termine dell'energia nucleare. Basandosi sugli impianti attualmente in costruzione e su quelli previsti per entrata in funzione prima del 1990, l'energia nucleare dovrebbe raggiungere per il 1990 una quota del 15% del mercato energetico. Nel diagramma della Fig. 6 è però stato considerato un

valore prudenziale del 10% nel 2000. Nel diagramma della Fig. 6 è stata inclusa una energia alternativa futura (Solare o Fusione) che entra nel mercato nel 1990 con la stessa rapidità di penetrazione dell'energia nucleare. Non vi è alcuna base logica per questa assunzione eccetto che i "solari" apparivano tristissimi se le date venivano spostate dopo il 2000. L'unica considerazione sicura è che tale fonte alternativa, qualunque essa sia, non potrà raggiungere una frazione dell'1% del mercato prima del 1990.

CONCLUSIONI

Le principali previsioni fornite dal modello logistico qui presentato, che differiscono dalle previsioni correnti sul futuro del mercato energetico sono le seguenti:

- Una scomparsa relativamente rapida del carbone come fonte di energia primaria.
- Un ruolo molto importante del gas naturale nei prossimi 50 anni.
- Un ruolo trascurabile nei prossimi 50 anni per qualunque fonte di energia alternativa, quale energia geotermica, energia solare, fusione, a causa delle lunghe costanti di tempo intrinseche nel sistema energetico.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Marchetti C. Nakicenovic N.: "The Dynamics of Energy Systems and the Logistic Substitution Model", RR-79-13, Dicembre 1979, IIASA.
- [2] Schilling H.D., Hildebrandt R.: "Primärenergie" - Elektrische Energie, Die Entwicklung des Verbrauchs an Primärenergieträgern und an Elektrischer Energie in der Welt, In den USA und in Deutschland seit 1860 bzw. 1925. Verlag Glückauf, Essen, 1977.
- [3] Putnam P.C.: "Energy in the Future" - Van Nostrand, New York, 1953.
- [4] Hafele W., Sassin W.: "The Global Energy System", Am. Rev. Energy, 1977, 2 : 1-30.
- [5] Meyer R.F. ed.: "The Future Supply of Nature - Made Petroleum and Gas", Pergamon Press, 1977.
- [6] Peterka V.: "Macrodynamics of Technological Change: Market Penetration by New Technologies" RR-77-22, Novembre 1977, IIASA.
- [7] Marchetti C.: "The Evolutions of the Energy Systems and the Aircraft Industry", Chemical Economy & Engineering Review, Maggio 1980, vol.12, No 5 (No 138), pp. 7-13.
- [8] Marchetti C.: "On Energy and Agriculture: From Hunting-Gathering to Landless Farming", RR-79-10, Dicembre 1979, IIASA.

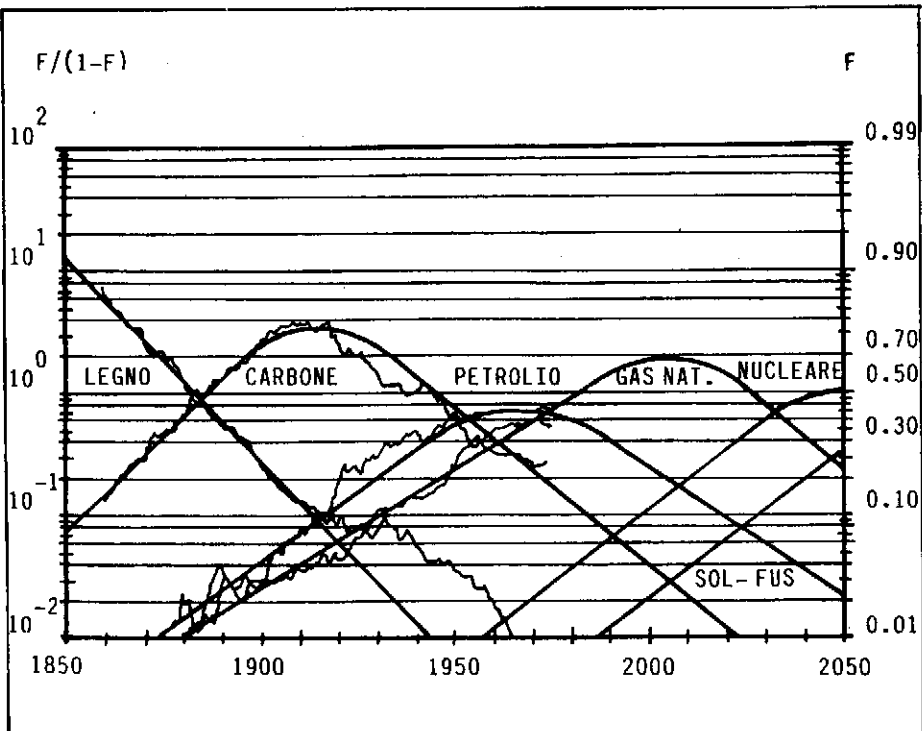


Fig. 6 - Sostituzione delle fonti di energia primaria per gli Stati Uniti, F = frazione di mercato.

