



Ente Nazionale per l'Energia elettrica  
Editore  
00198 - Roma, Via G. B. Martin, 3

Ermene Giorgio Tamberlani  
Direttore responsabile

Gennaio-Febbraio 1987

ENERGIA NUCLEARE

MARCHETTI-18

# QUALE FUTURO PER QUESTA TECNOLOGIA?

**L'energia nucleare da fissione aumenterà la sua penetrazione fino al momento in cui interverrà la produzione di energia da fusione. Le stime più prudenti prevedono come data più probabile il 2050**

**di Cesare Marchetti**

International Institute for Applied Systems Analysis Laxenburg - Austria

L'energia nucleare, fin dal suo apparire, ha messo in moto molta logica e molta adrenalina. Al momento le nebbie di adrenalina sono così dense che la logica non si intravede quasi più. Vista in prospettiva storica la cosa non meraviglia e non è da considerarsi malsana. L'imperativo categorico di ogni essere vivente è la sopravvivenza. Un animale assaggia con grande cautela un nuovo cibo, e questo varie volte a distanza di tempo, prima di nutrirsi regolarmente. Così la nostra società è estremamente attenta nell'accettare delle nuove idee e delle nuove tecnologie.

Rileggendo la storia dell'introduzione del treno a vapore, o dell'auto o dell'elettricità, c'è da sfasciarsi dalle risa, nel ripescare le analogie, tra di loro e con il caso dell'energia nucleare. Non solo

nelle grandi linee, ma anche in numerosi e succosi dettagli che rivelano la sostanziale unità del meccanismo.

Il concetto di base è nell'autoterrorizzarsi (la cautela dell'animale). Entrano allora in scena, bambini emaciati e moribondi, donne incinte, virilità minacciate, animali selvatici e domestici in fuga, fuoco, puzza di zolfo, nubi nere e piogge velenose. Detto così in tono un po' cinico, sembra tutto medioevo. Lo è. D'altronde l'uomo non sembra molto cambiato negli ultimi centomila anni, ed il fatto che tutto sommato sia molto ben sopravvissuto, induce a guardare queste medievalità con molta attenzione e rispetto.

La conseguenza di questo stato ansioso, è l'analisi emotiva e attentissima di ogni minuscolo dettaglio e il fantasticare su tutte le possibili conseguenze ne-

gative. I fatti che in altro contesto verrebbero considerati irrilevanti, assumono allora risonanze straordinarie. Il ronzio dei fili del telegrafo, mossi dal vento portarono nel passato, infinite lamentele da parte dei contadini, le cui mucche di conseguenza, smettevano di fare latte. Come se l'universo non fosse pieno di ronzii.

Col tempo si acquisisce un'esperienza sui vantaggi, svantaggi e neutralità della nuova tecnologia (o delle nuove idee) che viene così assimilata o respinta. Questo naturalmente non significa che la nuova tecnologia abbia solo dei vantaggi. L'uso dell'automobile comportò circa 200 mila morti all'anno, a livello mondiale, e dieci volte tanto feriti e malconciati. Evidentemente questo pro-zo vale la pena.

Che la cosa non dipenda da mera as-

...azione, ma discende da un preciso, anziché da un esiguo, calcolo. Il fatto è benefico. Lo si vede dal fatto che in tutte le società occidentali, i morti da incidente automobilistico, ammontano a 25 per centomila persone per anno, con grande stabilità, ed indipendentemente dal crescere del numero di auto (Figura 1a, 1b). Le oscillazioni sono così piccole che è inevitabile ammettere un *feedback* regolatorio da parte della società. Questo significa che la società, fatti i suoi conti interni è pronta a pagare la sua libbra di carne. Non di più. Tutta questa premessa serve a introdurre il concetto che questi grandi sistemi sono grandi bestie, altamente regolate e strettamente contestuali. Per farsene un'idea bisogna, con l'occhio alto dell'aquila *vederle nel loro insieme e nel loro ambiente*. Per fare questo bisogna muovere un lungo passo indietro e vedere come le tecnologie in generale e le fonti energetiche primarie si sono inserite nel tessuto economico e sociale delle società occidentali. Di lì trarre gli insegnamenti sui tempi ed i meccanismi che ci permetteranno di prognosticare. Il «ciclo di prodotto» del carbone, del petrolio essendo di due-trecento anni, conviene prendere questo tempo come base storica per guardare anche al nucleare negli stessi termini. Il modello matematico per fare queste

### WHAT SORT OF FUTURE FOR NUCLEAR ENERGY TECHNOLOGY?

*Fission derived nuclear energy will probably still be with us well into the 22nd century, accounting for between 65-70% of our primary energy requirements. The situation will then gradually modify as fusion picks up and begins to contribute the lion's share to electricity production until the time when fission will account for as little as 1% of production in about the year 2250. Talking about these appointments with the future as if they were only just around the corner often leads to loss of chronological perspective. Just by looking at progress over the last 200 years, however, one is brought back to reality by the sure-fire fact that these processes require time — lots of it. And those two hundred years ahead of us are no closer to us than the 200 years that lay behind us.*

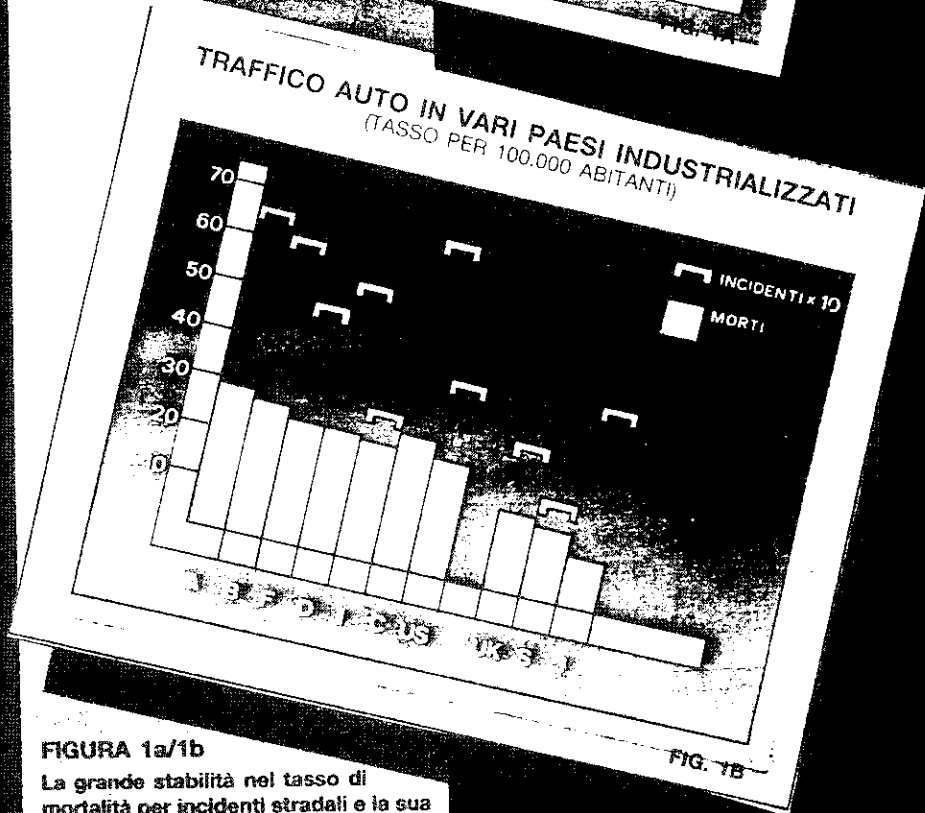
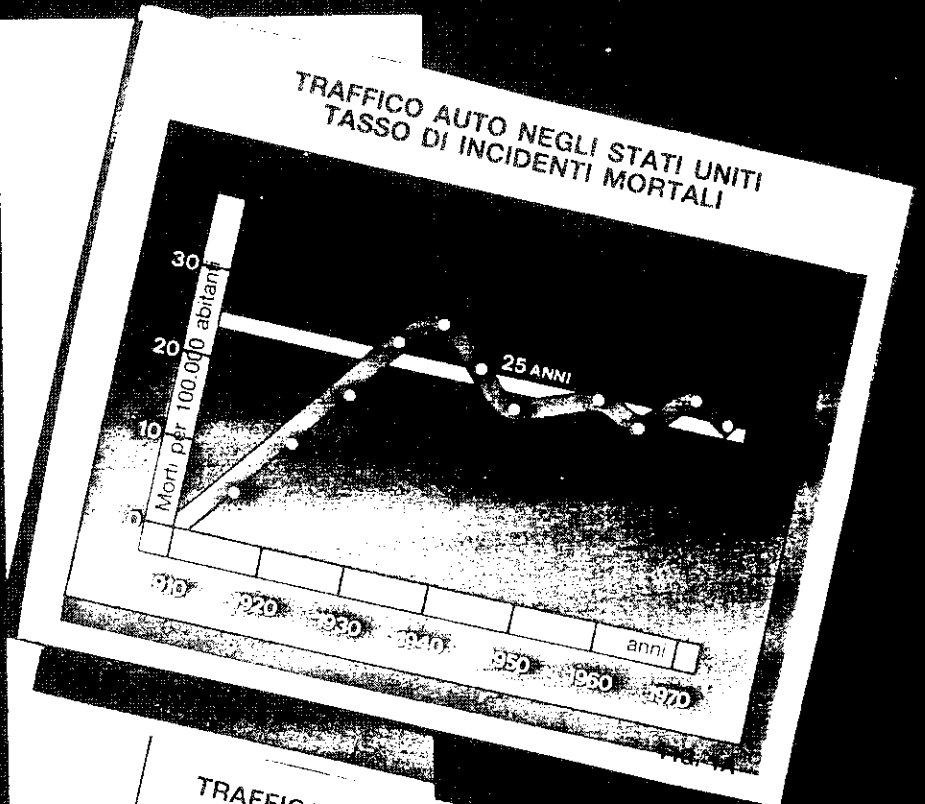


FIGURA 1a/1b

La grande stabilità nel tasso di mortalità per incidenti stradali e la sua indipendenza dalle intensità del traffico mostrano un potente autocontrollo delle società. È inoltre rimarchevole, che lo stesso tasso di mortalità si ritrovi nei vari paesi industrializzati, malgrado tutte le differenze che li contraddistinguono.

Nella fig. 1b i dati si riferiscono al 1975 e a qualche paese. La maggior parte di essi sembra che sia correlata al valore "magico" di 25. Inghilterra (UK), Svezia e Giappone sono una curiosa e inspiegabile eccezione.

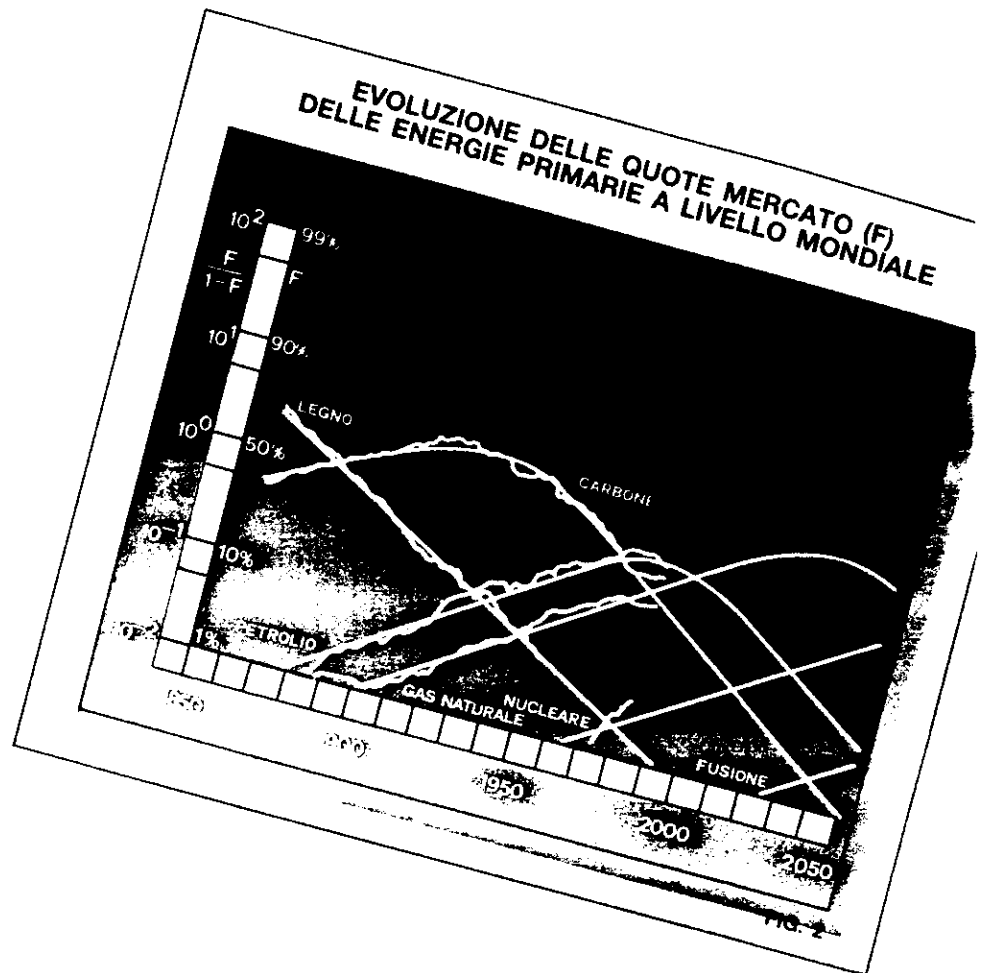
analisi è quello solito della competizione darviniana, che ho usato anche per gli articoli precedenti in questa rivista. Anche alcuni grafici riappariranno perché fanno inevitabilmente da sfondo ogni volta che si vuol trattare la dinamica dei sistemi energetici. Userò anche esempi tratti dal mondo o da altre nazioni, per evitare che la razionalità del lettore italiano sia turbata dalle passioni di parte che sembrano oggi infierire.

Detto questo, partiamo dal caso della competizione tra le fonti energetiche primarie espressa come dinamica delle quote di mercato (Figura 2). Il periodo coperto va dal 1860 al 1982. Dati precedenti al 1860 sono difficili da mettere insieme, si possono però fare delle verifiche su qualche punto per controllare che le equazioni portanti descrivano anche i fatti precedenti.

Nel grafico, le linee spezzate rappresentano le quote di mercato ricavate dalle statistiche, e quelle lisce le equazioni della competizione darviniana (Volterra-Lotka). Queste quote di mercato sono espresse qui come rapporti tra quote (ciascuno contro gli altri), sia per ragioni di formalismo matematico, sia perché i rapporti sono spesso più significativi, in senso fisico, che i valori assoluti o percentuali.

Si vede dal grafico che una fonte energetica entra nel mercato, lo conquista, poi, sotto la pressione dei concorrenti più giovani, cioè delle fonti entrate più tardi nel gioco, comincia a perder quota e finalmente a scomparire. In fase quasi fuori c'è ora solo il legno. Pur essendo essenziale come combustibile in molti paesi del mondo, questi paesi sono poveri e consumano poco in paragone ai 10 TW circa (10 miliardi all'anno di tonn. di carbone equivalente) che l'umanità oggi consuma. Il carbone ha raggiunto il suo apice negli anni venti, ed il petrolio in questi anni. Ambedue sono in fase di perdita di quota di mercato. Il metano invece è ancora in fase di espansione, e lo resterà per una cinquantina di anni.

Proiettando le equazioni all'indietro ed in avanti nel tempo si può costruire il «ciclo di prodotto» completo per una fonte primaria. Quello del carbone comincia circa nel 1750 (1% quota di mercato) e finirà nel 2050 (1% quota di mercato). Tutto questo a livello mondiale. Ogni sottosistema ha le sue equazioni e può seguire corsi diversi. Così come per il legno oggi, può darsi benissimo che ci siano paesi completamente dipendenti dal carbone anche nel 2050. Purché consumino poco in termini mondiali.



**FIGURA 2**

In questo grafico è riportata la storia della sostituzione delle fonti primarie, rappresentata come frazione di mercato (F) presa da ciascuna di esse, nel tempo.

La loro grande stabilità nel tempo è una ragione per usarle in modo predittivo, avanti e indietro nel tempo. Per ogni fonte primaria, si può così costruire un «ciclo di prodotto».

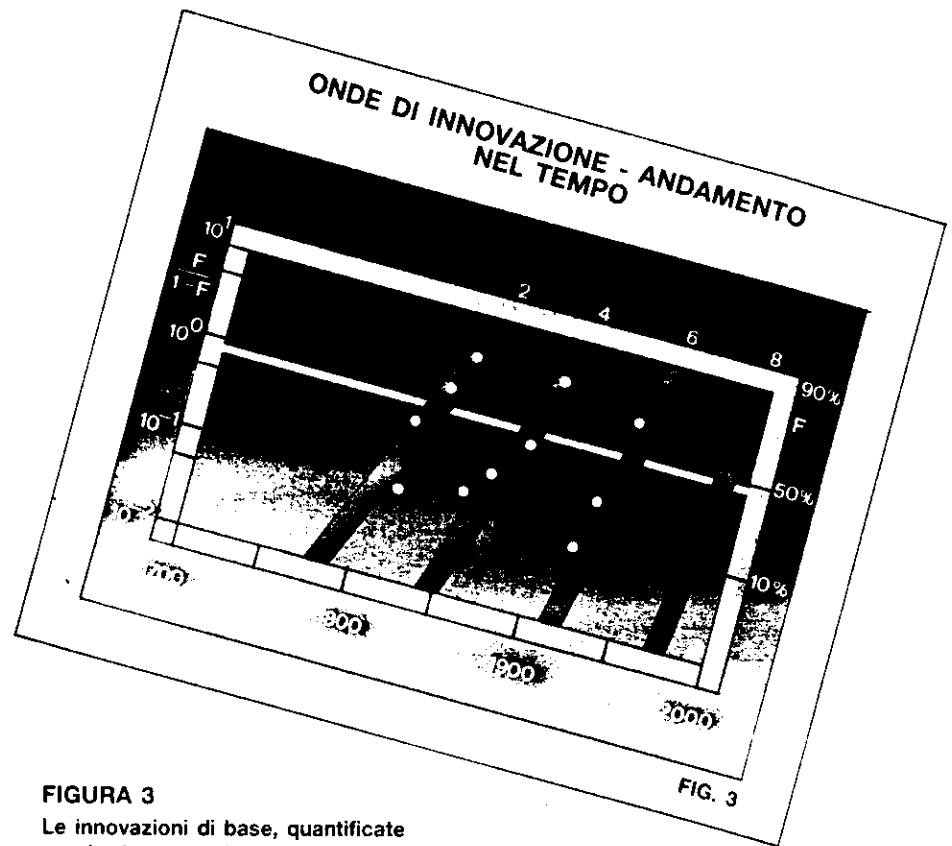
Le equazioni hanno due soli parametri ciascuno e per costruire la vita completa di un prodotto, basta avere il punto d'entrata e la pendenza della sua curva di penetrazione nonché quelli del concorrente che lo farà fuori entrando successivamente sul mercato. Queste pendenze hanno un'aria di famiglia nel senso che ogni concorrente successivo ha una penetrazione un po' più rapida, e le serie sono molto regolari.

Per il nucleare il punto di attacco è il 1972, quando la produzione di calore nucleare (la forma primaria), raggiunse circa l'1% dell'input primario energetico a livello mondiale. La pendenza non è però «corretta» perché, contrariamente alle altre fonti primarie, non deve scavarsi una rete di distribuzione, ma vende già direttamente all'ingrosso verso il sistema elettrico. Un caso analogo è dato dal metano, quando è entrato in paesi come la Germania e l'Inghilterra dove esistevano già estese reti per la distribuzione del gas (di città o di altoforno).

Questo significa che una volta presi i posti buoni con i clienti privilegiati, l'industria nucleare dovrà scavar le sue linee di distribuzione. Presumibilmente

producendo e vendendo idrogeno, ma non entrerà in questo argomento. L'importante è che, come nel caso del metano, la curva di penetrazione prenda la pendenza appropriata, i soliti cento anni, necessari per andare dall'1% del mercato al 50% (la costante di tempo!). L'unico elemento che ora ci manca per il calcolo è il «punto d'attacco» del concorrente. Prevedere quando nel futuro una nuova fonte energetica entrerà nel mercato può parer cosa da magia. Ma non lo è perché il nostro sistema è altamente regolato con strutture stabili a lungo termine. Un esempio lampante è dato dal grafico della Figura 2, dove la sostituzione delle fonti appare come un processo di assoluta stabilità per più di cento anni.

Per calcolare questo punto di attacco, bisogna fare un salto concettuale che richiede un certo coraggio. Una popolazione di oggetti, come le auto ad esempio, segue leggi darviniane sia nel suo sviluppo numerico che nella competizione-sostituzione con i cavalli, all'inizio del secolo. L'automobile può anche essere vista come un'innovazione tecnologica. Una volta fatta questa condensazione concettuale nei vari campi, si ottiene una nuova popolazione, quella delle innovazioni tecnologiche. Anche questa popolazione si comporta in maniera darviniana, ad esempio crescendo con impulsi di tipo malthusiano, cioè di

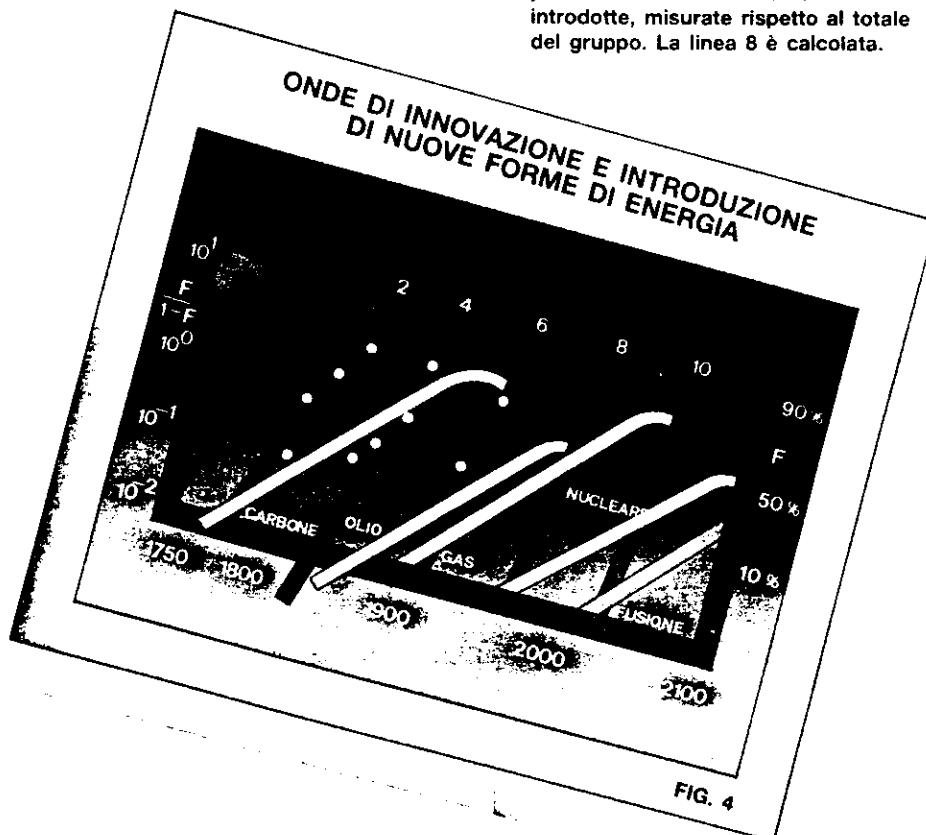


**FIGURA 3**  
Le innovazioni di base, quantificate con la data quando la prima vendita commerciale fu effettuata, si raggruppano in ondate e ciascuna ondata può essere analizzata come una "popolazione" crescente di innovazioni. Per ciascun momento viene riportato sul grafico la percentuale delle innovazioni introdotte, misurate rispetto al totale del gruppo. La linea 8 è calcolata.

una popolazione che cresce logicamente fino a saturazione.

Se si prendono le date di lancio commerciale delle innovazioni di base prodotte negli ultimi due secoli, si vede che il loro numero cumulativo, si organizza in impulsi di popolazioni malthusiane, riportato nella Figura 3 (prime tre linee con dati). L'estrema regolarità del processo permette di calcolare gli impulsi successivi e due di questi sono riportati in Figura 3 (linee senza punti-dati). Un particolare importante, che si ritrova in molti altri processi esaminati sul lungo termine, è la spaziatura di queste ondate innovative; misurata tra i loro punti centrali, è di circa 55 anni.

Una cosa che si correla piuttosto bene, è il lancio di nuove fonti energetiche. Una fonte di energia primaria può essere considerata come una tecnologia. Un paniere di tecnologia condensato in un



**FIGURA 4**  
Sovrapponendo al grafico di fig. 3 spezzoni delle fasi crescenti del grafico fig. 2, si scopre che ogni fonte energetica primaria, "parte", con un'ondata di innovazioni.

concetto. Dovrebbe dunque far parte del gioco delle ondate. La correlazione è mostrata in Figura 4 dove alle ondate innovative sono sovrapposti gli spezzoni di penetrazione delle energie primarie estratti dal grafico della Figura 2. La sovrapposizione è possibile perché le coordinate entro cui presento queste dinamiche sono normalizzate.

Appare evidente che ogni ondata innovativa contiene in partenza una nuova fonte energetica. L'ondata innovativa centrata nel 1992 è la nostra, e ho dovuto calcolarla perché i dati mi verranno solo col successo, provato dall'esistenza di una industria, che potrò verificare solo dopo il 2000. A questa ondata è associata in perfetta posizione l'energia nucleare. Dovrei anche aggiungere, che nelle centinaia di casi esaminati, quando una innovazione è arrivata a qualche percento del mercato non viene più riassorbita, ma esce dal mercato solo per l'azione di un concorrente entrato più tardi.

Avendo in mano l'algoritmo, si può calcolare l'ondata innovativa seguente e così avere un punto di riferimento per la nascita di una nuova fonte primaria. La data sarebbe intorno al 2024, quando questa fonte dovrebbe coprire circa l'1% della domanda energetica. Se si fa l'ipotesi che questa fonte sia la fusione, i conti «su strada» tornano abbastanza bene. Break-even verso la fine del secolo, dimostrazione intorno al 2005, prima centrale di potenza 2010-2015, e verso il 2020 costruzione di alcune centrali commerciali.

Anche a questa nuova fonte si può dare la costante di tempo di penetrazione di circa cento anni, che rappresenta il *business as usual*. Siamo così pronti per tracciare una curva di vita di prodotto per l'energia nucleare di fissione (Figura 5). Si tratta di un'analisi a maglia larga, naturalmente, ma che permette di vedere l'animale tutto insieme. Si tratta di un animale molto grosso, ed i paurosi faranno bene a non leggere il seguito. Il nucleare da fissione dovrebbe dunque penetrare fino a circa il 2100, quando coprirebbe tra il 65% ed il 70% della domanda di energia primaria, per essere poi progressivamente sostituito dalla fusione, fino a scomparire (1% del mercato) verso il 2250. Parlare di questo futuro lontano, come se lo si vedesse affacciandosi alla finestra, è di certo un po' osé. Ma l'analisi degli ultimi duecento anni (e su altri soggetti degli ultimi duemila) mostra la stabilità granitica di questi processi. E duecento anni all'indietro non sono più lunghi di duecento anni in avanti.

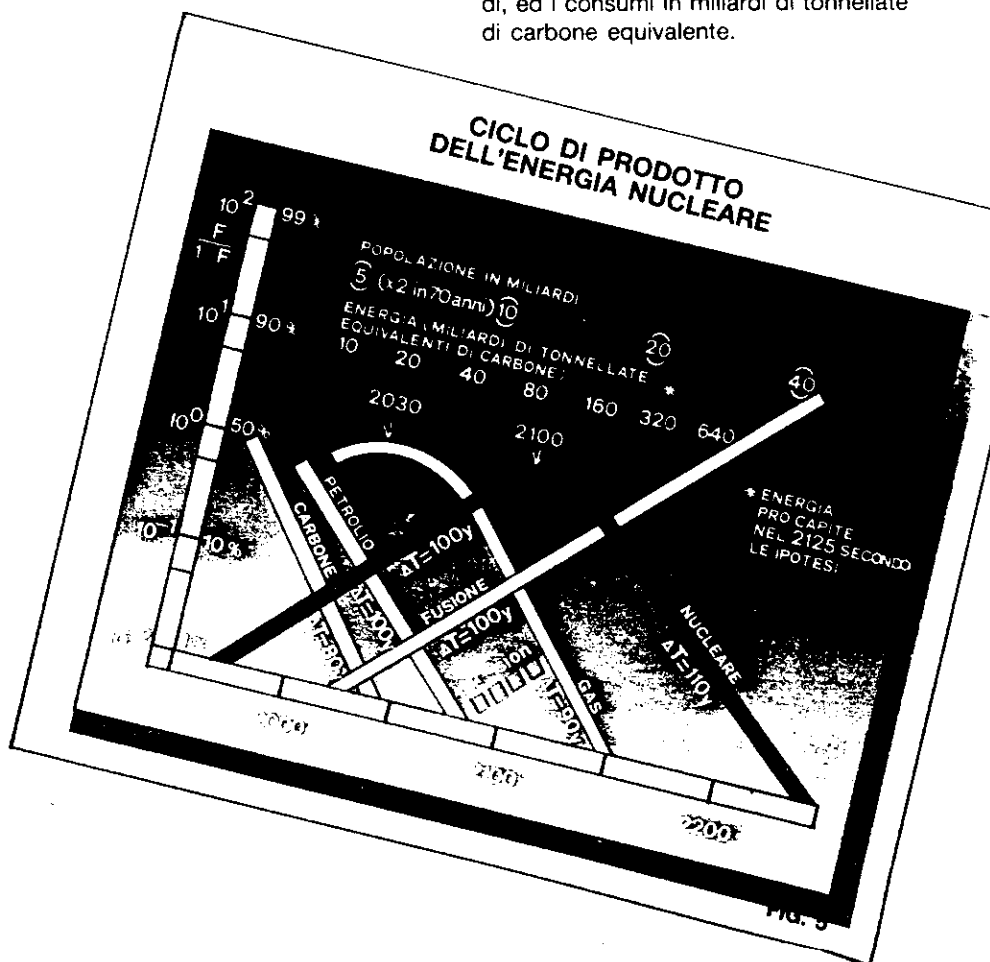
### FIGURA 5

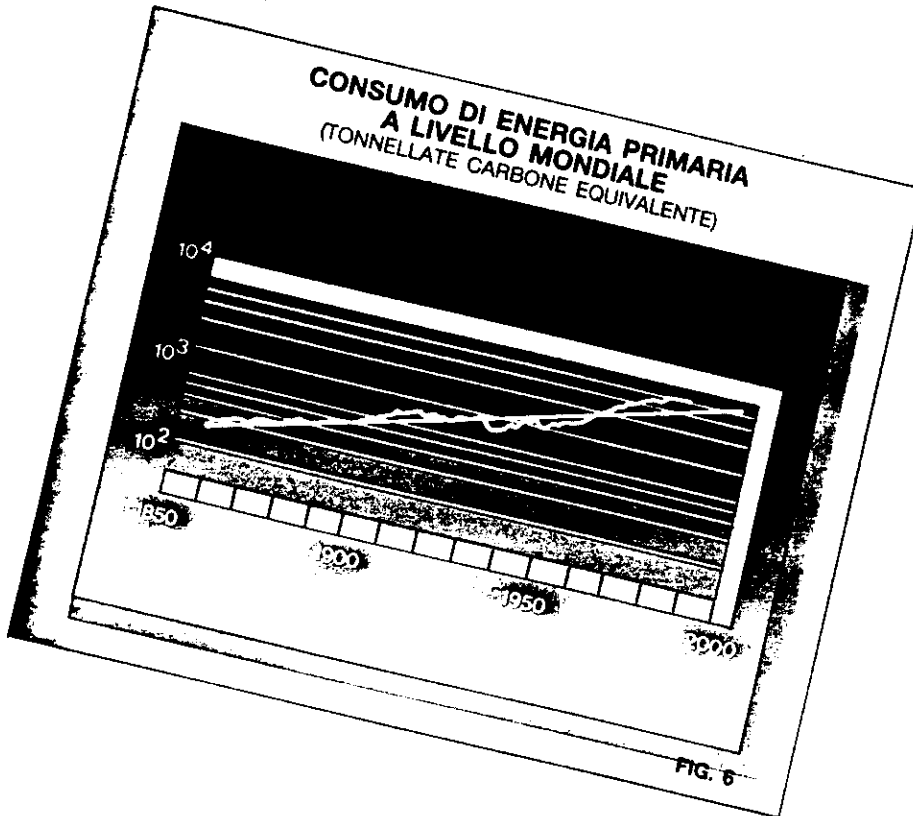
Avendo costruito il futuro delle energie già esistenti e calcolato il punto di attacco del prossimo concorrente, la fusione, si può costruire il ciclo completo di prodotto dell'energia nucleare.

Le linee di numeri in alto danno le ipotesi sullo sviluppo della popolazione umana (raddoppia ogni 70 anni) e del consumo mondiale di energia (raddoppia ogni 30 anni circa). A questi ritmi il consumo di energia pro capite nel 2125 sarà uguale a quello attuale negli USA.

Per soppesare le dimensioni fisiche bisogna però fare un'altra ipotesi, relativa alla crescita della domanda globale di energia. Negli ultimi centocinquanta anni, mettendo insieme tutto, incluso legno, fieno, vento, idraulica, si ottiene un tasso di crescita medio molto stabile del 2,3% all'anno. A questo si sovrappone una oscillazione pressoché sinusoidale se espressa in termini percentuali, con un periodo di circa 55 anni, ovvia manifestazione dei cicli di innovazione con associati boom e recessioni di cui ho parlato dianzi.

L'ipotesi più semplice è di tener fermo questo tasso. Vediamo un po' dove la cosa ci porta nel nostro orizzonte temporale. La popolazione umana continua a crescere, e secondo i demografi si avrà inesorabilmente un raddoppio a 10 miliardi nei prossimi 40-50 anni. Io faccio un'ipotesi più conservativa di due raddoppi in 150 anni. Mettendo insieme le due cose si trova che il consumo medio *per caput* di questa gente nel 2150, coincide grosso modo con quello medio *per caput* negli Stati Uniti oggi. Restiamo dunque nel seminato. I valori numerici, altamente arrotondati, sono riportati nella parte superiore del grafico. La popolazione mondiale è in miliardi, ed i consumi in miliardi di tonnellate di carbone equivalente.





**FIGURA 6**  
La linea portante dà una crescita media al tasso del 2,3% per anno. Le oscillazioni sono dovute ai cicli economici lunghi (Kondratief)

Il grafico della domanda di energia e di energia nucleare, costruito sulle logiche precedenti è riportato in Figura 6. Le unità sono in TW, ma il grafico può anche esser letto in termini di miliardi di Tonnellate di Carbone Equivalente (TCE) perché questa unità è all'incirca eguale ad un TW-anno. Tanto per dare un punto di orientamento, la produzione di calore da parte dei reattori nucleari oggi in funzione più quella che ci si attende dai reattori a buon punto di costruzione, equivale a circa un TW, o un miliardo di tonnellate equivalenti di carbone per anno. O ancora, essi producono circa il 10% della domanda complessiva di energia primaria.

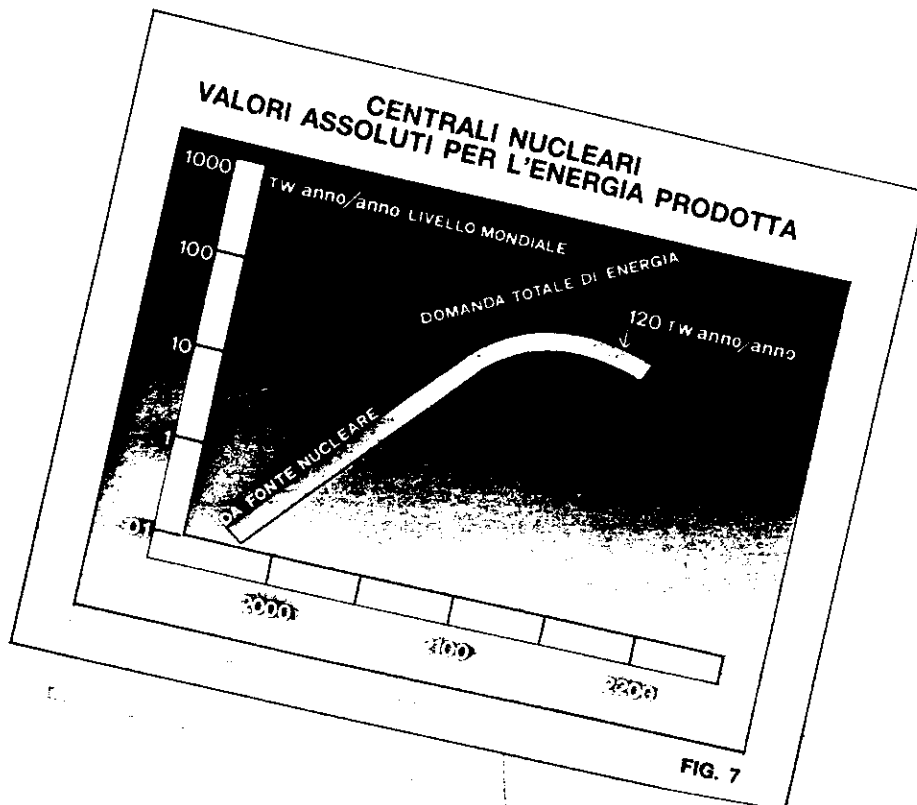
Una curiosità può subito nascere: se un livello di produzione nucleare cento volte superiore all'attuale è tecnologicamente plausibile. Ho avuto molte discussioni in proposito con illustri colleghi, ad esempio Alvin Weinberg, e ne sono uscito ben attrezzato per rispondere. Come al solito tutto si riduce ad un appropriato uso dell'analisi dei sistemi. Poiché i meccanismi che stanno alla base del loro funzionamento sono semplici e sempre gli stessi, il futuro si può distillare da una lettura appropriata della storia.

Studiando alcuni anni fa l'evoluzione del sistema elettrico negli USA fin dai tempi di Edison, osservai una cosa curiosa. Dopo che la rete elettrica si fu espansa territorialmente, alle principali aree urbanizzate degli Stati Uniti, il numero di generatori cominciò a diminuire. E questo malgrado il fatto che i consumi raddoppiavano mediamente circa ogni sette anni. Evidentemente la taglia dei generatori cresceva più rapidamente, di fatto raddoppiava circa ogni sei anni. Ma quale logica sta dietro a questo regolarissimo e stabilissimo processo?

La logica è molto semplice. In approssimazione zero il sistema può crescere omoteticamente. Nei fatti, la taglia del generatore viene ottimizzata, sia pure lascamente, in maniera da ottenere il miglior equilibrio tra le economie di sca-

**FIGURA 7**

Su questo grafico è riportata con ovvia schematicità l'evoluzione della domanda di energia, e della parte di questa domanda soddisfatta da energia nucleare primaria. Un TW anno/anno equivale ad un miliardo di tonnellate di carbone equivalente. Per ottenere le potenze installate bisogna ovviamente dividere per il fattore di utilizzazione.



la di un generatore grande e le disconomie di trasporto che nascono dal dover distribuire l'energia elettrica su un'area più grande. Crescendo però i volumi trasportati si può accedere a tecniche di trasporto più efficienti, alzando il voltaggio degli elettrodotti. Di conseguenza anche l'area servita dal generatore cresce, quando la potenza complessiva della rete cresce. Questa logica semplicissima permette di agganciare, quantitativamente, l'evoluzione del sistema elettrico alla densità territoriale del consumo.

Si può naturalmente obiettare che la tecnologia corrente può non essere in grado di fornire macchine della taglia richiesta dal sistema. Per quello elettrico la cosa non mi par si sia mai verificata. Ma può succedere. Ad esempio i motori a pistone per aereo, la cui potenza saturò sotto i 3 MW dei primi anni quaranta, furono progressivamente sostituiti da quelli a reazione, la cui potenza sta saturando sotto i 30 MW, per poter soddisfare la domanda di aerei sempre più grandi e veloci. Una possibile soluzione a vari problemi di sistema nel campo dei trasporti aerei, è il salto nell'ipersonico (Mach-7) che riporta la logica sul nostro tema, perché questi aerei possono solo funzionare usando come combustibile idrogeno liquido (LH<sub>2</sub>). E la mammella sarà inevitabilmente nucleare.

Concludendo le centrali nucleari che alla fine del presente impulso di costruzione saranno circa cinquecento, non dovrebbero crescere aldilà di qualche migliaio, l'aumento della domanda essendo coperto dall'aumento di taglia. Certo un reattore da 100 GW fa parte della fanta-tecnologia, anche se ho trovato schemi ragionevoli quando ho quantificato negli «atolli energetici» queste proiezioni. Non bisogna d'altronde dimenticare, che meno di cento anni fa, Edison ingorgava la sua megalomania con una dinamo capace di alimentare cento lampade, così ad occhio, della potenza di una decina di kW. Con questo non voglio dire che i 100 GW andranno in elettricità. Certamente un altro vettore energetico di grande trasportabilità sarà necessario, e l'idrogeno sembra avere tutte le caratteristiche per coprire questo ruolo. Nel qual caso il sistema energetico sarà costituito da due reti. Una che muove gli elettroni e l'altra i protoni. *Grosso modo.* Con le centrali di generazione molto grandi, poco numerose e probabilmente decentrate a livello continentale. Resta da chiedersi, per chiudere, quale siano il ruolo e le prospettive delle risorse

di combustibili classici che fan da quadro al nucleare. Poiché questo tipo di analisi permette di integrare su tutto il ciclo di prodotto, si può rispondere con buoni ordini di grandezza anche a questo. Per quel che riguarda il legno, o biomassa che si voglia chiamare, rimarrà dov'è. Tanto per curiosità le foreste della terra «desquamano» circa 100 TW in forma di biomasse varie. L'uomo ha ancora i calzoncini corti, malgrado la sua arroganza.

Per il carbone si è a due terzi del processo di estrazione, se ne tireranno fuori altri cento miliardi di tonnellate. Anche lui rimarrà dov'è, per la maggior parte. Per il petrolio, ne sono stati estratti, cifra tonda, cento miliardi di tonnellate e ne verranno estratti ancora trecento miliardi. In fase decrescente sì, ma tutt'altro che morto dunque, e le risorse verranno abbastanza strizzate anche se non esaurite.



FIGURA 8

Per quanto la situazione dell'energia nucleare sia stata considerata critica negli ultimi dieci anni, a causa dell'opposizione da varie parti, i fatti non rivelano alcun effetto legato a questa opposizione. La penetrazione procede come per qualsiasi altro prodotto, e di fatto più rapidamente che per le altre fonti energetiche quando furono introdotte sul mercato.

Per il gas naturale il problema è aperto. La domanda ipotizzata dal gioco delle sostituzioni porta a dei valori integrati cinque o sei volte maggiori di quelli del petrolio. Il più ancora da trovare. Ma c'è tempo e ci sono varie linee d'attacco. In nessuno dei casi citati la logica delle risorse ha determinato la logica delle sostituzioni che sembra siano gestite su un piano decisionale interno al sistema socioeconomico, vincolato ai condizionamenti esterni, ma non succube.

Cesare Marchetti