

Alcuni modelli della dinamica del mondo ***

1. Premessa

In un suo noto saggio¹ Jay W. Forrester esprime la convinzione che «la mente umana non sia adatta a interpretare il comportamento dei sistemi sociali, che rientrano nella classe dei sistemi a molteplici anelli di reazione non lineari. Nel corso della sua lunga evoluzione, l'uomo non ha avuto necessità di comprendere tali sistemi, almeno fino a epoche molto recenti: i processi evolutivisti, pertanto, non ci hanno fornito la capacità mentale di interpretare correttamente il comportamento dinamico dei sistemi dei quali siamo ora entrati a far parte».

Tuttavia ai nostri giorni è diventato non solo ineludibile ma anche drammaticamente urgente il problema di comprendere e possibilmente influenzare l'evoluzione del mondo di cui facciamo parte, quale ha luogo sotto l'azione di una popolazione umana che aumenta oltre misura, s'industrializza e turba troppo spesso l'equilibrio ecologico.

Da qui deriva la necessità di mettere a punto ed utilizzare correttamente opportuni modelli che ci aiutino a prevedere il comportamento del sistema "mondo" in corrispondenza a diverse politiche di intervento ed a valutare quella alla quale convenga attenersi.

2. Fasi di messa a punto di un modello matematico

Nella tecnica hanno una lunga tradizione i cosiddetti modelli fisici, che sono basati sulla riproduzione in scala del sistema che si vuole simulare, oppure

* Professore ordinario di Controlli automatici, Università di Padova.

** Professore associato di Controlli automatici, Università di Padova.

*** Il testo è quello della lezione tenuta al II° Corso di perfezionamento sui diritti dell'uomo e dei popoli, organizzato dal Centro di Studi e di Formazione sui Diritti dell'Uomo e dei Popoli dell'Università di Padova.

¹ Cfr. Jay W. Forrester, *Comportamento controintuitivo dei sistemi sociali*, in: Dennis L. Meadows e Donella H. Meadows (a cura di), *Verso un equilibrio globale*, Milano, Edizioni Scientifiche e Tecniche Mondadori, 1973 (il volume è stato edito contemporaneamente negli U.S.A. con il titolo: *Toward global equilibrium*,

utilizzano il principio della similitudine o quello della analogia (per esempio, modelli elettrici di sistemi meccanici).

Ai modelli fisici si possono contrapporre i modelli astratti; questi possono essere di vario tipo e sono stati classificati secondo criteri diversi: uno di questi porta a distinguere i modelli nelle categorie di quelli mentali, verbali, figurativi, diagrammatici ed infine dei veri e propri modelli matematici. Questi ultimi hanno acquisito un rilievo notevolissimo in quanto possono essere implementati su un elaboratore elettronico, che consente di ottenere in tempi ragionevolmente brevi la soluzione di problemi anche molto complessi.

Un modello concettuale (mentale o verbale) ed un modello matematico si trovano ai due estremi di un processo che, partendo dall'uno, arriva a mettere a punto l'altro attraverso le fasi di formalizzazione e di quantificazione. La prima consiste nel rappresentare in termini matematici le relazioni introdotte in termini intuitivi nel modello concettuale, la seconda nel determinare i valori numerici da attribuire ai parametri che compaiono nel modello formalizzato. Importantissima è poi la successiva fase di validazione, che consiste nell'apportare al modello iniziale le modifiche che a mano a mano si rendono necessarie affinché esso presenti un comportamento quanto più possibile prossimo a quello del sistema originale in un certo numero di situazioni note.

A questo proposito si tratta di tener presente che, in particolare nella fisica e più in generale nelle scienze della natura, di solito è possibile effettuare esperimenti i cui risultati sono assai efficaci per mettere a punto il modello. Nelle scienze dell'uomo e della società, invece, non è generalmente possibile procedere all'esecuzione di esperimenti e, quasi sempre, ci si può riferire solo alla serie dei dati storici disponibili.

La differenza sostanziale sta nel fatto che l'esperimento consente di separare i singoli aspetti del fenomeno allo studio, potendo essere condotto in modo che le altre cause potenzialmente in gioco abbiano influenza trascurabile. Ciò invece non si dà nella considerazione dei fatti quali si sono verificati storicamente, il che implica la necessità di tener conto contemporaneamente di tutti gli aspetti del fenomeno complesso di cui ci si occupa.

In qualche modo si è nella necessità di ricorrere al metodo baconiano (con la considerazione delle *tabulae presentiae* e delle *tabulae absentiae*) anziché a quello galileiano che permette di isolare ciascun aspetto particolare dell'indagine (si ricordi ad esempio come Galileo, nello studiare il moto accelerato di un grave lungo un piano inclinato, si preoccupasse di rendere particolarmente levigata la superficie di scorrimento in modo che l'attrito fosse trascurabile).

3. I modelli di Forrester

Nel trattare le questioni che qui interessano, particolare interesse hanno i modelli proposti da Forrester, a proposito del cui impiego egli parla di Dinamica

Cambridge (Mass.), Wright-Allen Press, 1973). Il saggio di Forrester era stato pubblicato per la prima volta su *Technology Review* nel gennaio 1971 ed è in sostanza una sintesi del suo volume: *World Dynamics*, Cambridge (Mass.), Wright-Allen Press, 1971.

dei Sistemi (in inglese *System Dynamics*). Il pregio maggiore di questi modelli sta nel fatto che essi possono costituire un efficace strumento di intermediazione, una vera e propria *lingua franca*, tra l'esperto di settore (che conosce, almeno dal punto di vista qualitativo, il fenomeno che si vuole esaminare) e l'esperto in problemi di simulazione mediante elaboratore.

I modelli di Forrester sono basati, sostanzialmente, su una sorta di analogia idraulica, in quanto prevedono due tipi fondamentali di variabili: quelle di "livello" e quelle di "flusso".

Le prime definiscono lo stato del sistema e sono chiamate così perché possono essere associate mentalmente al livello di un liquido in un serbatoio (o, se si vuole, al corrispondente volume "invasato").

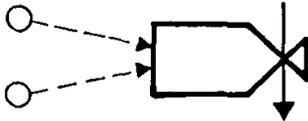
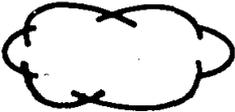
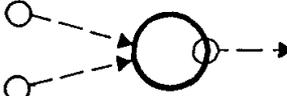
Le seconde corrispondono, nella stessa analogia, alle portate di liquido che, mediante opportune canalizzazioni, passano da un serbatoio ad un altro.

I livelli sono determinati dai flussi entranti in ciascun serbatoio e da quelli uscenti dal medesimo; in termini matematici, cioè, il livello è una funzione dell'integrale della somma algebrica di afflussi e deflussi.

Accanto a questi elementi fondamentali il modello di Forrester considera anche i canali di informazione, le funzioni di decisione che determinano la legge secondo la quale i livelli influenzano i flussi ed inoltre variabili ausiliarie (inserite in canali di informazione).

I simboli utilizzati per rappresentare livelli, flussi, canali di informazione, funzioni di decisione, sorgenti o scarichi di flussi e variabili ausiliarie sono riportati in Tabella 1. Schemi che usano tali simboli sono quelli delle Figure 1, 2, 3 e 4.

Tabella 1 - Principali simboli grafici degli schemi di Forrester

Livello	
Flusso	
Canale di informazione	
Funzione di decisione	
Sorgente o scarico	
Variabile ausiliaria	

Nel quadro dei contatti preliminari fra gli esperti di settore e quelli di simulazione non è difficile individuare le principali grandezze di interesse, caratterizzarle come livelli o come flussi e procedere all'analisi delle relazioni di causalità, stabilendo quali grandezze influenzino quali altre (eventualmente formando anelli di retroazione).

Il risultato è uno schema grafico che utilizza i simboli della Tabella 1 e che costituisce la base per la stesura di un programma di simulazione. A questo scopo è stato sviluppato il compilatore Dynamo, che consente di scrivere molto semplicemente il programma per valutare come il sistema simulato si comporti in corrispondenza a diverse sollecitazioni e/o a diversi valori dei parametri.

4. Caratteristiche generali del modello del mondo

Utilizzando la tecnica di rappresentazione che fa uso dei simboli della Tabella 1 (ed eventualmente di alcuni altri più specializzati), nella sua nota opera *World Dynamics* (cfr. nota 1), Forrester ha cercato di descrivere sinteticamente i complessi fenomeni connessi alla crescita della popolazione, allo sfruttamento delle risorse, all'inquinamento, etc.

Il suo modello è stato giudicato anche molto severamente e, comunque, è certamente sovrasemplificato. Tuttavia si ritiene utile darne cenno in quanto esso mette efficacemente in evidenza il fatto che provvedimenti che a prima vista potrebbero sembrare vantaggiosi, nei tempi lunghi possono invece dar luogo a conseguenze molto gravi. D'altra parte tale modello costituisce il punto di partenza per studi e proposte connessi alla tematica dell'interdipendenza ambientale globale e della redistribuzione planetaria delle risorse.

Più precisamente Forrester considera quattro variabili "di stato" (variabili livello) di cui descrive la dinamica mediante i corrispondenti "cicli"; si tratta, in particolare, della popolazione, delle risorse naturali non rinnovabili, del capitale investito e dell'inquinamento; considera inoltre una quinta variabile livello, e cioè la frazione di capitale investita in agricoltura, alla quale però non è fatto corrispondere un ciclo che ne governi la dinamica.

Le cinque variabili di stato si influenzano reciprocamente per il tramite di variabili ausiliarie ed il tutto dà luogo a quello che Forrester ha chiamato il modello del mondo.

Nel seguito si presenterà la forma più elementare di ciascuno dei quattro cicli citati, si accennerà ad alcuni perfezionamenti che possono essere introdotti in uno dei cicli ed infine si illustrerà brevemente lo schema complessivo nella forma chiamata "Mondo 2".

5. I quattro cicli principali

Ciclo della popolazione. Nella sua forma più elementare è rappresentato in Fig. 1. Il livello della popolazione aumenta per effetto dell'afflusso delle nascite e diminuisce per effetto del deflusso dei decessi (in unità per anno).

Questi flussi, a loro volta, sono legati al livello della popolazione tramite i tassi di natalità e di mortalità (espressi in unità per anno e per ogni mille abitanti).

I tassi possono spostarsi dai corrispondenti valori normali per effetto di altre cause esterne al ciclo.

Ciclo del capitale investito. Nella sua forma più elementare è rappresentato in Fig. 2. Il livello del capitale investito aumenta per effetto di un afflusso di investimenti che dipende da diversi fattori, di cui la figura indica i principali, e diminuisce per il deflusso che corrisponde al deprezzamento del capitale relativo ai costi di ammortamento, di manutenzione, etc.

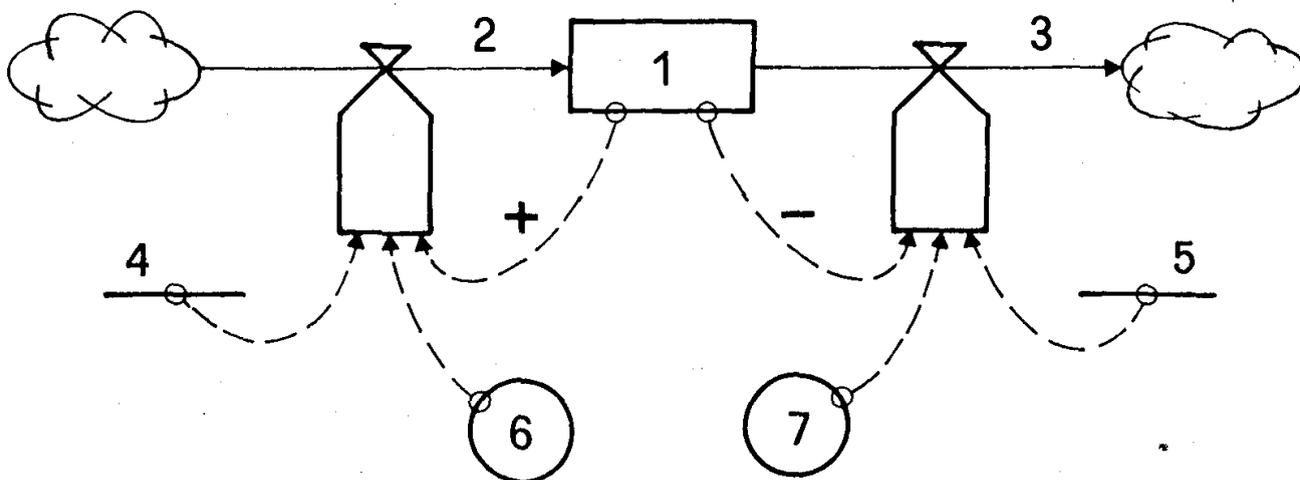


Fig. 1
1 Popolazione (livello); 2 Nascite per anno (flusso); 3 Decessi per anno (flusso); 4 Natalità normale; 5 Mortalità normale; 6 e 7 Altre cause che influenzano la natalità o la mortalità.

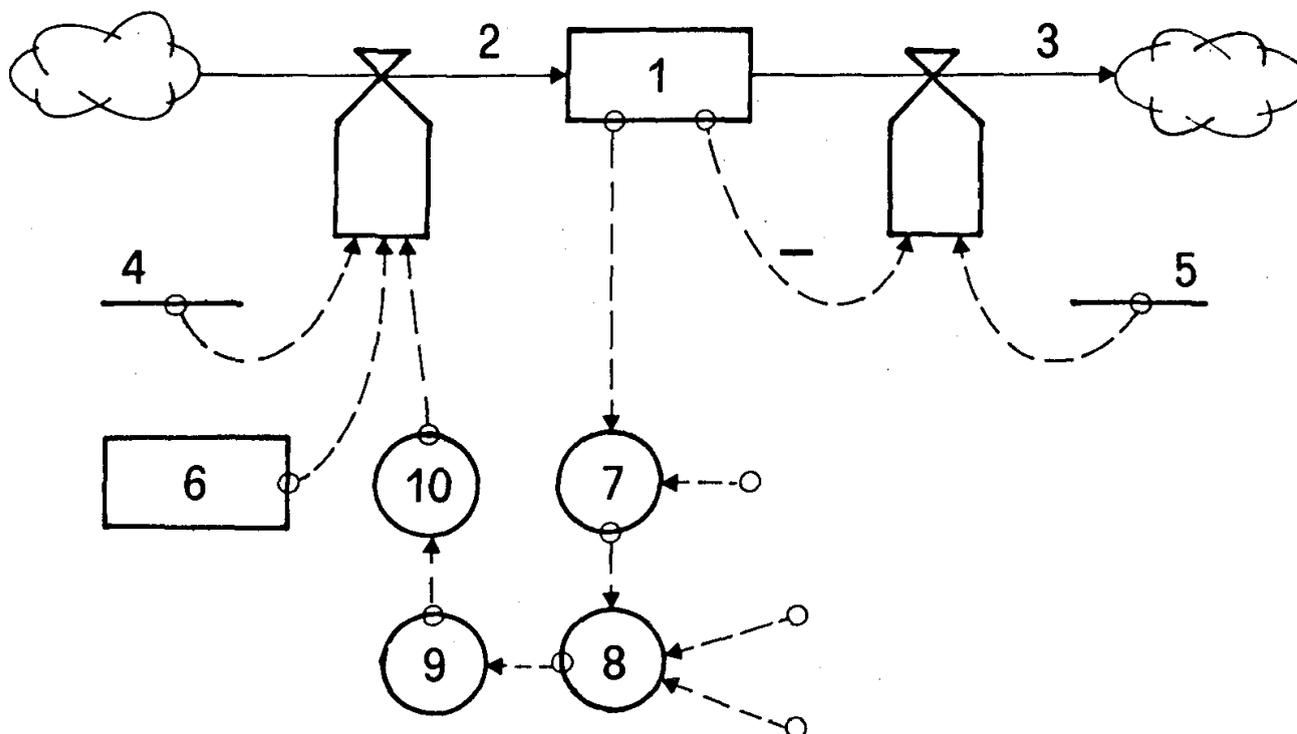


Fig. 2
1 Capitale investito; 2 Flusso degli investimenti; 3 Deprezzamento; 4 Investimento normale; 5 Deprezzamento normale; 6 Popolazione; 7 Rapporto capitale/investimenti; 8 Tasso di investimento produttivo; 9 Standard di vita; 10 Coefficiente di influenza sull'investimento di capitale.

Ciclo dello sfruttamento delle risorse naturali non rinnovabili. È rappresentato in Fig. 3; in questo caso il livello delle risorse può solo diminuire, e ciò avviene a seguito del deflusso corrispondente allo sfruttamento delle risorse stesse, che è determinato da un tasso dipendente a sua volta da vari fattori.

Ciclo dell'inquinamento. Limitandoci anche in questo caso alla forma più elementare, il ciclo è rappresentato in Fig. 4 dove sono indicate le cause che influenzano il tasso dell'inquinamento ed il fatto che, per quanto concerne il deflusso che dà luogo al suo assorbimento, si hanno due distinte catene di

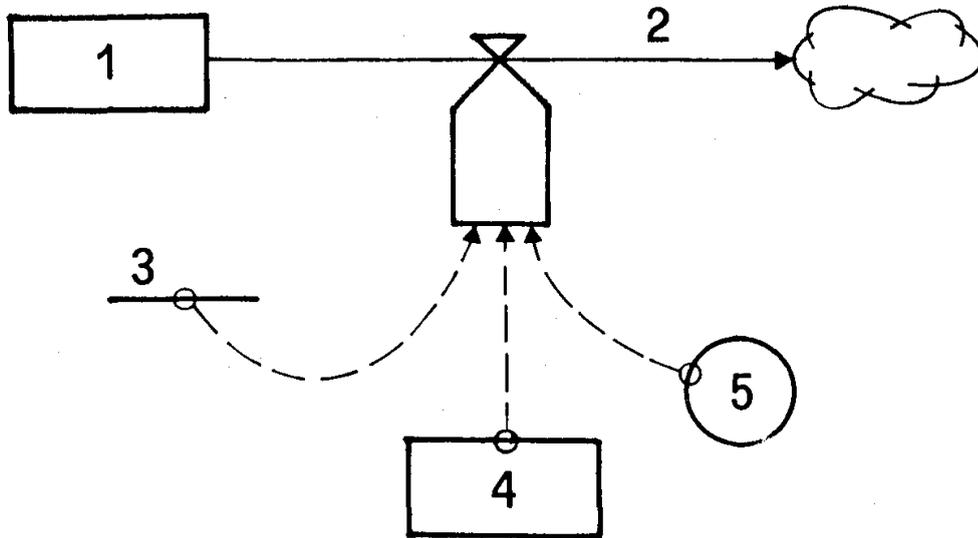


Fig. 3

1 Risorse naturali non rinnovabili; 2 Flusso di sfruttamento delle risorse; 3 Sfruttamento normale delle risorse; 4 Popolazione; 5 Standard di vita.

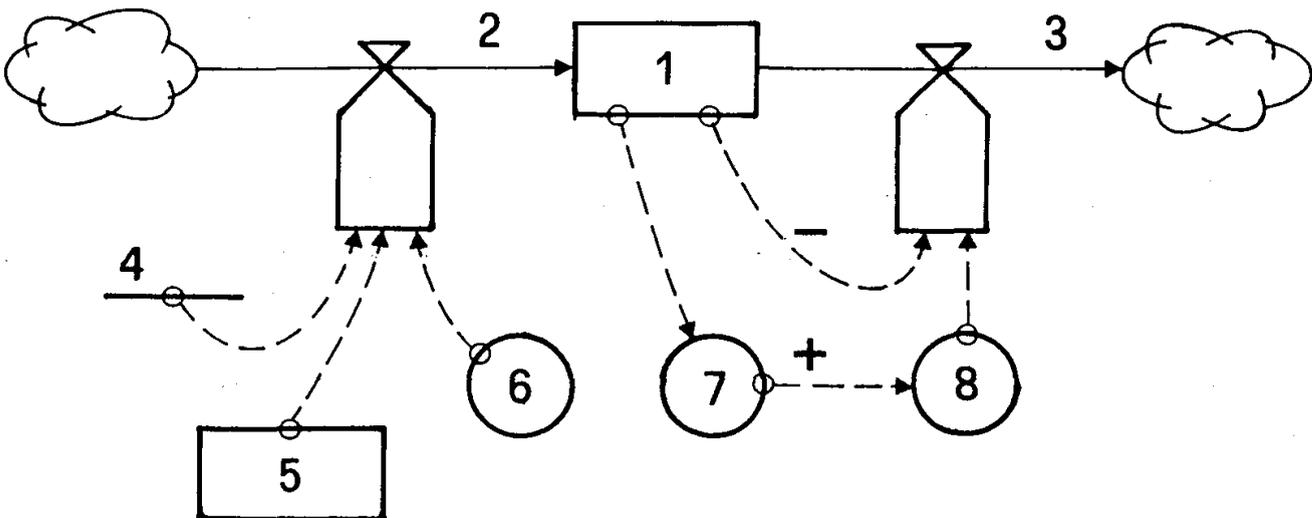


Fig. 4

1 Inquinamento; 2 Produzione dell'inquinamento; 3 Assorbimento dell'inquinamento; 4 Inquinamento normale; 5 Popolazione; 6 Funzione del capitale industriale; 7 Tasso di inquinamento; 8 Tempo di assorbimento dell'inquinamento.

retroazione (cioè catene mediante le quali il livello di inquinamento influenza il deflusso e quindi, indirettamente, se stesso); la retroazione determinata dal canale contrassegnato con il segno “-” corrisponde al fatto che la quantità di inquinante assorbita dipende dal livello dell’inquinamento, quella contrassegnata con il segno “+” corrisponde al fatto che le capacità di assorbimento da parte dell’ambiente diminuiscono all’aumentare del livello di inquinamento.

6. Il modello globale

Ovviamente gli schemi che si sono riportati vanno adeguatamente perfezionati, cercando di tener conto di un maggior numero di fattori influenzanti. Per esempio nel caso del ciclo della popolazione può essere utile mettere in evidenza in che modo il livello della popolazione influenzi, attraverso i cosiddetti effetti di affollamento (in inglese *crowding*), i tassi di natalità e di mortalità, facendo diminuire il primo ed aumentare il secondo al crescere della densità di popolazione.

Un altro perfezionamento consiste nel decomporre la popolazione in tre distinte variabili livello, e cioè in quelle relative alle popolazioni in età rispettivamente da 0 a 15 anni, da 15 a 45 anni ed infine superiore a 45 anni. In tal caso il flusso delle nascite per anno viene a dipendere sostanzialmente dalla sola popolazione in età fra 15 e 45 anni.

Si tratta poi di tener conto in modo più dettagliato delle influenze di particolari variabili livello sui flussi che interessano altre variabili livello. Per esempio il livello del capitale investito, tramite il tasso di investimento ed in particolare quello di investimento in agricoltura, contribuisce a determinare la disponibilità potenziale di alimenti pro capite che, a sua volta, influenza sia il tasso di natalità sia quello di mortalità. In modo analogo si possono esprimere in dettaglio le influenze reciproche fra il livello di popolazione e il livello di inquinamento: più numerosa è la popolazione, più alto è il flusso di produzione dell’inquinamento, come mostrato in Fig. 4; d’altra parte il livello di inquinamento tende a far diminuire il tasso di natalità e a far aumentare quello di mortalità.

Uno dei punti più delicati per la costruzione del modello consiste nella determinazione delle leggi secondo le quali la natalità è influenzata, ad esempio, dallo standard di vita (tendendo a diminuire gradualmente all’aumentare di quello) o la mortalità è influenzata dall’inquinamento o dalla disponibilità di alimenti pro capite.

Combinando assieme i vari elementi in gioco si ottiene il modello del mondo, che è stato elaborato in versioni successive di volta in volta più complesse. In particolare nella versione “Mondo 2” sono presenti le 5 variabili di livello a suo tempo menzionate, 7 variabili di flusso con altrettante funzioni di decisione e ben 31 variabili intermedie, per ciascuna delle quali è specificata la legge secondo cui essa dipende dai livelli o da altre variabili intermedie.

7. Risultati della simulazione

Per studiare gli effetti di possibili politiche di gestione sono state tenute in conto le quattro variabili livello dei cicli precedentemente considerati (popola-

zione, risorse naturali, capitale investito, inquinamento) ed una variabile ausiliaria opportunamente definita, chiamata in modo suggestivo qualità della vita.

Si è partiti dai valori di queste grandezze nell'anno 1900 e si è successivamente aggiustato il modello in modo che esso desse, in corrispondenza al 1970 (data delle simulazioni), i valori relativi a tale data.

Si è poi proceduto alla simulazione su un intervallo temporale di 200 anni adottando varie ipotesi.

Gli andamenti delle grandezze considerate sono riportati in Fig. 5 per il caso in cui le cose continuino ad evolvere secondo le tendenze che si sono manifestate nei primi settant'anni di questo secolo: in tal caso la popolazione (a partire dal 2020) e l'industrializzazione (un po' più tardi) declineranno bruscamente per il venir meno delle risorse naturali e per il connesso aumento dell'inquinamento.

Successivamente sono stati analizzati gli effetti di altre politiche. Ne è risultata una conferma della tesi che dà il titolo al già citato saggio di Forrester sul comportamento antiintuitivo dei sistemi sociali: infatti strategie apparentemente vantaggiose danno spesso gli effetti voluti solo a breve termine ma si traducono poi in situazioni addirittura disastrose.

Per esempio, se si trovasse il modo di limitare il drenaggio delle risorse non rinnovabili, non si avrebbe una soluzione soddisfacente. Infatti la Fig. 6 mostra che con una riduzione al 75% del tasso di sfruttamento delle risorse naturali a partire dal 1970 (rispetto ai tassi corrispondenti al settantennio precedente) «popolazione ed investimenti di capitale possono crescere in misura tale da provocare una crisi di inquinamento, con riduzione dell'indice di natalità, aumento del tasso di mortalità e diminuzione della produzione di alimenti». In particolare, la popolazione, nell'arco di quarant'anni, si ridurrebbe ad un sesto del valore massimo, raggiunto intorno al 2030.

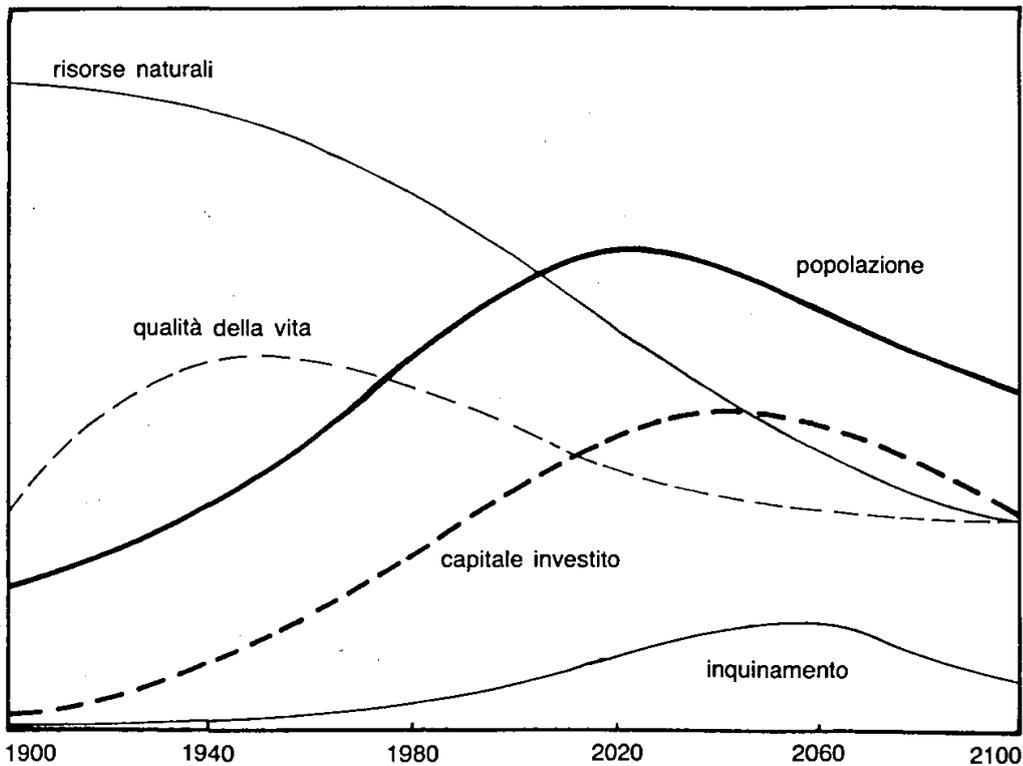


Fig. 5

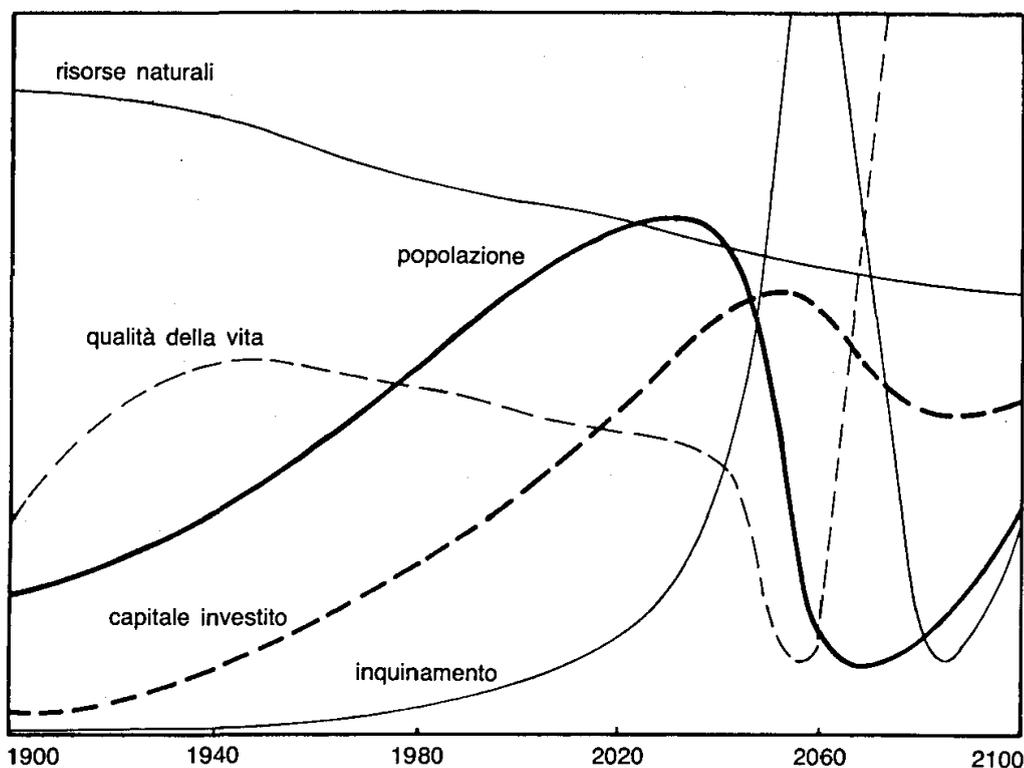


Fig. 6

Si hanno in tal modo quei “limiti dello sviluppo” – o meglio limiti della crescita – dei quali si è così a lungo parlato con riferimento alle iniziative del Club di Roma.

Gli studi del gruppo di Forrester hanno mostrato che molte altre strategie, apparentemente ovvie, possono risultare altrettanto disastrose ma anche che è possibile pervenire a risultati accettabili. Ciò tuttavia richiede di adottare nel presente autolimitazioni piuttosto drastiche in vista di ciò che potrà avvenire in un futuro anche lontano. Solo così, però, pare possibile governare la transizione da una fase di crescita ad una di equilibrio.

La Fig. 7 illustra l'andamento delle grandezze caratteristiche nella ipotesi che a partire dal 1970 si fossero adottate le seguenti ardue misure: riduzione del tasso di investimento del capitale del 40%, del tasso di natalità del 50%, del tasso di produzione dell'inquinamento del 50%, del tasso di sfruttamento delle risorse del 75% e di quello di produzione degli alimenti del 20%. A questo prezzo la qualità della vita tenderebbe a stabilizzarsi ad un valore alquanto più elevato di quello relativo agli anni '70.

8. Il modello di Mesarovic e Pestel

Come si è detto, il modello di Forrester ha ricevuto numerose critiche da vari punti di vista. Molte di queste si riferiscono al fatto che il modello considera un numero di variabili troppo ridotto ed in tal modo le conseguenze che se ne possono trarre sono troppo generiche. Non ha senso, infatti, dire che l'indice di natalità della popolazione umana complessiva deve scendere del 50% e quello della produzione di alimenti del 20%, se contemporaneamente non si specifica

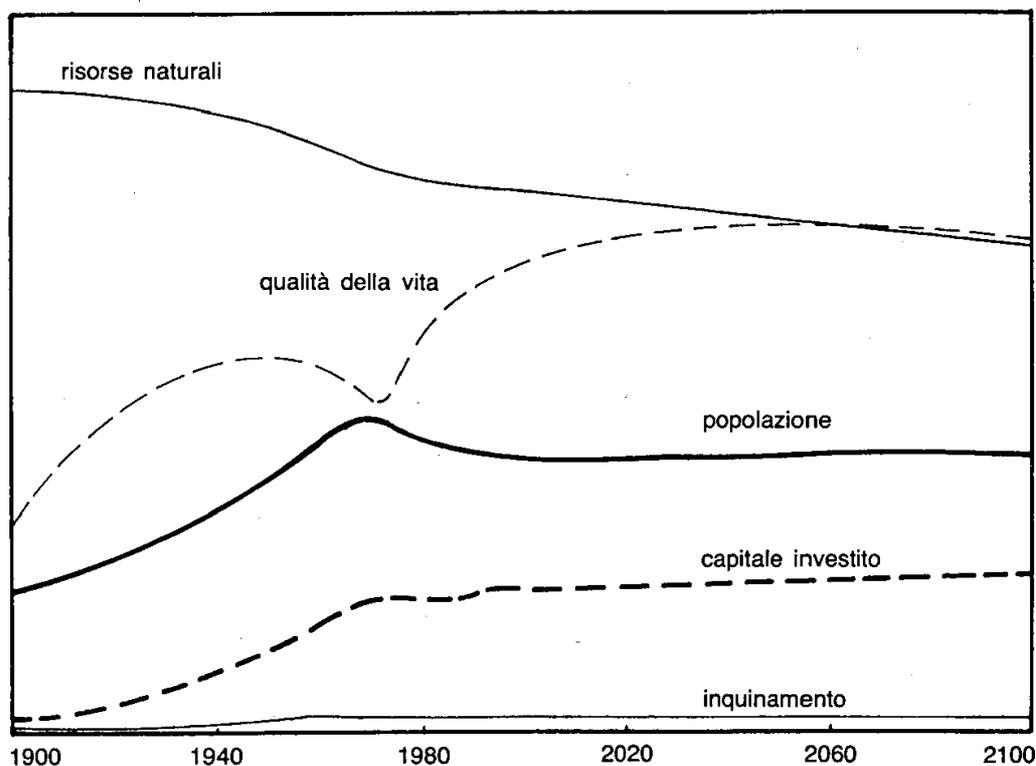


Fig. 7

come questi vincoli globali debbano particolarizzarsi per le singole nazioni: per le popolazioni insufficientemente nutrite del quarto mondo sarebbe infatti necessario prevedere comunque un aumento della disponibilità di alimenti pro capite, anche se quella complessiva deve diminuire.

Per superare gli inconvenienti citati, Mesarovic e Pestel² hanno proposto un modello che «tiene conto delle diversità esistenti oggi nel mondo, che hanno profonde radici nel passato e che indubbiamente prevarranno nel futuro; nello stesso tempo il modello rappresenta il mondo come un sistema, cioè come un insieme di parti mutuamente interagenti e interdipendenti»; inoltre esso tiene conto «della natura adattiva e del carattere soggettivo tipici di qualsiasi sistema che comprenda elementi umani».

In particolare vengono individuate dieci grandi regioni, la cui dinamica va studiata separatamente, pur tenendo conto delle relative interazioni. Si tratta, specificamente, di Nordamerica, Europa occidentale, Giappone, altri paesi sviluppati ad economia di mercato (Australia, Israele, etc.), Europa orientale e URSS, America Latina, Africa settentrionale e Medio Oriente, Africa tropicale, Asia meridionale e sudorientale, paesi asiatici ad economia pianificata (Cina, Vietnam, etc.).

Per la descrizione dei processi essenziali che determinano l'evoluzione di ciascuna regione si adotta una disposizione gerarchica a più strati: individuale, di gruppo, demoeconomico, tecnologico e ambientale.

Il modello prevede una parte simulabile su elaboratore e basata su relazioni causa-effetto ed una parte che corrisponde alla scelta di determinati scenari ed ai processi decisionali con quanto essi possono avere di soggettivo.

² Cfr. Mihajlo Mesarovic e Eduard Pestel, *Strategie per sopravvivere*, Milano, Edizioni Scientifiche e Tecniche Mondadori, 1974 (il volume è stato edito contemporaneamente in lingua inglese con il titolo: *Mankind at the turning point*, Ginevra, The Club of Rome, 1974).

9. Conclusioni

Sintetizzando le principali differenze fra il modello di Forrester e quello di Mesarovic e Pestel, si può dire quanto segue.

Secondo Forrester il mondo può essere considerato come un sistema unitario, mentre secondo Mesarovic e Pestel può essere concepito solo come un sistema formato da regioni distinte anche se interagenti.

Ne consegue che, mentre per Forrester se l'attuale tendenza proseguisse inalterata si andrebbe incontro ad una crisi che dovrebbe aver luogo intorno alla metà del prossimo secolo, secondo Mesarovic e Pestel nelle stesse ipotesi si verificherebbero, probabilmente prima di quanto ritenga Forrester, diverse crisi non contemporanee, dovute a motivi diversi e che interesserebbero specificamente singole regioni.

Tuttavia anche per Mesarovic e Pestel la soluzione, pur non riducendosi ad una modalità indifferenziata di rallentamento della crescita, dovrà essere cercata in provvedimenti pur diversi da regione a regione ma presi in base a considerazioni globali.

In definitiva, se si vogliono evitare conseguenze catastrofiche, non si può prescindere dalla interdipendenza fra le varie regioni del mondo e fra i vari aspetti tenuti separatamente in conto dai modelli considerati, il che comporta necessariamente l'esigenza di una redistribuzione planetaria delle risorse. ■

