

## ***Backcasting: note su retrodizione e simulazione***

Mauro Piattelli  
CNR-IAN  
Via De Marini, 6  
16149 Genova  
fax +39 010 6475 600

Nicola Bianchi  
CNR-CST  
Via Balbi, 6  
16126 Genova  
fax +39 010 209 9826

<http://www.ge.cnr.it/CST/M&S/DSS/papers/bkc/>

### ***Riassunto***

Si considera la simulazione a tempo invertito (*backcasting* o retrodizione) in quanto criterio ausiliario di validazione dei modelli e, in proposito, si commentano i termini della controversia su *I limiti dello sviluppo*.

Viene analizzata nell'ambito *System Dynamics* l'applicabilità del backcasting previa distinzione tra risposta libera e risposta in presenza di azioni esogene. Nel primo caso si constata la legittimità dell'estensione della retrodizione oltre il tempo iniziale della simulazione diretta. Questa procedura appare di particolare interesse nell'uso della simulazione come strumento ausiliario della storiografia.

Infine vengono considerate le approssimazioni risultanti dal backcasting e gli accorgimenti necessari per certe macro-istruzioni in uso nei linguaggi di derivazione DYNAMO.

Le conclusioni confermano l'utilità euristica della retrodizione, che però non può essere considerata in generale ottenibile mediante la semplice inversione del tempo: se si vuole far uso di tale metodo di validazione, il modello deve essere concepito anche per questa procedura e, inoltre, è necessario ricorrere a degli accorgimenti nell'impiego degli strumenti software per la simulazione.

## **1. Introduzione**

### **1.1 *Sul concetto di Backcasting o Retrodizione***

In linea generale la retrodizione può essere definita come metodo, o anche attitudine mentale, in contrapposizione alla previsione.

Mediante la previsione si cerca di identificare quale sarà il futuro in base alla situazione e alle tendenze in atto. La retrodizione invece parte da un futuro desiderabile per stabilire quali tendenze dovrebbero essere adottate oggi per raggiungerlo.

In ambito storiografico, entrambe le impostazioni metodologiche sono presenti: si cerca di comprendere il comportamento degli attori storici in base alle loro previsioni/aspettative, mentre l'effettivo risultato è spiegato attraverso le relazioni causali dominanti ricostruibili per retrodizione, cioè a partire dalla conclusione.

Uno strumento per la previsione del comportamento di sistemi complessi, tipicamente quelli comprendenti la componente sociale, consiste nella simulazione per mezzo del calcolatore, resa accessibile dal progresso del calcolo automatico in termini sia di *hardware* sia di *software*.

Nel seguito si considera la retrodizione, o backcasting, nel solo ambito di tale simulazione mediante modelli formalizzati quali i sistemi dinamici.

## 1.2 I modelli Sistema Dinamico per la simulazione

Si considerano modelli per simulazione, il comportamento dei quali in termini di energia variabile con continuità nel tempo, sia formalizzato dal Sistema Dinamico (DS, da *Dynamic System*). Il comportamento del DS risulta dalla variazione nel tempo del suo stato, definito come vettore di variabili ciascuna delle quali misura un contenuto di energia del sistema stesso.

Tale formalizzazione è basata su quattro assiomi, riconducibili per quanto qui di interesse all'affermazione che lo stato iniziale riassume la storia passata del sistema; pertanto non occorre conoscere l'andamento precedente dello stato stesso e delle azioni esogene.

La formalizzazione del DS definisce la struttura del modello in termini di numero (dimensione) delle variabili di stato e di esplicitazione delle derivate delle singole variabili in funzione di esse stesse e delle azioni esogene. La quantificazione definisce sia i parametri che intervengono nella struttura sia l'andamento delle azioni esogene. La inizializzazione definisce i valori iniziali delle variabili di stato e quanto altro richiesto dalla formalizzazione all'istante iniziale.

Il sistema di equazioni differenziali del primo ordine, costituente il DS, può essere integrabile, come nel caso particolare dei sistemi lineari, cioè ammette soluzione analitica. Altrimenti, ed è il caso generale, il modello è espresso da equazioni alle differenze che rappresentano la soluzione in termini di algoritmo iterativo (simulazione).

Se il passo di iterazione  $DT$  è sufficientemente breve, la simulazione nell'intervallo da  $t_0 = 0$  a  $t_n = n \cdot DT$  approssima in modo soddisfacente l'andamento dello stato nel tempo continuo nello stesso intervallo. Occorre annotare che un modello per simulazione comprende in generale, oltre alle equazioni di stato, comunque articolate e suddivise per comodità, anche equazioni logiche (del tipo, cioè, IF...THEN...ELSE) per le quali è qui irrilevante chiarire se dovute ad esigenze di concettualizzazione oppure di semplificazione del modello.

## 1.3 Backcasting o retrodizione

Quando si dispone di una serie temporale sperimentale si pone il problema della sua interpretazione analitica, il cui scopo è in genere la previsione dell'andamento futuro. La validità dell'interpretazione può essere verificata con metodi di backcasting o retrodizione, consistenti nel ricalcolare mediante il modello i valori precedenti della serie a partire dall'ultimo dato o da un dato qualunque successivo al primo.

Anche nell'ambito dei modelli per simulazione tale procedura è ritenuta utile ai fini di validazione. Una certa risonanza in proposito è risultata dalla controversia sui modelli del mondo (*World*) realizzati al Massachusetts Institute of Technology (MIT) dal System Dynamics Group (SDG) come rapporti al Club di Roma all'inizio degli anni settanta (e che dal titolo del rapporto più noto, *I limiti dello sviluppo*, vengono ancora identificati)<sup>1</sup>, criticati dalla Science Policy Research Unit (SPRU) all'Università del Sussex<sup>2</sup> e testati dalla stessa SPRU anche in backcasting. Controversia che riprenderemo nel seguito a scopo esemplificativo.

Nell'ambito dello studio dei problemi di sostenibilità si definiscono scenari futuri desiderabili per identificare azioni (politiche) da applicare a quello attuale allo scopo di realizzarli. Il backcasting può svolgere ruolo di validazione per le politiche considerate<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> Donella H. MEADOWS *et al.*, *I limiti dello sviluppo*, EST Mondadori, Milano, 1972; Dennis L. MEADOWS e Donella H. MEADOWS (a cura di), *Verso un equilibrio globale*, EST Mondadori, Milano 1973.

<sup>2</sup> H.S.D. COLE, *The Structure of the World Models*, in «Futures», February 1973, vol. 5, n. 1, pp. 14-32; H.S.D. COLE e R.C. CURNOW, *The Evaluation of World Models*, in «Futures», February 1973, vol. 5, n. 1, pp. 108-134.

<sup>3</sup> Questo aspetto applicativo, relativamente recente, sta assumendo notevole importanza. Le definizioni di *backcasting* proposte nei glossari dell'Organizzazione mondiale della Sanità ("Moving step-wise back in time from a future scenario to the present in order to identify the decisions and actions that must be taken at critical points if the scenario is to be

In ambito storiografico, la retrodizione, in quanto predizione rivolta al passato<sup>4</sup>, solleva inevitabili questioni epistemologiche<sup>5</sup>, ma la sua pratica in termini di modelli di simulazione presenta interessanti potenzialità come strumento ausiliario d'indagine.

In quanto segue si intende per *backcasting* la simulazione di modelli a tempo invertito del tipo realizzato in ambito *System Dynamics* (SD nel prosieguo)<sup>6</sup>. Esplicitamente, data una evoluzione storicamente nota tra  $t_0'$  e  $t_0$ , si può da essa ricavare un modello se, quanto meno, riproduce il comportamento storico in modo soddisfacente. Il modello così validato può essere usato per *forecasting*, cioè per prevedere l'evoluzione per  $t > t_0$ . Il backcasting, nei limiti posti al significato, costituisce un metodo di validazione del modello se applicato nell'intervallo  $t_0' \div t_0$ , e anche per  $t < t_0'$  quando il comportamento sia storicamente noto prima di  $t_0'$ .

#### 1.4 Modelli SD e backcasting

Nei modelli SD la variabili di stato principali (livelli secondo l'analogia idraulica di questa metodologia) sono calcolati mediante integratore puro, cioè con equazioni di significato evidente del tipo<sup>7</sup>:

$$(1) Y.k = Y.j + DT * (incY.jk - decY.jk)$$

dove j e k sono suffissi di specificazione temporale con  $k = j + DT$ .

Conviene ricordare che le linee guida della SD per i linguaggi di derivazione DYNAMO<sup>8</sup> suggeriscono l'uso esplicito del DT solo in tale tipo di equazione, detta di livello.

Effettuata la simulazione diretta nell'intervallo  $t_0 \div t_0 + n \cdot DT$ , il backcasting si ottiene iniziando le variabili di stato con il valore raggiunto ad un certo istante  $t \leq n \cdot DT$  e ponendo il

---

*achieved*" <[http://www.who.int/terminology/ter/Health\\_futures.html](http://www.who.int/terminology/ter/Health_futures.html)>) e della World Future Society ("A method of envisioning a desirable future or futures, and then working backward to determine the decisions that must be made to achieve that future" <<http://www.wfs.org/glossary.htm>>) sembrerebbero confermare questa tendenza.

I lineamenti metodologici (e filosofici) di questo approccio sono discussi in K.H. DREBORG, *Essence of backcasting*, in «Futures», 1996, vol. 28, n. 9, pp. 813-828; e in M. HÖJER e L-G. MATSSON, *Historical determinism and backcasting in future studies*, in *Urban Transport Systems — Proceedings from the 2<sup>nd</sup> KFB-Research Conference*, tema 4: Urban planning, Lund (Svezia), 7-8 giugno, 1999, <<http://www.tft.lth.se/kfbkonf/konf1.htm>>, 16 pp. Per le applicazioni del backcasting agli studi sul futuro si veda, ad esempio, H.A. MULDER e W. BIESIOT, *Transition to a Sustainable Society: A Backcasting Approach to Modelling Energy and Ecology*, Edward Elgar Publ., Cheltenham (UK) e Northampton (Mass.) 1998; e i *deliverables* del progetto europeo (4° Programma Quadro) POSSUM (ST-96-SC.107) sui trasporti, <<http://www.euroest.environ.se/pdf/5.pdf>>.

<sup>4</sup> Cfr. L. BULFERETTI, *La scienza come storiografia*, ERI, Torino 1970, p. 42. Bulferetti, in effetti, preferisce "postvisione" a retrodizione e in *Considerazioni sull'applicabilità della storiografia alla "natura"*, in «Annali di ricerche e studi di geografia», Gennaio-Marzo 1967, vol. XXIII, n. 1, p. 14, chiarisce anche le origini dell'uso di questi termini.

<sup>5</sup> Cfr. Paolo A. ROSSI, *Predizione e retrodizione in storia — Note sul modello Popper-Hempel*, in «Verifiche», 1978, n. 1, pp. 1-15. G. TORALDO DI FRANCIA, *Tra scienza e storia — Alla ricerca della verità*, in «Prometeo», 1998, n. ?, p. 11, afferma che predire e retrodurre sono, nonostante alcune analogie, due operazioni fondamentalmente diverse. Anche K.R. POPPER fa riferimento esplicito alla retrodizione nella *Logica della scoperta scientifica*, trad. di M. Trincherò, Einaudi, Torino 1970, p. 44, n.\*2.

<sup>6</sup> Metodologia ideata da J.W. Forrester a metà degli anni cinquanta, che trasferisce in campo socio-economico le sue esperienze nei servomeccanismi e nei calcolatori digitali. Cfr FORRESTER, *Industrial Dynamics*, M.I.T. Press, Cambridge (Mass.) 1961, e *Principles of Systems*, Wright-Allen Press, Cambridge (Mass.) 1968 [trad. ital., *Principi dei sistemi*, Etas Kompass, Milano 1974]. Il linguaggio di simulazione "standard" della *System Dynamics* è, fino alla metà degli anni ottanta, il DYNAMO (cfr nota n. 8). I modelli *World* dei *Limiti dello sviluppo* (vedi note n. 1 e n. 12) appartengono anch'essi all'approccio SD e sono stati sviluppati in DYNAMO.

<sup>7</sup> Nella trattazione, le formulazioni matematiche si alterneranno a quelle "informatiche", espresse con carattere tipografico non proporzionale, tipiche del linguaggio di simulazione in relazione alla significatività del contesto.

<sup>8</sup> Cfr. A.L. PUGH, III, *DYNAMO User's Manual*, M.I.T. Press, Cambridge (Mass.) 1970<sup>1</sup> e 1983<sup>6</sup>; G.P. RICHARDSON e A.L. PUGH III, *Introduction to System Dynamics Modeling with DYNAMO*, M.I.T. Press, Cambridge (Mass.) 1981.

valore del DT negativo. Una soddisfacente concordanza dello stato per  $t_0$  risultato dal backcasting con quello di inizializzazione per la simulazione diretta conferma la validità del modello nei limiti di tale criterio<sup>9</sup>.

Tuttavia l'aspetto di maggior interesse concettuale e applicativo consiste nella estensione a  $t < t_0$  e occorre chiarire preliminarmente quando tale estensione sia legittima. Risulta sufficiente in proposito ricordare gli assiomi del DS: posto che lo stato iniziale, ovviamente raggiungibile, riassume la storia passata del sistema, esso può risultare da una risposta libera oppure anche dall'applicazione di azioni esogene.

Nel primo caso, assenza di azioni esogene, gli assiomi stessi garantiscono l'unicità della traiettoria<sup>10</sup>, esprimibile in termini di condizione logica, dove per comodità  $t_0 = 0$  :

$$X_{-t} \Leftrightarrow X_0$$

per qualunque  $t$ ,  $X_{-t}$  è causa necessaria e sufficiente a ottenere l'effetto  $X_0$  e viceversa. In altre parole, la relazione è simmetrica e reversibile pertanto risulta legittima l'estensione del backcasting a  $-t$ .

Nel secondo caso, presenza di azioni esogene, la condizione logica diventa quella di condizione sufficiente:

$$X_{-t} \Rightarrow X_0.$$

La traiettoria non è unica, ma lo diventa introducendo la causa necessaria espressa dalle azioni esogene. In mancanza di tale dato, non ha significato l'estensione del backcasting a  $-t$ .

Conviene pertanto separare la trattazione per i due diversi casi. Prima però consideriamo le funzioni logiche, che possono essere presenti in entrambi i casi, e non dipendono esplicitamente dal tempo.

### 1.5 Funzioni logiche e backcasting

Le funzioni o relazioni di tipo logico, in generale corrispondenti a IF . . THEN . . ELSE, realizzano una scelta condizionata.

La condizione è espressa dal risultato del confronto tra due variabili, oppure tra una variabile e un parametro. La scelta può riguardare il valore di un parametro, ma anche l'uso di una diversa variabile.

In generale la condizione e la scelta conseguente non dipendono esplicitamente dal tempo, ma solo dal valore assunto dalla variabile argomento; pertanto le funzioni logiche risultano simmetriche, cioè utilizzabili in backcasting, senza necessità di adattamenti.

Conviene osservare che risultano simmetriche anche le funzioni tabellari, quelle che esplicitano la variazione di una grandezza in funzione di un'altra.

Infine l'argomento della funzione può essere il tempo stesso. Come esempio, si consideri l'evoluzione di Pompei prima e dopo l'eruzione del Vesuvio dell'anno 79 d.C. La comparsa esplicita della variabile indipendente richiede in generale un adattamento del modello per il backcasting: nel caso occorre sostituire al valore della simulazione diretta quello risultante dalla scelta dell'istante iniziale del backcasting. Si osservi che tale caso implica una azione esogena.

---

<sup>9</sup> Il termine *backcasting* denota, in questo lavoro, ogni istanza di simulazione a tempo invertito. In linea teorica, questa denominazione dovrebbe indicare una condizione simmetrica a *forecasting* –cioè il superamento dei limiti temporali posti alla validità del modello–; mentre invece si dovrebbe parlare di *backward* (o *reverse*) *simulation* se il calcolo a ritroso rimane compreso nell'intervallo temporale inizialmente fissato.

<sup>10</sup> Si assume che l'unicità sia garantita dalla ipotesi di continuità. Tale assunzione, non esaustiva in termini matematici, appare comunque valida nella modellistica per simulazione di uso pratico.

## 2 Il backcasting e la risposta libera

### 2.1 Premesse

La concettualizzazione, che interpreta sistemi come isolati o pseudo-isolati, produce un modello di simulazione in risposta libera, se non soggetto a disturbi stocastici.

Prescindiamo al momento dalla presenza di disturbi e osserviamo che in letteratura sono presenti in prevalenza modelli di sistemi pseudo-isolati, tra i quali esempi "classici" sono la *Dinamica urbana*<sup>11</sup> e i vari modelli del Mondo sviluppati dal SDG al MIT<sup>12</sup>.

Alla stessa categoria appartengono i nostri modelli, realizzati nel corso del progetto POLIS, incluso quello sul potere marittimo<sup>13</sup> con cinque città-stato sincrone, considerate come macro-sistema.

Per approfondire il problema del backcasting in risposta libera, consideriamo prima di tutto l'esempio semplice rappresentato dalla crescita esponenziale, utile per entrare nel merito della controversia su *I limiti dello sviluppo*. Introduciamo quindi il problema dei disturbi casuali e consideriamo infine le funzioni di ritardo (DELAY).

### 2.2 Il backcasting della crescita esponenziale

Consideriamo la crescita esponenziale di una popolazione  $Y$  in assenza di azioni esogene e disturbi.

La generica equazione di livello (1) per la simulazione diventa:

$$(2) Y.k = Y.j + DT * (TAX * Y.j) \quad \text{dove TAX = tasso di crescita.}$$

Nel tempo continuo l'equazione differenziale corrispondente è integrabile, dato il valore iniziale  $Y_0$  e la soluzione analitica risulta simmetrica rispetto all'inversione del tempo, nell'intervallo scelto ( $t_0$ ,  $t_n = n \cdot DT$ ).

Il caso appare banale in quanto il segno "meno" del  $DT$  per il backcasting può essere interpretato come dovuto a  $TAX$ , per cui abbiamo un identico tasso di crescita e di decrescita, identici intervalli per il dimezzamento, il raddoppio, ecc.

Se si procede per simulazione, cioè con  $DT$  "finito" come per il modello (2), viene introdotto un errore, definibile di isteresi<sup>14</sup>, per cui le  $Y.k$  risultano diverse per tempo diretto o inverso. Per la crescita esponenziale, il valore iniziale  $Y_0$  si ottiene in backcasting per  $t < t_0$ , cioè all'esterno dell'intervallo di simulazione diretta. L'errore risulta tanto minore quanto più breve è il  $DT$  e si annulla nel tempo continuo. Esso pertanto non inficia la validità teorica del backcasting, ma giustifica l'affermazione che i due valori di  $Y_0$  debbano essere soddisfacentemente corrispondenti.

Poiché il modello è in risposta libera, risulta legittima l'estensione del backcasting a prima dell'intervallo di simulazione diretta. L'interesse di tale estensione può dipendere dalla disponibilità di dati remoti isolati oppure dalla possibilità di identificare finestre temporali dove allocare eventi di discontinuità evolutiva, causa prima dell'evoluzione considerata, quali potrebbero essere mutazioni genetiche, disastri ambientali, immigrazioni, pestilenze e simili.

---

<sup>11</sup> J. W. FORRESTER, *Urban Dynamics*, M.I.T. Press, Cambridge (Mass.) 1969.

<sup>12</sup> Si tratta dei modelli *World2* e *World3*. Il primo compare in J. W. FORRESTER, *World Dynamics*, Wright-Allen Press, Cambridge (Mass.) 1971 [trad. it. *Dinamiche mondiali*, Etas Kompass, Milano 1974], mentre il secondo è descritto nei lavori citati in nota 1, ma il listato del codice sorgente, in linguaggio DYNAMO, del modello si trova in D. L. MEADOWS, W. W. BEHRENS III, D.H. MEADOWS, R.F. NAILL, J. RANDERS, e E.K.O. ZAHN, *Dynamics of Growth in a Finite World*, Wright-Allen Press, Cambridge (Mass.) 1974. Entrambi i modelli costituiscono l'oggetto della controversia tra SDG e SPRU, cui si fa riferimento in questa trattazione.

<sup>13</sup> M. PIATTELLI e R.G. COYLE, *On the Modelling of Seapower: An extension of the Polis model in a competitive scenario*, in T. SHIMADA e K. SAEED, *Proceedings of the 1995 International System Dynamics Conference*, vol. I – Plenary Program, Tokyo 1995, pp. 180-190.

<sup>14</sup> Tale denominazione è stata scelta per analogia con il caratteristico comportamento asimmetrico della magnetizzazione del ferro per induzione diretta e inversa.

Analogamente, quando si ponga uno scenario desiderabile futuro, l'estensione consente di definire quali azioni intraprendere per raggiungerlo e *quando*, se fattibili, tra oggi e quel futuro. Più semplicemente l'estensione del backcasting è strumento di validazione nella misura in cui il modello esaminato non produce comportamenti assurdi.

### 2.3 Il backcasting nella controversia de "I limiti dello sviluppo"

I modelli *World* sviluppati al MIT pongono  $t_0$  nell'anno 1900 e sono in risposta libera. Il backcasting realizzato dalla SPRU<sup>15</sup> è stato esteso a prima del 1900 e produce intorno al 1880 una crescita assurda della popolazione. Conviene anche osservare l'esistenza in *World* di un transitorio di andamento opinabile nei primi anni dopo il 1900.

Il risultato del backcasting ha permesso una critica sulla validità del modello, che ci sembra condivisibile in base a quanto fin qui considerato. Inoltre una risposta di Meadows *et al.* alla critica, conferma una certa ingenuità o superficialità nella modellazione. Scrivono, infatti, Meadows *et al.*: "*Disequilibria introduced through the assignment of initial values may insert transients in the model's behavior which cannot be reproduced in the reverse direction*"<sup>16</sup>.

Considerazione ineccepibile, che significa per converso che il backcasting avrebbe permesso una definizione dei valori iniziali congrua. Nella pratica della simulazione, in presenza di incertezza sui valori iniziali, non si ricorre per altro al backcasting in quanto è sufficiente ripartire da fine transitorio e/o spostare questo all'esterno dell'intervallo di interesse.

Il problema perde banalità se i valori di inizializzazione sono noti con errore modesto, perché allora il transitorio denuncia una incongruenza dei parametri o, peggio, una formalizzazione inadeguata.

Dobbiamo osservare che i modelli *World*, in particolare *World2* (classi di popolazioni non delineate), non rappresentano esempi di buona modellazione come sistemicamente analizzato da un esponente dello stesso MIT<sup>17</sup>, tuttavia dobbiamo concordare con la posizione di Meadows *et al.* accettando il valore politico di tali simulazioni; per altro tali critiche hanno contribuito a dare risonanza mondiale alle applicazioni della simulazione ai problemi della crescita sostenibile.

### 2.4 Il problema dei disturbi casuali

Un modello di simulazione, anche per sistemi isolati, contiene di norma disturbi casuali per interpretare le fluttuazioni del comportamento reale, il cui effetto pratico è lo spostamento cronologico del raggiungimento di valori attesi delle variabili. Più interessante è il caso dei disturbi la cui escursione è in grado di modificare il sistema, ad esempio l'estinzione di una specie oppure, nei sistemi aperti, la morfogenesi o auto-organizzazione.

Il disturbo, quale che sia la concettualizzazione, è azione esogena, ma viene qui considerato perché citato nella controversia SDG/SPRU. In realtà, nei modelli *World* oggetto della controversia non ci sono disturbi casuali, tuttavia Meadows *et al.* affermano: "*Finally, any stochastic influences on the behaviour of a model in the forward direction will not, in general, be recaptured in the reverse mode*"<sup>18</sup>.

L'affermazione è ineccepibile sul piano informatico-computazionale nel senso che si hanno sostanziali difficoltà a far funzionare un generatore di numeri casuali in modo che da qualunque valore riproduca invertita la sequenza precedente. Nella simulazione il problema è però facilmente risolvibile, poiché è sufficiente registrare la serie valori di disturbo utilizzata per la simulazione diretta e servirsene al

<sup>15</sup> H.S.D. COLE e R.C. CURNOW, *The Evaluation* cit.<sup>2</sup>, pp. 113-117; H.S.D. COLE e R.C. CURNOW, "Backcasting" with the *World Dynamics Models*, in «Nature», May 1973, vol. 243, pp. 63-65.

<sup>16</sup> Donella H. MEADOWS *et al.*, *A Response to Sussex, Futures*, in «Futures», February 1973, vol. 5, n. 1, p. 139.

<sup>17</sup> D. BERLINSKI, *On Systems Analysis: An Essay Concerning the Limitations of Some Mathematical Methods in the Social, Political, and Biological Sciences*, M.I.T. Press, Cambridge (Mass.) 1976, pp. 52-92.

<sup>18</sup> Donella H. MEADOWS *et al.*, *A Response* cit.<sup>16</sup>, p. 139.

rovescio per quella inversa. Il limite è ancora quello già ricordato: il backcasting non può essere esteso a  $t < t_0$ , cioè all'esterno dell'intervallo nel quale la sequenza casuale è nota.

Tuttavia il punto principale è un altro. Nei sistemi dove i disturbi siano le sole azioni esogene e il loro effetto sia in pratica solo nell'incertezza cronologica del comportamento, ma non nella sua qualità, la validazione viene condotta azzerando i disturbi stessi. Non si vede allora perché il backcasting, come ausilio alla validazione, debba tenere conto di tali disturbi.

In conclusione anche l'argomento dell'influenza stocastica non toglie validità alla critica da parte della SPRU.

## 2.5 Il "delay"

La SD utilizza costanti di tempo singole, doppie, triple, tempi morti e *smooth*, facenti parte della categoria di funzioni definite di ritardo (o *delay*).

Nella risposta alla SPRU, Meadows *et al.* affermano: "*Delayed relationships will also be asymmetric in time under certain circumstances*"<sup>19</sup>. Per chiarire la questione conviene fare riferimento all'esempio proposto da Brewer<sup>20</sup> a proposito del backcasting, che considera il comportamento di una rete di resistenze (R) e capacità (C) nel tempo continuo, cioè il classico caso di singola costante di tempo di valore  $T=RC$ .

Tale esempio permette anche l'introduzione di azioni esogene. L'esempio, interpretato in simulazione come DELAY1, corrisponde al modello:

$$(3) Y_k = Y_{j+DT} + DT * (U_j - Y_j) / RC$$

dove

Y = tensione ai capi del condensatore

U = tensione applicata

RC = costante di tempo

Nel continuo viene considerato l'andamento di Y dopo l'applicazione di un gradino in U per  $t=0$  e si ottiene il risultato banale della simmetria. In conclusione non ci sono problemi di backcasting nello stesso ambito temporale della simulazione diretta.

Se si estende il backcasting a  $t < 0$ , si ottiene il risultato assurdo di una tensione infinita sul condensatore. L'assurdo dipende dal fatto, secondo Brewer, che al tempo precedente l'istante iniziale il sistema aveva una struttura diversa (interruttore aperto); ma può essere, da noi, anche interpretato come azione esogena (chiusura dell'interruttore).

In conclusione, nell'ambito temporale di validità del modello riguardante la simulazione diretta, il DELAY1 ha comportamento simmetrico. La SPRU conferma la simmetria anche per DELAY3 (ritardo assunto nella SD come caratteristico nel processo tra variazione dello stato e percezione dell'informazione relativa), impiegato dal SDG in *World3*.

A questo punto però i termini della controversia diventano confusi. Infatti, pur essendo DELAY3 simmetrico, la sua inizializzazione nei linguaggi di derivazione DYNAMO non lo è.

## 2.6 Delay multiplo

Nel caso di DELAY1, così come di SMOOTH che è ancora un ritardo a singola costante di tempo, il problema dell'inizializzazione corrisponde ad associare alla equazione (3) la quantificazione

$$(4) Y = U \quad \text{per } t_0.$$

L'algoritmo ripetitivo viene in tal modo alterato per un solo passo DT e questo equivale come errore a quello definito di isteresi.

---

<sup>19</sup> *Ibid.*

<sup>20</sup> J.W. BREWER, *Backcasting*, in «Simulation», March 1976, p. 90.

In generale, tra uscita e ingresso, si può avere una equazione caratteristica di grado qualunque, cioè un ritardo costituito da numerose costanti di tempo, anche diverse. Nell'ambito della cosiddetta identificazione *black box*, il numero e la diversità delle costanti di tempo è riconducibile ad un numero di costanti di tempo uguali o anche ad una singola costante associata ad un tempo morto.

Nell'ambito SD, un *delay* di ordine fino al terzo realizza l'inizializzazione in modo trasparente imponendo la (4) per tutti i valori ignoti che sarebbero necessari. *Delay* di ordine superiore al terzo richiedono la definizione esplicita di tutti i valori di inizializzazione, tanti quanti è l'ordine, realizzata di norma mediante tabella. Infine il ritardo di tempo morto, pari a  $t < 0$ , richiede l'assegnazione, di norma ancora tabellare, di tutti gli  $n$  valori precedenti  $t_0$ .

Da quanto sopra, risulta che il *delay* fino all'ordine tre produce una asimmetria che è ancora un errore di isteresi per il backcasting corrispondente a  $3 \cdot DT$ . Se però si rinuncia alle macro di *delay* multiplo e si utilizzano i soli DELAY1 esplicitati come SMOOTH in cascata, allora l'errore di isteresi è ancora il solo dovuto al DT.

Nel backcasting non dovrebbero pertanto comparire istruzioni DELAY  $N$ , ma solo DELAY1 nel numero  $N$  richiesto in cascata. In caso di Tempo Morto, per trasporto di materiale o trasmissione di energia, l'istruzione relativa produce una asimmetria non eliminabile nel backcasting.

La conclusione è ancora quella proposta da Brewer: il backcasting non è riducibile alla inversione di segno del DT.

### 3. Backcasting in presenza di azioni esogene

#### 3.1 Premesse

Lo stato iniziale del DS ne riassume la storia, per cui non occorre conoscere l'andamento precedente del vettore degli ingressi o azioni esogene. Comunque, se tale andamento non è noto, perde significato l'estensione del backcasting a  $t < t_0$ .

In generale, le azioni esogene possono essere classificate, nella pratica della simulazione, come:

- disturbi stocastici,
- funzioni esplicite del tempo,
- uscite della simulazione di altri modelli.

Il caso dei disturbi stocastici è già stato considerato, ma merita ribadire che, quando tali disturbi non determinano modifiche qualitative nel comportamento del modello, allora per l'uso del backcasting ai fini della validazione, come nelle altre procedure in genere, l'ampiezza del disturbo viene azzerata.

Gli altri due casi differiscono solo per l'origine delle azioni, calcolate all'esterno del modello o al suo interno, ma non pongono differenze in relazione alla loro considerazione nel backcasting. Conviene allora fare riferimento alle funzioni esplicitamente tempo-dipendenti utilizzate in ambito SD e precisamente: impulso, gradino, rampa, campionamento remoto, memorizzazione; eventualmente associate a sequenze casuali, in particolare per l'impulso. Queste funzioni (definite test di input), anche combinate, consentono di verificare il comportamento del modello (validazione) e del corrispondente sistema quando sottoposto a shock.

Come per la risposta libera, l'approfondimento che segue considera un caso semplice, quello proposto da Brewer della rete RC.

#### 3.2 Il backcasting nella funzione "gradino"

Si considera il modello (3), ma con l'applicazione del gradino (STEP) di ampiezza  $A$  in  $U$  compresa nell'intervallo di simulazione diretta.

Il modello allora diventa:

$$(3') Y.k = Y.j + DT * incY.jk$$

$$\begin{array}{lll} \text{incY.kl} = 0 & \text{se } U.k = 0 & U.k = 0 \quad \text{se } t \leq \hat{t} \\ \text{incY.kl} = (U.k - Y.k) / RC & \text{se } U.k > 0 & U.k = A \quad \text{se } t > \hat{t} \end{array}$$

Il gradino è reversibile, cioè applicabile in backcasting, a condizione che sia definito in simulazione inversa l'istante di applicazione. In altri termini, le due definizioni di `incY` costituiscono una funzione logica, che è reversibile, ma richiede la predeterminazione della modifica in  $U$ .<sup>21</sup>

Conviene annotare che il risultato assurdo di backcasting ottenuto nel tempo continuo dal Brewer dipende dal non aver considerato nell'intervallo di simulazione diretta l'evento esogeno (applicazione del gradino) e di aver confuso  $t = 0$  con  $t_0$ .<sup>22</sup>

### 3.3 Altre funzioni tempo-dipendenti

Possiamo generalizzare il risultato precedente. Le funzioni tempo-dipendenti richiedono per la loro definizione la esplicitazione del tempo di applicazione, nell'esempio quando si verifica il gradino. Sotto tale aspetto dette funzioni risultano asimmetriche e richiedono il ricalcolo del tempo di applicazione per il backcasting.

Quanto sopra non risulta però sufficiente poiché occorre anche verificare la simmetria nel tempo dopo l'istante di applicazione.

Le considerazioni al riguardo sono complicate dalle possibili diverse esplicitazioni matematiche delle macroistruzioni nei diversi linguaggi orientati alla simulazione. In teoria, appaiono a priori simmetriche le funzioni tempo dipendenti interpretabili in termini logici, come il "gradino" del caso precedente. Della stessa natura è l'impulso (PULSE):

$$\begin{array}{l} (3'') \quad Y.k = Y.j + DT * \text{incY.jk} \\ \text{incY.kl} = 0 \quad \text{se } t \neq \hat{t} \\ \text{incY.kl} = A \quad \text{se } t = \hat{t} \end{array}$$

La memorizzazione del tempo associato ad un avvenimento non pone parimenti alcun problema di backcasting in quanto è, nella sostanza, un'istruzione logica.

Inoltre, risultano simmetriche le funzioni analitiche di  $t$  che ne conservano il segno (come le potenze dispari), e asimmetriche le altre (potenze pari, tempo morto, campionamento remoto).

In particolare, il campionamento remoto (SAMPLE), come il Tempo Morto (Pipeline\_DELAY), dà, in backcasting, un effetto asimmetrico analogo a quello di isteresi dovuto al DT, ma esteso al numero di DT da essi rappresentato. In teoria, per queste funzioni il problema è risolvibile come nel caso dei disturbi casuali: si memorizza la sequenza in simulazione diretta e si applica invertita nel backcasting, ma ciò richiede aggiustamenti notevoli nel modello, se non un trattamento a parte che richiede lo sviluppo di procedure software particolari. Nella pratica SD, tuttavia, le funzioni tempo-dipendenti

<sup>21</sup> Conviene rimarcare che ogni variazione delle grandezze-causa si manifesta come gradino nelle equazioni alle differenze (ad esempio nella 3' è  $DT * \text{incY.jk}$ ) pertanto simmetrico anche se il gradino è esogeno, a condizione di conoscere l'istante di applicazione.

<sup>22</sup> Si consideri la crescita esponenziale  $X = X_0 e^t$  e per  $t_F$  si ottenga  $X_F = X_0 e^{t_F}$  da prendere come valore iniziale del backcasting. Questo produce  $X = X_F e^{-t}$  o decrescita esponenziale fino a  $t = 0$ , cui corrisponde  $X_0$ . Poi diventa  $X = X_F e^t$  che cresce esponenzialmente per  $t < 0$ , il che è assurdo. L'assurdità dipende dalla posizione arbitraria di  $t = 0$ , che diventa corretta solo se riferita all'inizio del tempo, all'istante del big-bang per esempio, come riconsiderato nel § 5.1. L'assurdità del risultato non dipende dal modello, né dal backcasting, bensì dall'arbitrarietà della posizione  $t = 0$ , in sostituzione di  $t = t_0$ .

sono impiegate per analizzare il comportamento del modello, cioè per fini di validazione, e se il backcasting è usato per lo stesso scopo non occorre inserirle nel modello da provare.

In realtà, come già sottolineato, la funzione `SAMPLE` è analoga nella sostanza a quella di Tempo Morto e, pertanto, può risultare dall'interpretazione concettuale del sistema e quindi, in questo caso, non è eliminabile.

## 4. Conclusioni

### 4.1 Considerazioni di riepilogo

Il backcasting, o simulazione a tempo inverso, è considerato metodo ausiliario per la validazione dei modelli per simulazione.

Abbiamo svolto alcune considerazioni intese a chiarire l'applicabilità del metodo e gli eventuali accorgimenti necessari nell'ambito SD.

La natura del modello DS consente di dedurre l'applicabilità del backcasting a comportamenti non dipendenti da azioni esogene, con estensione anche a  $t < t_0$ .

Sono state esaminate le diverse categorie di funzioni tipiche, in uso nella modellazione SD, ai fini del backcasting. Le equazioni alle differenze producono un errore, definito di isteresi, dovuto al valore finito del passo  $DT$ , che però non inficia la validità teorica del backcasting. Le funzioni logiche e tabellari non pongono problemi teorici, ma risentono del suddetto errore di isteresi.

Per le funzioni di ritardo (`DELAYx`) si hanno in generale problemi di inizializzazione. In pratica, il backcasting per questo tipo di funzioni non si riduce alla semplice inversione del tempo, ma richiede di aggiustare, appunto, le inizializzazioni. Se si rinuncia alle macro-istruzioni di ritardo e questo è sempre esplicito, come si fa con `SMOOTH` per mettere in evidenza il valore di inizializzazione, il problema dell'inversione non si pone.

Risulta, invece, intrinsecamente asimmetrico il campionamento remoto (`SAMPLE`).

### 4.2 Presenza di azioni esogene

La presenza di azioni esogene esclude prima di tutto l'applicabilità del backcasting, se tali azioni non sono note, a prima dell'istante iniziale della simulazione diretta.

Ciò posto, il backcasting è applicabile per tutte le azioni intrinsecamente simmetriche (come impulso e gradino) previa modifica nel modello del tempo di avvenimento, da ricalcolare in base al tempo iniziale nel backcasting e a quello della simulazione diretta.

Alcune azioni esogene sono definite come intrinsecamente asimmetriche (per esempio, `Pipeline_DELAY` e `SAMPLE`) e non esistono, in genere, funzioni inverse nei linguaggi di simulazione disponibili.

Occorre però osservare in generale che le azioni esogene, rappresentate da funzioni tempo-dipendenti, sono di norma utilizzate, nell'ambito SD e non solo, per verifiche di risposta del modello a shock, cioè in ultima analisi come strumenti di validazione del comportamento. In altri termini, tali azioni non sono conseguenza della concettualizzazione del sistema e pertanto possono essere annullate quando si utilizza il backcasting come strumento di validazione. In conclusione, tali azioni sono da considerare alla stregua di disturbi stocastici e spesso sono anche definite come tali.

Conviene ancora chiarire un aspetto del problema, che può ingenerare confusione se si interpreta la definizione o il cambiamento di una politica di controllo in termini di azioni esogene. La trattazione tipica considera uno stato (scenario) attuale e uno scenario futuro desiderabile e pone il problema di come far transitare il sistema verso l'obiettivo.

Il procedimento prevede la identificazione dei parametri di caratterizzazione della politica e la modellizzazione che rappresenti gli effetti sullo stato. Ciò posto, sulla base dei soliti assiomi del DS, esistono infinite traiettorie tra lo scenario iniziale e l'obiettivo e se ne isola una sola applicando un

indice di costo o di merito suscettibile di ottimizzazione. Tale indice può comprendere tutte le variabili di stato comunque combinate e anche esplicitamente il tempo necessario alla transizione, mentre l'ottimizzazione riguarda la scelta dei parametri caratterizzanti la politica.

A questo punto può essere applicato il backcasting ancora come strumento di validazione del modello e della politica scelta. Esplicitamente, per assegnati scenari attuale e futuro, non esistono metodi di backcasting per identificare la politica da attuare, perché si ricade nel caso di azioni esogene di modifica dei parametri non definite in termini di tempo dell'avvenimento anche se intrinsecamente simmetriche.

### 4.3 Errori computazionali

Un aspetto, non considerato nella trattazione svolta, riguarda gli errori computazionali, per i quali un accenno di controversia nella letteratura pone la questione se siano più gravi per simulazione diretta o inversa<sup>23</sup>.

La questione di fondo riguarda ovviamente la precisione, ovvero il troncamento oltre un dato decimale. Non sembra dover scendere nel dettaglio della questione. Appare evidente che in simulazione diretta sono presenti errori di troncamento, che si aggravano comunque quando i valori ottenuti vengono riutilizzati e ulteriormente troncati nei calcoli di simulazione inversa.

A nostro avviso, tuttavia, tale problema non ha effetti significativi nella pratica della simulazione o, se si preferisce, può essere ricondotto alla questione più generale della sensitività.

Si è annotato che il valore finito del DT provoca differenze tra simulazione diretta e inversa e che, pertanto, come per altri criteri di validazione, il confronto deve essere condotto non tanto sui valori numerici, quanto sul comportamento qualitativo. Gli errori, definiti di isteresi, possono essere teoricamente ridotti abbreviando il DT, ma questa è procedura onerosa e pericolosa in quanto può far diventare prevalenti gli errori computazionali<sup>24</sup>.

Per concludere, se un modello, previsto e aggiustato eventualmente per il backcasting, produce un comportamento qualitativamente diverso in simulazione diretta e inversa allora occorre estendere l'analisi di sensitività a tutti gli aspetti possibili e tra questi potrebbe intervenire anche l'errore computazionale dovuto a incertezza nella inizializzazione, nella stima dei parametri, o a limiti di calcolo.

### 4.4 La controversia su "I limiti dello sviluppo"<sup>25</sup>

Si prescinde dal valore politico di risonanza mondiale associato ai modelli del mondo per il Club di Roma e successivi. Nell'ambito della tecnica modellistica ci sembra condivisibile la critica SPRU al Gruppo SDG del MIT e in particolare:

---

<sup>23</sup> Cfr. le conclusioni di J.W. BREWER, cit.<sup>20</sup>.

<sup>24</sup> Sugli errori computazionali legati all'implementazione dell'algoritmo iterativo di risoluzione delle equazioni alle differenze (metodo di Eulero), si veda, ad esempio, J.C. BEHRENS e P.E. SØRENSEN, *COLTS (Continuous Long-Term Simulation)*, in «TIMS Studies in the Management Sciences», 1980, vol. 14, pp. 161-178.

<sup>25</sup> Il dibattito sul backcasting, scaturito dalla controversia SPRU-SDG, è piuttosto ampio. Giova qui ricordare alcuni contributi non commentati nel testo. R.D. WRIGHT, *Retrodictive tests of dynamic models*, in *Proceedings of 1973 Summer Computer Simulation Conference*, Montreal (Canada), luglio 1973, Simulation Councils Inc., La Jolla (Calif.) 1973, pp. 1085-1093, tenta di chiarire alcuni aspetti del backcasting, sia per la parte teorica relativa alla matematica del continuo, sia per quella pratica legata ai linguaggi di simulazione; le conclusioni però non sono all'altezza dell'analisi prodotta perché risentono della sua posizione di allievo di Forrester. Qualche anno dopo, J. MCLEOD rilancia il dibattito con un editoriale (*Backcasting — The flight of the Wahoo Bird*, in «Simulation», November 1975, pp. vii-ix) sulla newsletter *S<sup>3</sup>—Simulation in the Service of Society*, cui seguono i commenti tecnici di BREWER, cit.<sup>20</sup>, la replica di S.A. ERICKSON, Jr., *More on backcasting*, in «Simulation», August 1976, pp. 74, e la controplica di BREWER, *Author's reply*, *ibid.*

- i modelli testati sono in risposta libera (esplicitamente anche senza disturbi casuali) per cui è legittima l'estensione del backcasting a  $t < t_0$  e i valori eccessivi della popolazione mondiale ottenuti prima del 1900 denunciano difetti di modellazione;
- nell'ambito della validazione si azzerano di norma i disturbi stocastici, se presenti nel modello, allo scopo di evitare incertezze interpretative; pertanto la ripetitività delle sequenze inverse pseudo-casuali non è pertinente per il backcasting come strumento di validazione, per di più è fattibile l'inversione forzata della sequenza stessa;
- infine, con qualche accorgimento, le funzioni ritardo, almeno quelle presenti nei modelli *World* del SDG possono essere simmetriche.

Le conclusioni ottenibili dalla controversia sono in parte specifiche per il caso studiato (i primi modelli *World* del SDG sono criticabili e non solo a seguito del backcasting) e in parte di validità generale (il backcasting non deve essere inteso come semplice inversione del segno del DT, ma richiede già nella modellazione per simulazione diretta di tenere conto che si userà tale procedura di validazione, non solo, ma occorre in genere adattare il modello quando si inverte il tempo).

Erickson e Pikul<sup>26</sup> offrono conclusioni sulla controversia a proposito di *World 2* e *3*, confermando i difetti di modellazione. Quindi, a supporto della tesi di Meadows *et al.* sull'asimmetria del Ritardo, propongono un esempio che si presta a equivoci (SMOOTH di andamento a denti di sega).

L'asimmetria è evidenziata per  $t < 0$ , dove c'è solo per arbitrarietà matematica, mentre è ignorata nell'intervallo di simulazione diretta per il quale il backcasting fornisce un andamento in controfase<sup>27</sup>, infine l'arbitrarietà della inizializzazione non consente di riottenere il valore iniziale.

La questione centrale riguarda la posizione arbitraria  $t = 0$  per l'inizio della simulazione. Da essa risulta per  $t < 0$  la crescita esponenziale, che però non è quella del modello. Infatti la crescita esponenziale di *World 2* e *3* per gli anni anteriori al 1900, non dipende dalla posizione  $t_0$  nel 1900, ma da difetti del modello.

L'esempio dei citati autori tradisce l'impostazione "controllista" che fa riferimento ad un modello di risposta forzata:  $t = 0$  e  $u_0 = y_0 = 0$ . Invece nel flusso continuo del tempo  $t = 0$  non ha significato reale, a meno di identificarlo con l'istante del big-bang.

#### 4.5 Applicazioni del backcasting

I modelli *World* costituiscono anche una applicazione della simulazione alla storiografia, in quanto riproducono in un certo intervallo temporale l'evoluzione di un sistema socio-economico.

In generale, l'evoluzione dei sistemi sociali è interpretabile come sequenza di periodi, caratterizzati da un comportamento, e da discontinuità che introducono un nuovo comportamento qualitativamente diverso<sup>28</sup>. Questa interpretazione corrisponde in ambito SD alla regola empirica secondo la quale un modello a struttura invariante (quello del DS) ha validità orientativa per un periodo dell'ordine della decina di anni nel caso di imprese e del centinaio di anni nel caso di società<sup>29</sup>. Ovvero l'analisi statistica indicherebbe il verificarsi di discontinuità con le suddette periodicità medie.

<sup>26</sup> S.A. ERICKSON, Jr. e R.A. PIKUL, *Backcasting Global Models: A Resolution of the Controversy*, in «IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics», September 1976, pp. 648-650.

<sup>27</sup> Si consideri la funzione periodica  $\text{seno} = \sin \omega t$  nel continuo e si inverta  $t$  da un valore  $\text{seno}$  qualunque; si ottiene  $\sin(-\omega t) = -\sin \omega t$  che è in controfase rispetto alla precedente.

<sup>28</sup> Cfr. C.R. DECHERT, *Integration and Change in Political and International Systems*, in J.H. MILSUM (a cura di), *Positive Feedback: A general systems approach to positive-negative feedback and mutual causality*, Pergamon Press, Oxford 1968, pp. 127, 133-135.

<sup>29</sup> Cfr. l'affermazione di Robert L. EBERLEIN nella *mailing-list* della SD Society, *message-ID*: <Pine.SGI.3.93.961024052940.5623C-100000@world.std.com>, *archive-file*: <<http://www.vensim.com/sdmail/archives/1996-10.txt>>.

L'interesse storiografico privilegia ovviamente le discontinuità, in quanto eventi significativi nella sequenza cronologica. Sia stato formalizzato un modello che copre un certo periodo "storico", caratterizzato da un dato comportamento. Il backcasting, come per *World*, può essere un ausilio alla validazione del modello. In questo caso questo può anche servire a estrapolare per predizione o postdizione/retrodizione con estensione non oltre  $\frac{1}{3}$  della lunghezza del periodo in cui si dispone di dati, ovviamente, "fittati" dal modello di simulazione<sup>30</sup>.

Per la Storia, l'incertezza interpretativa cresce in genere risalendo il passato e pertanto la postdizione (le tecniche di backcasting, nel nostro caso) assume importanza maggiore della predizione. Inoltre, l'incertezza risulta maggiore nella quantificazione delle condizioni a monte e a valle di un evento significativo, piuttosto che nella sua allocazione cronologica. Allora il backcasting del modello consente di identificare condizioni congrue a valle, di solito, meglio documentate, che riproducono la data dell'evento che le origina.

L'analisi di sensitività consentirà poi la definizione delle grandezze più significative, sulle quali concentrare la ricerca storica per limitare il numero di ipotesi.

Altra situazione riguarda l'incertezza cronologica sull'evento o addirittura il dubbio della sua esistenza. Il backcasting applicato a un modello di società, documentato in un certo periodo, può portare a situazioni assurde, tali cioè da postulare la necessità di un evento in una certa finestra temporale.

Quanto sopra è trasferibile al problema del raggiungimento di scenari futuri desiderabili a confronto di quelli prevedibili, inaccettabili ad esempio per motivi di non sostenibilità. Il passaggio dal prevedibile al desiderabile può essere ottenuto con modesto aggiustamento delle tendenze in atto, ma può anche richiedere discontinuità evolutive.

Un certo numero di società del passato, come quelle definite civiltà arretrate da Toynbee<sup>31</sup> o come quella della riserva signorile nel sistema feudale polacco<sup>32</sup> sono caratterizzate da una stabilità sostenibile realizzata sulla crescita quasi zero della popolazione (e quindi della produzione, del consumo, ecc.). Più in generale certi comportamenti oscillatori del modello potrebbero corrispondere ad un comportamento stabilmente ciclico, ancora con crescita media quasi zero<sup>33</sup>.

Per tali società la simulazione può aiutare a spiegare il transitorio che ha prodotto la stabilizzazione e i meccanismi che la mantengono. Con riferimento ad uno scenario futuro stabilizzato il transitorio è problema da backcasting, mentre i meccanismi di controllo possono essere trattati indifferentemente mediante pre o retrodizione.

---

<sup>30</sup> S. Bremer suggerisce questa regola empirica nel paragrafo *Postdictive tests* in Donella H. MEADOWS, John RICHARDSON e G. BRUCKMANN, *Groping in the dark — The first decade of global modelling*, J.Wiley, New York 1982, pp. 233-236.

<sup>31</sup> A.J. TOYNBEE, *A Study of History — Abridgment by D.C. Somervell*, Oxford Univ. Press, London 1970<sup>3</sup> [trad. it. *Storia comparata delle civiltà — Compendio di D.C. Somervell*, 3 voll., Newton Compton, Roma 1974]. Una proposta di formalizzazione degli archetipi di Toynbee si trova in A. LEPSCHY e S. MILO, *Su un modello formalizzato per la rappresentazione delle concezioni di A. Toynbee sulla dinamica degli eventi storici*, in «Scientia», 1976, vol. 111, n. 1-2-3-4, pp. 7-33.

<sup>32</sup> W. KULA, *Teoria economica del sistema feudale: proposta di un modello*, Einaudi, Torino 1970 [originale in polacco, Warszawa 1962]. L'implementazione del modello è descritta in O. ITZCOVICH, *L'economia della riserva signorile e la sperimentazione numerica: verifiche e problemi*, in «Quaderni storici», 1983, n. 53, pp. 579-600.

<sup>33</sup> Si veda, ad esempio, il comportamento di una società primitiva della Nuova Guinea in R.A. RAPPAPORT, *Pigs for the Ancestors*, Yale University Press, New Haven 1968, tradotto in modello per simulazione da S.B. SHANTZIS e W.W. BEHRENS III, *Meccanismi di controllo della popolazione in una società agricola primitiva*, in D.L. MEADOWS e D.H. MEADOWS (a cura di), *Verso un equilibrio globale cit.*<sup>1</sup>, pp. 339-378.