

A. DE MARCHE  
GARANZI 1992 P. 28-29; 44-57; 62-71; 74-85  
ECOLOGIA FUNZIONALE

63

63

superiore alla somma degli elementi che lo compongono. Una esperienza artistica analoga, sviluppata in Italia negli anni Cinquanta, fu quella dello Spazialismo: lo spazio inteso come elemento unificante.

Il senso dell'unitarietà dell'ambiente e dell'appartenenza dell'uomo a esso rimasero però — nella cultura occidentale — dei fatti puramente elitari e ciò finché la collettività non percepì in modo diffuso il malessere causato dai danni ambientali. Negli anni Sessanta nascono i movimenti ambientalisti e l'interesse all'ambiente si diffonde, superando rapidamente i concetti riduttivisti grazie ai contributi di due discipline emergenti: l'ecologia e la teoria dei sistemi. La ricerca scientifica in questi campi fa emergere l'ambiente come un sistema organico, ma porta anche al pericolo di passare da un riduttivismo frammentario a un olismo organicistico altrettanto irrealista: emerge il concetto del super-organismo, modello finalistico distorto perché, come vedremo, la natura ha una direzione, ma non un «fine».

L'ambiente, oggi, è inteso in senso sistemico, come quel complesso di condizioni e di relazioni che caratterizzano un determinato ambito spaziale, il quale sia caratterizzato da una certa omogeneità fisiologica e fisiologica, e nel quale in genere convivono, più o meno stabilmente, individui, popolazioni e comunità biologiche, uomo incluso.

L'analisi sin qui condotta, tuttavia, è insufficiente a spiegare l'ambiente, perché soffre di una visione statica, quasi di equilibrio, fra componenti e fattori, che distorce la reale dinamica ambientale.

È opportuno allora istituire una importante distinzione categorica: quella fra ambienti sistemici e ambienti non sistemici.

Gli *ambienti sistemici* (o sistemi ambientali) sono caratterizzati da complesse reti di relazioni che si instaurano tra le componenti del sistema, e tra esse e l'ambiente esterno. Queste relazioni (che consistono in flussi di materia, energia, informazione) sono concertate in modo tale che si sviluppano, nel sistema, degli efficienti meccanismi di organizzazione, regolazione e controllo del funzionamento complessivo. Una foresta, una prateria (ambienti naturali), una banca, un tribunale (ambienti umani) sono esempi di ambienti sistemici.

Sono *non-sistemici* quegli ambienti nei quali non si sviluppano determinate relazioni funzionali, o si sviluppano a un livello molto basso, tale da non consentire processi di organizzazione, regolazione e controllo delle condizioni ambientali. Sono esempi di ambienti non sistemici un ghiacciaio, una colata di lava recente (ambienti naturali), una cava di ghiacciaio, una piazzola di sosta lungo l'autostrada (ambienti umani).

## 1.2. I sistemi ambientali

### *Livelli di complessità e di organizzazione*

In natura la materia è organizzata secondo diversi livelli di complessità, cui corrispondono altrettanti «sistemi». Essi, dai più semplici ai più complessi, sono i seguenti: particelle subatomiche, atomi, molecole, macromolecole, cellule, organi, individui, popolazioni, comunità ed ecosistemi, regioni ecologiche, biomi, biosfera ed ecosfera. Le scienze ambientali si occupano dei sistemi ecologici appartenenti ai livelli di organizzazione che vanno dall'individuo (considerato in riferimento al proprio ambiente di vita) sino all'intera biosfera.

*Individuo*: è qualsiasi organismo vivente: esso percepisce il proprio ambiente di vita come una realtà unitaria, cioè come interazione dei fattori ambientali.

*Popolazione*: individui della stessa specie che interagiscono tra loro (e con i fattori esterni) nello stesso spazio e nello stesso tempo (es. i caprioli presenti in un bosco).

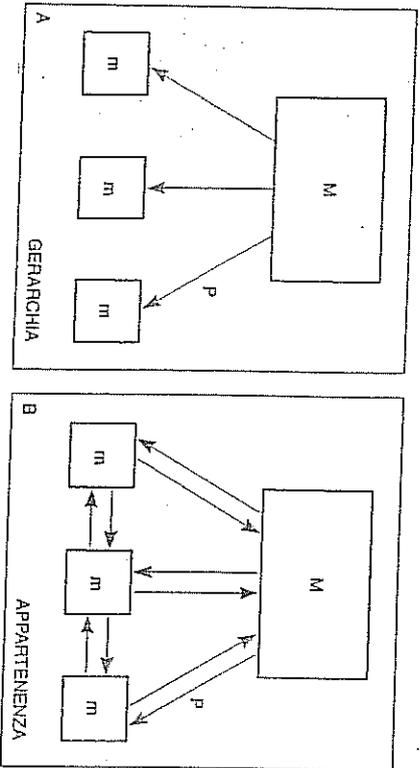
fattori ambientali; qualora intervenga in maniera determinante anche il fattore culturale, si hanno i sistemi umani. Sistemi di origine umana sono quelli in cui l'organizzazione sociale svolge un ruolo fondamentale (sistemi sociali): organismi individuali (es. capo, guardia, membro volante), gruppi (es. gruppo esecutivo di una società, guardiani di un museo, squadra di cucina di un ristorante), organizzazioni (es. tribunali, acciaierie, esercito), società (o nazioni, es. Etiopia, Stati Uniti, Filippine), sistemi sovranazionali (es. ONU, Cee) (Miller, 1965).

Nell'ambito dei sistemi ambientali si possono poi riconoscere quei sistemi che presentano una ben determinata estensione territoriale. Essi sono detti *sistemi regionali*, e comprendono le regioni ecologiche (di varie dimensioni), i biomi e l'intera ecosfera.

## IL SUPER-ORDINE DELLA NATURA

Tra i diversi livelli della scala di organizzazione dei sistemi naturali si instaurano rapporti interattivi.

Il macrosistema *M* sub-ordina i microsistemi *m* ma, al contempo, ne è super-ordinato: sub-ordine e super-ordine si intersecano e coesistono nei sistemi ambientali naturali, come espressione di due funzioni vettoriali coagenti nel sistema complesso.



Supponiamo che il livello *m* sia quello degli organismi individuali e il livello *M* ne rappresenti una popolazione. La popolazione (macro-livello) presenta proprietà sue proprie, sconosciute al microlivello degli individui: per esempio la regolazione demografica. Dunque un singolo individuo della popolazione non può comportarsi come se fosse

“isolato” (es. allevare tantissimi figli): è soggetto ai parametri d'ordine imposti dalla popolazione: se questa vive in un ambiente che richiede la stabilità dei numeri, il nostro individuo dovrà adattarsi ad avere solo due o tre figli che giungono alla maturità e alla riproduzione sessuale. Il sistema macroscopico sub-ordina quello inferiore.

Supponendo di trattare di una popolazione di uccelli, tuttavia, il numero di uova per covata può variare solo in un ristretto ambito, in risposta alla variazione dei fattori esterni (es. disponibilità di cibo). In gran parte esso è definito da precisi relenti genetici e biochimici: non può scendere sotto un certo valore. La dimensione ottimale di una nidaiata di cinciallegre è di 8-12 uova: a queste dimensioni il numero dei piccoli che sopravvivono è massimo. Ma questo numero può essere in contrasto con la strategia dell'omeostasi richiesta dall'ambiente esterno; la popolazione migrerà allora verso ambienti più produttivi (le cinciallegre non vivono nelle vecchie foreste climatiche, ma piuttosto nelle macchie, nelle radure, nelle zone ricche di siepi), caratterizzando la comunità e l'ecosistema nel suo complesso: la configurazione genetica e biochimica degli individui e delle popolazioni interisce direttamente sulla struttura della comunità e sull'ecologia del paesaggio. Il sistema microscopico super-ordina quello macroscopico, pur essendone al contempo sub-ordinato.

I sistemi ambientali naturali non solo funzionano rispettando le leggi della fisica, della chimica e della biologia, ma trovano anche in esse il referente di base della loro organizzazione e del loro ordinamento, emergendo tuttavia dai sistemi componenti per loro caratteristiche proprie le quali, a loro volta, condizionano il comportamento degli organismi e i loro processi vitali (v. anche § 3.1.).

Si può anche dire, in altri termini, che i viventi si adattano all'ambiente adattando al contempo l'ambiente a se stessi.

La funzione di super-ordine imposta dagli organismi all'ambiente naturale si riflette nella fenomenologia dell'ecosistema: un bosco nasce, cresce, fiorisce perché nascono, crescono, fioriscono gli alberi di cui è composto. Ma questo non deve trarre in facili inganni vitalistici: l'ecosistema non è una sorta di super-organismo, ma un sistema complesso di interazioni tra componenti e fattori del suo ambiente interno (comunità, popolazioni, individui) e quelli del suo ambiente esterno (regione ecologica, biomi, biosfera). La visione sistemica dell'ambiente può farci capire come funzionano gli ambienti naturali, mentre una semplicistica visione super-organistica traviserebbe la realtà e non sarebbe sostenuta da referenti genetici e biochimici. Il corredo genetico, infatti, è patrimonio degli individui e delle popolazioni, non dell'ambiente in sé. Sembra invece importante, oggi, cercare di individuare i meccanismi che, nei sistemi ecologici, abbiano un effetto causale (Ulanowicz, 1988).

2.1. Leggi fisiche e sistemi ecologici

Il funzionamento dei sistemi ecologici rispetta le leggi della fisica classica, ma al contempo le supera. Le usuali formulazioni della legge d'inerzia, del primo e secondo principio della termodinamica, delle leggi dell'equilibrio (leggi che vengono rispettate dai sistemi ecologici), valgono solo per sistemi semplici, in condizioni prossime all'equilibrio.

I sistemi ecologici, invece, sono sistemi complessi che funzionano generalmente in condizioni lontane dall'equilibrio. Per capire i processi ambientali, perciò, occorre ricercare nuove formulazioni delle leggi fisiche, adeguate al livello di complessità del sistema indagato. Occorre qui inserire alcuni concetti fondamentali in ecologia: *sistema aperto*: sistema che può scambiare materia ed energia con l'ambiente esterno; *sistema chiuso*: sistema che non può scambiare materia con l'ambiente esterno, ma può avere scambi di energia; *sistema isolato*: sistema che non può scambiare né materia né energia con l'ambiente esterno.

Per esempio, un lago è un sistema aperto; un fiume è un sistema ancora più aperto (vi possono dunque essere diversi gradi di «apertura»). La Terra (o meglio il sistema Terra-atmosfera) è un sistema chiuso ma non isolato. Il calorimetro (un calorimetro perfetto) è un sistema chiuso e isolato. Siccome la Terra è sempre soggetta al flusso energetico proveniente dal Sole, nessun sistema reale terrestre sarà mai un sistema isolato. Raramente si hanno dei sistemi veramente chiusi.

Perciò, in pratica, tutti i sistemi ambientali sono aperti e non isolati. Per esempio, il funzionamento di sistemi dinamici complessi è difficilmente descrivibile per mezzo delle formule di Newton. Può invece diventare accessibile per mezzo delle equazioni dell'algebra non lineare di Hamilton.

CAPIOT  
CAPA...  
B...  
1844-1876

CAPIOT → LAVOISIER

lati. L'unica eccezione è data dall'intero sistema terrestre (ecosfera) che, come si è detto, è chiuso ma non isolato.

Il non-isolamento energetico dei sistemi ambientali porta a riconsiderare in modo euristico i principi della termodinamica. Il secondo principio sancisce, come noto, che ogni trasformazione spontanea che avvenga in un sistema isolato comporta un aumento di entropia del sistema stesso.

L'entropia (così definita da Clausius nel 1865) è una funzione di stato di un sistema termodinamico che definisce l'entità della degradazione di energia. Ogni trasformazione energetica comporta un aumento di entropia. Così, in un sistema isolato, ogni trasformazione spontanea avviene con il passaggio da forme più «concentrate» a forme più «disperse» di energia: l'entropia è anche una misura del disordine termodinamico, il quale, a sua volta, è espressione della probabilità<sup>1</sup> che si verifichino determinate condizioni ambientali (fig. 4).

Nei sistemi naturali gestiti dagli organismi viventi (sistemi non isolati di tipo biologico, ecologico, ambientale), avvengono anche dei processi anti-entropici: l'energia viene «concentrata», le strutture diventano «ordinate» e così via. I viventi tendono cioè a realizzare strutture poco «probabili» in natura, e ciò avviene perché in tali condizioni si ottiene la migliore utilizzazione dell'energia che fluisce attraverso il sistema. Questo processo non emerge da un ipotetico «finalismo» della natura, ma dal fatto che, come vedremo in seguito, le situazioni a minore entropia si impongono selettivamente, per motivi energetici, rispetto ad altre situazioni possibili.

Questo non significa, ovviamente, che venga disatteso il secondo principio della termodinamica. L'entropia complessiva (sistema ambiente + ambiente esterno) è aumentata ma, all'interno del sistema gestito dai viventi, essa è diminuita. E ciò grazie a opportuni processi dissipativi che hanno «pompatto fuori», nell'ambiente esterno, il disordine necessariamente prodotto («necessariamente» indica appunto il rispetto del secondo principio).

I viventi sono dei sistemi anti-entropici: il flusso di energia che li

1 L'entropia è legata al disordine termodinamico dalla celebre formula del fisico viennese Ludwig Boltzmann (nato nel 1844 e suicidatosi nel 1906):

$$S = K \cdot \log D$$

in cui S è l'entropia, D il disordine termodinamico (o «probabilità») che si verifichi una certa configurazione) e K una costante (costante di Boltzmann).

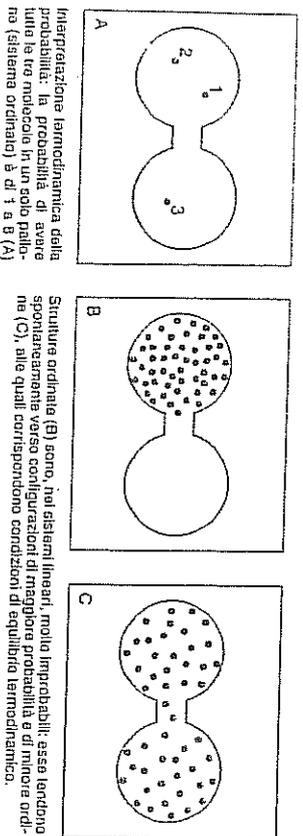


Fig. 4. Probabilità e disordine termodinamico. Le figure rappresentano due ipotetici palloncini di vetro collegati tra loro e contenenti un certo numero di molecole di gas. A temperatura ambiente, le molecole sono in uno stato di continua agitazione termica; esse, perciò, possono dislocarsi in modi diversi nei due palloncini (esempi A, B e C) secondo probabilità differenti.

I sistemi viventi, contrariamente ai sistemi puramente fisici, sono in grado di realizzare strutture molto ordinate, cioè assai poco probabili in natura (si pensi quanto sia «improbabile», da un punto di vista fisico, un animale a sangue caldo, o la codificazione dei caratteri genetici in un cromosoma, o la diversità biologica di una foresta pluviale).

attraversa impone efficienti configurazioni di ordine. La loro capacità di ridurre l'entropia è il risultato della riproduzione e dell'evoluzione, mediante le quali il sistema biologico può modificarsi, aumentare il proprio grado di ordine e «inventare» strutture e processi sempre più efficaci per conseguire i massimi valori di successo riproduttivo.

I viventi realizzano dei flussi in uscita di entropia negativa tali da dissipare la propria, inevitabile, produzione interna di entropia positiva. Questi flussi vengono realizzati per mezzo di scambi di energia e di materia con l'ambiente esterno: uno dei migliori esempi è quello degli organi bronchiali, per mezzo dei quali l'individuo espelle l'anidride carbonica prodotta nel corso della respirazione.

Ma anche i sistemi più complessi, come le strutture sociali, hanno continuamente bisogno di promuovere un flusso di entropia in uscita dal sistema, al fine di conservare l'ordine interno. Per l'ambiente urbano, le discariche di rifiuti, le immissioni di gas residui di lavorazione in atmosfera ne sono alcuni esempi familiari.

Tuttavia, mentre in natura i flussi di entropia sono diffusi e l'intera biosfera può «dissipare» il suo disordine verso l'esterno, consen-

Flusso

tendo così la conservazione e l'incremento dell'ordine interno dei singoli sottosistemi, l'uomo ha invece dissipato materia ed energia di bassa qualità direttamente nel proprio ambiente esterno (l'ecosistema, la regione, ecc.) causando sovente pericolosi «ingorghi di disordine», che l'ecosfera in certi casi non riesce più a smaltire (es. l'aumento dell'anidride carbonica atmosferica).

Funzionale al processo dissipativo sembra essere la tessitura frattuale: la ritroviamo frequentemente, in natura, in organi preposti allo scambio e all'interazione tra sistemi diversi: nei bronchi, nelle arterie, e più in generale nelle situazioni di interfaccia. Nei sistemi ambientali, le linee e le superfici di separazione tra un ecosistema e l'altro, tra la comunità forestale e l'atmosfera, assumono spesso una struttura frattuale.

*Energetica dei sistemi ambientali*

Come si è visto in precedenza, la legge generale dell'aumento di entropia che accompagna qualsiasi trasformazione, pur essendo legge universale, è valida soltanto all'interno dei sistemi isolati. Essa si applica alle trasformazioni spontanee che avvengono in tali sistemi. Pertanto l'entropia non è una proprietà intrinseca di un sistema ambientale (mai isolato) ma va sempre considerata nel complesso [ambiente interno + ambiente esterno].

Un osservatore interno al sistema (facente parte cioè dell'ambiente interno) che volesse prevedere l'evoluzione del sistema stesso, basandosi sulla tendenza alle variazioni di entropia, si troverebbe in grave difficoltà. Dovrebbe tener conto non soltanto delle condizioni all'interno del sistema, ma anche di quelle dell'ambiente esterno.

*L'energia libera: una funzione di stato locale*

Le tendenze evolutive e funzionali di un sistema ambientale sono invece più facilmente prevedibili se vengono studiate in connessione a una proprietà intrinseca al sistema, l'energia libera, così definita dall'americano Gibbs alla fine del secolo scorso: l'energia libera di un sistema è una forma di energia potenziale (energia di legame chimico) che può essere liberata come lavoro nel corso di una trasformazione. È l'energia disponibile per compiere un lavoro.

L'energia libera è l'energia immagazzinata nei composti capaci di fornire, mediante reazioni di trasferimento, l'energia contenuta nei

loro legami biochimici, per fare avvenire altre reazioni o per produrre lavoro.

Quindi, le trasformazioni spontanee procedono sempre verso la diminuzione dell'energia libera del sistema. Si tratta di una proprietà intrinseca e, come tale, predittiva del comportamento del sistema.

Tuttavia, nei sistemi ambientali reali, il flusso di energia che li attraversa può produrre — in condizioni opportune — un aumento di energia libera: è questa la legge del massimo di energia nei sistemi biologici, già enunciata da Lotka nel 1925.

L'aumento dell'energia libera si materializza, nei sistemi viventi, con l'aumento sia della «quantità» che della «qualità» della materia vivente.<sup>1</sup>

In natura, le configurazioni ambientali a maggiore energia libera sono dunque quelle più ricche di vita e perciò, in base ai principi che regolano i processi di competizione fra i viventi (v. cap. 5), esse sono destinate a sostituirsi a quelle a minore energia libera.

Solo l'uomo ha creato degli ambienti nei quali a una elevatissima quantità di energia libera (idroelettrica, da idrocarburi, atomica) non corrisponde una equivalente ricchezza di vita. Probabilmente è questa la maggiore differenza tra l'uomo e le altre specie.

<sup>1</sup> La regola generale per le trasformazioni energetiche nei sistemi ambientali viene dedotta dalla equazione di Gibbs:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

in cui  $G$  è l'energia libera (per es. negli organismi viventi, l'energia di legame chimico che può compiere lavoro),  $H$  è l'entalpia (energia termica che il sistema può scambiare con l'ambiente esterno),  $T$  la temperatura e  $S$  l'entropia.

Gli organismi viventi realizzano due processi fondamentali:

a. accumulo di energia libera (parendo, con le piante verdi, contenenti clorofilla, dall'energia solare, e trasferendo quindi questa energia agli erbivori, quindi ai carnivori, ecc.); questi processi sono perciò detti «endoergonici»;  
b. demoliscono questa energia libera per produrre lavoro (osmotico, muscolare, ecc.); e questi processi sono detti «esocergonici».

I due processi fondamentali attraverso i quali si realizzano queste trasformazioni sono quelli della fotosintesi e dell'assunzione di glucosio (processi endoergonici) e quelli della respirazione e della glicolisi (processi esocergonici).

Nel corso della respirazione, circa il 60% dell'energia utile del glucosio viene trasferita all'ATP: è un rendimento molto elevato, se confrontato con quello delle macchine costruite dall'uomo (motore a scoppio: 25% circa).

I processi di ossidoriduzione sono tra quelli che sviluppano le maggiori quantità di energia libera: per questo motivo la demolizione ossidativa è stata favorita dalla selezione naturale, al fine di conservare l'energia chimica prodotta dalla fotosintesi sotto forma di quella «moneta universale di scambio» che è l'ATP.

## 2.2. L'ambiente, un sistema lontano dall'equilibrio

Mentre la fisica classica studia per lo più i sistemi isolati in condizioni prossime all'equilibrio, le scienze ambientali sono chiamate a occuparsi principalmente di sistemi non isolati, nei quali il flusso di energia che li attraversa tende a mantenere condizioni di non-equilibrio.

Il Sole ha una temperatura superficiale di circa 6.000 C; la Terra di circa 15 C. Si instaura dunque un flusso di calore — costante alla scala dei tempi storici e in buona misura anche dei tempi geologici — dal Sole verso la Terra. Di conseguenza, il nostro pianeta è continuamente attraversato da un flusso di energia che entra nel sistema, compie lavoro, subisce delle trasformazioni e infine esce dal sistema stesso. La Terra è perciò un sistema non isolato e il flusso di energia solare mantiene questo sistema in condizioni di non-equilibrio termodinamico.

In realtà, all'interno del sistema terrestre si possono incontrare situazioni locali molto differenziate, che vanno da semplici sistemi fisici o geologici in condizioni assai prossime all'equilibrio, sino ai sistemi ecologici più ricchi di produzione biologica e più lontani dall'equilibrio termodinamico (v. scheda di pag. 85).

La vita, in quanto espressione di ordine, è possibile solo in condizioni lontane dall'equilibrio termodinamico. L'equilibrio è uno stato in cui non vi sono più differenze di temperatura da un punto all'altro del sistema, né di pressione, né di concentrazione. Si tratta di uno stato, dunque, dove non è più possibile alcuna trasformazione, alcun lavoro, alcuna forma di vita.

Quindi, anche i sistemi ecologici, nei quali la componente biologica è determinante nella gestione dei processi, sono sistemi che funzionano in condizioni lontane dall'equilibrio termodinamico.

Tuttavia, anche in condizioni lontane dall'equilibrio si possono realizzare situazioni tendenzialmente stabili — o, per meglio dire, condizioni di stato stazionario dinamico.

### Lo stato stazionario

Consideriamo adesso sistemi non isolati, cioè sistemi soggetti a un flusso di energia, che per ora supporremo costante e unidirezionale.

Il flusso di energia, se opportunamente indirizzato, distorce il si-

stema dal suo stato di equilibrio, e lo sposta in una situazione nuova, di non-equilibrio. Tuttavia, lontano dall'equilibrio, si possono talora creare stati coerenti ai quali corrisponde una certa stabilità dinamica, detti stati stazionari. Esamineremo ora alcuni esempi di stato stazionario, partendo dai sistemi fisici e chimici, e passando quindi a esempi biologici ed ecologici.

Cercheremo di sottolineare come, mentre nei primi l'ordine è transitorio, poiché cessa quando si esaurisce la causa che lo ha prodotto, nei sistemi viventi le situazioni di ordine createsi nello stato stazionario tendono a conservarsi nel tempo.

Lontano dall'equilibrio termodinamico, i sistemi ecologici possono evolvere verso situazioni di maggiore ordine, sostenute dai processi anti-entropici realizzati dagli organismi viventi.

#### a. Esempi meccanici

Consideriamo un primo esempio, puramente meccanico. Lanciamo una pallina da ping-pong al culmine di uno zampillo verticale d'acqua. Sappiamo che la pallina, se il flusso idrico è sufficientemente regolare, non cadrà a terra, ma si manterrà, oscillando, al vertice dello zampillo (fig. 5).

La pallina, in queste condizioni, non è in equilibrio: un corpo in equilibrio è fermo, oppure è dotato di moto rettilineo e uniforme (leggi di Newton). La nostra pallina non è in nessuna di queste due

1. Nello stato stazionario dei sistemi ambientali l'energia libera si mantiene all'incirca costante nel tempo, eppure non si può dire che  $\Delta G$  sia uguale a zero. Infatti la costanza media di  $G$  è data dal bilancio tra una continua produzione di energia libera ( $\Delta G > 0$ ) a opera del flusso dell'energia solare in ingresso e una continua demolizione di essa ( $\Delta G < 0$ ), per produrre lavoro. Non si tratta dunque di una condizione di equilibrio termodinamico (ove sarebbe  $\Delta G = 0$ ), ma di stato stazionario dinamico con un  $\Delta G$  positivo e uno negativo mediamente bilanciati nel tempo.

Questo concetto è fondamentale per la comprensione della dinamica degli ambienti naturali: per esempio, se è vero che lo stato stazionario dell'ecosistema marino (climax) si mantiene mediamente in condizioni isentropiche, isergoniche e isentropiche, è anche vero che ciò non avviene in condizioni di equilibrio (ove sarebbe  $G = 0$ ), ma in condizioni dinamiche lontane dall'equilibrio, con il massimo valore di  $G$ . Quanto più lontano è il sistema dallo stato di equilibrio, tanto maggiore è la caduta di energia libera, e perciò tanto maggiore è il lavoro utile che il sistema può compiere (Lenaz, 1980).

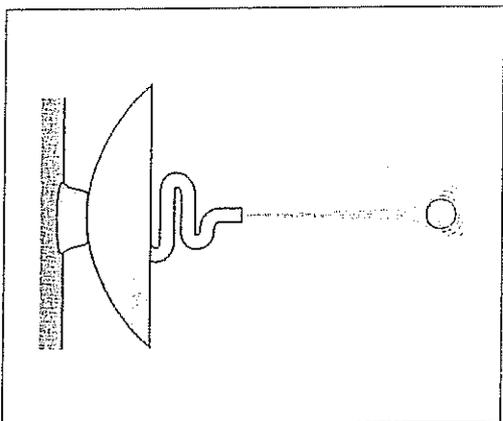


Fig. 5. Esempio di stato stazionario di tipo semplice, meccanico.

condizioni: oscilla continuamente attorno a un punto (attrattore del sistema nello spazio delle fasi).

Tuttavia il suo stato è sufficientemente coerente, cioè stabile. Se non interviene qualche perturbazione esterna di una certa intensità (come un forte colpo di vento; cioè superiore alla «soglia critica») e se il flusso dell'energia cinetica dell'acqua si mantiene regolare, la pallina si manterrà in questo stato: è uno stato stazionario.

Un altro esempio meccanico, che serve bene anche per chiarire la differenza tra equilibrio e stato stazionario, è quello della manica a vento. In assenza di flussi energetici esterni (vento nullo) la manica è in equilibrio; in presenza di un flusso energetico esterno (vento sensibile) essa si stabilizza in una condizione di stato stazionario (fig. 6).

#### b. Esempi idraulici

Consideriamo il livello dell'acqua di un fiume: in condizioni di flusso (portata) costante, esso si mantiene, in una certa sezione del corso d'acqua, mediamente costante nel tempo. Tuttavia la costanza del livello dell'acqua non indica uno stato di equilibrio, ma uno stato stazionario.

Nella fig. 7 sono illustrati altri semplici paragoni idraulici di stati stazionari.

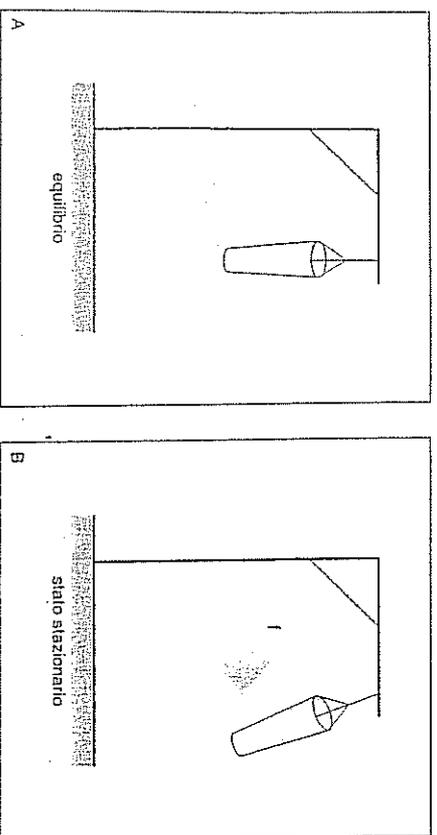


Fig. 6. Stato di equilibrio (A) e stato stazionario (B) nella manica a vento; il flusso energetico (vento).

*c. Esempio termodinamico  
(nasce l'ordine interno, ma è transitorio)*

Consideriamo ora un sistema un po' più complesso, di tipo termodinamico: le celle di Bénard. Si tratta di uno strato liquido compreso tra due superfici orizzontali. In condizioni di riposo, il liquido assume uno stato di equilibrio, meccanico e termico. Riscaldando dall'esterno la superficie inferiore, si genera un flusso di calore in senso al liquido, dal basso verso l'alto. Finché tale flusso è modesto, il calore viene trasferito per conduzione. Oltre una certa soglia critica, inizia un moto convettivo; con esso, il flusso di calore viene favorito dal sistema, nel quale — in condizioni appropriate — si formano delle celle di convezione regolari.

È questo uno stato stazionario in cui compare un fatto nuovo: sotto l'influenza di un flusso costante di energia il sistema acquisisce organizzazione e ordine, in condizioni abbastanza stabili (fig. 8).

Il sistema convertitivo delle celle di Bénard è stato recentemente rivisitato mediante una simulazione al computer (Mareschal e Kestemont, 1987). Il modello ha mostrato che il sistema, che allo stato iniziale presenta una distribuzione casuale delle velocità dei componenti microscopici, va ordinandosi in strutture a vortici quando fra le due superfici, superiore e inferiore, venga realizzato un gradiente

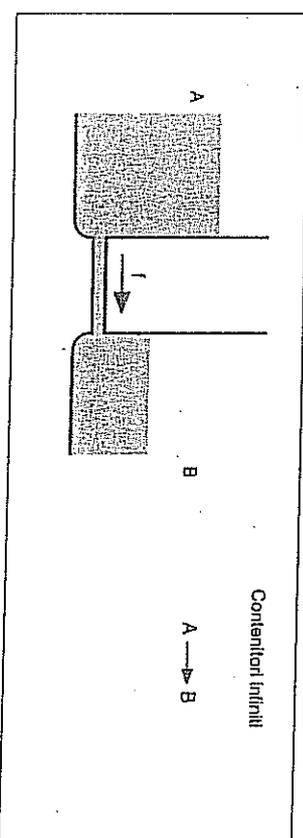
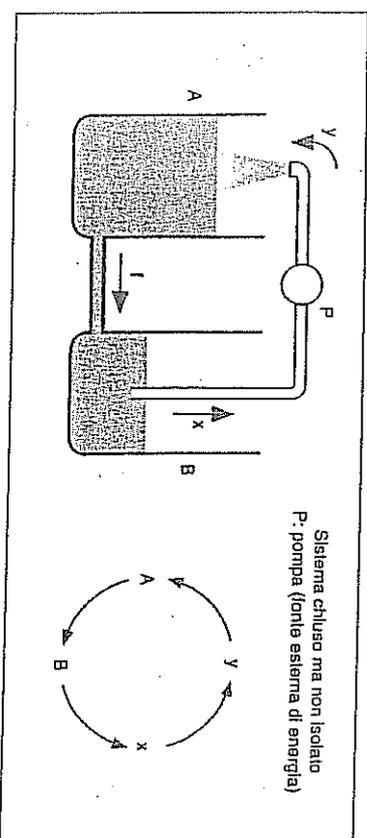
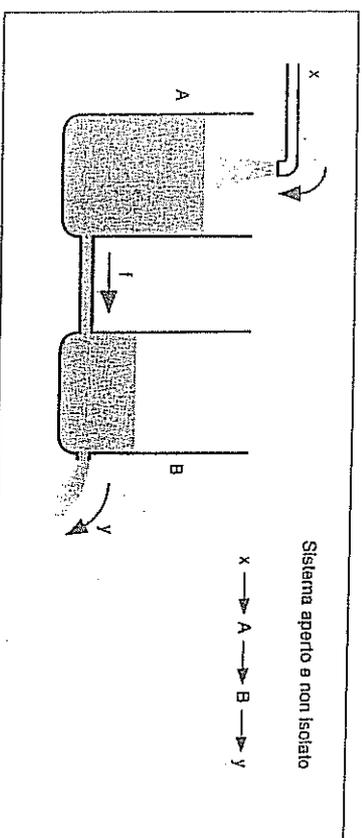


Fig. 7. Paragoni idraulici di stati stazionari. Il livello dell'acqua dei due serbatoi rimane costante nel tempo, ma questo non significa che sia in equilibrio: si tratta in realtà di uno stato stazionario in condizioni dinamiche (flusso idrico di portata costante) (da Lenz, 1980, modificato).

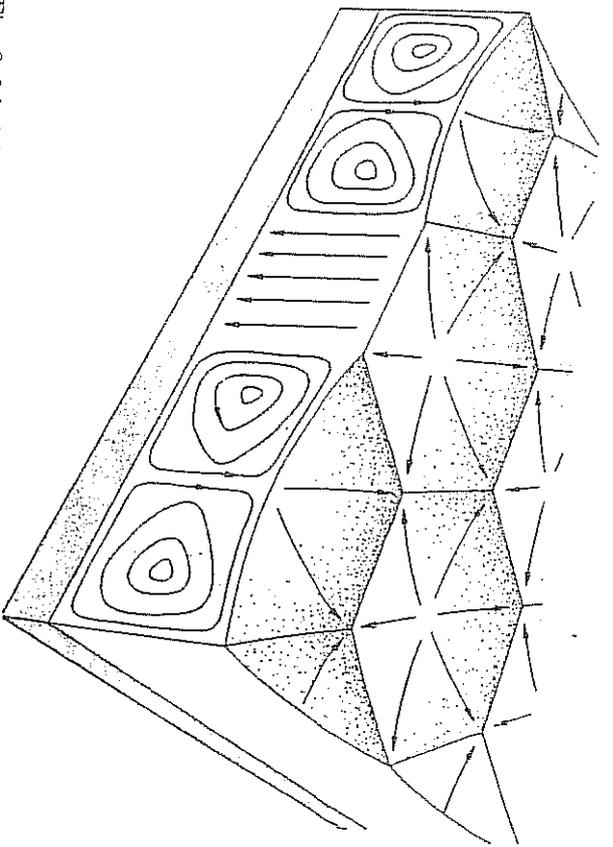


Fig. 8. Modello delle celle di Bénard. Uno strato liquido è compresso fra due superfici orizzontali. Riscaldando dall'esterno la superficie inferiore, si genera, nello strato liquido, un flusso di calore che, oltre una certa soglia critica (notare la comparsa di un fatto nuovo rispetto agli esempi meccanici: l'effetto soglia), genera le caratteristiche celle convettive esagonali (disegno tratto da Verlade e Normand, 1980, per gentile concessione di Le Scienze s.p.a., Milano).

A scala più grande ritroviamo celle convettive nei laghi, negli oceani e nello stesso mantello terrestre; queste ultime sarebbero alla base della formazione delle grandi zolle litosferiche, anch'esse aventi forme non molto dissimili dai poligoni esagonali.

di temperatura. Tuttavia questi vortici formano delle strutture stabili solo oltre una certa soglia critica (struttura ordinata) (fig. 9). Si tratta però sempre di strutture fisiche, reversibili. L'ordine imposto dal flusso energetico si conserva finché perdura la causa esterna che l'ha prodotto.

*d. Esempi chimici  
(verso modelli complessi a minima produzione di entropia)*

Esempi di stato stazionario si possono incontrare in diverse reazioni chimiche (v. scheda). In questi casi, però, è stato osservato che

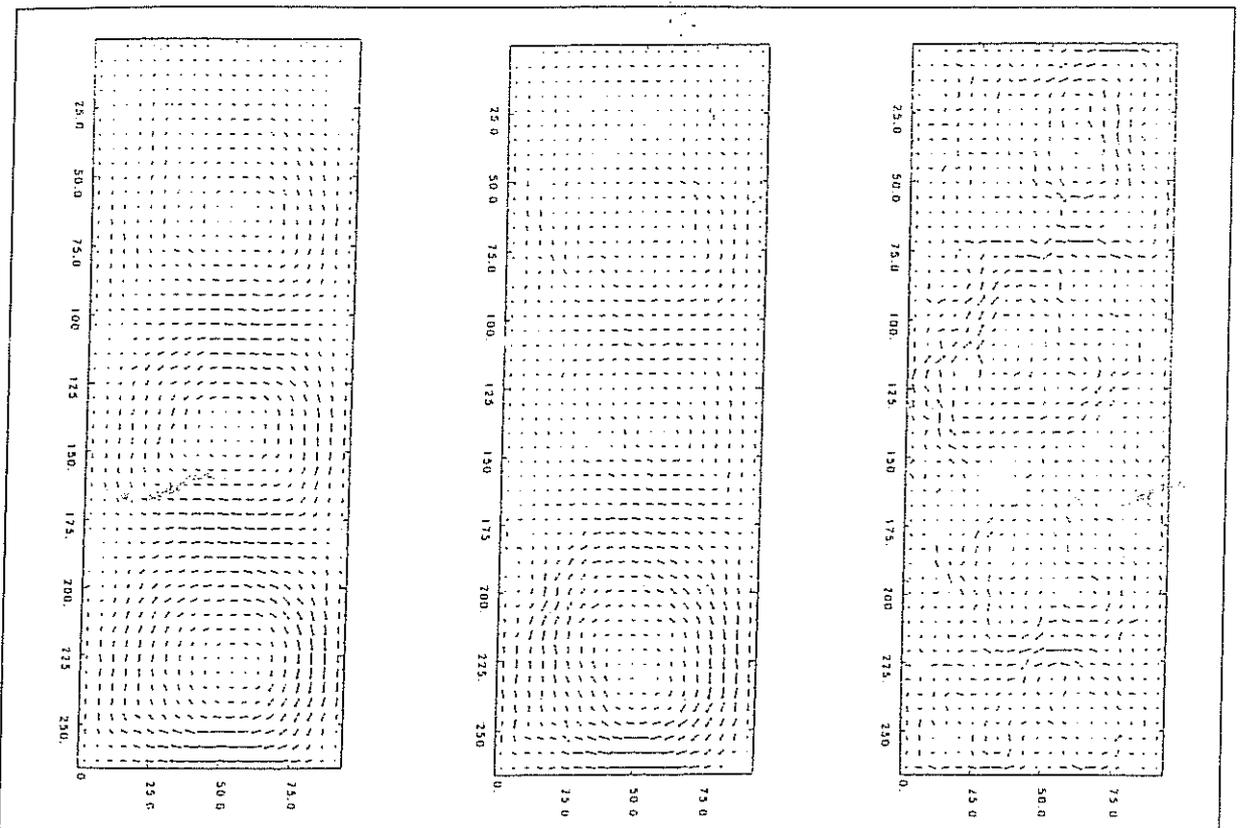


Fig. 9. Modellizzazione al calcolatore delle celle di Bénard: oltre una certa soglia critica si ha una progressiva imposizione di ordine nel moto simulato delle particelle (da Mareschal e Kestemont, 1987).



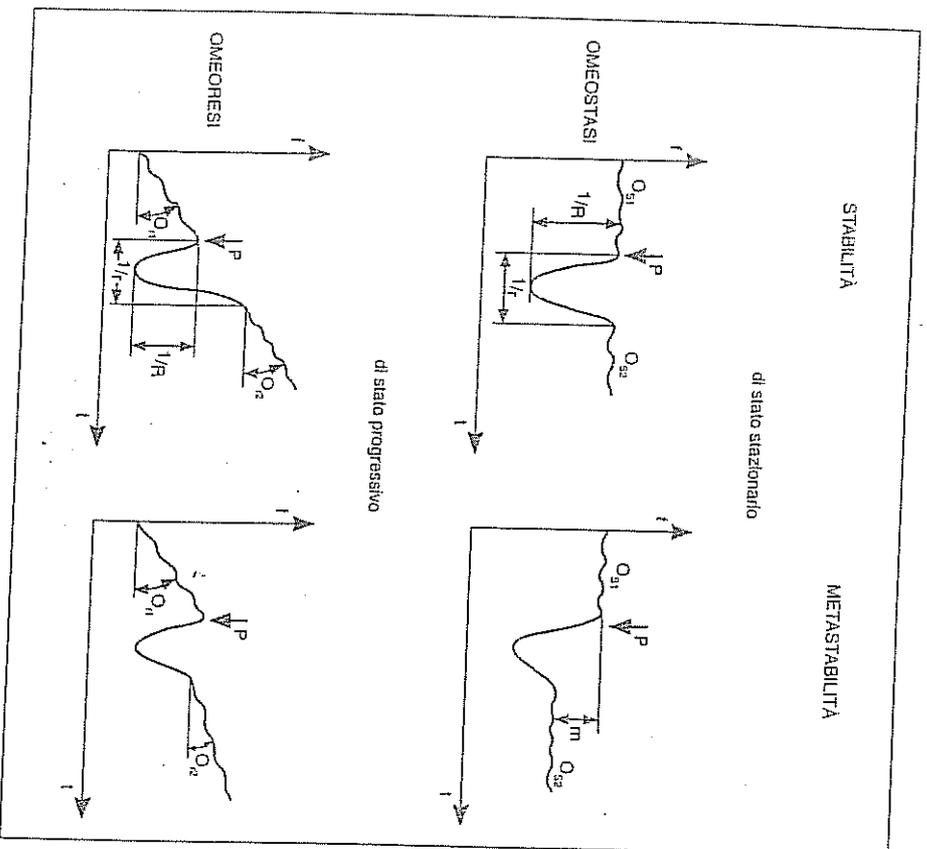


Fig. 14. Funzioni di stabilità e di metastabilità nello stato stazionario dell'omeostasi e nello stato progressivo dell'omeoresi.

f: funzione di stato (es. produttività)  
 r: tempo  
 P: perturbazione  
 $O_{1i}$ : omeostasi iniziale  
 $O_{2i}$ : omeostasi finale

$O_{1i}$ : omeoresi iniziale  
 $O_{2i}$ : omeoresi finale  
 R: funzione di resistenza  
 r: funzione di resilienza

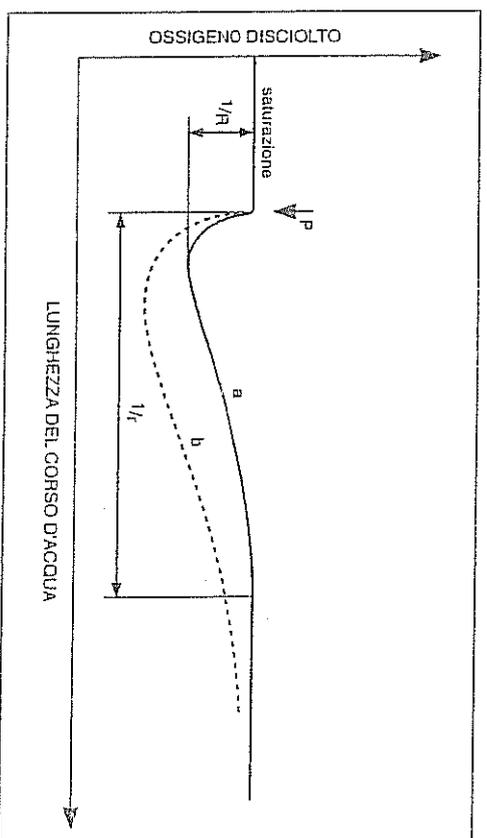


Fig. 15. Curva a sacco dell'ossigeno nei corsi d'acqua.

P: inquinamento (organico) r: funzione di resilienza  
 R: funzione di resistenza

(a: corso d'acqua turbolento; b: corso d'acqua laminare)  
 L'immissione di uno scarico organico (es. fognatura urbana) in un fiume provoca una repentina diminuzione dell'ossigeno disciolto nell'acqua, il quale viene ora attivamente utilizzato dai batteri decompositori che «aggregediscono» gli inquinanti organici; poi, gradualmente, l'ossigeno tende a riportarsi ai valori massimi, cioè, in genere, di saturazione: se il processo può arrivare a compimento, il fiume si è «autodepurato».  
 La «profondità» della curva a sacco dell'ossigeno dipende dalla capacità di resistenza, e la sua «lunghezza» dalla capacità di resilienza dell'ecosistema fluviale.

2) Risposte di metastabilità: il sistema si modifica e assume stabilmente una nuova configurazione di stato stazionario, nella quale esso non è più soggetto a stress e non tende a tornare nella configurazione iniziale. Il sistema, dunque, si è spostato verso un nuovo bacino di attrazione nello spazio delle fasi. Un esempio di stato multi-stazionario è quello dei laghi, ove il processo di eutrofizzazione può spostare le reti alimentari dal modello:

fitoplancton → zooplancton → pesci  
 microbi → zooplancton detritivoro

I Grandi Laghi nord-americani, per esempio, un tempo ricchi di popolazioni di pesci, furono per molti decenni soggetti a una forte pressione di pesca, che decimò queste popolazioni. Successivamente questa pressione venne allentata, ma le popolazioni di pesci non ritornarono alle dimensioni precedenti; probabilmente il sistema si era spostato in un nuovo campo di attrazione.

Vale la pena di accennare che il modello della metastabilità è destinato a portare il sistema in condizioni difficilmente definibili a priori. Il nuovo stato stazionario potrebbe anche avere una configurazione assai differente da quella originaria, e talora anche assai sgradevole per l'uomo.

La natura non tende verso la perfezione, ma verso la massimizzazione dell'energia libera dei sistemi viventi.

### *Il potere omeostatico: volano della dinamica ambientale*

Sistemi diversi rispondono in modo diverso a un test di stabilità, come per esempio una perturbazione, oppure l'interruzione momentanea del flusso energetico. I sistemi più semplici, come i sistemi fisici, risultano, in condizioni di stato stazionario, assai poco stabili: quando il flusso energetico viene a mancare, riprendono rapidamente la configurazione di equilibrio: togliendo la corrente elettrica, la lampadina si spegne subito, perché il suo filamento, non più «mantenuto» incandescente dal flusso di energia (stato stazionario), ritorna velocemente a temperatura ambiente, in stato di equilibrio (a livello macroscopico) e di maggiore probabilità termodinamica.

I sistemi fluidi possono risultare già più stabili, anche per particolari proprietà della materia. Se si spegne il fuoco sotto la pentola che bolle, l'acqua si manterrà calda per un tempo notevolmente superiore a quello impiegato dal filamento della lampadina per raffreddarsi. Questi sistemi semplici possono essere studiati secondo le leggi della fisica classica, e il loro comportamento viene descritto dall'algebra lineare. Il loro potere omeostatico (la capacità di conservare la configurazione interna stabile dello stato stazionario, di fronte ad alterazioni dello scenario esterno) è in generale assai basso.

Ben diversa è la situazione per i sistemi complessi. Per esempio, abbinando un elemento termostatico con un sistema a feedback negativo, sarà possibile sopperire a improvvisi black-out energetici.

Sulla Terra, questi black-out energetici sono all'ordine del giorno: ogni sera, al tramonto, il flusso energetico in ingresso nel «siste-

ma locale» si arresta bruscamente e molte regioni del globo devono sopportare lunghi inverni con un bilancio energetico negativo (fig. 37).

I sistemi ambientali, che sono sistemi complessi sostenuti dagli organismi viventi, hanno perciò sviluppato efficienti meccanismi per la conservazione dell'ordine imposto dal flusso energetico solare. La natura offre mirabili esempi di piante e animali che hanno sviluppato soluzioni per superare i periodi «senza energia» o con un flusso energetico insufficiente.

La attitudine dei sistemi ambientali a superare periodi critici è però solo un aspetto particolare della loro capacità omeostatica, cioè la capacità di conservare lo stato stazionario di fronte a perturbazioni esterne o anche interne al sistema.

### *I fattori della stabilità*

I fattori della stabilità sono di due tipi: esterni e interni al sistema. Sono fattori esterni favorevoli alla stabilità dello stato stazionario: la costanza del flusso energetico in entrata (input energetico), l'assenza di perturbazioni, la costanza del quadro di riferimento esterno, inteso sia come fonte di approvvigionamento di materie prime (e merci, nei sistemi economici), sia come recettore finale di materiali prodotti dal sistema (o di scarto).

Sono fattori interni favorevoli alla stabilità dello stato stazionario: la capacità di auto-organizzazione del sistema, l'ottimizzazione sia della quantità che della qualità delle componenti funzionali, l'efficacia della rete di interazioni tra le componenti, a sua volta basata su processi a retroazione negativa.

Si tratta, come si vede, di condizioni dinamiche, tipiche di un sistema complesso lontano dall'equilibrio. L'osservazione sperimentale di quanto accade in natura sembrerebbe attestare che, per poter avere un incremento del grado di ordine di un sistema ambientale, una condizione favorevole sia il fatto che la stabilità dell'ambiente esterno risulti prevalente su quella dell'ambiente interno. Solo in uno scenario esterno stabile, infatti, si manifestano processi spontanei di organizzazione dell'ordine interno del sistema. In queste condizioni il macrodeterminismo del sistema complesso non annulla l'autonomia funzionale dei sottosistemi, ma la controlla (Weiss, 1971).

Sulla Terra si è potuto sviluppare quel modello di elevato ordine

che è la biosfera grazie alla costanza delle condizioni ambientali esterne.

In una comunità naturale sufficientemente stabile, una singola popolazione può auto-organizzarsi molto efficacemente, mentre se l'ambiente esterno è eccessivamente mutevole, questo non è possibile. Si pensi, per esempio, ai territori delle cinche di un parco naturale protetto, situazione assai più ordinata di quella che si avrebbe in condizioni di ambiente disturbato; oppure alle nicchie sempre più separate nelle comunità biologiche mature. Un ecosistema, a sua volta, tende a evolvere verso situazioni di alto ordinamento interno solo se inserito in un sistema ambientale stabile.

Un bosco, per esempio, o un parco naturale possono raggiungere una configurazione «ordinata» solo se l'ecologia del paesaggio esterno presenta un sufficiente grado di stabilità. Specializzazione e organizzazione possono raggiungere alti livelli solo se l'imprevedibilità ambientale è bassa (Odum, 1983).

Non mancano gli esempi storici: nell'antico Egitto la grande civiltà delle dinastie faraoniche si sviluppò in un sistema caratterizzato da un ambiente interno instabile (le inondazioni non periodiche del Nilo), ma inserito in un ambiente esterno assai stabile (la grande valle del Nilo, praticamente auto-protetta, a motivo della vasta area desertica periferica, che la difendeva dagli attacchi nemici).

Se poi le variazioni ambientali sono di tipo periodico, e come tali evolutivamente prevedibili, un fattore favorevole alla stabilità sembra essere costituito dalla scalarià delle fluttuazioni, secondo frequenze decrescenti dai livelli più bassi a quelli più alti dell'organizzazione ambientale.

La ricerca sui fattori della stabilità negli ambienti naturali ha ricevuto recentemente un notevole contributo con la modellistica applicata ai processi ecologici a livello di comunità: competizione, predazione, mutualismo. Si distinguono modelli qualitativi e quantitativi. Nei primi è sufficiente conoscere gli aspetti statici dei processi, cioè i tipi di relazioni che intercorrono fra una entità e l'altra. Nei secondi è necessario conoscere anche gli aspetti dinamici: l'intensità con cui si realizzano queste relazioni.

Un modello qualitativo di forte potere euristico è quello della *loop analysis*, che prende in esame tutti i possibili circuiti (anelli) determinati dai legami intercorrenti tra le variabili del sistema (Giavelli e Rossi, 1989). Combinando questo modello con tecniche di simulazione stocastica, gli autori giungono a fornire importanti indicazioni sulla stabilità locale (capacità del sistema di conservare la compo-

sizione in specie immutata nel tempo) di alcune piccole isole del Mediterraneo.

#### Risposta alle fluttuazioni ambientali

I black-out energetici naturali sono perturbazioni esterne prevedibili, perché regolarmente periodiche; e come tali possono indurre adattamenti di tipo evolutivo negli organismi.

Assai diversa è la situazione per eventi perturbativi di tipo stocastico. Qui occorre valutare la stabilità a diverse scale: la piena centenaria di un fiume è imprevedibile per il singolo individuo, per il quale essa potrà apparire come una immane catastrofe; ma difficilmente il paesaggio regionale subirà dei mutamenti sensibili in seguito a questo evento. In natura, livelli più alti dell'organizzazione ambientale mostrano in genere tempi di processo più lunghi, minori velocità, prevalenza di componenti lente, maggiore inerzia e, almeno potenzialmente, maggiore stabilità.

I sistemi stazionari, come sono quelli ambientali in condizioni omeostatiche, non sono mai «statici» o «fissi»; la loro natura dinamica, e il fatto stesso di trovarsi in condizioni lontane dall'equilibrio, comportano oscillazioni più o meno periodiche nello spazio delle fasi. Potremmo allora chiederci quali rapporti debbano instaurarsi tra le oscillazioni nell'intorno dello stato stazionario ai diversi livelli dell'organizzazione ambientale, affinché si mantenga una funzione d'ordine in grado di far evolvere il sistema verso situazioni a minore entropia.

In natura si instaurano normalmente dei processi di fluttuazione a diversa lunghezza d'onda. Se l'ambiente fisico si modifica rapidamente è probabile che molte popolazioni non riescano a seguirlo con i loro adattamenti genetici.

Le fluttuazioni ambientali costituiscono generalmente delle forzature stocastiche che esercitano una azione negativa sull'ordine del ecosistema (De Angelis e Waterhouse, 1987). Inoltre, l'ampiezza delle fluttuazioni delle densità di popolazione aumentano se l'ambiente esterno è meno stabile e meno organizzato (Odum, 1971). Ma se vi è una maggiore resilienza nei sistemi inferiori, abbinata a una maggiore resistenza in quelli superiori, ciò può anche portare, per il principio di asservimento, a un loro più elevato grado di ordine.

È importante perciò che venga conservata e sostenuta la variabilità, cioè lo stato di non equilibrio nei sottosistemi ambientali,

Perché essa costituisce la fonte di ogni possibilità di adattamento alle fluttuazioni di più lunga portata imposte dai sistemi superiori.

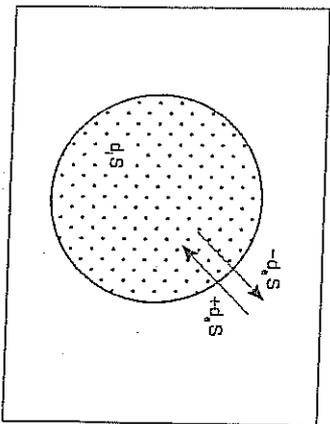
Lo stato di non equilibrio dei sistemi naturali svolge dunque un ruolo costruttivo, creatore di ordine, i cui effetti si ripercuoteranno poi anche ai livelli superiori, per il principio del super-ordine della natura, sostenuto da processi dissipativi e da modelli di riduzione dei gradi di libertà di tipo diffuso (sistemi di appartenenza).

## POMPARE FUORI IL DISORDINE

Il "segreto" degli organismi viventi, che sembrano sfidare il secondo principio della termodinamica aumentando il loro ordine interno e diminuendo così l'entropia del loro sistema, consiste nella loro capacità di "pompate fuori il disordine".

Quando, con la respirazione, l'organismo "brucia" carbonio, l'entropia aumenta; ma viene contemporaneamente allontanato dall'ambiente interno il disordine termodinamico che questo processo ha generato. Il disordine viene "pompato fuori" sotto forma di prodotti finali, inerti, della combustione, per conservare l'ordine prodotto nel corso di questo processo, sotto forma di energia di alta qualità.

Affinché questo meccanismo funzioni, occorre attivare un flusso di entropia in uscita, cioè un processo dissipativo. Questo processo biofisico, che si realizza negli organismi, è il tassello fondamentale dei processi antientropici dei sistemi ambientali gestiti dai viventi (Nicolis e Prigogine, 1977).



L'entropia (S) ha proprietà additive, per cui una variazione di S in un sistema ambientale è data da:  $dS = d_s S \pm d_e S$ , in cui  $d_s S$  è la produzione interna di entropia (sempre positiva) e  $d_e S$  è il flusso di entropia con l'ambiente esterno (negativa in uscita, positiva in entrata). In condizioni "normali" i sistemi ambientali riescono ad attivare un flusso di entropia in uscita ( $-d_e S$ : valore negativo) superiore alla propria produzione interna  $d_s S$ : l'entropia del sistema diminuisce, l'ordine interno aumenta. In condizioni "patologiche" invece il flusso di entropia in uscita può ridursi o annullarsi o addirittura invertire senso ed entrare nel sistema ( $+d_e S$ : valore positivo). Ciò può essere dovuto, per esempio, a un grave fatto di inquinamento (per es. di un lago) oppure, nell'ambiente umano, a un fatto traumatico come una guerra. L'entropia del sistema aumenta, l'ordine interno diminuisce.

### 3. L'AUTO-ORGANIZZAZIONE NEI SISTEMI AMBIENTALI

#### 3.1. Complessità e sinergismo

##### *Sistemi semplici e sistemi complessi*

Il concetto di sistema è quanto mai ampio nella letteratura scientifica. Nella fisica classica un sistema è considerato come un semplice insieme di punti materiali, eventualmente soggetti a vincoli, e di forme di energia contenute in un «campo» dello spazio. In un tale «sistema» valgono i principi dell'algebra lineare (sommatoria, integrali, ecc.), basati sulla logica insiemistica.

Già nel campo della termodinamica dei fluidi e più ancora nel campo della chimica, quando si studiano fenomeni dinamici (es. turbolenze, reazioni catalitiche ecc.), ci si accorge spesso che la logica insiemistica non è più sufficiente a spiegare i processi. Infatti in questi casi possono comparire delle funzioni nuove, non previste dall'algebra lineare. Per esempio, l'energia di attivazione di alcune reazioni chimiche, che possono avvenire a bassi livelli energetici: ma per innescarle occorre superare una soglia energetica molto più elevata.

Se poi i processi riguardano la termodinamica degli organismi viventi e dei sistemi ecologici, allora compaiono funzioni del tutto nuove. Il sistema deve ora essere concepito come una rete di collegamento fra elementi interagenti; in esso si sviluppano trasformazioni energetiche ed elaborazioni di informazione tra loro interdipendenti, e legate alle trasformazioni precedenti (sistema complesso).

I sistemi complessi, per poter funzionare, hanno bisogno di un continuo flusso di energia, proveniente dall'esterno. Se questo flusso a un certo punto cessasse, il sistema decadrebbe, senza tuttavia ritornare allo stato iniziale, perché in esso si sono verificati, durante il funzionamento, dei processi irreversibili: per esempio, lo sviluppo, che ha portato il sistema verso stadi più organizzati e più strutturati

I sistemi complessi naturali, quelli cioè che operano in natura spontaneamente, si sono evoluti in modo da potersi sostenere, indefinitamente nel tempo, per mezzo di una sola sorgente primaria di energia, quella solare (oltre a eventuali sorgenti sussidiarie, come le maree).

Essi possiedono una importante proprietà emergente: la capacità di auto-organizzazione, l'attitudine a sfruttare il flusso di energia in ingresso per realizzare strutture ordinate nuove, le quali, lontanamente dall'equilibrio, portano verso sistemi a bassa entropia in condizioni di stato stazionario.

La complessità del reale, dunque, non è più un attributo negativo: al contrario, se strutturata in sistemi auto-organizzanti, emerge come portatrice di nuovo ordine e di minore entropia.

##### *Le soglie della complessità*

In natura, gli ambienti emergono come sistemi complessi se:

- sono costituiti da un elevato numero di elementi componenti (soglia numerica);
- presentano una «dominanza» (cioè un potere di gestione dei processi) sufficientemente ripartita fra le componenti (soglia strutturale);
- si sviluppano tra le componenti rapporti di interazione a catena, a rete e processi omeostatici a retroazione (soglia funzionale).

La prima condizione di complessità è di tipo numerico: è necessario che il numero delle componenti risulti almeno sufficiente a sostenere i processi tipici che caratterizzano quel determinato livello di organizzazione, cui appartiene il sistema.

Per esempio, a livello di popolazione, il numero minimo di individui necessario per costituire un «sistema complesso» è quello sufficiente a garantire almeno il normale svolgersi dei processi fondamentali: natalità, evoluzione, adattamento, flusso genetico.

Franklin (1980) ha stimato in 50 effettivi il numero di individui di una popolazione animale per prospettive di sopravvivenza nei tempi brevi e di 500 per i tempi lunghi.

Analogamente, per una comunità, è necessario che il numero di componenti, in questo caso le specie, sia sufficiente ad assicurare i processi tipici di questo livello di organizzazione come la circolazione dei nutrienti e il flusso dell'energia.

sono trovare 10 o 20 specie arboree, 50 o 60 specie arbustive ed erba-  
 cee, un centinaio di specie di animali vertebrati e alcune migliaia di  
 invertebrati. In una foresta equatoriale, la diversità cresce ulterio-  
 rmente (fig. 16).

La seconda condizione di complessità è una soglia critica di ripar-  
 tizione dei ruoli.

In ogni sistema ambientale le diverse componenti possono gioca-  
 re ruoli di diversa importanza nel controllare il funzionamento del  
 sistema stesso. Tanto maggiore è l'equipartizione di questo ruolo,  
 tanto più articolato sarà, tendenzialmente, il funzionamento del si-  
 stema. E, viceversa, se l'intero ruolo di controllo fosse, al limite, svol-  
 to da una sola componente, non si potrebbe più parlare di sistema,  
 perché ne verrebbe meno una delle caratteristiche essenziali, che è la  
 interazione tra le parti.

Esiste cioè una soglia strutturale per il funzionamento del sistema  
 complesso, al di sotto della quale il sistema si degrada a modello  
 semplice e lineare. La natura tende a ripartire le risorse fra numero-  
 se componenti funzionali, perché queste configurazioni sono in gra-  
 do di sostenere i più elevati valori di energia libera del sistema,  
 sicché sistemi meno efficienti verrebbero eliminati per selezione.  
 L'uomo, invece, tende a concentrare le risorse energetiche sulle sole  
 componenti «utili» dal punto di vista economico, ottenendo elevate  
 rese ma realizzando ambienti semplificati che richiedono un conti-  
 nuo apporto di energia sussidiaria per essere sostenuti.

La terza condizione per l'affermarsi di un sistema complesso è co-  
 stituita dall'instaurarsi di processi di interazione fra le varie compo-  
 nenti, sotto forma di scambi reciproci (di materia, di energia e di in-  
 formazione). Questi sono processi di autoregolazione basati su anelli  
 di retroazione, anelli catalitici e autocatalitici. Da essi emergono fun-  
 zioni sinergiche e proprietà omeostatiche caratteristiche di ciascun  
 livello dell'organizzazione ambientale.

Esiste una soglia funzionale, al di sotto della quale il sistema, ri-  
 dotto a semplice sommativa fra le parti, cessa di esistere come tale.  
 Condizione essenziale perché questa soglia possa venire superata è  
 che le diverse componenti del sistema siano tra loro interfacciabili.

Così, i passaggi di materia e di energia da una componente all'al-  
 tra devono avvenire in forme gestibili da entrambe le componenti in-  
 teressate; mentre lo scambio di informazione deve svolgersi in lin-  
 guaggi compatibili.

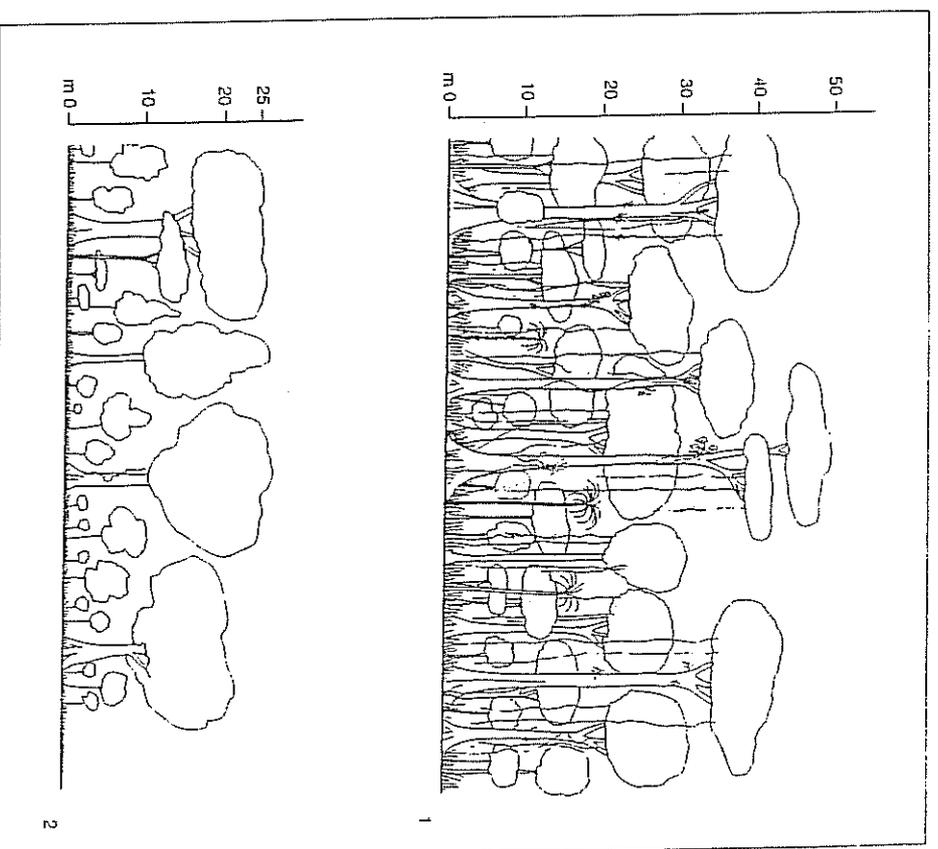


Fig. 16. Schemi strutturali di foreste: 1. foresta di latifoglie sempreverdi  
 equatoriali; 2. foresta di latifoglie decidue della fascia temperato-fredda (da  
 Tomaselli, 1977).

La diversità e la complessità sono attribuiti necessari, in natura, per realizza-  
 re strutture «ordinate», le quali, sfruttando l'energia e le altre risorse a  
 disposizione in modo più razionale, si impongono come dominanti rispet-  
 to a strutture «disordinate». I sistemi ecologici tendono quindi spontanea-  
 mente verso situazioni di elevata diversità e complessità. Ma vi è un forte  
 costo energetico per sostenere strutture complesse: perciò nelle regioni tro-  
 picali — ove l'energia solare incidente è maggiore — si possono avere (se  
 non vengono meno altre risorse, come l'acqua) ecosistemi naturali con  
 strutture più complesse e articolate di quanto si abbia, in analoghe condi-  
 zioni generali (topografia del terreno ecc.), alle latitudini medio-alte.

Tra gli individui di una stessa popolazione (monospecifica) o tra le diverse popolazioni di una medesima comunità si instaurano generalmente flussi più rapidi che fra ecosistemi contigui, o fra regione e regione del globo. Di conseguenza anche i legami che uniscono fra di loro le componenti di un sistema sono più forti e vincolanti nei livelli inferiori dell'organizzazione biologica e si fanno sempre più labili salendo ai livelli superiori. Per esempio, i legami che uniscono tra loro gli individui di una stessa popolazione (legami famigliari, sessuali, genetici) sono assai più forti di quelli che uniscono fra loro ecosistemi diversi, come un bosco e un lago, o diversi biomi dell'ambiente terrestre, come il deserto e la foresta tropicale, a meno che non intervengano particolari input esterni di energia sussidiaria (es. mare, vento, ecc.). Così come, nell'ambiente umano, i legami fra i singoli membri della famiglia sono generalmente assai più forti di quelli esistenti tra famiglia e famiglia, o tra gruppo e gruppo. In altri termini, i collegamenti energetici che uniscono le componenti diventano più deboli e più diffusi con l'espansione spaziale e temporale delle scale (Simmon, 1973).

In questa prospettiva, la diminuzione delle forze di legame fra le componenti, che si osserva passando dai livelli inferiori a quelli superiori della scala di organizzazione ambientale, non è un elemento di disaggregazione dei sistemi, ma costituisce un fattore creativo, poiché consente alla natura e all'uomo di «inventare» la varietà di situazioni, di paesaggi, di ambienti che caratterizzano il mondo vivente.

In condizioni sempre più lontane dall'equilibrio termodinamico, caratterizzate da basse forze di legame e da gradi di libertà a controllo diffuso, i sistemi complessi auto-organizzanti sono sempre più ricchi di possibili configurazioni diversificate.

### *Processi sinergici*

Sistemi ambientali diversi presentano differenti efficienze di funzionamento, a seconda del grado di organizzazione e di funzionalità del sistema di rapporti che viene instaurato e, quindi, a seconda della funzione di sinergismo che si viene a sviluppare. È da essa, sostanzialmente, che emergono le proprietà nuove, frutto dell'auto-organizzazione del sistema, e che lo fanno emergere a un livello più elevato dell'organizzazione ambientale.

Secondo la trattazione classica del sinergismo (Haken, 1981), in ogni sistema complesso si distinguono due livelli: il livello microscopico, formato dalle componenti, e il livello macroscopico, costituito dal sistema nella sua globalità. Le relazioni fra questi due livelli sono assicurate da alcuni parametri d'ordine, o di controllo, funzioni che descrivono il comportamento macroscopico del sistema.

In questi sistemi vale il «principio di asservimento»: il comportamento degli elementi componenti è controllato dal livello macroscopico, ovvero dal sistema complesso, il quale, con le sue qualità nuove (sconosciute al livello microscopico) induce nelle singole componenti (per mezzo dei parametri d'ordine) funzioni e prestazioni adeguate alla riuscita dei processi propri del livello superiore. Si ha così una notevole riduzione dei gradi di libertà dei singoli componenti e un aumento dell'ordine complessivo del sistema.

I sistemi complessi che si generano ed evolvono per auto-organizzazione mostrano generalmente un forte grado di coerenza, spaziale e temporale, dovuto alla funzione dei parametri d'ordine che assoggettano i sottosistemi ai processi tipici del livello macroscopico. Questa coerenza si traduce nella capacità, da parte del sistema, di stabilizzarsi in uno o più stati stazionari. Quanto sopra vale per sistemi sia naturali che umani. In natura, tuttavia, questa imposizione d'ordine, data dall'alto, non va a inficiare le leggi proprie di funzionamento dei sottosistemi asserviti (sistema di appartenenza, v. § 1.3).

Si osserva sempre che le leggi naturali che riguardano il funzionamento di un determinato sistema ambientale vengono rispettate, convalidate e non trasgredite dai sistemi ambientali superiori — come organizzazione ambientale — a quello considerato.

Il livello macroscopico subordina e controlla il comportamento del sottosistema asservito, ma si adatta alle sue leggi di funzionamento. Esse costituiscono i limiti della libertà del sistema di espandersi e di imporre leggi nuove, proprie del livello superiore.

Nei sistemi biologici, il referente fondamentale di queste leggi consiste nei processi e nelle reazioni biochimiche che avvengono a livello cellulare: la dinamica delle proteine, degli enzimi e degli acidi nucleici sono i referenti di base del «funzionamento» dell'individuo, e quindi anche — per quanto visto sopra — della popolazione, della comunità, dell'ecosistema e così via. I sottosistemi, pur essendo «asserviti» (o «subordinati») ai livelli macroscopici del sistema complesso, appartengono a essi come componenti funzionali e organici.

È questa la caratteristica peculiare del sinergismo nei sistemi ambientali. In un sistema meccanico un qualsiasi componente non ve-

nire sempre sostituito con un pezzo di ricambio, senza con ciò alterare la struttura della macchina: i sottosistemi sono cioè gerarchicamente separati e distinti dal sistema complesso. In una popolazione, invece, non è possibile sostituire un individuo con un altro, senza alterare la struttura genetica di tutta la popolazione: il sottosistema (individuo) appartiene organicamente al livello superiore di organizzazione ambientale. E, analogamente, in una data regione ecologica, non si può pensare di sostituire un ecosistema con un altro tipo di ambiente (eliminare un bosco per far posto a un'acciaieria) senza alterare sostanzialmente l'intera ecologia del paesaggio regionale.

### 3.2. *Processi cibernetici*

Il cibernete, il pilota delle navi ateniesi, per conservare la prora in direzione di Creta, cioè in uno stato stazionario, dovette governare la nave con manovre di vela e di timone capaci di opporsi all'azione destabilizzante del vento e del mare. E Platone, nei suoi *Dialoghi*, ne trasse insegnamento per applicare il concetto cibernetico al governo dei popoli.

#### *Conservare la direzione senza avere un fine*

I sistemi ambientali naturali sono sistemi complessi, capaci di autogoverno per la realizzazione di un processo direzionale (non di un «fine»). Questa «direzionale» è intesa, in senso energetico, come la tendenza dei sistemi ambientali a conseguire configurazioni di massima energia libera (v. § 2.1.).

Per conservare questa direzione, la natura ha sviluppato degli efficienti sistemi cibernetici (fig. 17) di controllo e regolazione. Il loro funzionamento è mediato da organismi biologici capaci di percepire, di trasmettere e di reagire alle informazioni, per conservare la corrispondenza tra il loro ambiente interno ed esterno.

I sistemi cibernetici ambientali sono molto diversi da quelli meccanici o elettronici. In un sistema tecnico le funzioni di controllo sono in genere esterne al sistema e le informazioni canalizzate in cavi o reti (*network*); in un sistema ambientale, invece, le funzioni di controllo sono per lo più interne al sistema e l'informazione viene per lo più diffusa spazialmente, anziché entro rigidi canali.

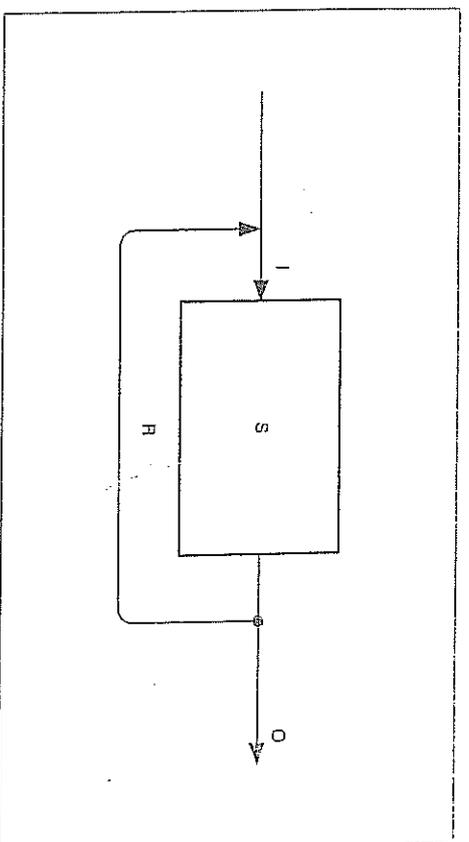


Fig. 17. Schema generale di un sistema cibernetico (o a feedback): S: sistema; I: entrata; O: uscita; R: anello di retroazione.

In questi sistemi i prodotti in uscita retroagiscono sulle componenti in entrata, con due possibilità:

- a. incrementando ulteriormente le deviazioni in uscita (feedback positivo);
- b. smorzando, al contrario, le deviazioni da un certo valore standard nei prodotti finali (feedback negativo). Questo secondo processo è alla base del controllo omeostatico dei sistemi biologici.

#### *L'ambiente: un sistema non teleologico*

I sistemi che perseguono un fine determinato sono detti sistemi teleologici: ne è un esempio l'organismo individuale, in quanto portatore di un programma genetico che lo «guida» verso una determinata «forma» (dimensioni corporee, colore dei capelli ecc.).

I sistemi ambientali, invece, non perseguono un fine prestabilito, ma una direzione, un verso: sono sistemi a effetti organizzati che perseguono una direzione, costituita dalla massimizzazione dell'energia libera disponibile.

La traiettoria non è predeterminata da un preciso programma e neppure la finalità. Questo avviene per due motivi. In primo luogo perché l'ambiente non ha un suo codice genetico: esso è patrimonio dei singoli organismi e delle popolazioni biologiche.

In secondo luogo perché l'obiettivo non è predeterminato: il massimo di energia libera del sistema dipende, oltre che dall'input energetico, anche dalla sua capacità di auto-organizzazione e quindi di

efficienza, nonché dai fattori fisici esterni. In un deserto dove manca quasi totalmente l'acqua, o sui ghiacciai antartici dove il freddo e il gelo inibiscono quasi ogni forma di vita superiore, l'energia libera sarà molto minore rispetto alle foreste pluviali equatoriali dove l'abbondanza di acqua e la temperatura favorevole consentono forme di vita rigogliose.

*L'anello di retroazione*

Modello fondamentale di ogni processo cibernetico è l'anello di retroazione, che consiste in un circuito capace di valutare le caratteristiche dell'effetto prodotto da un sistema operativo e, sulla base di esse, inviare delle informazioni «all'indietro», cioè all'entrata, dove i fattori iniziali verranno modificati di conseguenza, variando così l'effetto in uscita.

Non è necessario che l'anello di retroazione agisca proprio sulla causa specifica che ha determinato lo scarto; esso può operare su qualsiasi fattore iniziale, purché dall'azione su tale fattore sia possibile controllare l'effetto in uscita. Tale fattore deve cioè essere «controllabile» e «influyente» sul processo.

È importante tenere conto di questa regola nei sistemi ambientali: se lo stato stazionario di un ecosistema viene alterato dall'ingresso di un parassita, non è detto che l'anello di retroazione agisca sul parassita medesimo. La finalità del sistema non è quella di «combattere il parassita», ma quella di «massimizzare l'energia libera».

Gli anelli a feedback possono essere di due tipi: a retroazione negativa o positiva. I primi tendono a conservare lo stato stazionario, e tendono perciò a mantenere gli effetti in uscita a valori costanti (fig. 18). Essi perciò favoriscono l'omeostasi e dunque la corrispondenza fra l'ambiente interno e quello esterno dei sistemi ambientali. Sono quindi molto diffusi in natura perché selettivamente favoriti.

Quelli a retroazione positiva, invece, tendono a esaltare ancor più un eventuale scostamento dell'effetto in uscita dal suo valore normale. Sono quindi processi destabilizzanti, e come tali potrebbero apparire poco importanti in natura, perché non sono favoriti dalla selezione.

In realtà, anelli a retroazione positiva sono attivi in natura, ma sempre abbinati ad altri anelli di controllo a retroazione negativa. In caso contrario il sistema ambientale degenererebbe, transistando dal bacino di attrazione del caos deterministico verso quello stocastico,

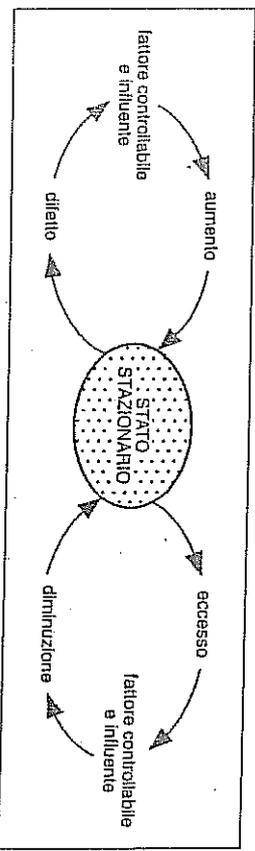


Fig. 18. Schema generale di funzionamento degli anelli a retroazione negativa (da Moroni e Faranda, 1983, modificato).

di cui peraltro tutti i sistemi ecologici, governati da processi non lineari, contengono il seme (Berryman e Millstein, 1989).

Processi e anelli autocatalitici agiscono nel sistema enzimatico: l'autocatalisi degli enzimi è un processo a retroazione positiva, ma che, a un certo punto, viene bloccato dal prodotto terminale della catena, che interviene come repressore (fig. 19).

La funzione regolatrice dei sistemi cibernetici a retroazione negativa, operanti a livello di sistema ambientale, ha il principale referente biochimico negli enzimi allosterici degli organismi, proteine regolatrici capaci sia di riconoscere e misurare numerosi composti, sia di interferire sulle reazioni per aumentare, per rallentare o per inibire la produzione di quei composti.

L'attività di questi enzimi può controllare flussi di energia anche

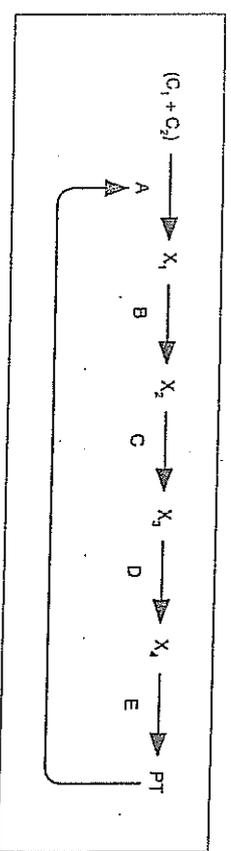


Fig. 19. Anello a retroazione negativa di tipo biochimico. I composti iniziali  $C_1$  e  $C_2$  richiedono, per la loro sintesi, l'intervento dell'enzima specifico A. La reazione procede quindi, attraverso i vari composti intermedi  $X_1, X_2, \dots$ , ecc., lungo una catena ove operano altri enzimi specifici (B, C, ecc.). Il prodotto terminale PT è un effettore allosterico: esso, se in eccesso, retroagisce sul primo enzima specifico della catena (A), inibendolo e bloccando perciò l'ulteriore sintesi dei composti iniziali, consentendo così al sistema di riprendere le condizioni iniziali di stato stazionario dinamico.

molto elevati, con un assorbimento energetico infinitesimo. Da ciò deriva l'elavattissima potenza cibernetica degli enzimi allosterici, che si riflette e si ritrova anche nel comportamento dei sistemi superiori a quello cellulare: organi, organismi, popolazioni, comunità biologiche.

Esempi di modelli cibernetici, in natura, si trovano nei sistemi preda-predatore e parassita-ospite, nei cicli degli elementi nutritivi, nei modelli comportamentali degli animali superiori. Molte volte, poi, questi modelli cibernetici si svolgono coinvolgendo anche le componenti abiotiche dell'ecosistema. Un buon esempio è quello dell'ossigeno atmosferico.

La quantità di ossigeno molecolare presente nell'atmosfera (21% in volume) sembra essere il risultato di un delicato bilanciamento fra la fotosintesi (che produce ossigeno) e la combustione (che assorbe ossigeno): l'ossigeno è un forte comburente e in sua presenza il carbonio e i suoi composti divengono facilmente combustibili. Si è valutato (ipotesi Gaia, Lovelock, 1985) che, arricchendo di ossigeno artificialmente una atmosfera controllata, le probabilità di combustione delle sostanze carboniose aumentano rapidamente, e si è stimato che l'atmosfera terrestre non potrebbe contenere più del 25% di ossigeno, altrimenti i casi di auto-combustione aumenterebbero di frequenza sino a riportare la concentrazione di ossigeno al di sotto di tale soglia. Probabilmente, il 21% di ossigeno nell'atmosfera rappresenta oggi uno stato stazionario, lontano dall'equilibrio ma relativamente stabile; sarebbe il risultato di un continuo processo a feedback negativo fra la produzione di questo gas, a opera delle piante verdi, e la corrispondente combustione della materia organica, sia nei processi metabolici (respirazione) che per combustione diretta (incendi).

Ben diverso è il caso dell'ambiente umano, dove i processi sono gestiti in modo intenzionale e perciò spesso in modo tale da conservare un determinato stato «favorevole»: processi a retroazione intervengono comunemente nel campo economico (misure protezionistiche), in quello sociale ecc.

## UNA CLASSIFICAZIONE FUNZIONALE DEI SISTEMI AMBIENTALI

