

CHIMICA & LIMITI DELLE RISORSE



Sergio Carrà
Politecnico di Milano
sergio.carra@polimi.it

EVOLUZIONE DEI SISTEMI NATURALI E SOCIALI

L'evoluzione di un ecosistema è caratterizzata da un aumento del suo livello di organizzazione, associato all'emergenza di comportamenti coerenti che creano dei meccanismi in grado di contrapporsi al depauperamento delle risorse naturali. Entrambi i concetti di crescita e sviluppo possono essere studiati nell'ambito della termodinamica dei sistemi in condizioni di non equilibrio.

Crescita e sviluppo: fattori centrali della fenomenologia dei sistemi naturali e sociali

La pubblicazione, nel 1972, del rapporto redatto a cura di MIT per il progetto del Club di Roma dal titolo “*Limits to the growth*” [1], ha rinverdito l'inquietante messaggio malthusiano sulla imminente carenza delle risorse materiali ed energetiche. In realtà dopo più di trent'anni dalla sua pubblicazione si constata come la situazione sia diversa da quella preconizzata, tanto che il rapporto è stato definito un'analisi vistosamente sbagliata sui destini del mondo, attribuendo ai suoi autori l'appellativo di catastrofisti. Più correttamente si dovrebbe però osservare che tale opera testimonia la difficoltà di fare previsioni, “in particolare sul futuro” come affermava Niels Bohr, anche se in realtà nel menzionato rapporto non vengono fatte previsioni specifiche, ma si confrontano le proiezioni, o gli scenari, derivanti da diverse ipotesi. In particolare nella prima, che si riferisce alla crisi delle risorse non rinnovabili, risulta che un andamento dei consumi analogo a quello registrato nel 20° secolo avrebbe dovuto portare ad un graduale progresso bruscamente interrotto nella prima metà del presente secolo. Ciò a

conseguenza del costo crescente delle risorse non rinnovabili, quali i combustibili, i giacimenti d'acqua, i fossili, i minerali, e quindi della necessità di dedicare maggiori energie al loro sfruttamento poiché sono destinate a diventare sempre più scarse e sempre meno accessibili. Questo preoccupante risultato ha fatto emergere la consapevolezza che l'incuria nella gestione delle risorse naturali e il loro depauperamento creano situazioni irreversibili, destinate a lasciare una traccia indelebile sul pianeta.

Purtroppo nel nostro Paese tale messaggio è stato recepito in modo ambiguo a conseguenza del titolo che è stato attribuito al rapporto stesso nel quale la parola *growth*, che significa “crescita”, è stata tradotta incorrettamente con “sviluppo”. La crescita indica infatti un'espansione che si manifesta in termini spaziali, materiali ed energetici solo per accrescimento. Dal punto di vista matematico il processo viene descritto in diversi modi, ad esempio mediante una relazione lineare se si considera la crescita di un cristallo a contatto con una soluzione in cui sia presente una concentrazione costante del componente che va ad arricchire la fase solida, o esponenziale se si tratta di una cultura microbica che si riproduce con progressio-

ne geometrica a spese di un nutriente. In entrambi i casi il processo si arresta bruscamente se viene a mancare l'alimentazione.

Lo sviluppo, pur comprendendo alcuni aspetti della crescita, implica anche un aumento del livello di organizzazione di un sistema in virtù del quale emergono comportamenti coerenti che esercitano funzioni collettive. Ad esempio il comportamento medio di un insieme di microrganismi che agiscono indipendentemente uno dall'altro non esce dall'ambito della scala che caratterizza le loro dimensioni. Ma se essi aggrediscono le cellule del corpo che li ospita ne nasce un effetto collettivo che genera conseguenze su scala macroscopica.

In particolare nell'economia lo sviluppo si riferisce specificamente al complesso processo in virtù del quale una società si evolve verso livelli sempre più elevati che includono, oltre alla crescita, l'aumento degli indicatori quantitativi di ricchezza, quali il prodotto interno lordo, e quelli di trasformazione qualitativi della vita legati, per esempio, all'alfabetizzazione, all'educazione, al miglioramento del benessere e del sistema sanitario. Pertanto è il risultato di una tendenza espansiva di lungo periodo che affinché non venga interrotta richiede l'accumulo di capitale, il progresso tecnico e in una certa misura la crescita demografica.

Complessità, diversità e stabilità dei sistemi ecologici e sociali

Il termine complessità, consuetamente usato nel linguaggio comune, ha acquistato da qualche anno la dignità di individuare un nuovo settore culturale che investe diverse discipline, quali le scienze in senso lato ed in particolare la biologia, l'economia, la sociologia ed altre [2]. Ciononostante la definizione di questo settore disciplinare resta elusiva. I sistemi fisici complessi sono costituiti da unità interagenti fra di loro in modo non lineare e quindi tale da fare emergere comportamenti collettivi non prevedibili dall'analisi delle singole unità. Per mutuare questo approccio al caso specifico di una società umana, la complessità deve essere ricondotta alla sue dimensioni, al numero e al grado di distinzione fra le sue parti, alla varietà dei ruoli sociali che essa include e a quella dei meccanismi coinvolti per organizzarli in attività funzionalmente coerenti.

Associati alla complessità sono i concetti di ordine, informazione e organizzazione, che risultano in qualche modo connessi con lo sviluppo cui un sistema è soggetto. In realtà l'uso di questi termini può apparire per certi aspetti contraddittorio, in particolare poiché l'informazione in accordo alla definizione di Claude Shannon, dipende dal numero di decisioni binarie, o bits, necessarie per descrivere lo stato di un determinato sistema. Così ad esempio per caratterizzare il moto delle molecole in un gas è necessario un numero più elevato di bits di quello richiesto per individuare le ordinate posizioni delle molecole in un cristallo. In realtà il termine ordine è più propriamente applicabile a sistemi statici come i menzionati cristalli, mentre per descrivere lo svolgi-

mento di attività o funzioni concertate risulta più adeguato quello di organizzazione. Tutto ciò giustifica il fatto che esistano diverse proposte per esprimere la complessità di un sistema che si riconducono al suo contenuto di informazione, alla difficoltà dei calcoli ad essa associati, al suo grado di organizzazione e così via [3].

Ciò premesso ci si può chiedere in che misura l'aumento di complessità si rifletta nello sviluppo di un sistema ecologico, economico e sociale. Una componente essenziale riguarda ovviamente lo sviluppo delle tecnologie che potrebbe essere limitato dal depauperamento delle risorse naturali. In realtà per dare una risposta a questo quesito dobbiamo essere consapevoli dell'ammonimento di Schopenhauer di non prendere i limiti della nostra visione come i limiti del mondo. Ad esempio il paventato esaurimento del petrolio basato sull'applicazione del modello statistico formulato dal geologo M.K. Hubbert nella seconda metà del secolo scorso, sino ad ora non si è ancora manifestato. Non solo ma in base ad una ipotesi avanzata da Mendeleev e ripresa da altri scienziati, fra i quali principalmente Thomas Gold [4], gli idrocarburi presenti nel sottosuolo possono avere in parte una origine inorganica in virtù della quale continuano a formarsi alimentando i pozzi petroliferi. Questa possibilità, considerata da taluni eretica, ha avuto però conferma sperimentale in laboratorio [5] dove trattando ossido di ferro (FeO) e carbonato di calcio ad elevata pressione, 5,7 Gpa, e a temperatura di 1.500 °C, si ottiene metano. Allo stato attuale non esistono certezze sulla rilevanza dei risultati precedenti sulle future disponibilità di petrolio, che comunque evidenzia come le nostre scarse conoscenze del sottosuolo limitino la validità delle previsioni che vengono avanzate sulla disponibilità delle risorse.

Ma ancora più importante è il fatto che lo sviluppo tecnologico risulta essenzialmente guidato dall'intelligenza delle innovazioni [6], per cui la sua evoluzione nel tempo può essere espressa dal rapporto fra la



CHIMICA & LIMITI DELLE RISORSE

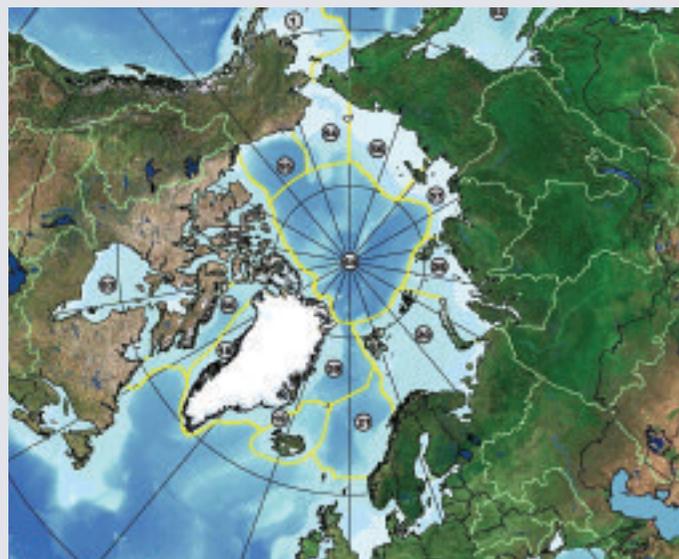


quantità di informazioni necessarie per realizzare un dispositivo e quella dei materiali che vengono impiegati. Se esaminiamo la variazione subita da tale informazione specifica a partire dal momento in cui ha avuto inizio lo sviluppo industriale, ovvero dalla metà dell'Ottocento, si constata che essa si è mantenuta sostanzialmente costante per un periodo relativamente lungo poiché all'aumentare delle dimensioni degli impianti è aumentato anche il contenuto di conoscenze scientifiche richiesto per la loro progettazione e gestione. A partire dalla seconda metà del Novecento, con l'avvento dell'elettronica e soprattutto della microelettronica, ha avuto però luogo un processo di miniaturizzazione che ha portato ad una impennata verso l'alto dei valori del rapporto menzionato, grazie anche all'avvento delle nanotecnologie. Non solo ma in accordo ad alcuni *opinion leaders* futurologi, come Ray Kurzweil [7], stiamo entrando in un'epoca di straordinarie scoperte grazie alle quali le capacità cognitive delle macchine si confonderanno con quelle umane, attraverso un'usurpazione dell'evoluzione biologica da parte di quella culturale che procede con un meccanismo lamarkiano e quindi con feedback positivi. Tutto ciò sta rendendo meno critico il depauperamento delle risorse naturali, con interessanti prospettive grazie all'affermazione di nuovi settori interdisciplinari quali la biologia sintetica, nella quale convergono fisica, chimica, biologia e ingegneria, che sono intese a progettare sistemi catalitici simili agli enzimi aventi elevate efficienze. Tutto ciò traendo ispirazione dai processi metabolici che avvengono attraverso complicate reti di reazioni chimiche che si sono evolute per la sopravvivenza e la riproduzione degli organismi. Si tratta allora di isolarne i passaggi rilevanti, rimuovendo le inevitabili ridondanze che costituiscono il retaggio del tempo impiegato dalla natura per costruire le architetture attualmente operanti, e simularli mediante i procedimenti che ci sono consueti nell'ambito della sintesi chimica. Si tratta di un obiettivo ambizioso ma stimolante che verrà

conseguito se l'ingegneria saprà trasferire le sue metodologie e l'approccio sistemico alla scala ridotta delle macchine molecolari.

Un esempio riguarda la cattura dell'energia solare simulando la fotosintesi, attraverso ricerche intese ad impedire che gli effetti climatici dovuti all'accumulo della anidride carbonica nell'atmosfera compromettano l'avvenire del pianeta. Si tratta di una sfida difficile e impegnativa, poiché se da un lato dobbiamo respingere l'affermazione moralmente indifendibile di Groucho Marx "*Perché mi devo preoccupare dei posteri? Che cosa hanno fatto loro per me?*" dall'altro lato è impossibile accettare l'affermazione di Sir Nicholas Stern "*I governi devono garantire il benessere di tutti i cittadini presenti e futuri in modo uguale senza dare preferenza ai votanti*". Infatti se confrontiamo pariteticamente passato e futuro non possiamo fare a meno di constatare che di futuro ce n'è troppo.

In realtà ci si deve però chiedere se tale stupefacente prospettiva tecnologica potrà risultare compatibile con lo sviluppo delle società umane. Infatti l'aumento dei benefici può anche avere aspetti controproducenti poiché per ragioni politiche l'organizzazione socio-economica tende ad evolvere verso complesse gerarchie che richiedono maggiore specializzazione, ma divengono nel contempo burocratizzate e quindi sempre più rigide e tetragone all'innovazione. Rimanendo nell'ambito economico, l'aumento in complessità di una società comporta un'espansione degli investimenti verso la produzione di risorse, dei processi di informazione, dell'amministrazione e della difesa. Il rapporto fra benefici e costi derivante da tali spese, all'inizio favorevole poiché si impiegano le soluzioni più semplici ed economiche, successivamente procede verso direzioni più onerose. Tutto ciò sino a raggiungere un punto in corrispondenza del quale i successivi investimenti non portano significativi vantaggi, con la prospettiva di raggiungere una zona in cui si manifesta un aumento della vulnerabilità verso un collasso



so, come si è verificato nel passato in diversi casi. Se si vuole conferire alla nostra analisi un respiro storico ci si deve chiedere se la caduta di alcune grandi civiltà possa costituire un modello per il futuro. La globalizzazione sembrerebbe allontanare la possibilità di fruire di tali modelli, anche se l'aumento di popolazione, le differenze sociali e religiose e le discontinuità economiche che stimolano flussi migratori, costituiscono purtroppo latenti minacce di conflitti.

Reti di flussi materiali ed energetici e ruolo della termodinamica nei processi evolutivi

La società umana ha una tendenza latente verso gradi di maggiore complessità rendendo sempre più disponibili i beni di consumo, il tempo libero e la creatività. Questo approccio lineare si sta rivelando però inadeguato, poiché l'evoluzione sociale comporta un'estensione di gruppi che hanno ruoli ben definiti, creando una rete di interazioni in continuo aumento, ma che dà origine ad una maggiore interdipendenza fra le parti e quindi rendendo sempre più rigido il sistema globale.

In questo quadro il comportamento e l'evoluzione degli ecosistemi e delle società può essere descritto mediante reti costituite da un insieme di elementi reciprocamente connessi attraverso flussi di energia, materia e informazione [8]. Ciascuno di essi può essere assimilato ad un nodo e i diversi nodi possono essere interconnessi da linee che indicano le interazioni reciproche. L'esperienza rivela che in molte situazioni la probabilità che un nodo scelto a caso abbia un numero k di interconnessioni risulta espressa da una legge di potenza del tipo $p(k) \propto k^{-\gamma}$, con $\gamma = 1-3$. Essa caratterizza in modo adeguato le caratteristiche di reti, chiamate a scala libera, che si riferiscono a sistemi di interesse biologico, ecologico, economico e sociale, e la sua emergenza è legata

alla dinamica dei processi che hanno generato la rete stessa. Può essere giustificata in diversi modi, in particolare assumendo che l'evoluzione della rete proceda attraverso l'aggiunta ad intervalli regolari di tempo di un nuovo nodo e che ciascuno di essi si connetta con gli altri con una probabilità proporzionale al numero di nodi che già possiede. La descrizione dell'evoluzione della rete può essere allora effettuata attraverso il comportamento asintotico di una serie di equazioni simili a quelle impiegate per studiare la distribuzione dei prodotti di una serie di reazioni successive [9].

In realtà l'analisi dei flussi di materia ed energia negli ecosistemi deve essere condotta in accordo al secondo principio della termodinamica, che come è noto sta alla base di tutti i processi naturali e che prevede un declino verso un disordine generalizzato. Questo approccio non esclude l'emergenza locale di nuove forme di crescita [10]; nei processi naturali traggono origine dal fatto che lontano dalle condizioni di equilibrio si manifestano elevati gradienti delle variabili fisiche intensive quali la temperatura, la pressione e i potenziali chimici. Nei sistemi economici essi trovano un riscontro negli squilibri sociali, monetari, dei costi ecc. [11]. In virtù della presenza di meccanismi di interazione non lineari, viene allora favorita l'emergenza di strutture organizzate la cui dinamica contribuisce al loro sviluppo [12]. In questo quadro una visione focalizzata sul limite delle risorse, anche se costituisce un monito alla tendenza verso dissipazioni favorite da un'eccessiva incentivazione dei consumi, deve essere esaminata in un contesto più ampio nel quale lo sviluppo economico dia maggiore rilevanza ai menzionati indicatori qualitativi di welfare e soprattutto sappia trarre vantaggio dalla ricerca scientifica, arricchendo di contenuti innovativi le attività industriali ed economiche.

Bibliografia

- [1] D.L. Meadows, Limits to the Growth, Universe Books, New York, 1972.
- [2] Y. Bar-Yam, Dynamics of complex systems, Perseus Books, Reading, 1997; Complexity rising: From human being to human civilization, EOLSS, Oxford, www.eols.net
- [3] S. Lloyd, Il programma dell'Universo, Einaudi, Torino, 2006.
- [4] T. Gold, PNAS, 1992, **89**, 6045.
- [5] H.P. Scott *et al.*, PNAS, 2004, **101**, 14023.
- [6] A.B. Cambel, B. Fritsch, A Synergistic Approach to Evaluate Technological Change, Alternative Energy Sources VII, T.N. Veziroglu (Ed.), **6**, 17-37, Hemisphere Publishing Co., Washington, 1987.
- [7] R. Kurzweil, La singolarità è vicina, Apogeo, Milano, 2008.
- [8] A.-L. Barabasi, Link, Einaudi, Torino, 2004.
- [9] P.L. Krapivsky, S. Redner, F. Leyvraz, *Phys. Rev. Letters*, 2004, **85**, 4629.
- [10] D. Schneider, D. Sagan, Into the Cool, The University of Chicago Press, Chicago, 2006.
- [11] Georgescu-Roegen, The Entropy Law and the Economic Process, Harvard University Press, Cambridge, 1971.
- [12] R.E. Ulanowicz, Growth and Development, to Excel Press, Lincoln NE, 2000.

Evolution of Natural and Social Systems

The evolution of an ecosystem is mainly due to an increase of its level of organization associated to the emergence of coherent behaviours that provides the mechanisms able to contrast the impoverishment of natural resources. Both growth and development concepts apply to ecosystems in the framework of non equilibrium thermodynamics.

ABSTRACT