

CIBERNETICA (dal gr. κυβερνήτης «timoniere» - *cybernetics*; *Kybernetik*; *cybernétique*; *cibernética*). – Scienza che studia i sistemi dotati di strutture cicliche (*loop*) di controllo; tali sistemi sono specificati definendo la loro organizzazione interna e la loro capacità di comunicazione intersistemica. Secondo la classica definizione di Norbert Wiener, la cibernetica è «lo studio del controllo e della comunicazione negli animali e nelle macchine».

La teoria cibernetica si articola in tre macrogruppi di concetti: quelli relazionali di base, quelli che identificano i processi dinamici di un sistema e quelli che riguardano le sue strutture cicliche di controllo e orientamento a uno scopo.

I concetti del primo gruppo, descrivendo i processi a un alto livello di astrazione, permettono l'utilizzo di un linguaggio fiscalista uniforme. Questi concetti sono: *sistema*, *varietà*, *vincolo*, *entropia*, *informazione*. Dato un sistema, la spiegazione cibernetica considera quali siano i possibili stati alternativi che questo avrebbe potuto raggiungere e si chiede perché non lo ha fatto. Per far ciò la cibernetica opera una serie di distinzioni. Quella primaria è tra sistema e ambiente. Tale distinzione è prodotta isolando quelle proprietà che, in base all'osservazione, un sistema possiede o meno. Tale approccio binario è esteso assegnando alle proprietà identificate un valore continuo o discreto. L'insieme di tutti i valori è lo *stato* di un sistema; l'insieme dei possibili stati è lo *spazio degli stati*. La *varietà* è il numero dei possibili stati distinti che un sistema potrebbe assumere e rappresenta il suo grado di «libertà» (il termine qui ha un valore tecnico, non etico). Se la varietà effettiva di un sistema è minore della varietà concepibile, il sistema in considerazione è *vincolato*. Una palla da biliardo potrebbe muoversi liberamente nelle tre direzioni, ma di fatto scorre su un piano bidimensionale. I vincoli permettono di ridurre i gradi di libertà di un sistema e, se imposti dall'esterno, di controllarlo. Inoltre, l'identificazione di vincoli sulle possibili relazioni tra gli spazi degli stati di due sistemi consente di studiare il loro rapporto reciproco. Varietà e vincoli sono in relazione tramite una formula che calcola l'*entropia* di un sistema in base alla distribuzione della probabilità di verificarsi di un certo stato. Se tutti gli stati di un sistema sono equiprobabili allora l'entropia di quel sistema sarà massima e tenderà a coincidere con la sua varietà

(si immagini una sfera perfetta che può muoversi su un piano ideale perfettamente allineato e privo di attrito). In questo senso il vincolo è ciò che diminuisce l'entropia di un sistema. L'entropia permette di definire anche il concetto di *informazione*, come misura della diminuzione di entropia che risulta dal ricevere un certo messaggio.

Attraverso questi concetti di base si possono descrivere le dinamiche e le interazioni tra sistemi come una serie di trasformazioni di uno stato al tempo t nello stato successivo al tempo $t+1$. La trasformazione può essere rappresentata matematicamente come una relazione tra gli stati di un sistema o, con una estensione, tra gli stati di più sistemi. Dati due sistemi A e B, se lo stato di A dipende dallo stato precedente di B, allora si potrebbe osservare B come un sistema di input; se gli stati di A, a loro volta, influenzano gli stati di un altro sistema C, si può osservare C come se fosse un sistema di output; se non conosciamo le dinamiche di A ma solo quelle di B e C, si dice che A è una scatola nera (*black box*).

Il secondo macrogruppo di concetti riguarda la classificazione dei processi circolari in cui un sistema può incorrere: l'autoapplicazione, l'autoorganizzazione, la chiusura e i cicli di retroazione (*feedback*). L'autoapplicazione è la constatazione formale che un sistema può ottenere in ingresso i suoi stessi stati di uscita. È rappresentata dalla formula $y = f(y)$. A seconda di come sono interpretati f e y si ottengono configurazioni circolari differenti. Lo studio dell'autoapplicazione è trattato nei termini di attrattori, bacini di attrazione, equilibri dinamici, caos deterministico e così via. Se si interpreta y come uno stato del sistema e f come una sua trasformazione, allora lo stato y è il punto di equilibrio verso cui la dinamica del sistema converge. Estendendo questa considerazione a un sottoinsieme di stati possibili allora si ottiene un bacino di attrazione. William R. Ashby chiama la situazione in cui un sistema tende all'equilibrio autoorganizzazione e nota che, se il sistema è formato da diversi sottosistemi, questi tendono ad adattarsi vicendevolmente. Quando il bacino di attrazione di un sistema coincide con la sua varietà, il sistema è chiuso, cioè è invariante a qualsiasi trasformazione. Se si considera lo stato di equilibrio di un sistema come il suo stato finale, si può trattare la differenza tra questo e il suo stato attuale come un segnale di errore

che il sistema può reintrodurre come input per aumentare o correggere la sua tendenza dinamica. Questo processo è la retroazione e si dice positiva quando incrementa la velocità con cui un sistema raggiunge il suo stato finale, negativa quando corregge (selezione) le dinamiche che deviano un sistema dal raggiungimento del suo stato di equilibrio.

Il terzo macrogruppo di concetti si occupa di classificare le dinamiche di controllo e di orientamento a uno scopo. Esistono tre meccanismi di controllo che sono il *feedback*, il *feedforward* e il *buffering*. Del primo meccanismo di regolazione si è già detto; il secondo riguarda la possibilità di un sistema di conoscere, anticipare e modificare la deviazione che un certo input potrebbe causare rispetto a un suo possibile stato finale. Il *buffering*, infine, è l'assorbimento passivo di una perturbazione. Nei sistemi dotati di regolazione, la varietà del disturbo non può essere maggiore della varietà della regolazione: è la «legge della varietà indispensabile» (*law of requisite variety*) per i sistemi di regolazione.

Quelli fin qui esposti sono i concetti che caratterizzano la dimensione teorica di base dell'approccio cibernetico: più il sistema in analisi si fa complesso, più questi concetti si raffinano ed estendono, fino a comprendere analisi delle gerarchie, relazioni epistemiche complesse (come modellizzazione e simulazione), apprendimento, cognizione, conoscenza e così via.

La storia della cibernetica è delineata dall'intreccio delle varie discipline che hanno contribuito allo sviluppo dei suoi principi teorici – ingegneria, biologia, filosofia, psicologia, logica, neuroscienze, sociologia ed economia – e alla costruzione di alcune macchine che incorporano tali principi. La spiccata interdisciplinarietà è legata all'intento di unificare i vari approcci sotto principi astratti comuni. Dopo la fine della seconda guerra mondiale, lo studio ingegneristico dei meccanismi di controllo automatico si sviluppò in maniera prorompente. Meccanismi protocibernetici come la valvola a vapore di Watt ispirarono lo studio e la realizzazione di meccanismi più sofisticati, basati su componenti elettronici: sistemi di puntamento, oscillatori, radioricevitori, regolatori di varia natura ecc. Anche l'analisi biologica dei sistemi viventi iniziò ad essere condotta nei termini di autoregolazioni.

In filosofia, la cibernetica rinnovò il dibattito sulla spiegazione fiscalista del comportamento teleologico degli esseri viventi. In *Behavior, Purpose and Teleology* (1943) Norbert Wiener, Arturo Rosenblueth e Julian Bigelow osservarono che l'analisi teleologica di derivazione aristotelica conduce al paradosso che una causa sia cronologicamente successiva al suo effetto, andando così contro l'ordine logico-temporale della spiegazione causale. Secondo questi autori il concetto di «causa finale» andava interpretato alla luce di una ridefinizione operativa dei termini che producono tale confusione. In questo senso, il comportamento attivo rivolto a uno scopo era ridotto a due classi: con retroazione (teleologico) e senza retroazione (non teleologico). La retroazione può essere di due tipi: positiva, se il segnale in uscita da un sistema è ripresentato in ingresso, e negativa, se il comportamento di un sistema è regolato in base alla differenza (errore) tra lo stato finale ricercato dal sistema e lo stato attuale. Questa differenza è il segnale che l'obiettivo invia al sistema per regolarne il comportamento. Tale analisi mise in relazione meccanismi autoregolanti e organismi viventi e fu considerata una provocazione da parte dei filosofi vitalisti e degli psicologi che consideravano l'attività rivolta a uno scopo come il carattere distintivo del naturale rispetto all'artificiale. In generale, la cibernetica fornì nuovi argomenti a fiscalisti e materialisti come Herbert Feigl, che vedeva nelle spiegazioni basate sulla retroazione la possibilità di integrare il livello mentale con quello fisico.

Antesignani della cibernetica nell'ambito della psicologia comportamentista furono Ernest Thorndike e Clark L. Hull. Il primo formulò la cosiddetta «legge dell'effetto», secondo la quale l'apprendimento è dovuto al rinforzo positivo che l'effetto produce su una risposta corretta. Il secondo propose «l'approccio dei robot», metodologia che usa la costruzione di modelli meccanici, basati sulle teorie psicologiche a disposizione, come mezzo di dimostrazione dell'inutilità di concetti vitalistici nella spiegazione del comportamento.

In ambito logico e neuroscientifico, la cibernetica contribuì allo sviluppo delle reti neurali e dell'intelligenza artificiale classica. Gli studi sulle reti neurali risalgono a Warren S. McCulloch e Walter Pitts, che mostrarono come neuroni formali possano esprimere un comportamento congruente con il calcolo logico. All'ap-

proccio delle reti neurali si ispirò Donald O. Hebb, secondo il quale le connessioni presenti nel cervello cambiano continuamente mentre l'organismo apprende diversi compiti funzionali e questi cambiamenti creano insiemi organizzati di cellule. Egli propose la legge per la quale l'attivazione ripetuta di un neurone da parte di un altro, attraverso una particolare sinapsi, aumenta la conduttanza di questa. Ne segue che gruppi di cellule debolmente interconnesse, se attivate simultaneamente, tenderanno a organizzarsi in insiemi più fortemente connessi: le assemblee cellulari. La teoria degli assembramenti cellulari ha dato il via a numerosi studi sull'apprendimento di reti neurali e sul modo in cui si genera e si propaga un'attività neurale sincronizzata. Nel 1958, Frank Rosenblatt costruì il *Perceptrone*, la prima rete neurale in grado di categorizzare stimoli presentati in ingresso senza possedere conoscenze pregresse.

Ashby, che per primo investigò le basi fisiche del comportamento teleologico e dell'apprendimento, propose di spiegare il comportamento orientato a uno scopo come la capacità della materia di ritornare a un suo punto di equilibrio, cambiando in alcuni casi la sua organizzazione interna. Per dimostrare ciò, descrisse una macchina chiamata *Omeostato*. Durante gli anni cinquanta la cibernetica trovò un quadro di riferimento teorico coerente nella teoria generale dei sistemi, elaborata da Ludwig von Bertalanffy. La teoria dei sistemi si occupa di fornire delle spiegazioni, basate su principi generali, che diano conto della dinamica di un qualsiasi sistema che sia aperto (ai segnali ambientali) ed evolva nel tempo.

La cibernetica classica entrò in crisi tra gli anni sessanta e settanta quando si svilupparono, in filosofia e in intelligenza artificiale, una serie di critiche alla definizione operativa di comportamento teleologico. Dopo un certo periodo di stasi, in cui ha predominato l'approccio ingegneristico e meccanicistico, molti cibernetici iniziarono a utilizzare concetti non necessariamente legati ai servomecanismi di controllo, tipici dell'approccio classico, dando risalto invece a quelli di autonomia, autorganizzazione, cognizione e al ruolo dell'osservatore nella modellizzazione dei sistemi. Nei primi anni settanta questo movimento confluisce nella cosiddetta «cibernetica del secondo ordine», in cui si fusero due aspetti. L'idea che la conoscenza di un sistema si formi grazie alla

costruzione di rappresentazioni semplificate, le quali estraggono elementi che appaiono essenziali a un certo osservatore per la costruzione di un modello esplicativo di quel sistema. E quindi il passaggio da un approccio teorico, in base alla quale l'accesso epistemico ai sistemi è oggettivo, separato e non influenzato, a un approccio più realistico, in base al quale il sistema osservato è esso stesso un agente che interagisce, modificandolo, con il sistema osservatore.

Sebbene la cibernetica abbia avuto un ruolo storico fondamentale e molte discipline abbiano assorbito i suoi concetti teorici principali (basti pensare alla ripresa negli anni ottanta degli studi sulle reti neurali o al ruolo che il concetto di retroazione riveste nella *Artificial Life*), attualmente non si può parlare di una scuola cibernetica o di una disciplina autonoma. Oggi pochissimi gruppi – come il *Principia Cybernetica Project* e l'*American Society for Cybernetics* – continuano lo studio della cibernetica come programma di ricerca teorico autonomo.

G. Paronitti - G.M. Greco - M. Taddeo - L. Floridi

BIBL.: K.J.W. CRAIK, *The Nature of Explanation*, Cambridge 1943; A. ROSENBLUETH - N. WIENER - J. BIGELOW, *Behavior, Purpose and Teleology*, in «Philosophy of Science», 10 (1943), pp. 18-24; D.O. HEBB, *The Organization of Behavior*, New York 1949; W.R. ASHBY, *An Introduction to Cybernetics*, London 1956; P. DE LATIL, *Thinking by Machine*, London 1956; W.R. ASHBY, *Design for a Brain*, New York 1960² (London 1952); N. WIENER, *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Cambridge 1961² (London 1948); M.A. ARBIB, *Brains, Machines and Mathematics*, New York 1964; V. SOMENZI - A. GUZZO (a cura di), *L'uomo e la macchina*, «Atti del XXI Congresso nazionale di filosofia», Torino 1967; L. VON BERTALANFFY, *General System Theory*, New York 1968; M.J. APTER, *The Computer Simulation of Behaviour*, London 1970; D.J. MCFARLAND, *Feedback Mechanism in Animal Behavior*, New York 1970; J.R. SLANGE, *Artificial Intelligence*, New York 1971; J.F. YOUNG (a cura di), *Information Theory*, London 1971; G. BATESON, *Steps to an Ecology of Mind: Collected*, New York 1972; H. VON FOERSTER, *The Cybernetics of Cybernetics*, Minneapolis 1974; H. MATURANA - F. VARELA, *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*, Dordrecht-Boston 1980; A. DE LUCA - L.M. RICCIARDI, *Introduzione alla Cibernetica*, Milano 1981; N. WIENER, *The Human Use of Human Beings; Cybernetics and Society*, New York 1988² (Boston 1954); S.J. HEIMS, *The Cybernetics Group*, Cambridge 1991; F.J. VARELA - E. THOMPSON - E. ROSCH, *The Embodied Mind. Cogni-*

tive Science and Human Experience, Cambridge 1991; S.A. KAUFMANN, *Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*, Oxford 1992; L. ROCHA (a cura di), *Self-Reference in Biological and Cognitive Systems*, n. mon. «Communication and Cognition - Artificial Intelligence», 12 (1995), 1-2; L. STEELS - R. BROOKS (a cura di), *The Artificial Life Route to Artificial Intelligence: Building Embodied, Situated Agents*, Hillsdale 1995; E. VON GLASERSFELD, *Radical Constructivism*, London 1995; A. CLARK, *Being there. Putting Brain, Body, and World Together Again*, Cambridge 1997; J.A. ANDERSON - E. ROSENFELD (a cura di), *Neurocomputing*, Cambridge 1998; S. NOLFI - D. FLOREANO, *Evolutionary Robotics*, Cambridge 2000; R. CORDESCHI, *The Discovery of the Artificial*, Dordrecht 2001.

► ANALOGICO-DIGITALE; AUTOPOIESI; AUTORIFERIMENTO; COMPUTER; COMUNICAZIONI DI MASSA, TEORIA DELLE; ENTROPIA; ETICA INFORMATICA - ETICA DELL'INFORMAZIONE; INFORMATICA; INTELLIGENZA ARTIFICIALE; INTERNET; MACCHINA; MODELLO; NEUROSCIENZE; SISTEMA.

►