

Gianni Zanarini

Complessità e futuro

Iniziamo con una bella poesia di Hans Magnus Enzensberger.

Appena ho chiamato la pietra
"pietra",
dietro di essa appare
diafana, fantasmatica,
come una sua ombra chiara,
una seconda pietra, più leggera,
che è facile scambiare per la prima.

La raccolgo,
ci dormo sopra,
la getto via.
Mi appartiene, non si può opporre.
Della mia pietra
faccio quel che voglio.

Ma non pesa niente.
Pesante è l'altra,
la prima,
che non mi dà retta,
che non ha nome,
che mi colpisce.¹

Sarà intorno a questa poesia che costruirò la mia conversazione.

L'oggetto, un qualunque oggetto, non coincide con l'immagine dell'oggetto che noi ci facciamo. Può essere una immagine fatta di parole, un nome: "pietra". O anche una immagine visiva, accompagnata magari da una serie di elementi caratteristici: il colore, le dimensioni, la forma, la relazione con altre pietre e con il resto del mondo... Ma anche il movimento ipotetico che l'oggetto farà se mi viene minacciosamente incontro, un futuro che può colpirmi, ferirmi se non lo prevedo.

Ora facciamo un piccolo cambiamento verso una situazione meno minacciosa: sostituiamo la pietra con una pallina da tennis. Il tennista che esegue un servizio anticipa quello che succederà, crea "un'ombra" della pallina, ha una intuizione vincente dei gesti necessari e del moto che ne seguirà. Ha una intuizione del futuro e di ciò che, nel presente, può costruire il futuro.

Forse cerca di sorprendere l'avversaria con un tiro molto radente. E anche veloce, e la velocità implica energia, che in parte viene fornita alla pallina dall'essere lanciata molto in alto prima della battuta. E magari dà uno spin (un "effetto"), alla pallina che renderà volutamente imprevedibile il rimbalzo sul terreno. E poi deve tener presente anche il passato: quello che ci si aspetta dai suoi servizi, la cui imprevedibilità è in parte prevedibile. E le caratteristiche dell'avversaria, del campo, del vento, della temperatura, della sua stanchezza, del punto a cui è arrivata la partita, E tanto altro: aspetti interagenti e in parte

¹ *Semantica*, in H.M.Enzensberger, *Più leggeri dell'aria*, Einaudi, Torino, 2001, p. 76.

conflittuali, come lo sono l'impostazione di un tiro radente e l'esigenza di non toccare la rete perché il servizio non venga annullato.

Questi sono solo accenni: un maestro di tennis potrebbe dire ben di più e ben meglio di me. Volevo solo sottolineare la complessità che porta a costruire questo gesto apparentemente semplice. E a costruire tutti i gesti che strutturano la partita: le intuizioni che portano ai posizionamenti sul campo, alle risposte, alle strategie.

Come si forma questo meraviglioso coordinamento di mente e corpo non solo per prevedere, ma per determinare il futuro? Come nasce, per parafrasare Enzensberger, quella "seconda" pallina, quell'"ombra chiara" che orienta il servizio vincente, quel modello implicito per prevedere e orientare il futuro? Nasce da un intreccio tra conoscenze implicite, addirittura conoscenze del corpo, e conoscenze esplicite (in particolare, conoscenze di fisica, di meccanica, di elasticità della pallina e delle corde della racchetta, di caratteristiche del campo da tennis, ecc.).

Nella mente di chi effettua il servizio, l'"ombra" della pallina da tennis è già volata oltre la rete, ha già toccato terra ed è rimbalzata. Solo dopo essere stata lanciata, l'altra pallina, quella pesante, quella che "si può opporre", seguirà, o non seguirà, lo stesso percorso.

In una situazione diversa, che non implica il coordinamento mente-corpo, ad esempio nel lancio di una navetta spaziale, quale sarà l'"ombra" – per così dire - del veicolo spaziale? Si dovrà evidentemente costruire un altro tipo di "ombra": un modello completamente esplicito della situazione. Si individueranno le variabili quantitative che intervengono nel problema (il peso e la forma della navetta, le caratteristiche del motore a razzo, la quota da raggiungere, la resistenza dell'aria, ecc.) e si esprimeranno le loro relazioni per mezzo di equazioni, ossia per mezzo della matematica che gli scienziati, soprattutto nel corso degli ultimi quattro secoli, hanno ideato a questo scopo.

Di questo "mondo virtuale", ci ha detto Enzensberger, possiamo fare quello che vogliamo. Che cosa vuol dire? Che possiamo studiare il comportamento della navetta spaziale nelle più diverse condizioni e determinare il valore delle variabili disponibili per il controllo attraverso la loro relazione con il risultato voluto. Il modello esplicito, matematico potrà così aiutarci a costruire il futuro della navetta.

I modelli matematici si fondano sulle conoscenze scientifiche. Ma a volte la scienza, nel suo sforzo di limitare il campo dell'esperimento, di semplificare le situazioni, di eliminare le perturbazioni, può dare l'idea illusoria che il mondo sia semplice: in particolare, che piccole cause abbiano sempre piccoli effetti, che ci sia una sistematica proporzionalità tra cause ed effetti. E invece non è sempre così.

Torniamo al tennis. Il gioco continua, e ogni volta che la palla viene colpita c'è dietro un pensiero: un pensiero implicito, ma attento alla complessità della situazione. Ora supponiamo che la pallina tocchi la rete. Interviene allora un elemento di novità della situazione. Improvvisamente, infatti, entra in gioco un livello di aggregazione più dettagliato. Fin qui si poteva approssimare il moto della pallina come quello di un punto materiale. Adesso, invece, diventa importante anche la sua superficie (la sua maggiore o minore morbidezza), come pure il bordo superiore della rete, e il dettaglio della loro interazione, che dipende dalla posizione e dalla velocità della pallina, ma che è in grado di

modificarle, retroagendo su di esse. Addirittura, in corrispondenza della rete si presenta una prospettiva estremamente non lineare: una biforcazione. La pallina, infatti, può finire da una parte o dall'altra della rete (una differenza macroscopica) in seguito anche a piccolissime differenze nel lancio. Dunque, in questo caso, abbiamo livelli diversi interagenti e retroagenti (quello della pallina come punto materiale e quello, più dettagliato, delle caratteristiche della sua superficie e dell'interazione con la rete), una non linearità tra cause ed effetti (una piccola causa può portare a una grande differenza), abbiamo biforcazioni, abbiamo imprevedibilità: abbiamo, insomma, una elevata complessità.

In termini negativi, si può dire che un sistema è complesso quando non si lascia spiegare in base a causalità semplici. E, accanto a molti sistemi naturali, i sistemi umani, o comunque i sistemi nei quali è centrale la relazione tra uomo e natura, sono sempre sistemi complessi. Lo sviluppo di un'economia, i cambiamenti climatici, i processi di consumo, l'evoluzione di una città, le implicazioni dell'ingegneria genetica sono realtà complesse che non si lasciano ridurre a spiegazioni e prospettive semplici.

Eppure, c'è sempre qualcuno che dice: dipende tutto da... c'è solo una cosa da fare... è tutta colpa di... le cose andranno avanti da sole, non bisogna intralciarle... Ma quelle che possiamo definire come spiegazioni "da bar" (o purtroppo, a volte, come promesse elettorali), che potrebbero forse avere un senso per situazioni semplici, non si adattano ai sistemi complessi, che richiedono un approccio scientifico. Questo comporta, come ho detto, la costruzione di un "mondo virtuale", di un mondo "ombra" (secondo la definizione di Enzensberger), in cui i componenti non sono oggetti concreti, ma oggetti matematici: sono variabili interconnesse tra loro. Spesso sarà un mondo con molte variabili interconnesse in modo non lineare, addirittura circolare, organizzate in più livelli in relazione tra loro. Un mondo virtuale che viene costruito per "simulare" l'altro mondo, quello della "pesante" realtà.

In questo modo, l'approccio scientifico aiuta a immaginare il futuro, a individuare gli interventi possibili, ad affrontare le incertezze future con una consapevolezza e un coinvolgimento maggiore. Inoltre, questo approccio che ho definito "scientifico" non è più soltanto il modo di procedere di chi, in remoti laboratori, elabora conoscenze dalle ricadute potenzialmente benefiche oppure minacciose sulla società, ma può diventare un corredo metodologico di ogni cittadino del mondo di fronte alla complessità dei sistemi e dei problemi del pianeta. Nello stesso tempo, anche i contenuti delle diverse discipline scientifiche acquistano un interesse nuovo, perché forniscono, per così dire, i mattoni ai progetti orientati a immaginare il futuro, siano essi relativi al clima, alle nanoscienze, all'intelligenza artificiale o ad altro ancora. E così le diverse materie (la matematica, la fisica, la chimica, le scienze) prendono anche un senso nuovo, che per i ragazzi è forse più facile da capire piuttosto che quello, che incontrano abitualmente, di un insieme ordinato e astratto di conoscenze. E il futuro non si presenta più soltanto come una realtà da subire o da prevedere, ma è anche una prospettiva da desiderare e da costruire.

Faccio soltanto un rapido accenno al problema dei cambiamenti climatici. Le variabili significative sono tante, e spesso sono interconnesse in modo non intuitivo (pensiamo ad esempio alla relazione non lineare che lega l'aumento di temperatura e lo scioglimento dei ghiacciai, in cui l'aumento di temperatura non solo fa sciogliere i ghiacciai, ma li rende più scuri, e quindi più assorbenti, per cui lo scioglimento è sempre più rapido). Costruire un

modello di una realtà complessa come questa richiede di individuare le variabili significative, di definire le loro relazioni, di studiare gli effetti futuri (possibili, probabili, desiderabili, realizzabili) - su diverse scale temporali - delle azioni su una o più variabili disponibili ai diversi attori planetari. Si giunge così a modelli complessi di situazioni complesse, che solo l'uso del computer premette di utilizzare al meglio per la simulazione e la previsione.

I sistemi complessi non sono tutti dello stesso tipo. Molte realtà complesse hanno una caratteristica particolare: quella di essere composti di un grande numero di elementi simili in una relazione dinamica tra loro, il che porta a sviluppare comportamenti collettivi imprevedibili al livello degli elementi costitutivi: "emergenze", "auto-organizzazioni" create dalla dinamica di interazione e che su di essa retroagiscono.

Queste auto-organizzazioni hanno una caratteristica paradossale: il sistema nel suo complesso, infatti, è «più» della somma delle sue parti costituenti, proprio perché al suo livello emerge un'auto-organizzazione, ma è anche «meno» di tale somma, perché realizza solo una particolare auto-organizzazione tra le tante possibili, reprimendo e incanalando le molteplici potenzialità dei singoli elementi.

Faccio un esempio quotidiano, per indicare come la complessità sia pervasiva. Le auto a un semaforo costituiscono un sistema semplice. Invece le auto a una rotonda costituiscono un sistema complesso. Non si può prevedere a priori la sua dinamica, che nasce dai comportamenti dei singoli automobilisti, ma su di essi retroagisce.

Pensiamo anche a uno stormo di uccelli, alle sue forme straordinarie e mutevoli. Una realtà sorprendente che ha incantato anche il signor Palomar, il personaggio creato da Italo Calvino.

Nell'aria viola del tramonto il signor Palomar guarda affiorare da una parte del cielo un pulviscolo minutissimo, una nuvola d'ali che volano. S'accorge che sono migliaia e migliaia: la cupola del cielo ne è invasa. Quella che fin qui gli era sembrata un'immensità tranquilla e vuota si rivela tutta percorsa da presenze rapidissime e leggere. [...] L'addensarsi e diradarsi dei volatili si sdipana come un lungo nastro sventolante a zigzag. Dove questo nastro si curva lo stormo appare più fitto, come uno sciame d'api; dove invece s'allunga senza torcersi c'è solo una punteggiatura di voli dispersi.²

Questa è una auto-organizzazione, perché non è prescritta dall'esterno, si colloca a un livello superiore rispetto a quello dei singoli uccelli e non è da essi prevedibile, ma li condiziona: come ho detto prima, condiziona. quasi paradossalmente, gli individui che contribuiscono a formarla. Come possiamo studiare un sistema complesso di questo tipo? In linea di principio, forse, scrivendo un sistema di equazioni. Ma gli elementi sono troppi, le interconnessioni sono troppe. L'impresa risulta dunque impossibile.

Come costruire un modello, come simulare una realtà come questa? Partendo dall'osservazione che l'ordine emergente in un sistema complesso ha origine da attività, anche semplici, di elaborazione di informazioni da parte dei singoli individui.

Gruppi di studiosi di altissimo livello (ne cito solo uno: Giorgio Parisi, uno dei fisici teorici più autorevoli del mondo) hanno studiato a lungo il comportamento degli stormi e quello

² I. Calvino, *L'invasione degli storni*, in *Romanzi e racconti*, Mondadori, Milano, 1991, vol. 2, p. 929.

dei singoli uccelli, e sono giunti alla sorprendente conclusione che la complessità dello stormo nasce da comportamenti piuttosto semplici dei singoli. Ognuno di essi tiene d'occhio un numero limitato di altri volatili (7, 8, non di più), controlla la distanza reciproca (si avvicina se è troppo lontano o si allontana se è troppo vicino) e adatta la sua velocità a quella degli altri. L'iniziativa del cambio di rotta è presa da pochi uccelli, e l'informazione si propaga all'interno dello stormo a una velocità elevata, di diverse decine di metri al secondo. Anche la cosiddetta "onda di terrore" (*terror shock*) per l'arrivo di un predatore si propaga a grande velocità.

Sulla base di queste osservazioni, è possibile costruire modelli di simulazione al computer. E il comportamento appare subito molto simile a quello osservato nel cielo di Roma.

In biologia, la morfogenesi, ossia lo sviluppo di organismi viventi a partire da una cellula fecondata, è una straordinaria manifestazione di auto-organizzazione, che si sviluppa attraverso un'attività di incessante elaborazione di informazioni da parte delle molecole.

Ma possiamo considerare auto-organizzazioni anche le società animali, e non solo le loro temporanee aggregazioni in stormi o branchi. Pensiamo ad esempio al comportamento apparentemente casuale e disorganizzato di una moltitudine di formiche intente a trasportare fucelli. E' possibile che, senza alcun progetto, da questo errare "emergano" auto-organizzazioni: enormi piramidi o nuovi percorsi che aggirano gli ostacoli. La simulazione al computer permette di mostrare che, anche in questo caso, per l'auto-organizzazione del sistema sono sufficienti alcune regole semplici, oltre naturalmente a un grande numero di elementi, in questo caso formiche.

Si sviluppa così la prospettiva di studiare questa tipologia di sistemi complessi come costituiti di agenti (dei tipi più vari, dalle molecole agli esseri viventi e alle loro aggregazioni) che raccolgono, elaborano e comunicano informazioni, ciascuno al proprio livello e in modo diverso. A seconda del tipo di agente, le attività di elaborazione delle informazioni saranno viste, ad esempio, come iscritte nel sistema nervoso di un essere vivente (è il caso degli stormi di uccelli), o decise esplicitamente dal pensiero di un essere umano o dagli organi decisionali di una istituzione. Certo, gli agenti eseguono azioni, oltre che elaborare informazioni. Ma anche l'azione nasce da una informazione e, in quanto è misurabile, genera una informazione.

In questa prospettiva, i singoli agenti svolgono un'attività di pensiero: un pensiero che può essere anche molto semplice, ma si manifesta in situazioni non completamente definite a priori. L'interazione fra i componenti del sistema, poi, fa nascere, in un certo senso, un pensiero a più alto livello, un pensiero collettivo.

In generale, le decisioni degli agenti possono dipendere da informazioni sul presente e sul passato, o addirittura anche da previsioni sul futuro. Gli agenti all'interno di un sistema complesso possono essere pochi (al limite, soltanto due, come nel caso di una partita di scacchi) o moltissimi (come gli uccelli di uno stormo), possono operare in base a strutture decisionali molto semplici oppure in base strutture a loro volta complesse.

Nei sistemi complessi costituiti di agenti, come ho detto, possono emergere organizzazioni (auto-organizzazioni) anche in assenza di un progetto (proprio come le

strutture degli stormi di uccelli): organizzazioni mutevoli eppure riconoscibili, originate dalle elaborazioni dell'informazione da parte dei singoli agenti ma imprevedibili e inconcepibili al livello dei singoli componenti, pur retroagendo su di essi.

I sistemi complessi presentano spesso una caratteristica poco intuitiva ma molto importante. In molti casi le strutture che emergono sono robuste: anche tentativi molteplici e drastici non hanno effetto. Pensiamo al sasso che interrompe un corteo di formiche. Grandi interventi possono dunque avere scarsi effetti. Ma spesso è vero anche il contrario. Un corteo di formiche può iniziare da una singola formica, e poi ingrossarsi e diventare stabile. Piccole azioni possono allora avere grandi effetti.

I criteri di elaborazione delle informazioni - come quelli citati per gli uccelli in uno stormo - si possono simulare con programmi per computer, riproducendo comportamenti simili a quelli che vengono osservati in "sistemi ombra" costituiti da "agenti virtuali". Questo tipo di simulazioni ha raggiunto ormai un elevatissimo grado di realismo, per cui c'è un uso sempre più ampio di questi sistemi complessi virtuali: soprattutto nei videogiochi, ma anche nei film.

I due diversi modi di cui ho parlato per costruire modelli espliciti, quantitativi del mondo (lo studio per mezzo di equazioni e lo studio che mette al centro l'elaborazione di informazioni) vanno considerati come complementari: ognuno è particolarmente adatto ad affrontare certe classi di sistemi complessi. Come nel caso dei modelli matematici, anche in questo caso lo studio dei sistemi complessi al computer è una simulazione. La parola simulazione, d'altra parte, nasce dalla radice di "simile", e c'è appunto una somiglianza tra la computazione del mondo e quella della macchina. In questo caso, gli agenti occupano il ruolo che nei modelli matematici apparteneva alle variabili.

La simulazione si può definire come un esperimento mentale assistito dal computer e preparato da una elaborazione concettuale.

Le simulazioni sono il terzo strumento della scienza, uno strumento che si è aggiunto abbastanza di recente, cioè da quando computer veloci e potenti sono divenuti accessibili a qualunque scienziato, ai due strumenti di ricerca tradizionali: le teorie e gli esperimenti di laboratorio.³

Le parole chiave dello studio dei sistemi complessi basato su agenti sono dunque *complessità, informazione, simulazione*. Questo approccio non si limita allo studio di sistemi naturali. Esso è oggi usato anche per studiare sistemi umani: sistemi di produzione, stoccaggio, distribuzione, commercio, trasporti, servizi. Ma anche per studiare fenomeni sociali come le mode, i comportamenti imitativi nei mercati finanziari, lo sviluppo di bolle speculative, le fluttuazioni macroeconomiche. Ecco perché, come ho detto, anche grandi scienziati si dedicano oggi a studiare questi sistemi. Studiarli per progettarli, per cambiarli, per modificarne l'organizzazione, per studiare l'effetto di nuove norme e procedure sul loro funzionamento. Ma altre prospettive sono già immaginate dalla fantascienza. Sciami di nano-robot, per ora solo nella fantasia, potrebbero venire usati per interventi in medicina, e non solo. Michael Crichton nel romanzo *Preda* e Alex Proyas nel film *Io, robot* immaginano proprio questo.

³ D.Parisi, *Se il laboratorio è nel computer le scienze hanno un'arma in più*, Telèma, 5 (1999), pp. 28-30.

Ho definito i sistemi complessi di questo tipo come sistemi “pensanti” a più livelli. Tanto più, dunque, è interessante costruire anche del cervello, sede del pensiero umano, una immagine nuova, che permette di non prendere in considerazione soltanto quella cristallina razionalità che è stata spesso identificata come l’unica attività degna del nome di pensiero. Infatti, l’attività del cervello non è soltanto quella, ad alto livello, di eseguire deduzioni o dimostrazioni logiche. Esso svolge anche operazioni molto meno rigorose, come riconoscimento di immagini, interpretazione di dati, apprendimento, previsione, controllo dei movimenti del corpo, ecc. Proprio come nel caso del servizio in una partita di tennis! Nella prospettiva informazionale, il cervello si può pensare come un sistema complesso costituito da un enorme numero di elementi (i neuroni) che computano ad ogni istante il proprio stato successivo in base alle informazioni immagazzinate e ricevute e inviano informazioni ad altri neuroni.

A partire da questa immagine, sono stati elaborati “cervelli virtuali” in cui i neuroni (virtuali anch’essi) sono organizzati in strati interconnessi (input, output, rappresentazioni). Questi cervelli virtuali sono definiti reti neurali. Una rete di questo tipo sarà sempre più in grado di stabilire corrette associazioni tra input e output quanto più verrà addestrata con esempi (rinforzando o indebolendo opportune connessioni tra gli elementi in base al risultato). E’ proprio sulla base di reti neurali a più livelli che funzionano molte delle applicazioni di intelligenza artificiale con le quali interagiamo e sempre più spesso interagiranno ogni giorno anche attraverso i nostri telefoni.

Per capire meglio le caratteristiche delle reti neurali nello sviluppo di processi cognitivi, partiamo da alcune domande molto semplici. Che cos’è che fa di una “A” una “A”? Come mai noi riusciamo a riconoscere facilmente le lettere anche se sono scritte in modi diversissimi? Che cosa è caratteristico di una firma o di una impronta digitale? Com’è possibile fondarsi sulle proprietà dei sistemi complessi per costruire macchine in grado di riprodurre la stupefacente capacità di riconoscimento della nostra mente?

Osserviamo, a questo proposito, che il riconoscimento di lettere è un caso particolare di tutta una classe di problemi che sono facilissimi da risolvere in modo intuitivo anche da parte di un bambino, ma che sono terribilmente difficili da esplicitare, così da poter programmare un computer per eseguirli. Ecco un paradosso: è molto facile far eseguire a un computer operazioni di calcolo complicatissime, che eccedono le possibilità di qualunque mente umana; ma, nello stesso tempo, è molto difficile insegnargli a eseguire operazioni di riconoscimento che a noi appaiono semplicissime. Per questo motivo, risulta particolarmente interessante impostare il problema in termini di auto-organizzazione di un sistema complesso.

Le reti neurali sono costituite da centinaia (o anche migliaia) di elementi indipendenti (neuroni) organizzati in strati. Ognuno di questi neuroni riceve dagli altri un certo numero di segnali di ingresso (un numero che dipende, ovviamente, dalle connessioni attive), ne fa la somma algebrica e, a seconda del risultato, entra in uno stato eccitato ovvero resta a riposo. Se è eccitato, invia a sua volta impulsi verso gli elementi a cui è connesso. Come si vede, struttura e comportamenti assomigliano, anche se in modo drasticamente semplificato, a quelli dei neuroni biologici. Il comportamento collettivo di una rete come questa è determinato, oltre che dalla struttura delle connessioni, dai «pesi» delle connessioni stesse (che fissano l’intensità del segnale che viene inviato agli altri neuroni).

Come può una rete di questo tipo sviluppare una capacità di riconoscimento? Per comprendere il suo funzionamento, consideriamo un semplice modello di rete: quello a tre strati. Allo strato di ingresso arriva il segnale (ad esempio, la forma da riconoscere); sullo strato di uscita si ha il risultato del riconoscimento; lo strato intermedio ha una funzione di elaborazione auto-organizzata. Ogni cella può inviare segnali a tutte quelle dello strato successivo, ma non a quelle dello strato precedente. Per addestrare reti di questo genere, si propongono in ingresso, per centinaia o migliaia di volte, le figure da riconoscere; ogni uscita viene poi confrontata con il risultato voluto e, a seconda dell'esito di tale confronto, i pesi delle configurazioni vengono modificati sulla base di particolari algoritmi. Dopo un'opportuna sequenza di episodi di addestramento, si avrà una rete capace non solo di riconoscere figure note, ma addirittura di generalizzare le conoscenze acquisite, classificando forme mai viste prima.

La rappresentazione della conoscenza all'interno della rete (nello strato intermedio) è totalmente auto-organizzata, non prevista da un progettista. La conoscenza, dunque, non è formalizzata in proposizioni logiche, come accade nei sistemi informatici classici, ma è per così dire una conoscenza non verbale, pre-simbolica. Anche se, al livello più elementare, si può immaginare che i singoli neuroni eseguano pur sempre le operazioni logiche elementari.

In questo sistema non c'è un programma esplicito e definito a priori da un progettista, in grado di determinare il comportamento del sistema. Benché si tratti, in linea di principio, di un sistema deterministico, il suo comportamento si può considerare auto-organizzato proprio perché esso non è definito da un programma, ma si costruisce attraverso l'apprendimento e le relative modifiche strutturali.

I risultati sono interessanti, e si estendono nei campi più svariati, dal riconoscimento della voce alla diagnosi medica, fino alla classificazione di eventi nella fisica delle alte energie. Ma pensiamo anche al riconoscimento delle impronte digitali o al riconoscimento facciale, ormai presente anche nei dispositivi tascabili, o alle auto che si guidano da sole. Le loro reti neurali possono essere più complicate di quella a tre strati a cui ho accennato, ma l'idea di base è quella di sistemi di oggetti interconnessi (neuroni virtuali), ognuno dei quali segue regole semplici di elaborazione delle informazioni che provengono dagli altri oggetti a cui è connesso e che ad essi invia.

In questo modo, lo sviluppo dei computer ha fornito un supporto fondamentale per l'elaborazione di una nuova immagine dei processi cognitivi e per la creazione di sistemi di intelligenza artificiale, e in particolare dei sistemi basati su reti neurali.

Per la prima volta in modo massiccio, i mondi virtuali trovano posto anche all'interno dello stesso mondo reale. Infatti, un telefono di ultima generazione, un robot, un sistema di produzione automatizzato incorporano un cervello virtuale che simula un cervello reale.

Questo discorso, apparentemente, mi ha portato lontano dal tennis. Ma non poi tanto, perché anche l'"ombra" (ripreso così l'immagine di Enzensberger), l'ombra della pallina da tennis e del suo futuro possibile, desiderato e costruito che si crea nella mente del tennista nasce da un incessante lavoro dei suoi neuroni che, come parte di un sistema complesso, hanno contribuito al suo apprendimento di quella meravigliosa tecnica che lo

fa vincere. Ma allora è possibile, con l'uso di reti neurali, costruire un cervello virtuale connesso a un corpo artificiale, e far imparare a un robot, se non a giocare a tennis, almeno a giocare a calcio!

Il mondo in cui viviamo è un intreccio mai visto finora di reale e di virtuale. Facciamo parte di un sistema complesso, scientifico e tecnologico, a livello planetario che pensa a un livello superiore ai singoli agenti intelligenti, che siamo noi (e forse non saremo solo noi)! Ma la nostra intelligenza - la straordinaria intelligenza umana - ci consente, con l'aiuto della scienza, di guardare anche il mondo dal di sopra, dal di fuori e non solo dal di dentro. Ci consente di costruire "mondi virtuali", : ci consente di fare modelli, di prevedere, di progettare futuri probabili, possibili e desiderabili: ci consente di concepire il futuro come un mondo di cui fin da adesso possiamo essere e sentirci attivamente partecipi.

Bibliografia

C.Bertuglia, F.Vaio, *Complessità e modelli*, Bollati Boringhieri, Torino, 2011

G.Zanarini, *Entropia, informazione, complessità*, in B.Continzenza, E.Gagliasso (a cura di), *L'informazione nelle scienze della vita*, Franco Angeli, Milano, 1999, pp. 29-43.

R,Serra, G.Zanarini, *Sistemi complessi e processi cognitivi*, Calderini, Bologna, 1994.