

# Intelligenza Artificiale per la pianificazione urbana e territoriale: i sistemi multi agente

(testo tratto dalla Tesi di Laurea di C. Petito, Relatore: prof. R. Fistola)

Questo lavoro di tesi si pone l'obiettivo di approfondire la tematica della rappresentazione dei sistemi tramite la modellizzazione multi-agente (MAS: multi agent system o, talora ABM: agent based modelling) e l'utilizzo di tali modelli come strumento di supporto nella gestione e governo delle trasformazioni territoriali.

Oggetto di ricerche da lunga data in intelligenza artificiale, i sistemi multi-agente costituiscono un'interessante tipologia di modellazione di società, ed hanno a questo riguardo vasti campi d'applicazione, che si estendono fino alle scienze umane e sociali (economia, sociologia, etc.).

Un sistema multi-agente o (sistema ad agenti multipli) è un insieme di agenti situati in un certo ambiente ed interagenti tra loro mediante una opportuna organizzazione. Un agente è cioè un'entità caratterizzata dal fatto di essere, almeno parzialmente, autonoma, sia essa un programma informatico, un essere umano, e così via.

I sistemi multi-agente vengono utilizzati per simulare le interazioni esistenti tra agenti autonomi. Si cerca di determinare l'evoluzione del sistema al fine di prevederne l'organizzazione risultante.

Nel primo capitolo sarà approfondito lo studio dell'Intelligenza Artificiale (che viene comunemente contratto nell'acronimo I.A.), una disciplina scientifica nata intorno al 1950, il cui obiettivo può essere definito l'indagine sui meccanismi soggiacenti alle facoltà cognitive degli esseri umani (come il linguaggio, il ragionamento, la capacità di risolvere problemi, la percezione) e la loro riproduzione mediante computer opportunamente programmati. Esamineremo i fondamenti teorici alla base di questa nuova scienza e faremo un rapido excursus sui vari programmi di I.A., mettendone in luce pregi e difetti. Infine vedremo i filoni di ricerca dell'Intelligenza Artificiale che attualmente suscitano maggior interesse.

Nel secondo capitolo introdurremo le caratteristiche salienti dei sistemi multi-agente e il concetto stesso di sistema multi-agente; e mostreremo i motivi per cui la modellazione MAS sta ottenendo un così largo successo. In questo quadro, anche partendo da applicazioni condotte in diversi settori disciplinari, illustreremo come il nuovo approccio configura, in vari aspetti, nuovi modi di intendere il rapporto tra "realtà" e suo "modello".

Nel terzo capitolo, attraverso un processo di generalizzazione, astrarremo una teoria della modellazione multi-agente, definendo gli elementi costitutivi dei MAS, le caratteristiche degli agenti stessi, le relazioni che si possono avere tra tali agenti ed il "contesto" entro cui si svolgono tali relazioni.

Nel quarto capitolo analizzeremo poi le specificità dei sistemi multi-agente territoriali (MAST), rispetto ai MAS. L'aspetto che caratterizza i MAST è la grande attenzione dedicata ad approfondire natura e caratteristiche dello spazio in cui sono immersi gli agenti. Questo aspetto è quello che rende particolarmente adatto per i nostri fini questo tipo di modellizzazione, perché nei sistemi che noi analizziamo il territorio

rappresenta l'elemento fondamentale oggetto di studio e sul quale interveniamo con la nostra azione di governo.

Analizzeremo quindi i vari aspetti della "introduzione" del territorio nella simulazione multi-agente. Poi considereremo la casistica delle applicazioni MAST, anche avvalendoci della presentazione di alcuni lavori particolarmente significativi.

Nel quinto capitolo viene mostrato come rendere operativo il modello MAS realizzato. Sono presentati, e comparati, i linguaggi di programmazione e i software attualmente disponibili allo scopo detto. Si preciserà anche come finalizzarli ad applicazioni MAST.

Poi, per rendere più chiaro tutto quanto sopra esposto in termini generali, nel sesto capitolo si presenterà e analizzerà il software Turisti. Turisti simula degli agenti delocalizzati che si muovono ed interagiscono in un ambiente virtuale, che altro non è che la rappresentazione di uno reale. Questo software descrive il comportamento di agenti-turisti in visita alla città di Lucca, il loro stesso comportamento viene sensibilmente influenzato dalle complesse regole previste: partendo da agenti che si muovono in modo casuale, si giunge a simulare il movimento di turisti con comportamenti imitativi, che utilizzano, per orientarsi, le proprie mappe mentali del territorio ed un campo di visibilità di ampiezza variabile.

Infine l'ultimo capitolo sarà dedicato all'analisi dei risultati della nostra simulazione al fine di attuare la nostra azione di governo sul territorio oggetto di studio. Il nostro scopo è quello di individuare i canali preferenziali scelti dai turisti nei loro spostamenti e di intervenire in tali canali attraverso interventi mirati al soddisfacimento delle necessità dei turisti. Inoltre saranno proposti anche interventi rivolti alla mobilità e alla popolazione residente nell'ambito oggetto di studio.

## CAPITOLO 1

# L'INTELLIGENZA ARTIFICIALE

### 1.1 Premessa

Talvolta, quando ci si mette di fronte ad un computer e lo si osserva mentre esegue i suoi compiti, può accadere di avere l'impressione che esso sia dotato di una specie di intelligenza. Tuttavia si sa che questa impressione è sbagliata. Un computer, infatti, non fa altro che eseguire una sequenza di istruzioni, esplicitate in un programma, in maniera meccanica. Senza dubbio esistono programmi che possono eseguire operazioni molto complicate. Persino un comune programma di videoscrittura può avere centinaia o migliaia di comandi, alcuni dei quali possono apparire, specialmente all'occhio di un utente inesperto, incomprensibili. Ma appena si acquista un minimo di confidenza qualsiasi programma, per quanto complicato, perde tutta la sua aurea di mistero. Non a caso il computer viene considerato dalla maggior parte della gente solo un utile strumento. E sicuramente nessuno riterrebbe che uno strumento, per quanto complesso, sia dotato di intelligenza. D'altra parte nella considerazione generale, nemmeno gli esseri viventi più vicini a noi, come i cani, i gatti o le scimmie, vengono ritenuti in possesso di vere e proprie capacità intellettive. A questo punto si deve affrontare un piccolo excursus filosofico. Nella considerazione comune l'intelligenza umana rientra tra quei fenomeni che trascendono il mondo fisico e le sue leggi. Anche coloro che non professano alcuna credenza religiosa raramente sono disposti ad

accettare l'idea che il pensiero, la coscienza, il ragionamento possano essere spiegati mediante qualche tipo di teoria scientifica. La formulazione più esplicita (e famosa) di questa credenza la si deve al filosofo Cartesio, vissuto nel '600. Egli infatti, pur essendo stato uno dei fondatori del moderno pensiero scientifico, quando arrivò a trattare il problema della ragione umana non volle estendere anche ad essa la sua concezione meccanicista. Sostenne così che la mente e la realtà materiale sono fatti di due sostanze diverse, e che rispondono a leggi del tutto diverse.

Questa visione, che prende il nome di dualismo, esercita tuttora un fascino notevole e, come è stato rilevato, è condivisa anche a livello di senso comune. Essa tuttavia va incontro ad una grossa difficoltà: se la mente è irriducibilmente separata dalla materia (e dunque dal corpo), come è possibile che queste due entità interagiscano? Il fatto che l'interazione esista è innegabile: quando io penso di avere fame e decido di voler mangiare il mio corpo si alza, va in cucina e mangia. La causa del movimento del corpo è, dunque, il pensiero. Ma come può una sostanza immateriale esercitare una azione causale su una sostanza materiale? Lo stesso Cartesio si rese conto di questa difficoltà e cercò di trovare una spiegazione, senza molto successo.

A questo punto non restava che accettare un atto di fede (mente e corpo interagiscono, pur essendo distinti, in virtù di un processo misterioso e inspiegabile) o risolvere il dualismo in un senso o nell'altro. Alcuni filosofi scelsero di negare (in vari modi) l'esistenza autonoma (o l'attingibilità) della realtà, dando vita alla tradizione filosofica che prende il nome di idealismo. Altri pensatori invece, cercarono di elaborare una teoria della mente che fosse compatibile con le leggi della realtà materiale. Non ci soffermiamo sull'evoluzione di questa complessa vicenda intellettuale, durata oltre quattrocento anni. Tuttavia su una cosa ci preme attirare l'attenzione: una delle idee ricorrenti in molti pensatori della tradizione meccanicista è che il pensiero (per la precisione il ragionamento, ma ai nostri fini non fa differenza) sia in ultima analisi una forma di calcolo che la mente effettua manipolando qualche tipo di simboli, o idee.

Questa idea (espressa in una forma assai semplificata) pur non essendo immune da problemi teorici, ha attraversato la tradizione culturale occidentale fino alla metà del secolo scorso, quando si è incontrata con la nascente scienza dei calcolatori. Un incontro decisivo: i computer infatti dimostravano che una macchina materiale era in grado di effettuare calcoli, anche molto complessi, senza fare appello a nessuna sostanza o influenza misteriosa o spirituale. Si può dunque chiudere questa parentesi filosofica e ritornare all'argomento iniziale.

Si è detto che quando si attribuisce intelligenza ad un computer che esegue un comune programma, in realtà si è in preda ad un abbaglio. Ma se fosse corretto identificare il pensiero con una qualche forma di calcolo, non vi sarebbe alcuna ragione di principio che impedirebbe di sviluppare programmi tanto complessi e potenti da dotare veramente la macchina di un comportamento "intelligente". Anzi ci si potrebbe anche spingerci oltre: non esiste nessuna ragione di principio per cui un computer non possa avere una mente intelligente in tutto e per tutto uguale a quella di un essere umano. Per conseguire tale obiettivo "basterebbe", per così dire, capire che genere di calcoli sono alla base della mente umana, e trasformarli in programmi per un computer. A partire dagli anni '50, con l'emergere della nuova disciplina chiamata Intelligenza Artificiale, alcuni scienziati e ricercatori si sono posti esattamente questo obiettivo.

## 1.2 Cosa è l'Intelligenza Artificiale

Prima di procedere nella trattazione è opportuno fissare (nei limiti del possibile) alcuni termini di base. Si comincia proprio con “Intelligenza Artificiale”. Di norma questo termine (che viene comunemente contratto nell'acronimo “I.A.”) viene utilizzato per designare una disciplina scientifica (talvolta considerata una branca della più generale scienza dei calcolatori) il cui obiettivo può essere definito *l'indagine sui meccanismi soggiacenti alle facoltà cognitive degli esseri umani* (come il linguaggio, il ragionamento, la capacità di risolvere problemi, la percezione) e la loro riproduzione mediante computer opportunamente programmati (in realtà la limitazione allo studio delle facoltà cognitive degli esseri umani non è condivisa da tutti i ricercatori di questa area. Sono anzi sempre più numerosi gli studiosi che si occupano di studiare le facoltà cognitive di varie specie animali). Il primo ad usare l'espressione “artificial intelligence” per indicare questo genere di ricerche è stato John McCarty, durante uno storico convegno che si tenne nella città statunitense di Dartmouth nel 1956. Non di rado lo stesso termine viene usato per indicare la capacità di un computer o di un programma di eseguire compiti intelligenti, o per qualificare un programma dotato di tali capacità (ed esempio nell'espressione “programma di intelligenza artificiale”). Con il passare degli anni la disciplina designata come “intelligenza artificiale” ha subito una divisione in due aree, che si distinguono in relazione al senso del termine “riproduzione” che è stato usato nella precedente definizione.

La prima area è la cosiddetta “intelligenza artificiale forte”, la quale ritiene che un computer opportunamente programmato possa veramente essere dotato di una genuina intelligenza, non distinguibile in nessun senso importante dall'intelligenza umana. Alla base di questa concezione vi è la teoria che anche la mente umana sia il prodotto di un complesso insieme di procedimenti di calcolo, eseguiti dal cervello. Resta naturalmente da stabilire rispetto a quale livello di descrizione cervelli e computer possano essere considerati la stessa cosa (escludendo, almeno per ora, il livello dell'hardware); nondimeno i sostenitori dell'I.A. forte sono convinti che un tale livello debba esistere. Questa area dell'I.A. è l'erede diretta della tradizione filosofica cui si accennava nella premessa.

La seconda area, per contro, viene chiamata “intelligenza artificiale debole”. Essa sostiene che un computer opportunamente programmato possa solamente simulare i processi cognitivi umani (o alcuni di essi), nello stesso senso in cui un computer può simulare il comportamento di un evento atmosferico, o di una fissione nucleare (nessuno direbbe che un computer che simula una tempesta è una tempesta). In questo caso dunque l'accento viene posto su ciò che un programma è in grado di fare, senza fare assunzioni sul fatto che il modo in cui lo fa coincida ad un qualche livello con i processi mentali umani. E d'altra parte non si pretende che un programma, per quanto complesso ed efficiente, possa veramente dirsi un esempio di “mente”. Ovviamente i sostenitori di questa forma di I.A. sono interessati anche alle molte applicazioni pratiche delle tecnologie che vengono sviluppate nella loro disciplina.

Le due declinazioni dell'intelligenza artificiale, pur differenziandosi profondamente rispetto agli assunti filosofici di base e alle finalità, condividono metodologie, strumentazioni e tecnologie. In particolare entrambe sostengono che per riprodurre e/o simulare un comportamento intelligente al computer sia necessario elaborare

informazione (rappresentata da simboli discreti) mediante un programma . In questo senso esse costituiscono quella che viene chiamata “intelligenza artificiale classica”.

Ad essa si oppone una nuova disciplina, chiamata connessionismo, la quale sostiene che per riprodurre o simulare il comportamento intelligente sia necessario replicare, tramite un elaboratore, il funzionamento del cervello umano a livello cellulare. In tal modo si replica il funzionamento dei singoli neuroni e si simulano le connessioni che trasmettono le informazioni fra un neurone e l'altro. Le applicazioni reali di questa tecnologia hanno dato origine alle reti neurali: sistemi in grado di evolversi e di apprendere in base agli stimoli a cui vengono sottoposti .

Vale la pena, infine, accennare ad un'altra disciplina: la scienza cognitiva. Si tratta di una area di studi che si è venuta costituendo negli ultimi venti o trenta anni grazie alla convergenza di esponenti di varie discipline (intelligenza artificiale, linguistica, filosofia del linguaggio e delle mente, psicologia cognitiva, neuroscienze), e il cui oggetto è lo studio dei sistemi intelligenti, naturali o artificiali che siano. In un certo senso la scienza cognitiva rappresenta l'erede della I.A. forte, soprattutto per la concezione che i sistemi intelligenti (qualunque essi siano) siano fundamentalmente sistemi di elaborazione dell'informazione che interagiscono con un ambiente complesso. D'altra parte la compresenza di diverse tradizioni disciplinari ha fatto sì che in questa nuova area si riconoscessero anche molti studiosi fortemente critici verso i fondamenti dell'I.A..

### **1.3 I fondamenti teorici dell'Intelligenza Artificiale**

La prima formulazione esplicita del fondamento teorico dell'intelligenza artificiale si può forse rintracciare nel filosofo inglese Thomas Hobbes (vissuto nel 600), che nel suo libro più famoso, scrisse: “Ragionare non è nient'altro che calcolare”. Con questa affermazione Hobbes intendeva dire che il ragionamento è una specie di operazione interna condotta mediante la manipolazione di quelle che egli stesso chiamò “particelle mentali”. Questa manipolazione, per Hobbes, era molto simile alle operazioni che si effettuavano quando si calcolavano numeri mediante un abaco. Si trattava, insomma di una serie di spostamenti delle particelle mentali eseguiti in base a regole ben precise. Le particelle mentali, infatti, erano concepite da Hobbes come dei minuscoli corpi fisici. Ma, a differenza delle palline di un abaco, non si limitavano a rappresentare numeri: potevano rappresentare molte altre cose.

Da questa semplice osservazione si possono enucleare i fondamenti teorici che sono alla base della moderna I.A.:

- l'idea che il ragionamento, e in generale ogni tipo di attività della mente, sia un calcolo;
- il concetto di simbolo o rappresentazione;
- il concetto di calcolo inteso come manipolazione di simboli in base a regole;
- l'idea (implicita in Hobbes) che possa esistere qualcosa come un manipolatore automatico di simboli.

Se ci si pensa, alcuni dei concetti che compaiono in queste proposizioni teoriche fanno parte del bagaglio di concetti del senso comune: calcolo, rappresentazione o simbolo sono parole che si usano abitualmente. Tuttavia in questo contesto essi assumono dei

sensi ben precisi, che non sono coincidenti con l'uso comune. Varrà dunque la pena soffermarsi su di essi per considerarli sotto una nuova luce.

### ***1.3.1 Il concetto di rappresentazione e di simbolo***

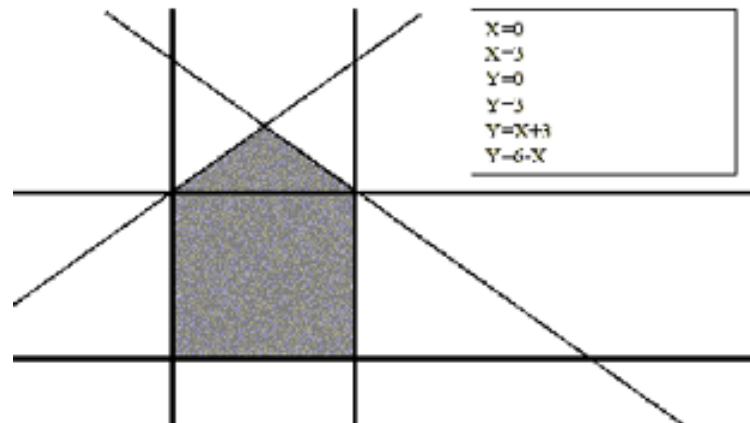
Si comincia con l'analisi del concetto importantissimo di "rappresentazione". Intuitivamente, tutti sono in grado di indicare esempi di rappresentazione:

- un quadro è una rappresentazione;
- una foto è una rappresentazione;
- una cartina stradale è una rappresentazione.

Che cosa hanno in comune questi esempi? Il fatto di essere delle cose che mostrano (in vario modo) altre cose, persone o luoghi. Un ritratto, ad esempio, mostra l'aspetto di una persona. Una cartina stradale, invece, mostra la disposizione delle strade in una città o in una porzione di territorio. Generalizzando si può dire che *una rappresentazione è un oggetto che sta per, o raffigura un altro oggetto*. Una proprietà interessante delle rappresentazioni è che esse non sono delle copie esatte dei loro oggetti. Tornando agli esempi fatti, un ritratto rappresenta l'aspetto di una persona, ma non il suo tono di voce, la morbidezza della pelle, o il profumo dei capelli, per non parlare del suo carattere. Una rappresentazione dunque è sempre il prodotto di un processo di selezione tra le molte (infinite) caratteristiche dell'oggetto da raffigurare, ovvero di un processo di *astrazione*.

Le rappresentazioni si dividono in due classi in base al rapporto che esiste tra oggetto rappresentante e oggetto rappresentato. In alcuni casi, come per le foto, esiste una relazione fisica che determina il modo in cui l'oggetto viene rappresentato. La luce emessa dall'oggetto, ad esempio una casa, impressiona la pellicola imprimendovi sopra l'immagine. In altri casi, come per il disegno, è il rappresentante che sceglie come rappresentare la casa, usando delle linee verticali, orizzontali o oblique. Tuttavia tanto il disegno quanto la fotografia mantengono un rapporto di somiglianza o *analogia* con il loro oggetto. Questo tipo di rappresentazioni sono appunto definite *analogiche*.

Ora, si prenda il disegno di una casetta, uno di quelli fatti dai bambini. Se si analizza il disegno ci si accorge che la sua forma può essere descritta come un quadrato a cui viene sovrapposto un triangolo. Chiaramente si ha ancora a che fare con qualcosa che assomiglia vagamente alla casa reale. Tuttavia arrivati a questo punto si può fare un vero e proprio salto nel processo di astrazione. Infatti grazie alla geometria analitica le figure geometriche sul piano possono essere rappresentate mediante insiemi di equazioni.



**Figura 1.1:** La rappresentazione di una casa mediante equazioni

E quando si considerano queste equazioni, costruite utilizzando i simboli algebrici e matematici, ci si trova di fronte ad una rappresentazione della casa che fisicamente non ha nulla a che fare con la casa stessa, ma che in qualche modo continua a raffigurare alcune sue caratteristiche. Questo tipo di rappresentazioni sono denominate *analitiche*.

La rappresentazione della casa fatta mediante formule matematiche ha alcune interessanti caratteristiche. In primo luogo essa si basa su un insieme di segni ben definiti e distinti, cioè discreti (i segni dell'algebra lineare): si possono indicare questi segni con il termine di simboli e si può dire che si ha una rappresentazione simbolica della casa. In secondo luogo questi simboli non hanno nulla a che fare con ciò che rappresentano: il fatto che siano usati per rappresentare una certa figura geometrica, che assomiglia a una casa, è frutto delle convenzioni e stipulazioni del sistema algebrico che si utilizza, ed è da questo punto di vista arbitrario. Infine, si nota facilmente che questi stessi simboli possono essere usati per rappresentare altri oggetti: ad esempio una scatola o un televisore. Basta che ci si mette d'accordo prima su che cosa si vuole rappresentare, e sul significato dei simboli utilizzati.

Pensandoci bene, anche le parole di una lingua possono essere considerate rappresentazioni simboliche in questo senso. Se si prende una parola, ad esempio "gatto", si vede che è composta da una sequenza di elementi distinti chiaramente l'uno dall'altro: i singoli caratteri dell'alfabeto. (In realtà l'esempio si riferisce alle parole scritte della lingua). A essere precisi dunque ci si trova in presenza di un duplice livello di rappresentazione: il primo è quello della scrittura che rappresenta la lingua parlata, ed il secondo quello della lingua che rappresenta oggetti o situazioni del mondo. Si può dire che si tratta di un simbolo composto. Questo simbolo viene usato per parlare e scrivere sui gatti e ci si capisce perfettamente. Ma la parola "gatto", per quanto, non mostra alcuna somiglianza con alcun gatto reale. Come i simboli matematici, anche i simboli della lingua rappresentano ciò che rappresentano in virtù di una convenzione.

### ***1.3.2 Il calcolo come manipolazione di simboli e i sistemi formali***



Si torni a considerare la rappresentazione di una casa per mezzo di equazioni lineari. Grazie alle regole dell'algebra si possono usare queste equazioni per calcolare ad esempio l'altezza della casa o la sua superficie. O meglio, per calcolare l'altezza o la superficie delle figure geometriche che rappresentano la casa. Ma che cosa si fa quando si effettuano questi calcoli? Di norma si scrivono su un pezzo di carta delle formule iniziali (le equazioni), poi si comincia a riscriverle trasformando i simboli che le compongono in base a regole ben precise. Che tipo di trasformazioni si applicano? Si sposta un simbolo da una parte ad un'altra della formula; si introducono nuovi simboli o si cancellano simboli esistenti. Tutto questo finché si arriva a scrivere una formula che costituisce il risultato dei calcoli. Quando si calcola dunque non si fa altro che manipolare, nel senso visto, simboli (eventualmente raccolti in formule) in base a regole esplicite. A ben vedere, si potrebbe anche non sapere niente dell'algebra, della risoluzione delle equazioni o dei sistemi di equazioni: basterebbe disporre di un manuale che dicesse che tipo di trasformazioni si possono applicare in una determinata situazione, e si sarebbe in grado di calcolare.

Questo modo di considerare il calcolo, che potrebbe sembrare piuttosto limitativo, si dimostra invece una estensione notevole della nozione di calcolo del senso comune. Essa infatti consente di far rientrare nel dominio dei calcoli una serie di fenomeni che normalmente non vengono considerati tali. Per capire che cosa si intende con questa affermazione si prenda, ad esempio, un gioco banale come il tris. Nel tris due giocatori scrivono a turno uno dei due simboli (di norma una crocetta e un cerchio) su una scacchiera composta da nove caselle. Per ogni turno di gioco ciascun giocatore può scrivere il suo simbolo in una qualunque delle caselle, purché sia libera. Lo scopo del gioco è allineare tre simboli eguali sulla scacchiera in verticale, orizzontale o diagonale; in alternativa il gioco finisce quando tutte le caselle sono state riempite. Se si analizza questo gioco si vede che si hanno:

- due simboli che si distinguono per la loro forma;
- una posizione iniziale del gioco: in questo caso, la scacchiera vuota;
- una regola precisa che dice per ogni singolo turno del gioco quali sono le mosse consentite; la regola è semplicissima: è possibile scrivere il proprio simbolo su ogni casella che non sia occupata;
- un insieme di posizioni finali che dicono quand'è che una partita finisce, e chi ha vinto.

Giocare un gioco come il tris, dunque, corrisponde ad effettuare un processo di calcolo nel senso visto sopra.

L'esempio fatto è piuttosto banale, ma permette di capire in che senso la nozione di calcolo, intesa come manipolazione di simboli in base a regole, è una nozione molto vasta. Essa infatti descrive il funzionamento di tutti quei sistemi che operano in base ad un insieme (finito) di elementi di base formalmente distinti e ad un insieme (finito) di regole che specificano le possibili trasformazioni di quei simboli. I sistemi di questo tipo sono denominati sistemi formali. Un'altra conseguenza che si può trarre dall'esempio è che i sistemi formali (tra cui il tris) per funzionare non dipendono da nessuna caratteristica del mezzo con cui sono costruiti.

La classe dei sistemi formali è molto vasta. Giochi come la dama, gli scacchi, i giochi di carte, sono sistemi formali. Ma anche l'aritmetica e la logica sono sistemi formali.

Secondo i teorici dell'intelligenza artificiale, infine, anche il pensiero può essere descritto come un sistema formale.

### ***1.3.3 La macchina e il test di Turing***

Se si osserva il sistema formale presentato nel paragrafo precedente, si nota che il suo funzionamento è completamente determinato dalla forma dei simboli e dalle regole di manipolazione. Non bisogna sapere nient'altro per farlo funzionare; soprattutto, non è richiesto nessun intervento creativo o intelligente. Questo vale per tutti i sistemi formali, per quanto complessi e articolati essi possano essere. Ma allora, nulla vieta di costruire una macchina che sia in grado di funzionare come un sistema formale.

Le caratteristiche di una macchina in grado di eseguire questo genere di compiti sono state definite in modo rigoroso dal logico e matematico Alan Turing in un saggio pubblicato nel 1936. L'obiettivo di Turing quando scrisse questo saggio era quello di risolvere alcuni complicati problemi logici che erano di grande interesse a quei tempi. Ma l'interesse di questo breve scritto non consiste solo in questo. Ciò che veramente è interessante è il metodo utilizzato da Turing. In tale metodo, infatti, troviamo per la prima volta molte delle idee alla base della moderna scienza dei calcolatori da un lato e della intelligenza artificiale dall'altro. Nel suo saggio infatti, Turing immagina una specie di macchina teorica, molto semplice, che facendo delle banali operazioni doveva essere in grado di compiere qualunque tipo di calcolo, di qualsiasi genere. Oggi questa macchina viene comunemente denominata macchina di Turing.

Una macchina di Turing è costituita da un dispositivo, una specie di testina, che può scrivere e leggere simboli, ad esempio 0 e 1, su un nastro. Il nastro è diviso in celle, ognuna delle quali contiene un solo simbolo, e può avere una lunghezza potenzialmente infinita<sup>1</sup>. La testina, oltre a scrivere, può spostarsi a destra o a sinistra, una cella alla volta. Inoltre può assumere un certo numero di stati interni distinti.

Il funzionamento della macchina avviene per passi successivi. Il suo comportamento ad ogni passo è determinato da regole, che tengono conto del simbolo che la testina legge sul nastro e del suo stato interno.

Ad esempio: se la testina legge il simbolo 0 e si trova nello stato A, la regola potrà dirle di scrivere 1 al posto dello 0 e di spostarsi a destra, passando allo stato B. Specificando opportunamente una serie di regole come questa, la macchina di Turing è in grado di calcolare moltissime cose. Di più: è in grado di svolgere tutti i calcoli che si possono eseguire con altri metodi. Ma non basta: non c'è alcuna ragione per cui i simboli di una Macchina di Turing debbano rappresentare numeri. Anzi, di per sé un simbolo può rappresentare qualsiasi cosa. E se esistono delle regole che dicono come manipolare tali simboli in modo sensato, ebbene, una macchina di Turing può farlo.

In effetti si può dimostrare che una macchina di Turing, dotata delle opportune istruzioni, è in grado di simulare il funzionamento di qualsiasi sistema formale. Anzi, la classe dei sistemi formali corrisponde esattamente alla classe delle funzioni che una

---

<sup>1</sup> Il potere di una macchina di Turing sta nella capacità di immagazzinamento del suo nastro. Supponendolo infinito, teoricamente l'output di una tal macchina sarebbe anch'esso infinito.

macchina di Turing può calcolare. Inoltre, anche tutti i moderni calcolatori digitali sono equivalenti a una macchina di Turing, nel senso che un computer può fare tutto quello che una macchina di Turing può fare. Di conseguenza si può dire che un

computer digitale è in grado di far funzionare (o di funzionare come) qualsiasi sistema formale.

Non ci si sofferma ulteriormente su queste considerazioni, poiché si tratta di argomenti di notevole complessità che richiederebbero una competenza specialistica, ma quanto detto è sufficiente per tornare al discorso sui fondamenti dell'intelligenza artificiale.

Infatti, se si ipotizza che i processi che avvengono nella testa quando si pensa, ragiona, parla e comprende possono essere descritti come sistemi formali, si potrebbe concludere che anche il cervello è una specie di macchina equivalente a una macchina di Turing e, di riflesso, a un computer digitale. Questo non vuol dire che nel cervello ci deve essere una testina che scrive simboli su un nastro infinito, o una CPU. Si sta soltanto dicendo che, se si parte da questa prospettiva, le operazioni che avvengono nel cervello quando si pensa sono manipolazioni di simboli, fisicamente rappresentati, secondo regole; detto in altri termini, sono una specie di programmi (i simboli mentali, naturalmente, sarebbero diversi da quelli usati dai computer, ma per quel che concerne la loro utilizzazione nell'ambito dei processi di calcolo ciò che conta è solo la loro forma. Si è visto infatti che il mezzo con cui viene costruito un sistema formale non ha alcuna influenza sul suo funzionamento).

Questa teoria sulla natura del pensiero viene comunemente indicata come teoria rappresentazionale della mente, e costituisce uno dei fondamenti teorici di molta parte dell'intelligenza artificiale. Infatti, se la suddetta teoria è vera, il problema di riprodurre su un computer digitale le capacità cognitive degli esseri umani si "ridurrebbe" a quello di trovare le regole con cui il cervello elabora i simboli mentali, e trasformarle in programmi.

Alan Turing è inoltre l'autore di un test che è universalmente conosciuto come l'unico in grado di stabilire se una macchina è in grado di pensare o meno: viene infatti definita intelligente una macchina che riesce a superare il *test di Turing*. Si suppone di sottoporre un uomo e una donna a una serie di domande da parte di un interrogante che non ha contatti fisici con essi, per esempio attraverso una telescrivente o un computer. Questo vincolo è ovviamente dettato dalla necessità di evitare che l'aspetto, la voce, o persino la calligrafia dei candidati possano influenzare il giudizio. L'interrogante, in base alle risposte dei candidati che tenteranno di confonderlo, deve scoprire chi è l'uomo e chi è la donna. Se si sostituisce uno dei due candidati con una macchina e l'interrogante non riesce a distinguere l'essere umano dalla macchina, allora si può asserire che la macchina è intelligente. Esso è cioè un test per l'intelligenza. A dire il vero questa convinzione è stata sottoposta a diverse critiche. Ad esempio, quando nella metà degli anni '60 una grande quantità di persone furono tratte in inganno da un semplice programma, noto come Eliza, in grado di sostenere brevi e banali conversazioni in inglese, molti ritennero che si fosse confutata l'adeguatezza del test. Tuttavia ancora oggi la maggior parte degli studiosi di intelligenza artificiale è incline a credere che il superamento del test di Turing, opportunamente condotto, costituisca, se non una prova definitiva, almeno un forte indizio dell'intelligenza di un computer.

## 1.4 I programmi di Intelligenza Artificiale

Tra i molti programmi sviluppati nell'ambito dell'intelligenza artificiale, quello che ha goduto della massima notorietà è senza dubbio Eliza, realizzato nel 1964 da Joseph Weizenbaum, a quei tempi giovane ricercatore del MIT. Si trattava di un programma, piuttosto semplice, che simulava una limitata competenza linguistica in inglese, ma che non aveva alcuna pretesa di comprendere realmente il linguaggio. Per semplificare il suo compito Weizenbaum aveva pensato di circoscrivere notevolmente l'ambito di argomenti su cui di volta in volta il suo programma era in grado di conversare.

Siccome ogni conversazione deve avere un argomento, il programma era organizzato su due piani: il primo conteneva l'analizzatore del linguaggio, il secondo un copione. In questo modo, Eliza poteva essere messo in grado di sostenere una conversazione su come si cucinano le uova, o sulla gestione di un conto corrente bancario e così via. Ogni particolare copione permetteva a Eliza di assumere un ruolo diverso nella conversazione. Il primo copione che Weizenbaum diede ad Eliza fu quello per recitare la parte di uno psicoterapeuta di scuola rogersiana. Gli psicoterapeuti di questa scuola durante una seduta cercano di intervenire il meno possibile e, quando lo fanno, spesso si limitano a ripetere le affermazioni del paziente in forma di domanda. Si trattava dunque di un comportamento linguistico abbastanza semplice da simulare.

Una volta terminato il programma, Weizenbaum lo installò su un computer del suo istituto, e iniziò a farlo provare da varie persone, tra cui la sua stessa segretaria.

Con grande stupore di Weizenbaum, Eliza ebbe un enorme successo. La gente che conversava con lui credeva veramente di avere a che fare con uno psicoterapeuta e provava persino sollievo dopo le sedute. Uno psichiatra, Kenneth Colby, scrisse persino che di lì a pochi anni programmi come Eliza sarebbero stati pronti per l'uso clinico. Lo stesso Colby poco dopo realizzò un programma non dissimile da Eliza, che battezzò Parry. Parry simulava il comportamento linguistico di un paranoico. E anche lui ebbe un buon successo, tanto da riuscire ad ingannare molti psichiatri che, dopo averlo intervistato via telescrivente, si dissero convinti di avere avuto a che fare con un vero paranoico. Ad un certo punto fu organizzata persino una seduta di Parry da Eliza.

Sembrava dunque che questi due programmi avessero superato il test di Turing. In realtà né Eliza né Parry erano dotati della sia pur minima intelligenza. Si trattava in entrambi i casi di un insieme di trucchi di programmazione (ad esempio Eliza nella maggior parte dei casi prende le affermazioni del paziente e le rovescia in forma di domanda cambiando semplicemente i pronomi, cosa che in inglese, peraltro, è piuttosto semplice) che facevano affidamento sulla credulità dei loro interlocutori. E a ben vedere nessuno dei due programmi avrebbe mai superato il test nella forma in cui Turing lo aveva immaginato. Le persone che credettero veramente nelle capacità di Eliza infatti, non prestavano attenzione a ciò che il programma diceva loro, ma erano piuttosto intenti a sfogarsi. E inoltre l'ambito della conversazione era tanto ristretto da non essere valido per il test.

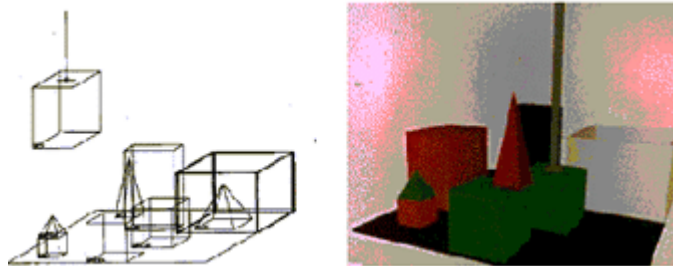
#### ***1.4.1 L'analisi del linguaggio naturale nell'Intelligenza Artificiale***

Uno dei limiti caratteristici nel modo di procedere formale del computer è quello che la macchina ignora il significato dei simboli che va manipolando. E' la distinzione

esistente fra un procedimento sintattico, formato da proposizioni indecidibili, come possono essere le proprietà aritmetiche, ed uno semantico, ovvero connesso al significato di ciò che viene elaborato.

Il primo programma dotato di un modulo per la comprensione semantica del linguaggio umano fu *SHRDLU* sviluppato da T. Winograd fra il 1968 e il 1970. Composto da un analizzatore sintattico, da un modulo semantico e da un risolutore di problemi, SHRDLU era in grado di comprendere il linguaggio naturale e di spostare a piacimento, tramite un braccio articolato, un gruppo di oggetti geometrici diversi per forma, misura e colore. La procedura di risposta ai comandi impartiti prevedeva una prima fase di riconoscimento della plausibilità sintattica della frase.

Quindi il computer passava all'interpretazione semantica ed infine alla fase operativa di constatazione circa l'effettiva esistenza degli oggetti e la possibilità di eseguire i movimenti indicati dall'operatore. SHRDLU, insomma, sperimentava la percezione del mondo esterno con rappresentazioni proprie di oggetti fisici.



**Figura 1.2:** Due raffigurazioni del mondo dei blocchi di SHRDLU

Sulla comprensione e la formulazione del linguaggio naturale furono iniziati a Yale da Roger Schank, alla fine degli anni '60, studi particolari che portarono al programma "Margie", proposto nel 1975 dallo stesso Schank. Il sistema, formato da tre moduli (un segmentatore di linguaggio, un modulo memorizzatore e di inferenza e un generatore di linguaggio) si basava su un modello di rappresentazione semantica chiamato dall'autore *dipendenza concettuale*. Sempre dalla scuola di Yale furono sviluppati altri programmi, come "Eli", scritto al fine di perfezionare la fase di segmentazione del linguaggio naturale, e "Babel", scritto per generare testi. I più recenti programmi elaborati a Yale, considerati come la terza generazione dei programmi di Intelligenza Artificiale, sono finalizzati come nel caso di "Sam" alla comprensione testuale, ad esempio di pezzi giornalistici, oppure, come nel caso di "Pam", sono in grado di perfezionare l'informazione aggiungendovi significati non esplicitati nel testo in esame.

Le ricerche sull'elaborazione del linguaggio naturale (natural language processing) costituiscono uno dei settori di punta dell'intelligenza artificiale e sono oggetto di una ulteriore disciplina che si chiama *linguistica computazionale*.

### **1.4.2 I sistemi esperti**

Una delle più importanti applicazioni dell'intelligenza artificiale soprattutto a livello commerciale è rappresentata dalla creazione dei *sistemi esperti*. In estrema sintesi, si

intende per sistema esperto un programma che è in grado di risolvere problemi complessi che rientrano in un particolare dominio, con una efficienza paragonabile a quella di uno specialista umano di quel settore. Ad esempio, un sistema esperto potrebbe essere capace di fare diagnosi mediche esaminando le cartelle cliniche (opportunamente formalizzate) di un paziente; o potrebbe valutare tutti i fattori di rischio e le prospettive di guadagno di un determinato investimento finanziario.

Di norma tutti i sistemi esperti hanno i seguenti componenti:

- una base di conoscenza specialistica su un determinato dominio, che rappresenta il sapere necessario ad affrontare e risolvere problemi in quel campo. Ovviamente la base di conoscenza dovrà essere opportunamente rappresentata nella memoria del calcolatore mediante dei formalismi;
- un motore inferenziale che sia in grado di dedurre (o inferire), a partire dalla base di conoscenza, le conclusioni che costituiscono la soluzione a un dato problema che rientra nel dominio. Il motore inferenziale, che è il vero cuore del programma, funziona applicando alla base di conoscenze una serie di procedure euristiche simili a quelle sviluppate nell'ambito del problem solving. Tuttavia nella maggior parte dei casi alle euristiche generali si affiancano delle euristiche specifiche per l'argomento di cui il sistema si occupa. Infatti in ogni campo specialistico un esperto umano è in grado di escludere immediatamente e senza valutarle una serie di opzioni che sono manifestamente improduttive;
- una interfaccia utente che è costituita da un insieme di moduli informatici grazie ai quali un essere umano è in grado di interagire con il programma ponendo domande e leggendo le risposte. In alcuni casi l'interfaccia utente può anche prevedere dei moduli di aggiornamento della conoscenza, che consentono agli utenti di aggiungere nuovi elementi alla base dati originale.

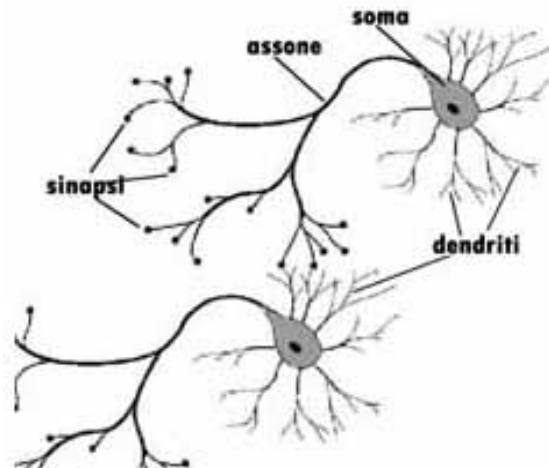
Il primo sistema esperto ad essere realizzato è stato DENDRAL, sviluppato nel 1965 e in grado di analizzare la struttura chimica delle molecole organiche. Ma il vero punto di svolta nella storia di questi programmi è rappresentato dalla creazione di MYCIN, che risale al 1972. MYCIN è un sistema specializzato nella diagnosi di malattie infettive, ed è sorprendentemente abile. Per lavorare fa ricorso ad una base di conoscenza molto dettagliata sulla sintomatologia di tutte le sindromi infettive conosciute, che confronta con la cartella clinica e con dati sulla storia clinica del singolo paziente sotto esame. Le tecniche impiegate per realizzare MYCIN (che ha avuto un grande successo commerciale ed è tuttora utilizzato in moltissimi ospedali, soprattutto in ambito statunitense) hanno dato origine ad una vera e propria famiglia di sistemi esperti: CASNET ad esempio è un sistema esperto per la diagnosi del glaucoma; PUFF si occupa delle malattie polmonari (le sue diagnosi si sono rivelate giuste nel 95% dei casi); un altro medico artificiale, questa volta generico, è CADUCEUS; PROSPECTOR, invece è un sistema esperto in grado di individuare la posizione di possibili giacimenti minerari sulla base di dati geologici, ed è riuscito ad individuare miniere e giacimenti per un valore di miliardi di dollari. Oltre che nell'ambito medico e in quello industriale, questo genere di programmi si è rivelato molto utile anche nel campo dell'insegnamento e della didattica.

Insomma i sistemi esperti costituiscono nel loro insieme una delle applicazioni pratiche più interessanti dell'intelligenza artificiale. Tuttavia, in un certo senso, il successo di queste applicazioni rappresenta una misura delle difficoltà incontrate

dall'intelligenza artificiale in senso forte. Un sistema esperto infatti, pur essendo molto abile nel suo campo, non sarebbe mai in grado di applicare la sua abilità ad altri domini: il suo è una specie di micromondo, solo un po' più ricco di quello in cui operava SHRDLU. E soprattutto un sistema, per quanto possa essere esperto in medicina o geologia, non riuscirebbe mai a trovare la soluzione ad un qualsiasi banale problema quotidiano che ciascun essere umano risolverebbe con il solo buon senso.

### 1.4.3 Le reti neurali

Le ricerche di impostazione connessionista hanno cercato di emulare il comportamento delle cellule neuronali facendo ricorso alle cosiddette *reti neurali*: una rete neurale è una struttura formata da un certo numero di unità collegate tra loro da connessioni. Attraverso le connessioni un'unità influenza fisicamente le altre unità con cui è collegata. Le singole unità hanno alcune caratteristiche essenziali delle cellule nervose, i neuroni del sistema nervoso reale, mentre le connessioni alcune delle caratteristiche essenziali dei collegamenti sinaptici tra neuroni.

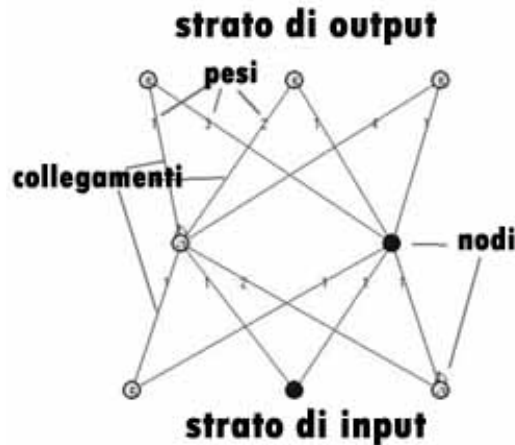


**Figura 1.3:** Rappresentazione schematica del neurone

Una rete neurale è costituita da un insieme di nodi collegati. Per ogni nodo vi sono dei collegamenti di input (da cui arrivano segnali) e dei collegamenti di output (attraverso cui la rete emette segnali). I nodi possono assumere due stati: stato di riposo e stato di attivazione. Quando un nodo è in stato di attivazione esso invia dei segnali ai nodi con cui è collegato. I collegamenti tra i nodi di una rete neurale sono di due tipi: collegamenti eccitatori e collegamenti inibitori. Ogni collegamento tra un nodo della rete e un altro, inoltre, è dotato di un peso che assegna diversi valori ai segnali che li attraversano. Ogni nodo diventa attivo e dunque manda un segnale ai nodi ad esso connessi solo se i messaggi che gli arrivano (nel computo tra segnali inibitori e segnali eccitatori) lo portano oltre una certa soglia di attivazione (misurata mediante una scala numerica).

Visto nel suo complesso, il comportamento di una rete neurale può essere descritto come un processo in cui, una volta fornita in ingresso alla rete una configurazione di

segnali-stimolo (mediante l'attivazione di alcuni suoi nodi, detti nodi in input), la rete rilancia in uscita un'altra configurazione di segnali.



**Figura 1.4:** Lo schema di una semplice rete neurale

Dal punto di vista della implementazione, una rete neurale può essere simulata interamente “via software” mediante un normale calcolatore digitale; oppure può essere realizzata direttamente a livello hardware, mediante la connessione di molti semplici microprocessori in grado di lavorare in parallelo. Quali proprietà hanno le reti neurali che le rendono, oltre che un modello (a dire il vero ancora “alla lontana”) del cervello, un possibile modello dei comportamenti intelligenti?

Una prima proprietà interessante è che le reti neurali, a differenza dei computer digitali, funzionano in *modalità parallela*, nel senso che in ogni istante molti nodi cambiano il loro stato simultaneamente. Questo tipo di elaborazione sembra essere molto più aderente al funzionamento reale del cervello rispetto al modello di elaborazione sequenziale proprio della macchina di Turing. Ma la proprietà più interessante delle reti neurali è la loro capacità di apprendimento: esse cioè possono imparare a svolgere dei compiti senza bisogno di essere programmate esplicitamente.

Il processo di apprendimento avviene in questo modo: per un dato periodo di tempo vengono forniti alla rete una serie di stimoli in entrata e i corrispondenti stimoli in uscita che essa dovrebbe generare. Ad esempio, in entrata vengono fornite le rappresentazioni in formato bitmap dei caratteri di un certo sistema di scrittura, e in uscita le corrispondenti posizioni della tavola ASCII. Durante questo periodo nella rete vengono modificati i pesi assegnati ai collegamenti tra nodi. Superata una certa soglia di autorganizzazione interna la rete è in grado di riconoscere da sola le configurazioni di input: essa ha cioè imparato a riconoscere i caratteri della scrittura.

Un'altro aspetto estremamente interessante delle reti neurali (soprattutto in relazione al discorso sui fondamenti dell'intelligenza artificiale classica e sulla teoria rappresentazionale della mente) è che in esse la conoscenza necessaria a svolgere un dato compito non è rappresentata da simboli distinti che vengono trasformati in base a regole, ma è diffusa tra tutti i nodi della rete che concorrono ad elaborarla. In altri



termini, la conoscenza insita in una rete neurale e la sua elaborazione sono *subsimboliche*.

Anche da questa breve trattazione, appaiono evidenti le ragioni in virtù delle quali si afferma che il connessionismo rappresenti un paradigma teorico radicalmente diverso dalla teoria *computazionale* classica: esso in primo luogo sostiene che per ottenere un comportamento intelligente è necessario emulare la struttura fisica (cellulare per la precisione) del cervello; ma soprattutto sostiene che i processi cognitivi e, *inter alia*, il pensiero, non sono il prodotto di processi computazionali simbolici, ma emergono dal comportamento complessivo di moltissime unità *subsimboliche* che, prese singolarmente, non rappresentano niente.

Sulla base di questo paradigma, sono state realizzate numerose applicazioni delle reti neurali in vari domini: per esempio nella simulazione dei comportamenti elementari di specie inferiori, spesso associata alla costruzione di robot reali. In questo settore specifico il primo esperimento importante è stato il *Perceptron* (1958) che era un robot in grado di muoversi in un ambiente evitando gli ostacoli. Un altro settore in cui il paradigma connessionista ha avuto larga diffusione è quello dello studio e della emulazione dei processi soggiacenti alla percezione, ambito nel quale l'impostazione computazionale classica ha mostrato notevoli limiti. E non sono mancate anche le applicazioni pratiche, soprattutto nel campo dei software per il riconoscimento dei caratteri (OCR).

#### ***1.4.4 Artificial Life***

Un'evoluzione negli studi sull'I.A. è rappresentata dall'A.L., acronimo di *Artificial Life*, cioè Vita Artificiale. Il suo obiettivo è simulare il comportamento di organismi ed ecosistemi reali attraverso il computer. La data ufficiale di nascita di questa disciplina, a cavallo tra biologia, genetica e informatica, risale al 1987.

Se l'I.A. studia i principi e la natura dell'intelligenza cercando di riprodurre alcune caratteristiche mediante i computer, così la vita artificiale cerca di rispondere a domande sulla vita e i processi che caratterizzano un organismo vivente (o una popolazione di organismi), e di capire come si siano svolti i processi evolutivi che da forme di vita semplici hanno portato all'evoluzione di forme di vita sempre più complesse e intelligenti, mediante simulazioni realizzate al computer.

Allo stato attuale, comunque, la maggior parte delle ricerche in questa disciplina è rivolta allo studio di processi biologici elementari (assimilabili a quelli dei virus o degli esseri monocellulari) o alla simulazione del comportamento di esseri più complessi ma comunque assai in basso nella scala evolutiva, come gli insetti.

La maggior parte delle creature studiate dalla vita artificiale sono pure simulazioni software che vivono in ambienti digitali. Tuttavia non mancano applicazioni di sistemi di vita artificiale a piccoli robot che sono in grado di muoversi in ambienti reali ancorché semplici. Già abbiamo citato il caso del *Perceptron*, un robot tartaruga che, governato da una rete neurale, poteva muoversi in un appartamento evitando gli ostacoli e individuando le fonti di energia necessarie al suo "sostentamento". Da allora numerose sono state le creature meccaniche realizzate dai ricercatori per studiare le basi del comportamento degli esseri viventi.

La somiglianza nei comportamenti tra alcune delle forme di vita artificiale (digitali o robotiche che siano) sviluppate dai ricercatori di A.L. e le creature organiche cui esse

si richiamano ha portato alcuni studiosi in questo settore ad assumere una posizione che può sembrare paradossale: per conto loro gli esseri artificiali sono “vivi” tanto quanto quelli organici. Altri studiosi, invece, si limitano ad asserire che le sperimentazioni condotte con i computer ci possono far capire meglio alcuni dei misteri della vita organica, senza assumere che le forme di vita artificiale possano dirsi viventi in un senso pieno. Insomma, come nell'intelligenza artificiale, anche nella vita artificiale vi è una posizione “forte” e una “debole”.

### ***1.4.5 Automi cellulari***

I più noti enti artificiali studiati in A.L. sono gli automi cellulari. Un automa cellulare è una macchina software autodiretta che di norma “vive” in ambienti simulati bidimensionali, è dotata di alcuni semplici comportamenti simili a basilari processi vitali (mangiare, spostarsi alla ricerca di cibo, difendersi da altri automi) ed è in grado di autoreplicarsi assemblando elementi inerti tratti dall'ambiente in base a regole semplicissime (come avviene nella mitosi cellulare, diretta dal DNA). La duplicazione di un automa cellulare non è completamente deterministica (altrimenti ci troveremmo di fronte a un programma che copia se stesso). Nel processo di replica, infatti, possono occorrere delle mutazioni che simulano le variazioni degli organismi reali previste dalla teoria darwiniana. In questo modo un sistema in cui “vivono” degli automi cellulari simula il corso di un processo evolutivo per selezione naturale, con il vantaggio che i tempi che regolano l'andamento del processo possono essere controllati dai ricercatori, a differenza di quanto avviene negli esperimenti effettuati con organismi reali.

In senso più astratto, un automa cellulare, anche elementare, ha le seguenti proprietà: è un sistema discreto nello spazio e nel tempo; è costituito da singole celle separate; è locale, cioè lo stato di ogni cella in un dato istante è determinato esclusivamente dagli stati assunti nell'istante precedente, dalle celle appartenenti all'intorno della cella; è omogeneo (la struttura dell'intorno è uguale per ogni cella) e parallelo, cioè ad ogni istante le celle sono aggiornate simultaneamente.

Uno degli esempi più interessanti di automa cellulare è costituito dall'ambiente artificiale conosciuto come *Life* (il gioco della vita), ideato nel 1960. L'ambiente del gioco è una scacchiera bidimensionale e gli organismi che vivono nell'ambiente sono rappresentati da celle piene, mentre quelle vuote sono considerate non occupate da organismi viventi oppure celle morte. Questi organismi si evolvono in base a tre semplici regole:

1. ogni cella con nessuna o una sola cella adiacenti piene muore (morte per isolamento);
2. ogni cella con quattro o più celle adiacenti piene muore (morte per sovraffollamento);
3. ogni cella morta con tre celle adiacenti piene torna in vita alla generazione successiva (regola di nascita).

Il sistema si evolve da solo in maniera spesso sorprendente e questa evoluzione genera forme di vita sempre più complesse battezzate con strani nomi: gliders (alianti), eaters (divoratori), glider guns (cannoni di alianti), etc.

## 1.5 I filoni di ricerca dell'Intelligenza Artificiale

La moderna visione di un sistema di intelligenza artificiale consiste nel considerarlo come un agente (o una molteplicità di agenti) in grado di espletare compiti di alto livello. I filoni di ricerca verranno, quindi, qui di seguito illustrati in termini delle capacità di cui vogliamo che l'“agente intelligente” sia dotato. Elencheremo dapprima i filoni di ricerca più classici, poi quelli più moderni.

- *Risoluzione automatica di problemi (problem solving)*. Gli agenti per il problem solving sono sistemi che identificano sequenze di azioni per il raggiungimento di stati desiderati. Gli algoritmi di ricerca automatica di soluzione si dividono in “non informati”, cioè sprovvisti di informazioni diverse dalla semplice definizione del problema da risolvere, e che, quindi, eseguono una ricerca uniforme nello spazio degli stati e algoritmi di ricerca “informati”, cioè provvisti di informazioni utili per individuare la soluzione. Mentre i primi diventano inutilizzabili appena la complessità del problema aumenta, i secondi possono essere molto efficaci se dotati di una buona “euristica”, cioè di una funzione che, utilizzando informazioni sul dominio del problema, permetta di guidare la ricerca più rapidamente verso una soluzione.
- *Rappresentazione della conoscenza e ragionamento automatico*. Si tratta di concetti fondamentali per l'intera intelligenza artificiale. La conoscenza e il ragionamento aiutano sia noi esseri umani che gli agenti artificiali ad avere comportamenti adeguati in ambienti complessi e/o parzialmente osservabili. Un agente basato sulla conoscenza può combinare le conoscenze di carattere generale con i dati percepiti per dedurre aspetti non espliciti e/o nascosti che possono essere utili per selezionare e scegliere tra comportamenti alternativi. La ricerca in questo campo riguarda il progetto di linguaggi, metodi e tecniche per rappresentare conoscenza su domini applicativi, e algoritmi e metodi per fare inferenze e trarre quindi conclusioni valide nel dominio di interesse. Per quanto riguarda i linguaggi, il punto cruciale è il potere espressivo (Si può rappresentare il tempo? Si possono rappresentare relazioni spaziali? Si può rappresentare la conoscenza di diversi agenti in modo che essa sia “privata” per ciascuno di essi e non accessibile ad altri?). Per quanto riguarda i meccanismi inferenziali, gli aspetti cruciali sono la correttezza e la completezza, e, non meno importante, la complessità di calcolo.
- *Pianificazione automatica*. Dati un dominio applicativo, la descrizione di uno stato di tale dominio in cui l'agente intelligente si trova (detto stato iniziale), la descrizione di un obiettivo (o stato finale) che l'agente vuole raggiungere e, infine, la descrizione dell'insieme delle azioni che esso può compiere, la pianificazione corrisponde all'identificazione di una sequenza di azioni necessarie per raggiungere un obiettivo. Si parla di “pianificazione classica” nel caso in cui gli ambienti siano completamente osservabili, deterministici, statici (tali cioè per cui qualunque variazione è causata solo dall'agente) e discreti dal punto di vista temporale, delle azioni, degli oggetti, degli effetti. È facile convincersi che raramente i domini di interesse per applicazioni pratiche godono di queste proprietà. La ricerca di algoritmi efficienti (e completi) per la pianificazione automatica in ambienti non deterministici e parzialmente osservabili è oggetto di intensa ricerca.

- *Apprendimento automatico e data mining.* L'idea fondamentale relativa all'apprendimento è quella secondo cui quanto viene percepito da un agente dovrebbe essere utilizzato non solo per il suo comportamento nell'ambiente percepito al momento presente, ma anche immagazzinato ed elaborato per accrescere la sua abilità nelle azioni future. L'apprendimento riguarda la capacità di un agente di osservare i risultati dei processi delle sue stesse interazioni con l'ambiente. Si parla di tecniche di apprendimento induttivo intendendo tecniche di tipo simbolico (per esempio, l'apprendimento di alberi di decisione a partire da esempi). Si parla poi di apprendimento connessionistico (quello che riguarda l'addestramento di reti neurali) e di apprendimento statistico (quello che si basa su tecniche di tipo statistico). Con l'espressione "data mining" si identificano le tecniche di apprendimento applicate a grandi quantità di dati (per esempio i tabulati delle telefonate immagazzinati da una grande compagnia telefonica, i tabulati dei consumi di un grande distributore) alla ricerca di regolarità, regole di comportamento ecc..
- *Comunicazione.* Con il termine comunicazione si intende identificare lo scambio intenzionale di informazioni mediante la realizzazione e la percezione di un sistema condiviso di segni convenzionali. La problematica della comunicazione coinvolge il linguaggio, le ambiguità dello stesso (sia strutturali che semantiche), la comprensione del discorso, i modelli probabilistici ecc.. La ricerca nella comunicazione si occupa dell'analisi e della generazione di linguaggio sia scritto che parlato, della traduzione automatica, della generazione di riassunti ecc.. Si occupa, inoltre, della interazione tra essere umani e sistemi artificiali in forma amichevole e adattiva e anche non verbale.
- *Percezione.* La percezione, ottenuta mediante sensori, è necessaria per fornire all'agente artificiale informazioni sull'ambiente con cui interagisce. Tutti i tipi di percezione sono importanti e oggetto di studio. Sono stati particolarmente esplorati la percezione acustica e visiva. Per quanto riguarda la percezione acustica, la ricerca si focalizza sulla comprensione del linguaggio parlato e su quella della scena acustica (per esempio, la localizzazione di sorgenti sonore); per quanto riguarda, invece, la visione artificiale, il riconoscimento di oggetti (e non solo in particolari scene e condizioni di luce) e la comprensione di scene in movimento restano problemi aperti perché particolarmente complessi.
- *Robotica.* I robot sono agenti fisici artificiali che svolgono funzioni e compiti manipolando gli oggetti del mondo fisico. Per questo essi devono essere provvisti di sensori, per acquisire le informazioni necessarie *dall'ambiente*, e di attuatori per agire *sull'ambiente* (ruote, braccia meccaniche ecc.). La ricerca in robotica, che per molto tempo aveva seguito strade indipendenti dall'intelligenza artificiale, sta ottenendo una rinnovata attenzione da parte dei ricercatori di I.A., soprattutto per quel che riguarda la progettazione di sistemi robotica cognitivi, cioè robot che esibiscono capacità di decisioni autonome di alto livello.
- *Programmazione naturale.* La programmazione naturale è quella branca della ricerca automatica di soluzioni che si occupa di riprodurre meccanismi che si osservano in natura. Rientra in questo ambito la ricerca sugli algoritmi

genetici, cioè algoritmi di ricerca che simulano i meccanismi della evoluzione darwiniana di popolazioni di individui. Sono di particolare attualità gli algoritmi che riproducono il comportamento di colonie di animali quali, per esempio, colonie di formiche che, sfruttando opportuni meccanismi di comunicazione, trovano velocemente il cammino più breve verso l'obiettivo (per esempio, il cibo).

- *Rappresentazione delle emozioni.* Una direzione recente della ricerca sulla comunicazione tra persone e sistemi artificiali è quella della comprensione e della generazione di particolari stati emotivi: in particolare quella della comprensione e generazione di situazioni umoristiche. Lo studio del cosiddetto umorismo computazionale dovrebbe, tra l'altro, aiutare a svelare i meccanismi psicologici, ad oggi non ben compresi, che consentono di cogliere gli aspetti impliciti e riposti del linguaggio naturale che danno origine all'ilarità (caratteristica, a quanto sembra, esclusivamente umana). È probabile che tali ricerche possano rivelarsi di grande aiuto nella simulazione di stati emotivi e nel miglioramento delle relazioni uomo-macchina.
- *Sistemi multi-agente.* Un agente artificiale non agisce in situazioni di isolamento: esso deve interagire con esseri umani ma anche con altri sistemi artificiali. La ricerca su sistemi multi-agente si occupa della rappresentazione della conoscenza e del ragionamento in situazioni in cui molti agenti sono presenti in un sistema, ciascuno dotato della sua conoscenza e del suo "punto di vista" sul mondo. Aspetti particolarmente importanti sono la comunicazione, il coordinamento e la pianificazione cooperativa: sono necessari affinché il sistema multi-agente possa perseguire efficientemente (distribuendo il carico di lavoro o sfruttando le capacità specifiche di alcuni agenti presenti nel sistema) un obiettivo comune anche in ambienti eventualmente resi ostili dalla presenza di un'altra squadra di agenti avversari. Lo studio dei sistemi multi-agente e delle loro peculiarità sarà oggetto dei prossimi capitoli.

## 2 I SISTEMI MULTI-AGENTE

### 2.1 Premessa

L'avvincente evoluzione tecnologica del computer, dalla sua nascita fino ad oggi, ha permesso all'uomo contemporaneo di avvalersi di uno strumento essenziale per le proprie ricerche. Quella che inizialmente era una semplice macchina di calcolo, si è trasformata in un sistema informatico con capacità tanto elevate da poter gestire società, processi industriali, disegnare macchinari o assistere analisi mediche.

Con l'aiuto degli strumenti informatici, si sono potuti descrivere numerosi processi reali allo scopo di spiegarli, studiarne le caratteristiche e simularne l'evoluzione temporale, così da poter prevedere possibili scenari futuri. Recentemente, è emersa la necessità di analizzare fenomeni complessi, originati dal comportamento dei singoli e da scelte spesso non deterministiche, quindi difficilmente rappresentabili matematicamente attraverso equazioni: tali fenomeni, che si sono evidenziati in molteplici ambiti, per esempio in quello sociale, economico e territoriale, non sono spiegabili mediante il principio della sovrapposizione degli effetti<sup>1</sup>.

Per dare una risposta a queste esigenze, si sono sviluppati modelli in grado di descrivere matematicamente solo piccole parti di un sistema; essi evolvono analizzando un fenomeno attraverso le interazioni tra gli elementi stessi: sono i sistemi basati sugli agenti (MAS: multi agent system).

---

<sup>1</sup> Principio di sovrapposizione degli effetti, vale a dire la somma dei comportamenti dei singoli individui.

### 2.2 Caratteristiche dei sistemi multi-agente

La simulazione multi-agente permette di creare dei mondi artificiali, modelli dei sistemi reali, nei quali è possibile effettuare controlli su tutte le variabili e sui parametri di stato. Questa fondamentale caratteristica dei sistemi multi-agente ci permette di sperimentare direttamente le conseguenze di comportamenti diversi da quelli reali, di accadimenti inaspettati o di teorie alternative.

A differenza di quelli matematici, con l'uso dei modelli basati sugli agenti si possono rappresentare variazioni del sistema reale semplicemente modificando alcuni parametri o piccole parti del programma, senza richiedere, quindi, di intervenire sulle equazioni, oppure pesantemente sul software implementato. I modelli interi, o parte di essi, sono così riutilizzabili in altri esperimenti ed un ricercatore può arrivare a realizzare il proprio modello, senza dover programmare dall'inizio un sistema e senza dover ricorrere all'aiuto di esperti informatici.

I modelli con agenti hanno inoltre il vantaggio di presentare degli output di più semplice lettura e comprensione, anche da parte di chi non conosce approfonditamente le dinamiche del sistema oggetto di studio: questo non significa che per programmare un sistema multi-agente non sia necessario conoscere il sistema, ma che tali modelli

non sono di tipo “black box”, anzi hanno un’interfaccia utente che ci permette di avere sempre chiare le relazioni intercorrenti tra gli elementi del sistema.

I modelli basati sugli agenti si presentano come più versatili e “user- friendly” dei modelli classici, tanto da essere definiti dall’Academy of Sciences il paradigma più promettente per i prossimi anni.

### 2.3 Il concetto di sistema multi-agente

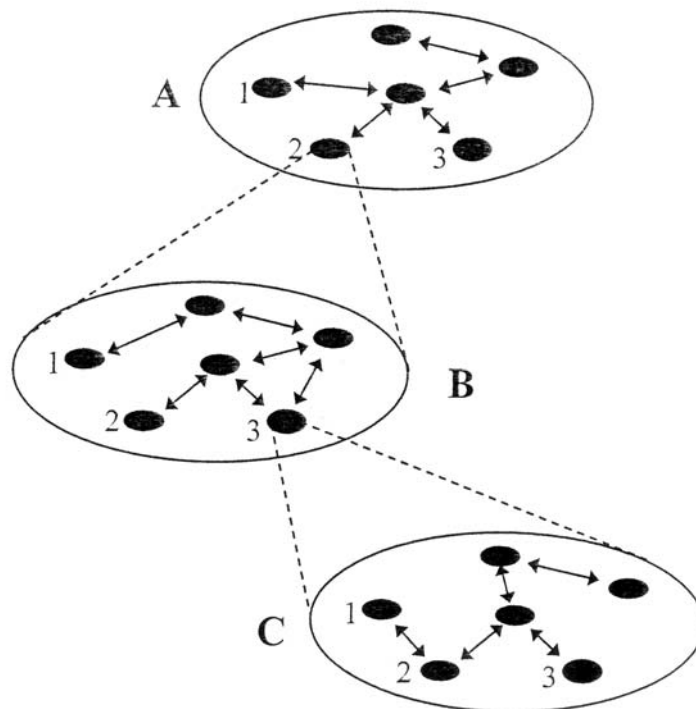
Il concetto di sistema multi-agente può sembrare addirittura banale ed essere immediatamente compreso dalla descrizione del processo di modellazione MAS, in particolare se confrontato con il metodo tradizionale di costruzione dei modelli.

Questo modo di introdurre il concetto di MAS è chiamato approccio formale.

E’ da notare subito che l’immediatezza dell’approccio formale lascia ampio spazio ad ambiguità ed imprecisioni interpretative.

Per superare queste occorre una più vasta riflessione sia sul piano dei paradigmi scientifici (approccio epistemologico), sia sul piano dei meccanismi cognitivi (approccio computazionale).

Verranno esposti, nell’ordine, i seguenti tre approcci.



**Figura 2.1:** Sistema, elementi e relazioni, sottosistemi e livelli di aggregazione.

#### 2.3.1 Approccio formale

Avendo sott'occhio la figura 2.1 si consideri una qualsivoglia entità, ad esempio una città, un processo localizzatevi o, ad esempio, il sistema solare, vista come entità sistemica (oggetto B nella figura).

Secondo la definizione stessa di sistema, il sistema (B) sarà concepito come un insieme di elementi (b1, b2, b3) connessi da relazioni (meccanismi di interdipendenza, raffigurati da frecce).

Come è noto agli analisti dei sistemi, ogni elemento del sistema è (o può essere) a sua volta un sistema, "sotto-sistema" del sistema dato (nella figura: b3 esplicitato come sistema C). Così, ad esempio, un elemento della città, un quartiere, può essere articolato nei suoi elementi costitutivi (case, negozi, scuole...) e nelle relazioni tra questi ultimi.

Analogamente il sistema in oggetto è (o può essere) a sua volta un elemento di un più generale sistema (nella figura: B elemento a2 del sistema A). Così, ad esempio, il sistema città può essere una città all'interno di un sistema regionale.

Il difficile compito dell'analista di sistemi è quello di tradurre il sistema "reale" nel suo "modello".

Sulla base dei dati disponibili, delle sue (più o meno limitate) conoscenze e finalità di analisi ed anche delle sue personali preferenze (cosce o non) egli deve:

- decidere a quale livello descrivere il sistema in esame, se A o B o C (problema della finestra di osservazione);
- valutare se, e come, trattare il rapporto tra il "sistema modello" prescelto ed un più generale sistema in cui esso può essere inserito (rapporto tra A e B) (problema della chiusura);
- individuare quali elementi (b1, b2, b3..) e quali interazioni considerare, nonché come specificare tali relazioni (problema dell'ontologia);
- in parallelo, scegliere, tra i vari elementi (b1, b2, b3...), se e quali dettagliare esplicitamente in sottosistemi del modello (b3 sostituito con C) (problema della disaggregazione).

In questa complessa operazione la modellistica tradizionale privilegiava un approccio, che si potrebbe definire *globale*, orientato verso il sistema nel suo complesso; cioè, definiti gli elementi costitutivi, prevalentemente focalizzato verso l'insieme di interrelazioni tra elementi, come determinanti "appunto nel loro insieme" delle proprietà del sistema.

In questa ottica la modellistica classica dapprima si è diretta a rappresentazioni semplificate della realtà, con sistemi costituiti da pochi elementi (e cioè, modelli con poche variabili), ma studiando le implicazioni di interazioni di forma funzionale anche molto complessa (si tratta dei modelli analitici, così detti perché generalmente risolti non attraverso il calcolo, ma con l'analisi matematica).

Poi, quando si sono resi disponibili potenti strumenti di calcolo, la modellistica classica si è estesa anche verso i modelli "a larga scala", costituiti da moltissime variabili e moltissime relazioni, divenuti trattabili appunto grazie al nuovo strumento, ma restando sempre nell'ottica globale.

La modellizzazione multi-agente privilegia, per contro, un approccio che si potrebbe definire *locale*, più orientato verso i diversi elementi costitutivi del sistema (gli agenti); cioè prevalentemente focalizzato verso l'approfondimento di come è



costituito ogni elemento (agente) (b3 strutturato nel modo C) e di come tale sua struttura definisca le sue interrelazioni con gli altri elementi (agenti).

Naturalmente la definizione “locale” di tutti gli elementi e delle loro relazioni, comporta la definizione del funzionamento globale del sistema in esame.

La preferibilità dell’approccio MAS rispetto al metodo classico sarà approfondita nel prossimo paragrafo. Qui basta osservare che si riconosce subito la possibilità con questo approccio di introdurre, più agevolmente rispetto al metodo tradizionale, comportamenti degli agenti variabili nel tempo, in conseguenza di variazioni delle circostanze in cui si vengono a trovare.

Per supportare questa astratta presentazione del concetto di MAS, può essere utile fare un esempio.

Si consideri a questo proposito il sistema “pendolarismo in un certo territorio”. In ottica classica, gettando uno sguardo “globale” al sistema si riconosce che nel territorio considerato:

- c’è una certa quantità di persone che partono da varie zone ( $O_i$ );
- ci sono zone diversamente attrattive per quelle persone ( $W_j$ );
- ci sono certe distanze tra le zone di partenza e quelle di arrivo ( $c_{ij}$ );
- i dati empirici confermano, con ragionevole approssimazione, che la quantità di persone che si spostano da una origine ad una destinazione ( $F_{ij}$ ) è proporzionale al numero di partenti da quella zona, all’attrattività della zona di destinazione, ed è inversamente proporzionale alla distanza tra le zone considerate.

Questi dati (variabili e relazioni) conducono a formulare, insieme a qualche altra assunzione, di carattere più tecnico (irrilevante ai fini dell’esempio), per il sistema, il ben noto modello (gravitazionale) di interazione spaziale:

$$F_{ij} = A_i * O_i * W_j * \exp(-\beta * c_{ij}) \quad \text{con} \quad A_i = \left[ \sum_l W_l * \exp(-\beta * c_{il}) \right]^{-1} \quad (2.1)$$

dove  $\beta$  è un parametro che misura quanto “pesi” la distanza nella propensione a spostarsi dei pendolari.

Considerando lo stesso sistema in un’ottica multi-agente, e del tutto ovvio indirizzare l’attenzione verso il singolo pendolare, che appare come il vero attore nel fenomeno in esame. Naturalmente la modellizzazione MAS sarà fatta per condizioni del tutto identiche a quelle della modellizzazione tradizionale e cioè, che ci sono una certa quantità di pendolari in partenza dalle varie zone, che ci sono zone diversamente attrattive per quei pendolari e che le zone di partenza da quelle di arrivo distano una certa quantità.

Volendo caratterizzarlo, come è nella natura del metodo MAS, una semplice riflessione sulle preferenze dei pendolari induce a considerare che egli desidera accedere alla zona massimamente attrattiva, minimizzando nel contempo il “costo” dello spostamento dalla sua zona di origine; in altre parole che egli cerchi come zona di destinazione quella che massimizza la sua utilità:

$$U_{ij} = \ln W_j - \beta * c_{ij}$$

dove  $\beta$  è un parametro che valuta il trade-off tra benefici (accesso a zona di attrattività  $W_j$ ) e costi (distanza  $c_{ij}$  da superare).

Se consideriamo poi che per ogni origine ci sono  $O_i$  pendolari, è meglio scrivere l'utilità, per il generico (n-esimo) agente, come:

$$U_{ij} = \ln W_j - \beta * c_{ij} + \varepsilon_{ij}^n$$

dove  $\varepsilon_{ij}^n$  è un termine che misura lo scostamento (positivo o negativo) nell'utilità del n-esimo agente rispetto ad un agente "medio". Questo termine è aggiunto perché è più realistico assumere che i vari pendolari percepiscano differientemente, per limiti di informazione sui valori delle variabili in gioco ( $W_j$ ,  $c_{ij}$ ) o per differenziazione nelle preferenze, utilità più o meno elevate (rispetto ad un dato medio).

A questo punto si dispongono di quasi tutte le informazioni necessarie per condurre, per via numerica, la simulazione del comportamento degli agenti. Se, infatti, a completa specificazione dei dati sugli agenti, si avanzano le ipotesi aggiuntive che i comportamenti dei pendolari siano totalmente indipendenti tra di loro (cioè  $\varepsilon_{ij}^n$  non correlati tra di loro) ed identicamente distribuiti (cioè che gli  $\varepsilon_{ij}^n$  siano variazioni casuali riferibili ad una stessa funzione di distribuzione), i flussi  $F_{ij}$  che si ottengono dalla microsimulazione sono eguali a quelli forniti dal modello gravitazionale (formula 2.1).

Da questo esempio si comprende, oltre alla differenza tra i due approcci, anche come nei MAS sia più agevole introdurre ipotesi più complesse sugli agenti (sui pendolari), ad esempio il considerare comportamenti imitativi o di inerzia al cambiamento, di quanto sia il farlo operando sulla formula 2.1.

Quando non si dispongono di rappresentazioni "alternative" dello stesso sistema, come nell'esempio appena fatto, può risultare difficile stabilire, dalla sola struttura del modello, se si tratti di MAS o no.

Bisogna però osservare che, se chiamati a modellare questo sistema, nel passato tutti gli studiosi avrebbero adottato un approccio globale, oggi una larga maggioranza preferirebbe l'approccio ad agenti.

### 2.3.2 *Approccio epistemologico*

L'approccio epistemologico al concetto di sistema multi-agente individua in un diverso modo di pensare dell'analista di sistemi, la più sottile ma reale natura della transazione dalla modellistica classica a quella MAS.

In effetti la seconda metà del Novecento ha assistito ad una vera rivoluzione dei paradigmi scientifici.

La visione del mondo secondo la prospettiva evuzionistica<sup>2</sup> darwinista, a partire dalla biologia, si è andata imponendo in pressoché tutti i campi del sapere, a sostituzione del paradigma meccanicista delle scienze classiche.

Al cuore del darwinismo biologico, c'è il riconoscimento che un organismo deve essere caratterizzato a due livelli:

- quello di *fenotipo*, ovverosia delle sue proprietà (fenomenologiche) che lo specificano nelle interazioni con l'ambiente in cui è collocato;
- quello di *genotipo*, ovverosia delle proprietà degli elementi (geni) costitutivi, che ne determinano l'essere quello che è.

Ed è solo l'interazione tra i processi ai due livelli (per Darwin: la selezione ambientale

del più adatto, a livello di fenotipo; e la generazione di mutazioni, a livello di genotipo) che spiega l'evoluzione degli organismi, diversamente non spiegabile sulla base della considerazione singola dei meccanismi di ciascuno dei due livelli.

Riletto in termini più generali, il contributo che il darwinismo porta all'analisi dei sistemi è quello della necessità, nel trattare una qualche entità, di considerare sempre (almeno) due livelli di rappresentazione (l'entità come sistema costituito da...; e l'entità come elemento del sistema...) in interazione tra loro. Ed è proprio questa duplicità di rappresentazione quella radicata nel modo di pensare della simulazione multi-agente.

La visione evoluzionistica sostituisce, al semplice dualismo globale-locale visto nell'approccio formale, una prospettiva multi-livello di sistemi annidati l'uno nell'altro, che apre ad una modellazione olistica della natura (antitetica al riduzionismo sotteso alla chiusura del sistema, propria della modellazione classica).

E' proprio questa attenzione all'olismo che costituisce uno dei due motivi della generalizzazione dell'evoluzionismo dalla biologia e tutte le altre scienze. L'altra molla è l'attenzione alla irreversibilità dell'evoluzione dei sistemi (antitetica alle usuali ipotesi di equilibrio o, al più, quasi equilibrio).

---

<sup>2</sup> Talora questo nuovo paradigma viene chiamato *scienza della complessità* (complessità che poi mostreremo essere strettamente connessa all'evoluzionismo).

### **2.3.3 Approccio computazionale**

Lo sviluppo dei MAS, non avrebbe potuto aver luogo senza un indispensabile prerequisito: lo sviluppo dell'elaborazione automatica<sup>3</sup>.

Nell'esempio prima fatto di sistema multi-agente (sistema pendolarità) era stato citato il ricorso a questa tecnologia per risolvere il sistema stesso.

Difatti, in generale, i sistemi multi-agente ereditano dai preesistenti modelli a larga scala, la necessità di servirsi della computazione numerica, per due ragioni:

- la numerosità degli agenti e delle loro interazioni (per la precisione, non il numero assoluto, ma la numerosità di tipi di agenti e relazioni), ostacolo eminentemente operativo<sup>4</sup>;
- la complessa forma funzionale delle relazioni (nonché il loro accoppiamento<sup>5</sup>), problema di sostanza<sup>6</sup>. Questa complessità si manifesta, in particolare, nella possibilità di esprimere le relazioni stesse in forma algoritmica<sup>7</sup>; fatto che, se da un lato facilita la (ed amplia la potenzialità di) descrizione delle caratteristiche dei sistemi multi-agente, da un altro inesorabilmente impone la soluzione computazionale.

Conseguenza inevitabile della simulazione numerica è che nel modello MAS, nel suo funzionamento complessivo (o di particolari significative aggregazioni parziali di agenti), diventa incomprensibile il rapporto logico tra cause (cioè il comportamento ipotizzato per i singoli agenti) ed effetto (il funzionamento detto).

---

<sup>3</sup> Vogliamo con ciò richiamare gli avanzamenti nelle modalità esecutive dei calcoli, le aumentate possibilità di gestione e rappresentazione dei dati, la immensamente cresciuta potenza di calcolo e di

---

memoria.

<sup>4</sup> Difatti per questo aspetto è solo l'onere del lavoro che indirizza all'automazione del calcolo.

<sup>5</sup> Cioè la reciproca dipendenza delle relazioni e quindi la necessità di soluzione "simultanea" delle relazioni stesse.

<sup>6</sup> Ovverosia impossibilità di risolvere altrimenti (per via analitica) il sistema.

<sup>7</sup> La relazione viene espressa, non in forma di funzione matematica, ma come insieme strutturato di istruzioni dichiarative del comportamento relazionale.

Ove la si voglia valutare, questa incomprendibilità si presta ad una lettura bivalente:

- da un lato, pone problemi di affidabilità e di validazione del modello<sup>8</sup>;
- da un altro lato, pone in evidenza il pregio specifico della modellistica MAS, che è quello di far "emergere"<sup>9</sup> le proprietà globali del sistema, cioè di costruire, a partire da un livello di conoscenza, un altro livello di conoscenza, al di là della capacità logica dell'uomo da sola.

Questa ultima affermazione segnala un nuovo modo di fare scienza, caratterizzato dal "*ragionamento basato sul calcolatore*", espressione in cui il termine basato vuole sottolineare che il raziocinio non è più solo pensiero umano supportato dal computer, ma è costituito, nel suo essere stesso, dalla stretta e paritaria interazione tra capacità mentali ed elaborazione informatica<sup>10</sup>.

In conclusione, l'approccio MAS anche nella sua dimensione operativa ha una valenza molto più profonda di quanto intuibile da una sua pura lettura formale.

---

<sup>8</sup> L'affidabilità (come possiamo essere sicuri che il funzionamento è proprio quello?) pone un problema di credenza nei risultati dei modelli costruiti secondo l'approccio MAS. E pone un problema più operativo: come essere sicuri che il modello è stato correttamente programmato, cioè che non ci sono errori nella sua implementazione informatica? A questo problema basta per ora dire che esistono soluzioni informatiche, anche se la garanzia totale non è mai data.

La validazione (cioè come possiamo essere sicuri che il modello MAS adottato è proprio quello "vero" del sistema in esame) pone un problema metodologico, peraltro comune a tutti modelli. Nei modelli classici la verifica empirica dei risultati (cioè la corrispondenza tra funzionamento reale e funzionamento modellato) automaticamente implicava la validità delle ipotesi di modellazione. Nei MAS, questa logica consequenzialità non si dà. Bisogna ricorrere ad una nuova metodologia di validazione, i cui due cardini sono:

- a. La descrizione quanto più possibile esaustiva, analitica e rigorosa degli elementi costitutivi del modello. Si tratta cioè di definire l'ontologia del modello, al fine di minimizzare le ambiguità interpretative;
- b. La disponibilità di software multi-agente "standard" (accuratamente testati) per la conduzione ripetuta delle simulazioni in condizioni controllate, in modo tale da verificare attraverso la riproducibilità dei risultati, la validità del modello stesso.

<sup>9</sup> Il termine emergenza bene rende l'idea dell'apparire imprevisto (perché logicamente imprevedibile) di un certo comportamento complessivo (proprietà globale) del sistema.

<sup>10</sup> Tale rivoluzione della modalità di pensare è stata da qualcuno paragonata, come importanza, al passaggio dalla cultura orale alla cultura scritta. E così come ora sembrerebbe ridicolo dubitare dell'affidabilità del sapere scritto, è probabile (anzi quasi certo) che sempre più si darà credito, senza dubbi, alla nuova forma di pensiero.

---

## 2.4 Modellizzazione multi-agente e complessità

Da tutto quanto detto in precedenza dovrebbe essere evidente la stretta connessione tra approccio MAS e modellizzazione dei sistemi complessi. Sarà analizzato il rapporto in questo paragrafo, a partire dalla precisazione della natura stessa della complessità.

Dell'idea di complesso sono state fatte una vera immensità di presentazioni, dando una pluralità di definizioni. Si preferisce, qui dare una visione del concetto in grado, di riannodare la molteplicità delle predette definizioni.

Introduciamo, per illustrarla, una precisazione terminologica:

- *complicato* è ciò che non si capisce. Il sistema complicato è percepito come costituito da troppi elementi e/o da relazioni troppo enigmatiche per essere compreso.
- *semplice* è ciò che si capisce. Il sistema semplice è percepito come costituito da un numero piuttosto limitato di elementi e da relazioni "lineari" (cioè logicamente chiare), tale da essere intelligibile;
- *complesso* (qui antitetico a complicato e non suo sinonimo, come talvolta si usa) è, come il semplice, ciò che si può capire. In questo caso, però, il sistema è percepito come costituito da non pochi elementi e da relazioni non facili da intendere, ciononostante restando comprensibile. E' la situazione che si può riconoscere nei costrutti umani, particolarmente in quelli più evoluti (artefatti tecnologici o creazioni artistiche) che, complicati per i più, sono comunque perfettamente capiti dai loro fabbricatori.

Per sua natura, di primo acchito, il mondo tutto ci appare sempre come complicato. E perciò nel passato, elevando a metodo, conscio e dunque controllato, quello che sempre stato un vantaggio evolutivo, la scienza classica ha codificato le procedure di "semplificazione" della realtà<sup>11</sup>, cioè comprensione della stessa.

---

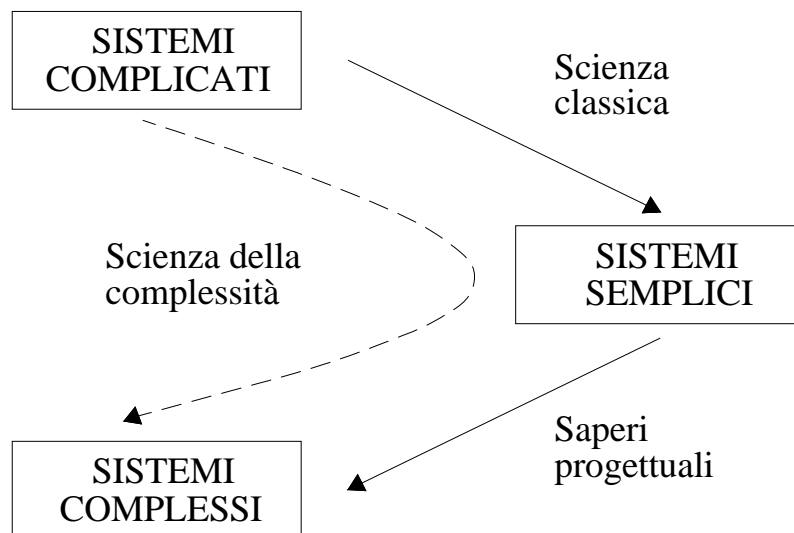
<sup>11</sup> Più correttamente, di passaggio da una percezione complicata ad una percezione semplice di aspetti della realtà. E' fondamentale in questo passaggio l'accettazione che la seconda sia inevitabilmente una approssimazione della realtà "vera".

Nello stesso tempo, i saperi progettuali<sup>12</sup> hanno analizzato quella capacità, pressoché unica del genere umano, di costruire artefatti (cioè entità artificiali, non già presenti in natura) sia per fini utilitaristici (come i manufatti tecnologici), sia per il godimento dello spirito (come le opere d'arte).

Alla base di questi saperi c'è la consapevolezza che "assemblando opportunamente"<sup>13</sup> (il che vuol dire che il progettista sa come procedere e cosa succede unendo gli elementi) componenti elementari con specifiche funzioni si può ottenere una entità globale con altre funzioni percepite come meno semplici di quelle dei costituenti.

I saperi progettuali sono quindi, il processo di "complessificazione" della realtà, di comprensione della stessa nella specie di realtà complessa, anziché semplice.

In questa prospettiva, la nuova scienza della complessità si propone come unificatrice dei due processi in un passaggio globale da complicato a complesso.



**Figura 2.2:** Relazione tra scienza classica, saperi progettuali e scienza della complessità

<sup>12</sup> Ci riferiamo, ovviamente, a tutte le ingegnerie ed a tutte le arti; ma anche a quelle discipline, umanistiche e non, dove invenzione o creatività sono il cuore della disciplina stessa.

<sup>13</sup> Non si intende questa operazione solo in senso meccanico. Può essere, ad esempio, anche la “composizione logica” di un’opera artistica.

Una classificazione della complessità sul piano fenomenologico è dovuta al noto sociologo-filosofo francese Edgard Morin. Secondo Morin vi sono tre principi (tre grandi tipologie di manifestazioni di complessità) che possono aiutare a riconoscere la complessità stessa.

Il primo è il **principio dialogico**, che consiste nel mantenimento della dualità tra relazioni di complementarietà e relazioni di antagonismo all’interno del sistema. Il principio dialogico confonde la mente, segno di complessità, anche se alla fine l’analisi complessa del sistema ci mostra che questa dualità è non solo parte del sistema stesso, ma sua componente essenziale.

Caso paradigmatico è l’organizzazione del “vivente”: si ha, infatti, nelle cellule, da un lato il continuo rinnovamento delle proteine che danno forma ed espressione a ciò su cui sono basate, e cioè la struttura del DNA che da un altro lato permane nel tempo, immutata o quasi<sup>14</sup>.

Il secondo **principio**, detto **di ricorso di organizzazione**, stabilisce che tra un sistema e le sue parti c’è spesso un rapporto di reciproca e circolare influenza: la parte condiziona il tutto, che a sua volta determina le caratteristiche della parte.

E’ tipicamente il caso dell’individuo nella società: la società è prodotta dalle interazioni tra gli individui, ma a sa volta li condiziona fornendo loro la cultura, le convenzioni, il linguaggio. Cioè gli individui sono allo stesso tempo prodotti e produttori della loro società. Si sancisce quindi una netta rottura con l’idea tradizionale di causa ed effetto, di struttura e sovrastruttura.

Il terzo principio, detto **principio ologrammatico**, stabilisce che, così come la parte è compresa nel tutto, anche il tutto è contenuto in ogni sua parte. Questa idea è un superamento rispetto alle teorie riduzionistiche che focalizzano l'attenzione prevalentemente sulle parti, così come rispetto alle teorie olistiche, che focalizzano l'attenzione sul tutto. Essa stabilisce che la conoscenza del tutto avviene attraverso quella delle sue parti e viceversa.

Di nuovo un caso esemplare viene dalla biologia: il patrimonio genetico contenuto in

---

<sup>14</sup> Pur nell'antitesi (rinnovamento contro persistenza), ciascuno dei due elementi non potrebbe esistere senza l'altro (complementarietà).

ogni cellula fornisce le informazioni per costruire l'intero individuo (cioè il tutto è contenuto in ogni sua parte), indipendentemente da quale sia il compito specifico della cellula considerata (cioè la parte è compresa nel tutto).

I tre principi sono, in modo evidente, intimamente collegati<sup>15</sup> e nell'insieme, forniscono le basi per una concezione del mondo totalmente destrutturata, in cui non c'è la prevalenza dell'insieme sulle sue parti né quella della parte sull'insieme, cioè un mondo in cui, usando le parole di Morin, "il tutto è nella parte che è nel tutto".

Questa concezione, è anche quella soggiacente l'analisi dei sistemi secondo l'approccio multi-agente<sup>16</sup>. Quindi la simulazione MAS si presenta come la modalità modellistica propria dei sistemi a fenomenologia complessa.

Per questo motivo diventa interessante esplorare i campi di applicazione dei sistemi multi-agente, mettendoli in relazione ai tre principi individuati da Morin.

Tre grandi collegamenti si segnalano a questo proposito: tra connessionismo e principio dialogico, tra rapporto individuo–insieme e principio di ricorso di organizzazione e tra relazione micro–macro e principio ologrammatico.

### **2.4.1 Il connessionismo**

Nella gran parte delle applicazioni finora esplorate, si è evidenziata la mancanza, nei sistemi multi-agente, di una rigida gerarchia tra gli elementi del sistema.

I singoli agenti (o le organizzazioni in cui essi si riuniscono) sono infatti legati da relazioni prevalentemente funzionali, cioè determinate dalla necessità di svolgere i compiti stabiliti, ma come tali soggette a variazioni e non rispecchianti una catena di comandi rigidamente gerarchizzata.

---

<sup>15</sup> Essi sottolineano, per un lato, aspetti diversi della complessità, e da un altro lato, essi si rinviano direttamente l'un l'altro.

<sup>16</sup> In termini banalizzanti, quindi parziali ed approssimati, ma utili alla comprensione, l'associazione può essere derivata dalla duplice corrispondenza :

sistemi multi-agente ⇔ evoluzionismo ⇔ complessità

Questo non significa che non vi sono rapporti di subordinazione tra agenti o gruppi di agenti, ma semplicemente che essi non implicano la presenza di una struttura rigida di compiti e mansioni.

Quanto descritto è il connessionismo, termine/concetto che esprime la presenza nel sistema, dal punto di vista logico, di una struttura "reticolare", in cui la sede

dell'intelligenza dell'insieme non è identificabile in uno specifico nodo della rete, ma emerge nel momento in cui la rete prende forma (cioè si dispiegano le interazioni tra agenti). Questa ottica "connessionistica" dei MAS trova un'applicazione particolarmente significativa nel campo informatico. Difatti si è sviluppata molto l'Intelligenza Artificiale Distribuita (DAI), in contrapposizione all'Intelligenza Artificiale (AI) classica basata su strutture gerarchicamente ben definite.

La visione connessionistica dei MAS permette di rappresentare quella vasta gamma di situazioni reali in cui i rapporti tra gli individui non sono determinati a priori, ma si sviluppano seguendo percorsi di auto-organizzazione. In questo senso ci si riferisce al principio dialogico: la contraddizione tra l'apparente presenza di un'intelligenza che regola il sistema, e la reale assenza di qualsiasi entità che presieda al funzionamento del sistema, è risolta identificando la sede dell'intelligenza del sistema con la sua struttura emergente.

Un esempio di questa tipologia di problemi è quello di agenti motivati ad esercitare il controllo sociale sui propri simili, convincendoli ad osservare determinate norme. Le norme sono inizialmente in numero limitato e stabilite a priori (o dedotte dagli stessi agenti "controllori" osservando il comportamento degli altri). La motivazione degli agenti può essere la ricerca della propria soddisfazione; certo non è nelle intenzioni degli agenti "controllori" ispirare la comunità a dotarsi di nuove norme. Ma, di contro, questo è proprio ciò che accade, perché comportamenti condivisi e vantaggiosi assurgono al ruolo di norme (nel momento in cui la larga maggioranza degli agenti vi si adegua). Si crea così un sistema normativo spontaneo che regola il sistema e che può essere apparentemente visto come il risultato di un'intelligenza superiore che abbia come obiettivo il bene comune.

#### **2.4.2 Rapporto individuo-organizzazione**

La seconda grande tematica che si osserva nelle applicazioni multi-agente è attinente al complesso rapporto tra individuo ed organizzazione (il suo insieme di appartenenza).

In tutte le simulazioni il singolo agente, è sempre il risultato di una modellizzazione il cui scopo di fondo è però quello di rappresentare il sistema (attraverso la considerazione di molti agenti). Per quanto ogni agente possa essere individualmente caratterizzato, il suo operare acquista significato solo in un mondo (l'organizzazione) in cui vi sono altri agenti a lui più o meno simili. Potrebbe così nascere il problema di stabilire se l'agente sia all'origine dell'organizzazione o se invece non sia solo un suo elemento costitutivo, la cui descrizione dettagliata potrebbe non essere neppure indispensabile per comprendere il funzionamento dell'organizzazione stessa. Messo in questi termini, si tratta di un problema mal posto, in quanto entrambe le ottiche rispecchiano le intenzioni di chi crea il sistema multi-agente: l'organizzazione è pensata in modo astratto<sup>17</sup> per risolvere un certo problema e, di conseguenza, ne vengono implementati gli agenti ritenuti adeguati; ma, d'altra parte, essi costituiscono l'elemento indispensabile che dà forma all'organizzazione, in modi spesso impreveduti e con conseguenze da verificare<sup>18</sup>.

Da quanto precede ben si comprende come il *principio di ricorso di organizzazione* si applichi al rapporto individuo-insieme: l'effetto (l'organizzazione) è concausa di sé



stesso, perché determina le caratteristiche degli agenti da cui l'insieme stesso trae forma e radici della sua evoluzione nel tempo.

Come esemplificazione, ritorniamo al precedente caso della emergenza delle norme nei sistemi sociali. Osservato che l'insieme delle norme può essere equiparato ad una organizzazione, abbiamo che:

---

<sup>17</sup> Cioè ne è definita la struttura logica potenzialmente idonea alla soluzione del problema.

<sup>18</sup> Peraltro è questa l'essenza stessa della simulazione: verificare (nel senso proprio di validazione scientifica) l'evolversi di un sistema e il suo modo di strutturarsi, a partire da ipotesi e dati noti.

- esse nascono perché, sotto la spinta di alcuni agenti motivati ad esercitare una azione di controllo, una larga maggioranza di individui adotta comportamenti condivisi (e desiderabili perché vantaggiosi);
- d'altra parte, le norme sono per definizione vincolanti a comportamenti "conformi alla regola" (cioè condivisi dalla pluralità degli agenti).

Quindi coercizione esercitata dalle norme e desiderata dagli agenti sono mutuamente concause.

### **2.4.3 Rapporto micro-macro**

Un'ultima importante classe di problematiche in cui trovano applicazione i sistemi multi-agente è costituita dagli spesso intricati rapporti tra realtà (sistemi) a dimensione ridotta (come potrebbe essere un piccolo gruppo di agenti o, al limite, un singolo agente) e realtà più vaste (come potrebbe essere una grande organizzazione di agenti creatasi per un dato scopo o, l'intero sistema).

La questione che, in questo caso, la simulazione multi-agente deve risolvere è che le relazioni, molte, non lineari e spesso mal definite tra le diverse parti del sistema impediscono una definizione inequivoca di ciò che è *micro* (la realtà ridotta) e ciò che è *macro* (la realtà vasta); o equivalentemente, ma detto in modo più orientato alle scale spaziali, di ciò che è *locale* e ciò che è *globale*.

La simulazione MAS cerca di mettere ordine attraverso una strategia in due mosse:

- attraverso l'assunzione di una pluralità di livelli di approccio al problema, con singole unità costituenti un'organizzazione che a sua volta può essere vista come componente unitaria nei confronti di organizzazioni di livello superiore. L'agente diventa così un *meso* livello di analisi, parte di un tutto e insieme di parti;
- e, rese leggibili da questa visione *meso*, attraverso la considerazione delle influenze che l'agente può esercitare alle diverse scale, a seconda delle caratteristiche intrinseche degli agenti stessi e delle relazioni esistenti.

Il *principio ologrammatico* ben si applica, quindi, al rapporto micro-macro indicando come non vi sia una netta separazione tra i due livelli, bensì nella costituzione stessa di un agente siano già compresi il suo ruolo nell'ambiente e nei confronti degli altri agenti: il "micro-mondo" dell'agente (la sua costituzione) è intimamente connesso al "macro-mondo" del sistema di cui l'agente fa parte (il suo ruolo nell'ambiente e nei confronti degli altri agenti).

