

## COMPUTARE E PENSARE: CONCETTI IN EVOLUZIONE

Prolozione ai corsi del prof. Maurizio Martelli, Preside della Facoltà di Scienze Matematiche,  
Fisiche e Naturali

Parlare al giorno d'oggi di informatica a un pubblico di non specialisti sembrerebbe più facile di quanto non lo fosse nei lontani anni Settanta quando mi sono laureato, tra i primi in Italia, in questa disciplina.

In realtà così non è perché la diffusione pervasiva dello strumento finale (il calcolatore) ha fatto perdere la percezione della complessità delle discipline che ne sottendono il funzionamento. Si oscilla quindi tra specialismi difficilmente fruibili dal grande pubblico e applicazioni straordinarie e spettacolari che sono percepite quasi come nuove magie (quindi ugualmente difficili da fruirsi, perché facilmente equivocabili nella loro intima essenziale natura). La riflessione che proprio in questo periodo noi docenti di informatica stiamo facendo, in risposta all'applicazione del nuovo assetto legislativo delle lauree e delle lauree magistrali, deve tener conto delle difficoltà di attrarre giovani di grande talento che vogliano competere con le sfide che l'informatica ancora pone sia negli aspetti teorici che in quelli delle frontiere delle ricerche interdisciplinari.

Trovare una risposta a questi problemi è ovviamente collegato anche al ruolo che l'ICT (Information and Communication Technology) potrà giocare nello sviluppo e nella competizione del nostro paese a livello mondiale ed è quindi un dibattito molto meno astratto di quanto possa sembrare.

Proverò in queste note a trovare un 'fil rouge' che colleghi le ricerche che ho portato avanti in questi anni ad alcuni temi che siano al contempo interdisciplinari e possano stimolare riflessioni anche in chi non è necessariamente esperto del settore.

### **Il computare**

Partiamo da una nozione a tutti assai familiare che è alla base non solo degli aspetti fondativi delle scienze, ma del nostro sviluppo come esseri umani: il calcolare o computare.

Il nome che è stato usato per descrivere lo strumento principe dell'informatica è proprio collegato al concetto di calcolo (calcolatore elettronico), anche se più propriamente si dovrebbe parlare di elaboratore; in altre lingue e principalmente in inglese si parla di 'computer' e l'informatica è la 'computer science'.

È sicuramente un nome che deriva da precedenti macchine e prime applicazioni, ma può essere interessante notare l'etimologia del verbo *computare* (*cum putare*) che riconduce anche a significati quali lo stimare, il reputare, il giudicare, il credere e anche il pensare.

In realtà è proprio la nozione di elaborazione dell'informazione (numerica e non numerica) che si vuole sottolineare con il moderno termine di 'computation'. Se noi consideriamo una trasformazione che prende in ingresso (input) la codifica dei numeri 2 e 3 insieme al comando di somma e produce come risultato (output) la codifica del numero 5, troviamo che non c'è una grande differenza semantica tra questa e una qualsiasi interrogazione a una grande base di dati oppure l'interrogazione di un sistema esperto di diagnosi mediche che può aiutare un medico a diagnosticare una rara malattia.

Ma, almeno per chi come me insegna 'Intelligenza Artificiale', è ovviamente più intrigante sottolineare le connessioni tra la computazione e il pensare.

### **L'agente intelligente artificiale**

Un possibile modello moderno di computazione è l'agente razionale (o intelligente); in questo paradigma potete considerare un robot o un software particolare, un pilota automatico o un dimostratore automatico di teoremi matematici.

L'agente è un qualsiasi sistema che percepisce l'ambiente attraverso dei *sensori* e agisce su di esso attraverso degli *attuatori*. In base alla sequenza di percezioni l'agente si comporterà secondo un programma agente che realizzi la propria funzione agente (una funzione che, semplificando, terrà conto delle percezioni e dello stato interno dell'agente, producendo delle azioni).

Se vogliamo che l'agente sia anche razionale, dovremo definire una qualche *misura di prestazione* che ci permetta di valutare il successo o meno del suo comportamento. Quindi potremo dire che un agente razionale, per ogni possibile sequenza di percezioni, dovrebbe scegliere un'azione che massimizzi la sua misura di prestazione attesa, date le informazioni fornite dalla sequenza percettiva e da ogni altra conoscenza dell'agente. Notate che non si parla di impossibilità di errori, e infatti l'agente è razionale ma non onnisciente: la limitazione non credo che possa sorprendere!

Ovviamente il nostro agente dovrà intraprendere azioni mirate a modificare le percezioni future (information gathering) magari attraverso l'esplorazione dell'ambiente; dovrà essere capace di imparare dalle proprie esperienze e quindi essere in grado di modificarsi per migliorare le prestazioni; dovrà infine avere un certo grado di autonomia per non dipendere sempre dal programmatore che ne ha stabilito il funzionamento iniziale.

Ci sono agenti semplici, detti *reattivi*, che rispondono semplicemente a un impulso o a un comando e quelli *basati su modello* che hanno uno stato interno, tengono conto della storia delle percezioni e sono in grado di prevedere l'evoluzione dell'ambiente e magari anche cosa possono fare le proprie azioni.

Ci sono agenti più complessi che hanno degli obiettivi da perseguire tali da permettere di scegliere quali azioni compiere prima e quelli che compiono tale scelta basandosi sull'utilità. Ovviamente i più complessi sono quelli in grado di apprendere e perfino di generare problemi utili all'apprendimento che portino l'agente a compiere esperienze particolarmente significative allo scopo.

I grandi capitoli dello stato dell'arte degli agenti che si studiano oggi possono essere: agenti per la risoluzione di problemi, capaci di ricercare una soluzione a un problema anche in presenza di avversari; gli agenti logici capaci di forme di ragionamento simbolico e con una rappresentazione esplicita della conoscenza; gli agenti pianificatori; gli agenti che trattano conoscenza incerta e quelli adatti a prendere decisioni. Altri aspetti già menzionati sono le caratteristiche di apprendimento, di

comunicazione, di strumenti per la percezione e per efficaci attuatori (un esempio per tutti l'uso del linguaggio naturale).

### **Intelligenza umana ed intelligenza artificiale**

Con questo approccio non siamo così lontani da una possibile caratterizzazione del 'comportamento intelligente' dal punto di vista della psicologia: cicli di azioni che seguono una direzione scelta volontariamente dal soggetto, richiedono chiara comprensione delle proprie intenzioni e del contesto, stimolano l'invenzione di linee di condotta, tra le quali con atto di critica scegliere la più adatta.

Ovviamente le nostre resistenze culturali e religiose ci fanno oscillare tra la rassicurante visione già espressa da Ada Byron nel 1843:

*"Il Motore Analitico [di Babage] non ha nessuna pretesa di originare alcunché. Può solo fare ciò che noi sappiamo ordinarli di fare"*

e lo sconvolgente finale di '2001 Odissea nello spazio' in cui HAL9000 dice:

*"Mi spiace Dave, non ti posso lasciar fare questo!"*

Si toccano su questo tema le corde antiche dei miti fondanti la nostra cultura. Eschilo nel 'Prometeo incatenato' descrive il dono all'uomo del "nous", la mente razionale, di fatto l'intelligenza.

Prometeo:

*«Ascoltate invece le sventure dei mortali: prima erano infanti e io li feci diventare esseri coscienti e dotati di pensiero. Parlerò senza alcun disprezzo degli uomini, ma spiegando con quale benevolenza ho fatto loro dei doni. Prima vedevano ma vedevano invano, udivano ma non ascoltavano, ma simili alle immagini dei sogni vivevano una lunga vita facendo tutto a caso e alla rinfusa ... facevano tutto senza ragione, finché io insegnai loro il sorgere e il tramontare degli astri, cose difficili da interpretare; e inventai per loro il numero, culmine dell'ingegno, e la combinazione delle lettere nella scrittura, memoria di tutto, feconda madre della poesia.»*

(Eschilo, *Prometeo incatenato*, vv. 442-450; 456-461).

Il Prometeo di Goethe ci dice di formare uomini *forme menschen* fatti a sua somiglianza *nach meinem bilde*. E questo si ricollega alle forme più antiche del legame tra creazione dell'uomo capace di autonomia di pensiero ed atto di ribellione agli dèi: Adamo ed Eva e il Peccato originale, Dante, Milton, ecc.

E soprattutto la irripetibilità di un simile atto da parte dell'uomo: Efesto che crea Pandora per punire l'umanità; Paracelso che ispirò Goethe nel Faust; il Golem del Rabbino Judah Ben Loew nella Praga del 1580; fino a Mary Wollstonecraft Godwin in Shelley nel "Frankenstein o il Moderno Prometeo".

Le capacità superiori dell'uomo e la sua autonomia sono quindi il frutto di azioni che prevedono sanzioni; azioni simili, se ripetute dall'uomo stesso, sono poi *inconcepibili* o comunque causa di disastri.

Contemporaneamente la storia del pensiero scientifico ha individuato gli strumenti per concepire l'inconcepibile. Aristotele che introduce nella Fisica lo studio delle cose che cambiano, la distinzione tra materia e forma che è alla base del calcolo simbolico e che nella Logica, lo strumento dello studio del pensiero, applica la distinzione tra materia (i ragionamenti) e forma (gli schemi) al pensiero ottenendo un sistema simbolico per descrivere e parlare delle forme del pensare.

Anche in Greco, il concetto implicato dal termine *logos* comprende insieme la parola, il pensiero e il calcolo: parlare, pensare, calcolare (sinonimo *loghismòs*, il verbo è *loghizomai*).

E infatti il paradigma della computazione nella accezione che abbiamo visto procede nel tempo con alti e bassi, con scarti e ricomposizioni, ma ritorna sempre nei grandi momenti di svolta.

Cartesio (1596-1650) nei “Principia 1,7”: “Cogito ergo sum”, cioè l’uomo è una *res cogitans* e il ragionare è alla base della conoscenza.

Hobbes (1588-1679) nel “Leviatano”: “Pensare come calcolare con segni arbitrari”.

Locke (1632-1704) nel “Saggio sull’intelletto umano” sostenendo che le idee provengono dall’esperienza e dalla riflessione interiore sui dati sensoriali, parla di “anatomia della mente” e di “geografia delle procedure intellettuali”.

Infine, Hume (1711-1776) nel “Trattato sulla natura umana” (o dei processi psichici) parla apertamente di idee complesse composte da idee semplici, che la mente è un flusso di idee, sensazioni, ricordi e ragionamenti, di elaborazioni tramite operazioni della mente, fino alla famosa frase *cognition is computatio*.

## **La scienza moderna**

La logica matematica e l’avvento del computer hanno permesso di sviluppare il concetto di computazione sia nei suoi aspetti teorici e fondazionali che nel realizzarsi delle sue potenzialità.

All’inizio del XX secolo c’erano i presupposti per un salto di qualità nello sviluppo dell’intelligenza artificiale.

La logica era uno strumento che forniva i componenti necessari per automatizzare una teoria del ragionamento (matematico e filosofico) attraverso, per esempio, il trattamento puramente formale (e quindi meccanico) della dimostrazione di un teorema.

Torres y Quevedo con i suoi automi nel 1915 avrebbe ispirato la Cibernetica e quindi l’approccio connessionista e gli studi sugli organi di senso, l’adattabilità all’ambiente, ecc. Wertheimer, fondatore della psicologia della Gestalt (o forma) vedeva i processi primari del cervello come sistemi dinamici in continua trasformazione.

L’idea di programmazione era già stata inventata: mancava il “Calcolatore Universale”.

Di astrazione in astrazione, strumenti formali sempre più potenti ci avvicinavano all’approccio moderno. Fu Alan Turing che modellando la nozione di computazione (un qualsiasi procedimento definito) attraverso delle semplici macchine elementari e del corrispondente linguaggio, era riuscito a dimostrare l’esistenza di macchine di Turing Universali, capaci cioè di imitare, mossa per mossa, qualunque altra macchina di Turing e quindi anche se stessa.

Era stato concepito il “calcolatore universale” che poteva avere moltissime forme e che poteva simulare e quindi eseguire qualsiasi computazione: il moderno computer e il corrispondente linguaggio anch’esso in grado di esprimere qualsiasi computazione.

E proprio Turing in un famoso articolo “Computing Machines and Intelligence” fu il primo a parlare esplicitamente di intelligenza artificiale e di un test per decidere se ci si trovi in presenza di una forma di intelligenza artificiale basata sulla indistinguibilità tra uomo e macchina da parte di un osservatore esterno.

Se ritorniamo al nostro concetto di agente intelligente vediamo che la potenza del calcolatore universale permette di realizzare agenti che ipotizzano il modo di ragionare di altri agenti e perfino di agenti riflessivi, capaci cioè di avere internamente una rappresentazione dell’“IO” distinta dagli “altri” e quindi di immaginare comportamenti e relazioni complesse tra sé e gli altri.

Possiamo concludere che la famosa definizione di computazione del filosofo Daniel Dennett, e cioè “percezione + ragionamento + azione”, bene si attaglia al modello che stiamo delineando.

### **Gli aspetti computazionali alla base dell'evoluzione umana**

Oggi siamo in grado di programmare ma soprattutto di inserire nel concetto di computazione comportamenti e ragionamenti estremamente sofisticati. Ciò stupisce e desta perplessità proprio a causa dei nostri retaggi culturali. Ma ormai il mondo è globalizzato, altri popoli non hanno simili problemi etici e comunque noi ci rifugiamo in un retropensiero rassicurante: come già Ada Byron pensiamo che comunque siano forme di macchine da noi controllate e che la loro evoluzione non abbia niente a che fare con noi.

Ma siamo così sicuri che l'evoluzione umana, e in particolare della mente umana che ci rende così unici, sia così dissimile dal complesso processo di evoluzione del concetto di computazione sopra delineato?

Tutti concordano circa il ruolo centrale del linguaggio nello sviluppo dell'uomo, ma può essere utile considerare qualche analogia tra l'evoluzione del linguaggio umano e un linguaggio artificiale.

Rimanendo a un livello non tecnico, possiamo pensare all'evoluzione dei linguaggi artificiali di programmazione come costruiti con ingredienti quali: un insieme di concetti e di nomi per rappresentare la realtà, un insieme di procedure per percepire e riconoscere l'ambiente, un insieme di procedure per agire, un linguaggio di comandi, meccanismi di astrazione che permettano di ottenere procedure complesse componendo procedure più semplici, e infine la capacità di programmare un calcolatore universale.

Se consideriamo il mondo animale, notiamo che alcune di queste componenti più semplici sono presenti nei linguaggi degli animali e in particolare degli scimpanzè. Come siamo arrivati al linguaggio umano?

L'evoluzione verso l'homo sapiens è stato un processo lentissimo, ma se facciamo riferimento agli studi di André Leroi-Gourham (“Il gesto e la parola”) possiamo considerare aspetti quali la posizione eretta, la possibilità di avere le mani libere, la faccia corta che riposiziona la massa cerebrale, ecc.

La cosa più interessante è però l'osservazione che già gli Australantropi, due milioni di anni fa, avevano queste caratteristiche e usavano e fabbricavano utensili (la tecnica). Era per loro un possedere concetti corrispondenti a procedure stabili che trasmettevano ai loro discendenti quasi come estensioni del corpo. L'evoluzione della costruzione di strumenti va di pari passo allo sviluppo dell'intelligenza e l'homo sapiens è solo l'ultimo anello di una catena.

Il ripetitivo movimento per la costruzione di ciottoli alla base della tecnica ed il loro combinarsi nei tempi dell'evoluzione umana possono essere visti come gli ingredienti di una costruzione di un corrispondente sviluppo delle capacità linguistiche e quindi dell'intelligenza.

A questo riguardo, nell'ultimo Festival della Filosofia di Modena, Bernard Stiegler ha recuperato gli studi di Leroi-Gourham della tecnica come vettore di memoria, per parlare della “Terza memoria di Prometeo”.

Così come Prometeo rubò le *tekhnai* agli dèi per donarle ai mortali, così inizia a un certo punto un processo di esternalizzazione in cui l'evoluzione tecnica non dipende più da quella biologica, costituendo il terzo strato della memoria (oltre il genoma o la memoria della specie e la memoria dell'individuo). Questa visione ha delle assonanze assai interessanti con la costruzione di conoscenza procedurale attraverso meccanismi di astrazione sempre più complessi. Dalle forme elementari di “case-based reasoning” e comportamento reattivo degli animali a forme di astrazioni

di alto livello (meta) che espandono l'espressività del linguaggio fino al manifestarsi di una struttura sufficientemente ricca (come quella di un calcolatore universale) in grado di rappresentare anche il "sé".

Parlo di manifestarsi perché anche i linguaggi artificiali sono stati spesso concepiti per necessità di applicazione e poi solo successivamente dimostrati equivalenti a linguaggi universali (nel senso di Turing).

Per inciso è interessante notare come anche la matematica nasca dagli aspetti tecnici di misurazioni (si veda il bellissimo libro di Paolo Zellini "Gnomon") ed esprima la sua potenza solo attraverso meccanismi di astrazione sempre più sofisticati che permettano, per esempio, di rappresentare quantità infinite attraverso opportune rappresentazioni simboliche.

### **Le frontiere delle relazioni con la biologia: la bioinformatica**

I ragionamenti e i paralleli sull'evoluzione del concetto di computazione e della mente umana sono sicuramente stimolanti culturalmente e magari non facilmente accettabili da chi distingue in modo netto l'intelligenza umana e quella artificiale, ma rimangono in una sfera speculativa che non ci crea sicuramente problemi etici collegati al concetto di vita.

Le macchine sono macchine e quindi inanimate anche se negli studi sulla robotica umanoide si parla di "coscienza" e questo pone problemi etici come ben sa chi conosce gli importantissimi studi dei colleghi Sandini e Tagliasco.

Le cose però si complicano ulteriormente se introduciamo una nuova dimensione: il materiale biologico. Gli studi di bioinformatica sono oggi molto in voga ma il nome denota approcci molto diversi. Ci sono gli studi relativi all'utilizzo di strumenti informatici sofisticati, per esempio il "Data Mining", per applicazioni di interesse biologico come la sequenzializzazione del genoma.

Ci sono tutti gli studi che partono da risultati importanti di informatica teorica, quali quelli sulla concorrenza, e si cimentano con nuovi linguaggi e sistemi per la modellizzazione dei componenti fondamentali della vita quali la cellula o le membrane. Tra questi ha particolare rilievo l'approccio integrato della "system biology" che si presta in modo particolare a essere interfacciata con l'informatica attraverso la modellazione e relativa simulazione delle reti molecolari di controllo.

C'è infine un approccio ancora diverso, e interessante in questa sede, che potremmo definire l'uso di materiale biologico per la realizzazione di macchine o computazioni.

È stupefacente pensare che Richard Feynman, il 29 dicembre 1959, in un famoso discorso alla conferenza annuale dell'American Physical Society al California Institute of Technology (Caltech) dal titolo "There's Plenty of Room at the Bottom" che gettava le basi delle nanotecnologie, quasi per inciso intitolasse un paragrafo "*The marvelous biological system*":

*The biological example of writing information on a small scale has inspired me to think of something that should be possible. Biology is not simply writing information; it is doing something about it. A biological system can be exceedingly small. Many of the cells are very tiny, but they are very active; they manufacture various substances; they walk around; they wiggle; and they do all kinds of marvelous things---all on a very small scale. Also, they store information. Consider the possibility that we too can make a thing very small which does what we want---that we can manufacture an object that maneuvers at that level!*

Questo approccio, che possiamo chiamare "BioComputing", nasce da una generale esigenza di tipo tecnologico, e cioè il limite del processo di miniaturizzazione che rende difficile pensare nei prossimi venti/trenta anni a una evoluzione del tipo "sempre più piccolo e sempre più veloce" (la legge di Moore). Questa esigenza e la tendenza a definire sempre nuove frontiere ha fatto nascere il settore della "computazione naturale" e cioè di nuovi modi di eseguire computazioni che si

possono basare sugli studi dei materiali (nanotecnologie computazionali quali i nanotubi al carbonio), sulla fisica quantistica (Quantum computing) ma anche sulla biologia come per il Biomolecular Computing.

Il primo esperimento è stato quello di Leonard Adleman nel 1994 che risolse il problema del commesso viaggiatore (vedere se dato un insieme di città e connessioni tra loro esiste un cammino che le visiti tutte senza mai ripassare due volte dalla stessa città) utilizzando una codifica con pezzi di DNA e relative proteine ed eseguendo la “computazione” in vitro.

Al Weizmann Institute Udi Shapiro porta avanti un altro approccio che corrisponde a realizzare automi a stati finiti (semplici macchine di Turing) realizzati con spezzoni di DNA e capaci di riconoscere stringhe di DNA/RNA. Si può pensare di realizzare macchine biologiche che possono entrare nelle cellule, riconoscerne uno stato particolare e solo in quel caso rilasciare la sostanza curante.

Altri approcci quali il DNA autoassemblante portati avanti nella University of Southern California cercano direttamente di costruire nuovi meccanismi di calcolo simili alla logica matematica.

Queste tecnologie godono di ottime caratteristiche quali il parallelismo intrinseco, elevata densità di informazione e bassissimi consumi, ma anche di gravi problemi quali il difficile input/output (dare istruzioni costruendo esperimenti e leggere i risultati) o il degrado della macchina.

Questo fa presupporre che nel futuro l’approccio vincente sarà l’integrazione dei paradigmi con dispositivi e macchine di diverso tipo a seconda del tipo di applicazione.

Ai fini del ragionamento solo teorico che stiamo facendo, credo però che questo basti a delineare come i confini tra il computare e il pensare non siano più così netti e che inedite questioni etiche potrebbero porsi nel futuro nel caso che agenti intelligenti potessero essere realizzati con materiale biologico e che, come particolari forme cellulari, potessero evolversi e magari riprodursi.

Ma forse possiamo comunque stare tranquilli: non riprogetteremo necessariamente l’uomo!