

ALFREDO VITERBO-ARNALDO CODIGNOLA

## I 70 ANNI DEL MANIFESTO DELL'INTELLIGENZA ARTIFICIALE

**SOMMARIO:** 1. L'impostazione filosofica del Manifesto. — 2. Le tre questioni discusse: computazione, universalità di impiego, decidibilità. — 3. La natura sequenziale e computazionale dei processi mentali esternalizzabili nella macchina di Turing. — 4. Alla base dell'Intelligenza Artificiale sta la logica-matematica. — 5. Dal Manifesto del 1937 al Colossus del 1943-1945 e al Mark I del 1948. La storia dell'Intelligenza Artificiale ha inizio col saggio di Alan Mathison Turing.

### 1. L'IMPOSTAZIONE FILOSOFICA DEL MANIFESTO.

Nel 1937 venne pubblicato in Inghilterra nei *Proceedings of the London Mathematical Society* un saggio col titolo *On Computable*

\* Le note a piè di pagina indicano taluni testi di riferimento, ma non tutti quelli, assai più numerosi, consultati. Ogni indagine sull'Intelligenza Artificiale, infatti, data la sua natura interdisciplinare, deve necessariamente utilizzare opere appartenenti a più materie.

Per superare questa limitazione bibliografica gli Autori ritengono opportuno rimandare il Lettore al n. 3 - dicembre 2006, della *Rivista quadrimestrale di scienze cognitive e intelligenza artificiale, Sistemi Intelligenti*, edita da il Mulino.

Il n. 3 della Rivista porta questo titolo: *L'Intelligenza Artificiale ha 50 anni* (i Direttori della Rivista hanno ritenuto di datare all'anno 1956 la nascita dell'Intelligenza Artificiale riferendosi al seminario del Dartmouth College).

In questo numero della Rivista *Sistemi Intelligenti* la materia dell'Intelligenza Artificiale è trattata sinteticamente ma approfonditamente con gli interventi, organizzati in modo da poter essere agevolmente comparati tra loro (con risposte a specifiche domande), di: Roberto Casati, Cristiano Castelfranchi, Adelino Cattani, Federico Cecconi, Marco Colombetti, Rosaria Conte,

Roberto Cordeschi, Giovanni Degli Antoni, Giacomo Ferrari, Marcello Frixione, Danilo Fum, Salvatore Gaglio, Francesco Gardin, Giovanni Guida, Gabriele Lolli, Giuseppe Longo, Remo Pareschi, Domenico Parisi, Vincenzo Tagliascio, Pietro Terna, Giuseppe Trautteur, Riccardo Viale.

Dall'esame di questi vari e importanti contributi di tanti studiosi il Lettore potrà constatare come il dibattito sull'Intelligenza Artificiale sia ancora aperto e lontano da conclusioni definitive.

Alla domanda su cosa si debba intendere per Intelligenza Artificiale gli studiosi interpellati hanno dato diverse e talora divergenti risposte.

Taluni hanno affermato che l'Intelligenza Artificiale è caratterizzata dal progetto di costruire una macchina intelligente ovvero in grado di simulare comportamenti intelligenti. Altri hanno sostenuto che, trattandosi di una branca dell'ingegneria del software, l'Intelligenza Artificiale non deve proporsi di spiegare o di replicare meccanismi cognitivi, ma deve essere trattata come questione di progettazione e di sviluppo tecnologico. Altri hanno, invece, dichiarato che lo scopo preliminare dell'Intelligenza

*Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem*, opera di un giovane matematico dell'Università di Cambridge, Alan Mathison Turing (1912-1954), oggi considerato l'inventore dei computer, il padre delle macchine universali della modernità. Il saggio sui numeri computabili fu allora trascurato dagli studiosi e soltanto negli ultimi tempi ne è stata riconosciuta appieno l'importanza attribuendogli la definizione di Manifesto dell'Intelligenza Artificiale.

Le idee di Turing erano tanto anticipatrici da poter sembrare poco scientifiche. Negli anni trenta, infatti, scrivere di macchine intelligenti non poteva non essere ritenuto, specialmente nel mondo dell'Accademia, un congetturare astratto, un formulare ipotesi che si sarebbero potute verificare soltanto in un lontano e del tutto ipotetico futuro<sup>1</sup>.

Al contrario, *On Computable Numbers* non solo fondava la nuova filosofia delle macchine universali, ma ne abbozzava anche la soluzione ingegneristica.

Artificiale è quello di capire la natura dell'intelligenza e che la sua contestualizzazione scientifica va fatta in dipendenza del perseguimento di tale scopo.

Altri hanno definito l'oggetto degli studi dell'Intelligenza Artificiale come quello della rappresentazione e della elaborazione di conoscenze complesse.

Altri, infine, osservando come lo scopo dell'Intelligenza Artificiale sia stato, al suo inizio, quello di capire la natura dell'Intelligenza e come non lo abbia raggiunto, si professano convinti che l'Intelligenza Artificiale simbolica debba essere ritenuta superata. Questi stessi studiosi ritengono che per poter studiare l'intelligenza, anche quella dei computer, occorre tenere in conto la biologia degli esseri umani come di ogni organismo. L'intelligenza non è programmata ma è il risultato di processi spontanei che avvengono nella specie (evoluzione biologica), nell'individuo (apprendimento) e nella comunità (cultura superindividuale).

I Direttori della Rivista hanno anche domandato agli studiosi sopra elencati quale dovrebbe essere lo statuto accademico della disciplina dell'Intelligenza Artificiale.

Taluni hanno risposto affermando che l'Intelligenza Artificiale non può costituire una disciplina ma soltanto un campo di studio di un possibile curriculum universitario. Altri hanno sostenuto la configurabilità di una laurea specialistica dedicata all'Intelligenza Artificiale. Altri hanno affermato che lo studio dell'Intelligenza Artificiale va posto all'interno dell'informatica. Altri hanno auspicato la definizione di un percorso interdisciplinare da realizzare

come curriculum interdipartimentale o comunque autonomo. Altri, infine, hanno espresso l'idea che si debba scindere la formazione in Intelligenza Artificiale in due percorsi: l'uno strettamente informatico (software intelligente) e l'altro in discipline cognitive e teorie degli algoritmi.

Dal canto loro gli Autori di questo saggio sui 70 anni del Manifesto di Turing ritengono che andrebbe istituito un corso di Laurea dedicato espressamente all'Intelligenza Artificiale.

Alla base di questo corso dovrebbero essere posti: la filosofia, l'epistemologia, la fisica, la matematica, l'informatica, la biologia, la scienza cognitiva, la neuroscienza, la semiologia.

Rilievo dovrebbe essere dato sia alla filosofia dell'Intelligenza Artificiale (e dei relativi problemi anche etici) che al diritto dell'informatica sotto vari profili: da quello delle correlazioni con l'economia della conoscenza a quello della tutela dei diritti fondamentali anche rispetto alle sperimentazioni sugli esseri umani (bioetica).

Il quadro di riferimento dell'intero corso dovrebbe essere costituito dalla storia della bimillennaria ricerca che la civiltà dell'Occidente ha sviluppato per giungere all'Intelligenza Artificiale.

<sup>1</sup> Turing non usò mai la definizione di Intelligenza Artificiale, ma si riferì alle sue macchine come capaci di esprimere intelligenza. Il termine Intelligenza Artificiale fu coniato molti anni più tardi durante un seminario tenutosi al Dartmouth College in Hanover, New Hampshire, nell'estate del 1956.

Il saggio segnò, da un lato, la fase dell'adozione, nella ricerca verso l'Intelligenza Artificiale, del moderno paradigma per il quale la conoscenza è un processo che si sviluppa attraverso ipotesi sempre provvisorie e incomplete e determinò, dall'altro lato, il definitivo abbandono dell'impostazione di Gottfried Leibniz (1646-1716) che nel Seicento aveva sostenuto che una macchina universale avrebbe potuto dare all'uomo conclusive verità e certezze, trasformando il ragionamento in calcolo<sup>2</sup>.

Diversamente da Leibniz, Turing non si proponeva di costruire uno strumento destinato a rendere possibile agli uomini il perseguimento del vero, ai filosofi la composizione delle dispute, ai magistrati l'emanazione delle sentenze e così via. Turing riteneva, invece, che fosse duplicabile in macchine automatiche la capacità della mente di organizzare razionalmente le informazioni e di elaborarle in modo logico, sequenziale, computazionale. Turing sosteneva che si potesse costruire un apparato in grado di ripetere i nostri formalismi ideativi, le nostre procedure mentali e, quindi, in grado di eseguire calcoli ed elaborazioni intelligenti delle informazioni.

Secondo Turing la logica-matematica, che sta alla base del nostro pensare razionale, permette la scrittura di linguaggi simbolici con i quali si può descrivere la realtà in termini di computabilità e

<sup>2</sup> G.W. LEIBNIZ scrisse nella sua *Dissertatio de arte combinatoria* (1666) che l'umanità avrebbe un giorno posseduto uno strumento che avrebbe accresciuto i poteri della ragione molto di più di quanto un qualsiasi strumento ottico avesse mai aiutato i poteri della vista. Leibniz, ispirandosi al logico tardomedioevale Raimondo Lullo (1235-1315), il quale aveva per primo trattato di una macchina per elaborazioni automatiche, argomentò che se si possono esprimere relazioni logiche in forma algebrica, avrebbe dovuto essere anche possibile costruire una macchina capace di risolvere equazioni logico-matematiche. A questo fine occorreva scrivere un linguaggio i cui segni servissero al medesimo scopo a cui servono i segni aritmetici rispetto ai numeri e i segni algebrici rispetto alle grandezze assunte astrattamente. Bisognava, cioè, costituire una classe di termini semplici dai quali ottenere per combinazione i termini complessi, una sorta di alfabeto dei pensieri umani col quale scrivere la *lingua characteristic*, una ideografia logica con cui eseguire il *calculus ratiocinator*, il calcolo logico-matematico. Il *calculus ratiocinator* di Leibniz avrebbe operato come un algoritmo di uso universale, sollevando la mente da faticose elaborazioni, aiutandola con esattezza e versatilità nelle più va-

rie attività. Grazie al *calculus* eseguito dalla macchina sarebbe divenuto impossibile *scrivere chimere*, ovvero commettere errori: « un ignorante o non sarà in grado di usare la macchina ovvero usandola diventerà erudito ». Quello di Leibniz era un progetto basato sulla fiducia nella capacità dell'uomo di comprendere un mondo meccanico e limitato, organizzato come un orologio, un mondo che si può smontare e ricomporre, sicché lo si può conoscere compiutamente. Secondo Leibniz, l'uomo, avvalendosi della macchina universale, avrebbe potuto scandire il ritmo delle sue elaborazioni cognitive, come fanno all'interno di un cerchio le lancette di un orologio che misurano con esattezza il tempo. Così però non è stato, perché, in seguito, quando nel Novecento la ricerca verso l'Intelligenza Artificiale giunse alla prima macchina di Turing, la filosofia della scienza era profondamente mutata nei suoi paradigmi rispetto al pensiero positivista. Per l'epistemologia del Novecento una sola cosa è certa e cioè che la scienza è sempre provvisoria ed i formalismi, i sistemi assiomatici, logici e matematici impiegati per svilupparla sono incompleti, indecidibili per definizione. Come il mondo è complesso ed infinito, così lo è anche il difficile processo di avvicinamento cognitivo ad esso.

si possono elaborare le informazioni al fine di conoscere le regolarità del mondo. La logica-matematica permette la configurazione di metafore concettuali, di strumenti cognitivi, di modi di congegnare in forme tali da poter essere esternalizzate, trasfuse e trascritte nelle macchine, *insegnate alle macchine*<sup>3</sup>. La forza del pensiero di Turing, la forza del paradigma dell'Intelligenza Artificiale stava nel suo rigore concettuale e nell'ambiziosa finalità di riuscire a far ripetere da macchine automatiche procedimenti elaborativi propri della mente umana.

## 2. LE TRE QUESTIONI DISCUSSE: COMPUTAZIONE, UNIVERSALITÀ DI IMPIEGO, DECIDIBILITÀ.

Nel suo scritto *On Computable Numbers*, Turing affermò che « *it is possible to invent a single machine which can be used to compute any computable sequence* ».

Per dimostrare la realizzabilità di tale affermazione Turing mise in relazione tra loro tre questioni filosofiche e scientifiche, proponendo per ciascuna soluzioni originali e utilizzandole per costruire la filosofia dell'Intelligenza Artificiale e disegnare l'architettura matematica ed ingegneristica delle macchine automatiche<sup>4</sup>.

La prima questione è quella della definizione di numero computabile e di processo computazionale. La seconda è quella della progettabilità di una macchina di impiego universale. La terza è quella della configurabilità o meno di una macchina universale che possa risolvere il problema della decidibilità (*Entscheidungsproblem*), proposto dal matematico David Hilbert (1862-1943) nel 1900<sup>5</sup>, rispetto alla propria tavola di istruzioni.

<sup>3</sup> A.M. TURING, *Computing Machinery and Intelligence*, in *Mind*, vol. 59, 1950. EDIZIONE ITALIANA, *La filosofia degli automi*, Bollati Boringhieri, Torino, 1965.

<sup>4</sup> A. HODGES, *Alan Turing. The Enigma*, Burnett Books, London, 1983. Edizione italiana, Bollati Boringhieri, Torino, 2006.

<sup>5</sup> Al congresso dei Matematici tenutosi a Parigi nell'anno 1900, il matematico David Hilbert pose la domanda del se fosse possibile garantire la matematica dal rischio delle contraddizioni, delle antinomie, e se fosse possibile verificare l'attendibilità delle soluzioni in base ad un apposito sistema assiomatico. Si trattava della questione detta della decisione (*Entscheidungsproblem*), ovvero della decidibilità, che fu a lungo dibattuta nella prima metà del Novecento. Hilbert si dichiarava certo della possibilità della formulazione di un procedimento applicabile a qualunque teorema

matematico, espresso in forma simbolica, per decidere sulla sua coerenza, attendibilità, verità o meno. Hilbert coniò un motto al riguardo della questione da lui sollevata: « *noi dobbiamo sapere, noi sapremo* », ma la filosofia del Novecento giunse a concludere nel senso dell'inesistenza del procedimento generale da lui ipotizzato. Quando negli anni trenta Turing esaminò la questione sollevata da Hilbert tenne conto degli studi di un altro matematico, suo contemporaneo, Kurt Gödel (1906-1978), il quale nel 1931 aveva formulato il « teorema di incompletezza ». Per questo teorema in ogni sistema formale esistono questioni che sono indecidibili, ovvero questioni che non sono dimostrabili e la cui negazione è pure indimostrabile. Tra queste questioni vi è la verifica, eseguita restando all'interno del sistema, della propria coerenza formale. Gödel osservò come un esempio di problema indecidibile si potesse

Queste tre questioni potevano sembrare senza connessione tra loro, eppure la loro trattazione contestuale diede fondamento alla filosofia della Intelligenza Artificiale e permise la descrizione della struttura di una macchina automatica di uso universale<sup>6</sup>.

Turing presentò la computabilità dei numeri — cioè di quei numeri reali le cui espressioni come decimali sono calcolabili con mezzi finiti — come rappresentativa del concetto generale di computabilità. Come la mente di un uomo, impegnata in un calcolo, applica una certa procedura, realizza un certo algoritmo, svolge una certa computazione per giungere alla soluzione di un dato problema, così una macchina può ripercorrere i passaggi fatti dalla stessa mente attraverso i diversi stati concettuali, seguendo lo stesso percorso con passi fisici. Tale computazione sarebbe stata effettuata dalla macchina usando la notazione binaria (da cui *bit*, *binary digit*) in luogo di quella decimale.

Turing riprese così l'idea che Leibniz aveva formulato nel 1679, nello scritto *De progressionem dyadica*, e cioè quella di usare per il calcolo meccanico soltanto due simboli, zero e uno, in luogo dei dieci del sistema decimale.

Il sistema binario inventato da Leibniz fu quello che Turing pensò di adottare per farne il linguaggio dei computer, così come prima di lui aveva proposto anche un altro matematico che aveva progettato nell'Ottocento una macchina automatica, Charles Babbage (1791-1871)<sup>7</sup>.

trarre dal paradosso (termine che sta per « contrario alle aspettative ») del mentitore. Si tratta di un semplice, ma efficace esempio di indecidibilità logica interna a un sistema. Fu Protagora (480-411 a.C.) il filosofo greco che sollevò la questione del paradosso del mentitore con questo quesito: « Il filosofo cretese Epimenide ebbe a dire: tutti i cretesi sono bugiardi. Epimenide disse la verità? » Se un cretese asserisce che tutti i cretesi sono mentitori, formula un'asserzione circolare, un'asserzione che contraddice se stessa. Infatti, stando alla proposizione, diventa insolubile il problema del se il cretese Epimenide disse la verità, oppure no, quando affermò che tutti i cretesi mentono. Siamo di fronte a un paradosso, un paradosso che è autoreferenziale in quanto l'autore dell'affermazione include se stesso nell'insieme degli abitanti (mentitori) di Creta. Per uscire dal paradosso occorre superare la contraddizione ricorrendo ad un sistema assiomatico più ampio, più coerente, più euristico. L'indagine sulla decidibilità proposta da Hilbert giunse, così, alla conclusione negativa formulata da Gödel nel 1931 e da allora venne accettata l'idea che l'autoreferen-

zialità assiomatica è imprescindibile nel modo di elaborare della mente umana, il che causa limiti cognitivi che dobbiamo sforzarci di spostare sempre più avanti.

<sup>6</sup> D. LEAVITT, *L'uomo che sapeva troppo. Alan Turing e l'invenzione del computer*, Codice Edizioni, Torino, 2007.

<sup>7</sup> Charles Babbage, professore di matematica a Cambridge, realizzò soltanto alcune parti del suo progetto di macchina automatica (alla quale diede il nome di *Analytical Engine*), ma si trattò di un progetto ricco di intuizioni teoriche ed ingegneristiche. L'idea innovativa di Babbage fu che la sua macchina avrebbe dovuto essere in grado di automatizzare qualsiasi operazione matematica. Per di più il meccanismo avrebbe potuto eseguire compiti non solo in base a qualsivoglia istruzione, ma anche in base a qualsivoglia tipologia di simboli, e ciò in quanto Babbage riteneva che bisognasse meccanizzare non già una determinata operazione, ma il controllo logico dell'organizzazione dell'aritmetica, o di qualsivoglia altro sistema simbolico. Per realizzare tale controllo la macchina analitica avrebbe potuto operare di volta in volta scelte di varianti (con-

Babbage concepì il primo calcolatore digitale automatico ponendosi al culmine di una lunga ricerca iniziata dai matematici e dai filosofi greci, una bimillenaria ricerca che dall'apparato di Antikithera<sup>8</sup>, alla macchina logica di Lullo<sup>9</sup>, agli strumenti del Rinascimento e alle calcolatrici del Secolo dei Lumi aveva sempre avuto come base la logica-matematica.

Turing ritenne che il sistema binario di Leibniz e di Babbage fosse funzionale al modo di operare delle macchine, macchine che allora, negli anni trenta, al tempo del Manifesto, avrebbero potuto essere soltanto elettromeccaniche. In seguito, negli anni quaranta, quando Turing giunse a costruire le prime macchine elettroniche, tale scelta si espresse a pieno nella sua utilità: con l'elettronica e impiegando il sistema binario — e non quello decimale

*ditional branching*) qualora avesse constatato l'esistenza delle condizioni logiche che ne rendessero possibile l'adozione. La macchina di Babbage avrebbe, però, avuto insuperabili limiti di funzionamento. Si sarebbe trattato, infatti, di un artefatto (azionato dal vapore e strutturato con ingranaggi metallici) di assai problematico, se non impossibile, funzionamento, incomparabilmente lontano dall'efficienza degli odierni computer basati sull'elettronica. Come scrisse Ada Lovelace (1815-1852), figlia di Lord Byron, studiosa di matematica, Babbage aveva pensato un meccanismo in grado di combinare tra loro simboli generali in successione di illimitata varietà e lunghezza, stabilendo un nesso tra processi mentali astratti ed operazioni materiali, un « *tramite tra la materia e i processi mentali* ». Per la sua macchina Babbage aveva recuperato, un secolo prima di Turing, l'idea di Leibniz di usare la notazione binaria in luogo di quella decimale. Secondo Babbage la macchina avrebbe calcolato con due soli simboli (zero e uno) conseguendo il vantaggio di azionare solo due funzioni automatiche. A Londra nel Museo delle Scienze è conservato quello che fu realizzato della macchina analitica, l'inizio dell'incompiuto progetto di Babbage che fu esaminato dal giovane Turing negli anni trenta. Babbage aveva dato impulso alla ricerca, progettando le funzioni algebriche della macchina, senza però poterne configurare la memoria. Con la memoria incorporata la macchina universale elettronica sarebbe stata, prima che un apparato meccanico, un contenitore ideale di funzioni matematiche, un progetto di natura essenzialmente concettuale, filosofica.

<sup>8</sup> Nell'anno 1900 fu ripescato dalle acque dell'isola greca di Antikithera un ap-

parato risalente al secondo secolo a.C. (oggi presso il Museo Archeologico nazionale di Atene). A partire dal residuo metallico ritrovato è stata ipotizzata la intera struttura di tale apparato e si è giunti alla conclusione che si trattasse di uno strumento per rilevazioni astronomiche formato da vari ingranaggi la cui base stava in un rotismo principale (un meccanismo differenziale, epicicloidale) che permetteva di ottenere diverse velocità di movimento in relazione alle diverse velocità di rotazione dei corpi celesti. Si ritiene che con questo strumento si potessero calcolare i mesi, gli equinozi, il sorgere del Sole, le fasi della Luna e i movimenti dei cinque pianeti allora conosciuti. In ogni caso è certo che la progettazione del meccanismo di Antikithera presupponeva la conoscenza del sistema solare, ma anche una capacità quasi moderna dell'uso della logica-matematica.

<sup>9</sup> Il catalano Raimondo Lullo (1235-1315), francescano, professore di logica a Parigi, a Montpellier e a Napoli, scrisse un trattato (*Ars brevis ad absolvendam omnium artium encyclopaediam*) nel quale affermava che integrando la logica con la matematica si sarebbe potuto automatizzare il ragionamento e risolvere ogni problema. Lullo ideò una « macchina per pensare », un meccanismo composto da tre cerchi concentrici ognuno diviso in 15-20 riquadri. La macchina avrebbe avuto funzioni tali da permettere, una volta definiti i principi di tutte le scienze e date le opportune premesse, di raggiungere la verità in ogni campo e di risolvere ogni problema. Il meccanismo ipotizzato e descritto da Lullo sarebbe stato basato sugli stessi criteri con i quali era stato costruito l'apparato astronomico di Antikithera, in quanto strutturato secondo la logica-matematica.

— fu possibile aumentare incomparabilmente la velocità di calcolo e di elaborazione.

Turing comprese che le macchine, realizzando sequenze per mezzo della successione di posizioni di acceso-spento, sarebbero state in grado di gestire lunghe stringhe di simboli composte di innumerevoli zero e uno.

Le macchine avrebbero operato con la velocità dei loro circuiti elettrici, così come fa la mente con gli impulsi chimico-elettrici che regolano le sinapsi neuronali.

I calcolatori, assumendo diverse, successive configurazioni, avrebbero realizzato cambiamenti di stato, compiendo passi meccanici uno dopo l'altro, sequenzialmente, così come la mente si sposta da uno stato mentale, elaborativo, computazionale all'altro; passando da una configurazione all'altra avrebbero eseguito automaticamente e in termini fisici il tracciato seguito dalla mente in termini ideali, in termini di azione del pensare.

Un uomo che conta sino a dieci chiudendo una dopo l'altra le dita delle mani esegue nello stesso tempo una computazione in forma sia mentale che fisica, sia ideativa che meccanica.

Modificando i loro stati fisici le macchine avrebbero potuto elaborare in base a tavole di istruzioni che le avrebbero messe in grado di eseguire qualsiasi specifica computazione raggiungibile con quelle stesse istruzioni.

Quella di Turing sarebbe, dunque, stata una macchina di uso tendenzialmente universale. Le si sarebbe potuto, infatti, insegnare, come si fa ad un bambino, la logica e le più varie procedure mettendola in grado, all'interno del sistema adottato dal programmatore, di eseguire qualsiasi calcolo, di realizzare qualsiasi elaborazione.

Così non sarebbe più stato necessario costruire ogni volta un apparato specializzato per fare soltanto un certo particolare calcolo o porre in essere soltanto una data elaborazione.

La macchina di Turing avrebbe avuto, dunque, un utilizzo universale perché sarebbe stata una macchina logica ed analitica, sarebbe stata duttile, in grado di apprendere e capace di eseguire qualsiasi operazione, proprio come fa la mente di un bravo studente versato nella matematica.

La terza questione affrontata da Turing consisteva nella domanda sul se la macchina avrebbe potuto, o meno, verificare la tenuta logica e cognitiva di qualsivoglia sistema espresso in termini simbolici e, quindi, anche del sistema in base al quale fosse stata scritta la sua tavola di istruzioni. Turing affrontava cioè la questione del programma di David Hilbert, seguendo i suggerimenti che aveva ricevuto dal matematico Maxwell Newman (1897-1984), di cui lo stesso Turing era stato allievo presso l'Università di Cambridge<sup>10</sup>.

<sup>10</sup> Maxwell Newman fu colui che indicò il suo giovane allievo Turing a porre

Si trattava della questione della decidibilità, l'*Entscheidungsproblem*, ovvero della questione della realizzabilità del programma teorico volto a individuare un metodo generale per dimostrare la coerenza, la non contraddittorietà e la completezza delle teorie matematiche fondamentali.

Newman aveva interpretato l'ipotesi di Hilbert (descritta come l'ipotesi di identificare un « metodo definito ») nel senso di « processo meccanico », un senso, un'accezione che non coincideva con la dizione usata dallo stesso Hilbert.

Accogliendo la sollecitazione di Newman, ed anzi sviluppandola, Turing attribuì al termine « processo meccanico » il significato di procedimento attuato da una macchina e giunse a concludere che la costruzione di una macchina capace di verificare la verità di qualunque teorema espresso in forma simbolica, la validità di ogni sistema assiomatico, non sarebbe mai stata possibile.

Turing asserì che la macchina avrebbe dato risposte all'interno del suo sistema assiomatico e non avrebbe potuto essere, quindi, un ente infallibile e capace di rispondere ad ogni domanda, e, quindi, anche a quella concernente la completezza e l'esattezza delle soluzioni da lei stessa date — o non date — a qualunque problema, soluzioni che una volta ottenute avrebbero fatto fermare la sua attività elaborativa.

---

attenzione alla divisibilità logica delle procedure della mente in vista di una loro possibile riproduzione all'interno di un processo meccanico. Questa influenza scientifica e filosofica iniziò quando Turing seguì le lezioni di Newman a Cambridge nel 1935 e nel 1936, al tempo della stesura del suo scritto sui numeri computabili, lezioni che concernevano i fondamenti della matematica. Studiando una ipotesi sottopostagli da Newman, Turing descrisse nel Manifesto la sua macchina filosofica e nell'ambito di tale descrizione confutò la tesi di Hilbert, concordando a proposito della questione della decidibilità con la negativa di Gödel. Turing terminò di scrivere il suo saggio nel 1936, saggio che venne letto da Newman e che fu pubblicato nel 1937 sulla rivista della *London Mathematical Society*. Newman segnalò a Turing che un logico americano, Alonzo Church (1903-1995), aveva a sua volta pubblicato nel 1936 a Princeton un articolo nel quale veniva trattata la questione della decidibilità dei teoremi matematici in termini simili a quelli di Turing. Convinto della opportunità che Turing lavorasse con Church, Newman inviò allo stesso Church l'articolo di Turing con una lettera nella quale scriveva: « ringrazio per l'estratto del suo (di

Church) articolo nel quale vengono definiti i numeri calcolabili dimostrando che l'*Entscheidungsproblem* per la logica di Hilbert è insolubile ». Circa il lavoro di Turing, Newman precisava, nella stessa lettera a Church, che la sua elaborazione era stata assolutamente originale e indipendente, senza la supervisione o il sostegno critico di alcuno. Church lesse lo scritto di Turing e rispose a Newman in questi termini: « la nozione (della indecidibilità) di Turing ha il vantaggio di rendere immediatamente evidente l'identificazione con la computabilità effettiva senza la necessità di dimostrare teoremi preliminari ». Newman chiese per Turing una borsa di studio all'Università di Princeton, borsa che fu concessa e che gli permise di trascorrere due anni in quel laboratorio scientifico dove insegnavano i più illustri scienziati. Church pubblicò una recensione del lavoro di Turing sul *Journal of Symbolic Logic* di Princeton e in questa recensione coniò per la prima volta la definizione di « macchina di Turing ». Una definizione che divenne il logo del programma della Intelligenza Artificiale. Soltanto dieci anni dopo la formulazione della sua ipotesi filosofica, la macchina di Turing divenne — prodigiosamente — realtà.

Nessuna macchina avrebbe potuto verificare la correttezza della propria tavola di istruzioni basata su di un dato sistema assiomatico. Per ogni macchina sarebbero esistiti problemi indecidibili intorno ai quali si sarebbe inutilmente arrovellata senza giungere a fermarsi, senza giungere a dare risposta (*halting problem*).

Tra questi problemi che la macchina non avrebbe potuto risolvere c'era anche quello della coerenza ed esattezza del proprio sistema di regole logico-matematiche.

Per poter verificare la coerenza e la non contraddittorietà del sistema assiomatico di una data macchina sarebbe stato necessario poterne costruire un'altra più potente e dotata di una più adeguata tavola di istruzioni, di una tavola di istruzioni con un sistema assiomatico più euristico, più esteso nella sua validità cognitiva.

E per sottoporre ad esame il sistema logico-matematico di questa seconda, più potente, macchina se ne sarebbe dovuta poter costruire una terza ancora più potente, e così via<sup>11</sup>.

### 3. LA NATURA SEQUENZIALE E COMPUTAZIONALE DEI PROCESSI MENTALI ESTERNALIZZABILI NELLA MACCHINA DI TURING.

Dunque la macchina di Turing non sarebbe stata né superumana né subumana; avrebbe avuto gli stessi limiti e la stessa fallibilità della mente dell'uomo. La sua intelligenza si sarebbe manifestata, in modo simile a quella dell'uomo, con la capacità di imparare, non con quella di appurare verità assolute.

La forza teorica e progettuale del pensiero di Turing stava nel ricondurre l'azione del pensare ad un procedimento sequenziale e computazionale, esternalizzabile nella macchina. Turing si riferì alla attività ideativa dell'uomo ricostruendo l'elementare processo di elaborazione di una mente semplice come quella di un contabile (di un *computer*) intento a svolgere compiti di nessuna complessità.

Così nel suo scritto *On Computable Numbers* del 1937 Turing elaborò la sua filosofia delle macchine intelligenti, una filosofia che gettava un ponte tra i simboli astratti e il mondo fisico, e ciò era reso possibile dalla conoscenza dei procedimenti algoritmici del pensiero, dalla profonda comprensione dei processi elaborativi della mente<sup>12</sup>.

Scriveva Turing: « *immaginiamo che le operazioni del calcolatore (umano) vengano suddivise in operazioni semplici, tanto elementari da rendere difficile immaginarle ulteriormente divise.*

<sup>11</sup> T. NUMERICO, *Alan Turing e l'intelligenza delle macchine*, Franco Angeli, Milano, 2005.

<sup>12</sup> A. HODGES, *Turing: A Natural Philosopher*, Phoenix, London, 1997.

*Ciascuna di tali operazioni consiste in un cambiamento del sistema fisico. Conosciamo lo stato del sistema se sapremo quali di questi simboli sono osservati dal contabile e se conosceremo lo stato della sua mente. Possiamo supporre che in un'operazione semplice non venga mai alterato più di un simbolo. Ogni altro cambiamento può essere suddiviso in cambiamenti semplici. [...] È sempre possibile che il contabile interrompa all'improvviso il suo lavoro, si alzi e se ne vada non pensandoci più e lo riprenda più tardi. Se fa questo, deve lasciare un biglietto di istruzioni in cui si spiega come fare per continuare il lavoro. Il biglietto è la interfaccia di uno stato della mente. Supponiamo che il contabile lavori molto saltuariamente, così da non fare mai più di un passo a ogni seduta. Il biglietto di istruzioni dovrà metterlo in grado di operare un passo e scrivere il biglietto successivo. In questo modo lo stato di avanzamento del calcolo, in un qualsiasi stadio del lavoro, è completamente determinato dal biglietto di istruzioni».*

Questa era la descrizione che Turing faceva, senza retorica, senza sussiegueo accademico, senza enfasi, del procedimento di elaborazione della mente, una descrizione della computazione e del suo sezionamento algoritmico che ne avrebbe reso possibile la sua enucleazione e la sua meccanizzazione, avviando la scienza dei computer verso la civiltà delle macchine intelligenti.

Insieme al sezionamento algoritmico del processo ideativo, l'importanza teorica del Manifesto risiedeva nella correlazione tra stati della mente e stati fisici della macchina: ogni passo mentale, ogni stato ideativo avrebbe potuto essere trasformato nelle modificazioni del posizionamento fisico della macchina.

Mente e macchina sarebbero state l'una lo specchio cognitivo dell'altra, l'una il progettista e l'altra la calcolatrice, ma calcolatrice nel senso più esteso e filosoficamente pregnante del termine<sup>13</sup>.

Oltre all'adozione del sistema binario che era stato ideato nel Seicento da Leibniz (e che poi era stato dimenticato sino all'Ottocento, sino a Babbage) Turing si ispirò anche alla lingua filosofica, logico-matematica, che lo stesso Leibniz aveva pensato per la sua macchina universale.

C'è, infatti, analogia tra il concetto di computazione di Turing e l'idea di Leibniz della possibilità di scrivere una lingua filosofica, la *lingua characteristic*, da usare mediante la macchina universale.

Leibniz immaginava che questa lingua sarebbe derivata dall'analisi e dalla scomposizione dei pensieri, dei concetti, dei principi, dei formalismi dell'umana cultura.

---

<sup>13</sup> R. PENROSE, *Ombre sulla mente*, Mondadori, Milano, 1998.

Eseguendo questa scomposizione si sarebbe potuto scrivere un alfabeto logico-matematico costituito da nozioni essenziali non ulteriormente riducibili, ovverosia non più divisibili in sotto-definizioni.

Secondo Leibniz, elaborando per mezzo dei segni di questa *lingua caratteristica* e usando la macchina, si sarebbe trasformato il ragionamento in calcolo e l'uomo avrebbe potuto perseguire certezze e verità.

Turing dal canto suo e in modo analogo proponeva nel Manifesto di analizzare e scomporre non già gli esiti del pensiero, ma l'azione stessa del pensare nei suoi passi procedurali e computazionali sino al punto di poterli esternalizzare in apparati meccanici e automatici, di poterli far ripetere dalle macchine automatiche.

Le macchine sarebbero state capaci di imparare e ripetere le procedure del pensare ed applicarle per le loro elaborazioni. Tra il programmatore e la macchina sarebbe intercorso un rapporto simile a quello tra insegnante e discepolo.

L'approccio di Leibniz, nel proporre profeticamente il suo progetto di macchina universale, era figlio dell'ottimismo filosofico del Secolo dei Lumi. L'impostazione di Turing nasceva, invece, dalla epistemologia del Novecento e dalla sua convinzione che la conoscenza è un processo, difficile e provvisorio (però sempre più vicino al vero), indirizzato alla comprensione dell'intera realtà. Questa crescente comprensione della realtà sarebbe stata realizzata usando la lingua universale rappresentata dalla matematica, la lingua con la quale la struttura biologica cognitiva della mente si interfaccia con la struttura della realtà fisica<sup>14</sup>.

#### 4. ALLA BASE DELL'INTELLIGENZA ARTIFICIALE STA LA LOGICA-MATEMATICA.

Turing sin dai suoi primi anni di studio si era interessato di fisica quantistica e di biologia<sup>15</sup>.

Se, da un lato, l'idea di una base quantistica dei processi mentali gli serviva per tentare di sostenere il libero arbitrio, dell'altro lato la biologia e in particolare la morfogenesi gli avevano dato il convincimento della sequenzialità di ogni processo organico. Di qui l'idea di Turing della natura sequenziale del funzionamento del cervello e, quindi, della mente. Secondo Turing la natura sequenziale del modo di procedere del pensiero affondava le sue

<sup>14</sup> F. PATRAS, *Il pensiero matematico contemporaneo*, Bollati Boringhieri, Torino, 2006.

*of Morphogenesis*, in *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 237, 1952.

<sup>15</sup> A.M. TURING, *The Chemical Basis*

più profonde radici nella struttura biologica dell'uomo, così come anche nella struttura biologica di ogni specie vivente.

Ciò che costituisce la differenza tra la materia organica e quella inorganica, tra ciò che vive e il mondo inerte, sta nel programma genetico proprio di ogni essere vivente.

Questo programma da un lato spinge ogni creatura ad adattarsi sempre meglio all'ambiente e, dall'altro lato, assicura l'invarianza generazionale: questa invarianza è regolata da algoritmi genetici di tipo sequenziale<sup>16</sup>.

La macchina di Turing avrebbe avuto, dunque, natura parabiologica in quanto capace sia di invarianza che di adattabilità.

Il Manifesto dell'Intelligenza Artificiale del 1937 ha rappresentato l'esito di una complessa crescita culturale, scientifica e filosofica, iniziata nell'Ottocento con Darwin e poi proseguita con la biologia, la fisica, la matematica del Novecento, e molte altre discipline.

Ma le più lontane origini delle macchine di Turing, le più profonde origini culturali dei computer vanno ricercate nell'incontro tra la logica e la matematica avvenuto nella filosofia della Grecia di Aristotele. Tale incontro si rinnovò sul finire del medioevo e si sviluppò durante il Rinascimento col confluire della logica scolastica e della matematica araba nel contesto della ricerca scientifica sperimentale<sup>17</sup>.

La logica e la matematica stabiliscono la base assiomatica del ragionamento e definiscono le regole dello sviluppo razionale della conoscenza. Tra il procedimento cognitivo e la realtà sussiste una relazione biunivoca: la realtà si manifesta con informazioni sulle proprie regolarità fenomeniche e la mente del ricercatore organizza e sintetizza — per mezzo della logica-matematica — tali regolarità in termini di leggi scientifiche<sup>18</sup>.

La filosofia positivista liberò le teorie fisiche dalle ipotesi metafisiche che vedevano in esse solo modelli della realtà.

Oggi la filosofia della matematica tende a sottolineare il ruolo della logica nella definizione dei teoremi (filosofia deduttivistica della matematica). Quello che è rilevante della logica, anche di quella tradizionale, per la matematica, non sono le singole tautologie o le regole di inferenza, ma è la concezione stessa della logica, o dell'inferenza logica. « *La scoperta della logica formale è una delle più grandi scoperte relative alle capacità cognitive umane*<sup>19</sup> ».

Il nostro tempo è un tempo d'incertezza di principi, di instabilità dei fondamenti. In matematica si usa il termine di crisi dei fon-

<sup>16</sup> J. SEARLE, *Mente, cervello, intelligenza*, Bompiani, Milano, 1988.

<sup>17</sup> G. LOLLI, *Filosofia della matematica*, il Mulino, Bologna, 2002.

<sup>18</sup> W. BECHTEL, A. ABRAHAMSEN, G.

GRAHAM, *Menti, cervelli e calcolatori. Storia della scienza cognitiva*, Editori Laterza, Bari, 2004.

<sup>19</sup> G. LOLLI, *Da Euclide a Gödel*, il Mulino, Bologna, 2004.

damenti, in fisica si parla di crollo della rappresentazione dell'universo.

Molti concetti che venivano ritenuti evidenti da secoli appaiono al moderno ricercatore limitati, incompleti, errati.

Lo sviluppo della scienza si esprime con successive revisioni e adeguamenti della sua struttura logica<sup>20</sup>.

#### 5. DAL MANIFESTO DEL 1937 AL COLOSSUS DEL 1943-1945 E AL MARK I DEL 1948. LA STORIA DELL'INTELLIGENZA ARTIFICIALE HA INIZIO COL SAGGIO DI ALAN MATHISON TURING.

L'ipotesi del Manifesto trovò la sua verifica attraverso le realizzazioni ingegneristiche degli anni tra il 1939 e il 1945, quando Turing lasciò l'insegnamento a Cambridge per andare a lavorare presso il GCCS (*Government Code and Cypher School*), il Centro dei servizi segreti inglesi di decodifica delle comunicazioni criptate dell'esercito tedesco, che aveva sede a Bletchley Park in una vittoriana villa di campagna a nord di Londra.

Durante quegli anni di guerra, proprio a Bletchley Park fu ottenuto un importante risultato grazie alla sintesi tra la filosofia della Intelligenza Artificiale e l'impostazione ingegneristica della macchina universale. Questo risultato fu rappresentato dalla costruzione di una enorme macchina denominata Colossus, passata alla storia come la prima calcolatrice elettronica.

Il Colossus venne progettato e costruito da Turing in collaborazione con Maxwell Newman (che raggiunse Turing al Centro lasciando anche lui l'insegnamento a Cambridge, alcuni anni dopo lo stesso Turing) per essere usato nelle attività di controspionaggio.

Proprio a Bletchley Park, nel 1943, i due studiosi realizzarono il prototipo di questa ingente macchina non più elettromeccanica, ma per la prima volta elettronica e parzialmente programmabile. Quello dall'elettromeccanica all'elettronica fu un passaggio decisivo nella strada verso la costruzione del primo computer della storia.

Nelle macchine elettromeccaniche i calcoli avvenivano per via meccanica attraverso contatti elettrici, con grande lentezza e difficoltà di funzionamento. L'unità elementare era costituita da relè con massa di un grammo e con tempo di attivazione di alcuni millesimi di secondo. Invece nelle macchine elettroniche le parti in moto sono elettroni ( $10^{-27}$  grammi) con tempi di attivazione infinitamente più brevi e con efficacia di funzionamento incomparabilmente maggiore.

<sup>20</sup> W. PAULI, *Fisica e conoscenza*, Boringhieri, Torino, 2007.

L'innovativa macchina denominata Colossus fu realizzata nel pieno del conflitto mondiale per le necessità di difesa delle forze alleate ed in particolare della flotta che dall'America portava aiuti di ogni genere all'Inghilterra assediata, flotta che era continuamente attaccata dai sommergibili tedeschi.

Questa necessità bellica catalizzò una grande sinergia scientifica e ingegneristica tra un elevato numero di studiosi e specialisti di varie discipline (provenienti dalle Università e dalla società civile) riuniti nel Centro di Bletchley Park.

All'interno di questo contesto fortemente interdisciplinare, Turing, con il suo Manifesto e con i suoi successivi studi, concorse in modo determinante a dare l'avvio ad un processo inventivo e tecnologico che in seguito non si sarebbe più fermato, ed anzi avrebbe costantemente acquistato velocità di sviluppo.

Dopo l'esperienza di Bletchley Park, tre anni dopo l'ultima versione del Colossus del 1945, sarebbe stata costruita nel 1948 presso l'Università di Manchester la prima macchina elettronica con memoria incorporata e programmabile, il primo computer universale della storia che fu denominato Mark 1.

Sia il Colossus che il Mark 1 furono il frutto della collaborazione tra Turing e Newman. Alla progettazione e costruzione del Colossus contribuirono, con i due Autori, anche matematici, ingegneri e tecnici scelti nella folta e variegata comunità di ricercatori del Centro di Bletchley Park. Ed anche per la costruzione del Mark 1 presso l'Università di Manchester Turing e Newman si avvalsero della collaborazione di matematici, ingegneri e tecnici con i quali avevano già lavorato nella stessa Bletchley Park.

Fu così che dopo la fine della seconda guerra mondiale le tecniche di elaborazione elettronica delle informazioni vennero trasferite dall'ambito militare a quello civile.

Nessuno avrebbe potuto immaginare negli anni quaranta che nel volgere di poco tempo l'elettronica avrebbe permesso la costruzione di macchine che sostituiscono non tanto il lavoro manuale quanto quello intellettuale « *in misura e in forme sempre più estese e sempre più inquietanti*<sup>21</sup> ».

Eppure, sotto la spinta delle necessità di difesa nel corso del secondo conflitto mondiale, lo straordinario programma filosofico e ingegneristico del Manifesto dell'Intelligenza Artificiale del 1937 trovò — sorprendentemente — pratica realizzazione dopo soli dieci anni dalla sua formulazione.

L'Intelligenza Artificiale e i computer stanno oggi cambiando il modo di produrre e stanno creando le condizioni per il venirsi a formare di una nuova società con una nuova sovrastruttura ideale.

---

<sup>21</sup> M.G. LOSANO, *Storie di automi*, Einaudi, Torino, 1990.

Sta nascendo la civiltà del futuro, la civiltà delle macchine intelligenti, la cui storia viene fatta iniziare da molti studiosi a partire da un famoso seminario tenutosi al Dartmouth College in Hanover, New Hampshire, nell'estate del 1956, cinquanta anni or sono, un seminario che ha rappresentato uno storico passaggio nello sviluppo dell'Intelligenza Artificiale.

Per ottenere il finanziamento necessario alla organizzazione di quel seminario, i promotori ne descrissero l'oggetto in questi termini: « *lo studio dell'Intelligenza Artificiale sulla base della congettura che, in linea di principio, ogni aspetto dell'apprendimento o di qualsiasi altra caratteristica dell'intelligenza possa venir descritto in modo così preciso da mettere una macchina in grado di simularlo*<sup>22</sup> ».

Peraltro, a nostro avviso, piuttosto che dal seminario del Dartmouth College del 1956 la storia delle macchine intelligenti può, forse più motivatamente, essere fatta iniziare dalla pubblicazione del Manifesto di Turing nel 1937, venti anni prima, tanto più che proprio l'impostazione dello stesso Manifesto portò poco dopo il suo Autore alla costruzione del primo computer elettronico con memoria incorporata.

Il Manifesto del 1937 ha rappresentato la base teorica ed ingegneristica dei computer, la cui costruzione passò nel volgere di pochi anni dai prototipi alle produzioni di serie su base industriale.

Nella seconda metà dello scorso secolo, dopo la seconda guerra mondiale, ha avuto così inizio un vorticoso progresso scientifico e produttivo per effetto del quale la società umana sta cambiando in modo straordinariamente più veloce e più profondo di quanto non è avvenuto durante tutti i suoi precedenti diecimila anni.

La sempre maggiore diffusione, l'infittirsi delle interconnessioni, l'espandersi delle reti, lo sviluppo di tipo parabiologico delle macchine intelligenti, rappresentano qualcosa di mai visto nella storia umana.

La potenza dei supercomputer sta per raggiungere quella della mente dell'uomo.

Nei prossimi decenni, con l'ulteriore loro miniaturizzazione per mezzo della costruzione di chip nanotecnologici, le macchine di Turing esprimeranno grandi capacità elaborative. Si stanno progettando inoltre chip bionanotecnologici, e si stanno studiando futuribili chip quantistici che potrebbero esprimere straordinarie potenze, velocità e complessità elaborative.

Per effetto della sua crescita cognitiva la civiltà della conoscenza (la civiltà delle macchine intelligenti) segnerà il passaggio dall'era dell'*homo sapiens sapiens* a quella dell'uomo bioinformatico la cui

---

<sup>22</sup> *Sistemi Intelligenti* Rivista quadrimestrale di scienze cognitive e intelligenza artificiale, il Mulino, Bologna, 3 dicembre 2006.

scienza riuscirà a comprendere infiniti aspetti della materia inerte e di quella biologica impiegando supercomputer e reti di computer.

Il nuovo modo di produrre di questa società delle macchine intelligenti darà luogo a molti problemi di natura giuridica, sociale, istituzionale, costituzionale ed etica.

Questi problemi, assolutamente nuovi, deriveranno dal venir meno dell'organizzazione territoriale delle istituzioni politiche e dal superamento delle suddivisioni e contrapposizioni tra classi di produttori. E dal venirsi a formare di una struttura sociale non più competitiva ma cooperativa.

Necessariamente la civiltà del nuovo millennio dovrà sapersi dare nuove costituzioni e nuove regole.

La specie umana sarà dedicata a straordinarie sperimentazioni sino ad apprestarsi a colonizzare altri pianeti.

Il motore dell'enorme, e sempre più veloce e complesso, avanzamento scientifico sarà costituito dalle macchine intelligenti.

Quella dell'Intelligenza Artificiale è, dunque, la questione filosofica iscritta all'ordine del giorno del nostro tempo.

Il Manifesto di Turing ne ha impostato i termini, dando l'avvio ad una crescita cognitiva, scientifica e tecnologica indirizzata verso l'infinito.