

Le radici storiche dell'informatica
(Breve storia della Logica da Aristotele a G. Boole)
prof. Claudio Mola

L'introduzione diffusiva dell'informatica e delle tecniche informatiche ha cambiato, negli ultimi anni, non solo la prospettiva in cui avviene l'offerta e l'acquisizione dei saperi, ma la traiettoria stessa della ricerca. Basti un esempio. Fino a qualche tempo fa, costituiva, spesso, un risultato la dimostrazione dell'esistenza della soluzione ad un problema matematico; la determinazione della soluzione era un fatto secondario, un traguardo spesso irraggiungibile per l'onerosità del calcolo. L'utilizzazione degli elaboratori, con la relativa possibilità di una ripetizione eguale di operazioni, sposta, invece, la luce sulla *computazionalità* di una procedura mirante alla cattura della soluzione, mettendo in gioco una variabile nuova, il tempo.

Caso più unico che raro, l'informatica nasce come tecnica, diviene una scienza, con un suo corpo teorico, una sua assiomatizzazione.

In quanto scienza e non *tecnè*, essa non è più solo un mezzo operativo ma rappresenta la risposta ad una esigenza dello spirito: *il dominio della conoscenza*.

Proprio in quest'ansia, le radici storiche dell'informatica, si intrecciano con quelle di una disciplina di definizione ben più antica, la Logica.

Una rapida rassegna di Storia della Logica non vuole, dunque, soltanto aiutare la riscoperta di una sistemazione temporale di fatti, nozioni e personaggi che hanno determinato l'evoluzione del Pensiero, accompagnato le sue crisi profonde e fertili di conseguenze per la ricerca, ma vuole fornire uno spunto di riflessione sul sogno segreto, talvolta inconsapevole, del controllo completo del Sapere, della generazione *in vitro* della conoscenza.

Può una macchina pensare? E' un interrogativo tanto più inquietante quanto più la complessità della macchina ci induce a dimenticare che si tratta di un prodotto umano e d'altra parte la risposta non è scontata

se si sposta l'indagine sul livello dell'ontologia del pensiero. La possibilità della conduzione automatica di un ragionamento suggerisce una percezione di completezza dello Scibile, sembra che l'idea della conoscenza *non conclusa* sia dovuta ad una contaminazione delle facoltà razionali: con la macchina, l'intelligenza sfugge alle maree delle emozioni e si muove pura ed austera, secondo leggi immutabili tracciando la mappa completa del Sapere; ciò che è infinito nell'uomo appare finito fuori dell'uomo, ciò che non è dominabile appare, infine, dominabile.

LA LOGICA GRECA

Una qualsiasi delineazione, seppur breve, di storia della logica non può prescindere da Aristotele e ciò non perché prima di Aristotele non ci sia stata una Scuola di pensiero che abbia affrontato problemi di logica. Tutt'altro: la Scuola megarica e quella stoica sono cronologicamente antecedenti alla Scuola aristotelica, ma è con il filosofo di Stagira che la logica acquista la connotazione di scienza e di scienza formale.

Non conoscenza, dunque, ma scienza ossia, con definizione scolastica successiva, *cognitio rei per causas*, conoscenza delle cose attraverso l'analisi delle cause o, più in generale, conoscenza dedotta per fasi comprovate, e la deduzione sarà il processo inferenziale per eccellenza, portato in auge nell'Alto Medioevo e, solo in tempi relativamente recenti, affiancato ai metodi dell'inferenza induttiva.

In quanto scienza la logica ha un oggetto di studio ed è il "pensato", il prodotto di un atto intellettuale. E' detto, infatti, che essa studia l'*ens secundae intentionis* ossia non l'ente e neppure il pensato in quanto rappresentazione diretta dell'ente (*intentio prima*), ma il pensato in quanto pensato con le proprietà che gli competono in quanto *actus rationis*.

Proprio in quanto svuotato di ogni riferimento diretto con l'ente, il pensato diviene forma che si inserisce secondo leggi precise, in ragione delle sue caratteristiche, nella costruzione di un percorso inferenziale corretto.

La correttezza di un ragionamento scaturisce dal rispetto di regole sintattiche e non è comprovata dalla verifica di risultati particolari. La separazione del livello sintattico da quello semantico, che avviene di fatto anche nella diversa collocazione negli scritti esoterici (*Analitici primi ed Analitici secondi*), introduce palesemente il concetto di variabile e farà nascere negli intelletti più fervidi del XII e XIII secolo l'idea di una automatizzazione del ragionamento spingendo alla costruzione di primitive ma ingegnosissime macchine per la conduzione dell'inferenza.

La liberazione dal contenuto avviene in Aristotele attraverso uno studio attento del linguaggio. Pur limitando l'analisi alle sole proposizioni semplici ed assertorie, il filosofo individua nella

costituzione degli enunciati una identità strutturale in cui le variabili soggetto e predicato assumono valori appartenenti a classi predefinite: le *categorie*.

Chiunque abbia conoscenza anche minima di programmazione non resiste alla suggestione di un collegamento con la definizione di *tipo*.

Come in ogni programma corretto tutte le variabili devono risultare implicitamente o esplicitamente definite in relazione al tipo, ossia all'insieme dei valori assumibili, in quanto risultano dipendenti dal tipo le operazioni consentite, così l'intelletto, per inferire, deve operare su giudizi corretti, ossia su giudizi in cui siano chiaramente definiti il soggetto e le proprietà per lui predicate.

Con le categorie, elencate in numero di dieci, Aristotele risolve il problema della corretta costituzione delle proposizioni semplici ed assertorie, in quanto consentono di definire esattamente gli enti riconducendoli alla loro essenza più generale.

La teoria del giudizio si completa con una classificazione delle proposizioni in ragione della quantità (distinguendo tra universali e particolari) e della qualità (distinguendo tra affermative e negative). I risultati sono riassunti dagli studiosi medioevali, affascinati dalle simmetrie presenti nella teoria aristotelica, nella costruzione del quadrato logico, in cui vengono evidenziate le relazioni tra proposizioni in funzione della qualità e della quantità.

Le proposizioni affermative, rispettivamente universali e particolari, sono indicate con le vocali A ed I, utilizzando le prime due vocali della parola latina *adfirmo*, le proposizioni negative, rispettivamente universali e particolari, sono indicate con le vocali E ed O, utilizzando le due vocali della parola latina *nego*. La classificazione delle proposizioni è la premessa della teoria dell'inferenza sviluppata da Aristotele, conosciuta come "Sillogismo".

Un sillogismo è costituito da tre proposizioni; le prime due sono chiamate rispettivamente premessa maggiore e premessa minore, la terza è detta conclusione. Poste le premesse, la conclusione risulta necessaria (la definizione scolastica di sillogismo è, infatti: *oratio deductiva tribus constans propositionibus ita inter se connexis ut, duabus positis, tertiam ponere necesse*).

Ogni proposizione, sia essa una premessa o la conclusione, è strutturabile nella forma:

<oggetto> <predicato>

In un sillogismo, indipendentemente dal ruolo di soggetto e di predicato, compaiono solo tre nomi. Indicando con A e B rispettivamente il soggetto e il predicato della conclusione e con C il terzo nome, termine medio, sono possibili le seguenti quattro configurazioni:

C B	B C	C B	B C
A C	A C	C A	C A
A B	A B	A B	A B

Come si vede, il soggetto della conclusione è soggetto o predicato della premessa minore, mentre il predicato della conclusione è soggetto o predicato della premessa maggiore; il termine medio connette le premesse sì che la conclusione scaturisce come necessaria. Lo sviluppo dei quattro schèmata evidenzia chiaramente che l'obiettivo principale di Aristotele è riposto in una formalizzazione finalizzata alla conduzione automatica dell'inferenza. Un sillogismo con una sintassi rientrante nell'insieme dei modi consentiti è significativo di un ragionamento corretto. La verità del ragionamento, il suo contenuto semantico è tutt'altra cosa. Essa poggia sulla verità delle premesse a sua volta deducibile mediante sillogismi corretti da altre premesse e così via fino a giungere a principi supremi che non abbisognano di dimostrazione ma riconosciuti universalmente validi in quanto autoevidenti e sono: il principio di identità, di non contraddizione e del terzo escluso.

L'ultimo sforzo della Stagirita in questo processo di formalizzazione risiede nello studio delle trasformazioni che consentono di ridurre i sillogismi del secondo, terzo e quarto schèmata in quelli del primo. Siamo di fronte ad un vero e proprio sistema assiomatico con i suoi postulati, i quattro sillogismi del primo schèmata, connaturati da maggiore autoevidenza, e le regole di trasformazione per la dimostrazione di teoremi corrispondenti ai sillogismi nelle altre figure. La grande limitazione della teoria aristotelica dell'inferenza è nella circoscrizione dell'analisi alle sole proposizioni assertorie e semplici (monadiche) facendo, per così dire, un passo indietro rispetto ai risultati raggiunti dalla Scuola megarica e da quella stoica che aveva invece sviluppato una primitiva teoria dei connettivi, introducendo

l'analisi vero-funzionale delle proposizioni, valutando il contenuto di verità di una proposizione composta a partire dal contenuto di verità delle proposizioni costituenti in forza della correttezza sintattica delle connessioni.

Le regole sintattiche sviluppate dalla Scuola megarico-stoica sono racchiuse nella definizione dei cinque *indimostrabili*, ossia di cinque regole di inferenza assunti come principi dimostrativi autoevidenti tra i quali ha particolare rilevanza l'implicazione materiale.

Ad una analisi attenta si riconosce che l'assunzione dei cinque indimostrabili corrisponde all'acquisizione di un insieme di connettivi completo ossia tale da consentire la costruzione di un qualsiasi altro operatore di connessione.

Ancor più sorprendente è riconoscere che tale insieme è costituito dagli stessi connettivi che sono ritenuti oggi necessari per la costruzione di un insieme completo e che sono alla base della progettazione delle macchine combinatorie.

Per completezza, sono di seguito riportati gli anapodittici nella formulazione dello stoico Crisippo.

- Se il primo, allora il secondo; ma il primo; allora il secondo
($p \rightarrow q; p; q$)
- Se il primo, allora il secondo; ma non il secondo; allora non il primo
($p \rightarrow q; NOTq; NOTp$)
- Non (il primo e il secondo); ma il primo; allora non il secondo
($NOT(p AND q); p; NOTq$)
- O il primo o il secondo; ma il primo; allora non il secondo
($p XOR q; p; NOTq$)
- O il primo o il secondo; ma non il secondo; allora il primo
($p XOR q; NOTq; p$)

LA LOGICA MEDIOEVALE

Studi più recenti e più attenti suggeriscono una completa rivalutazione dell'Età medioevale, per lungo tempo congedata con la poco lusinghiera etichetta di età di oscurantismo, di tempi bui, quasi un fossato tra il Mondo Antico e l'Età moderna, in cui il massimo sforzo riconosciuto sia stato quello di trasportare sul nuovo argine, per mezzo di un lavoro faticoso e paziente, il bagaglio di conoscenze che i Grandi del passato avevano consegnato all'Umanità, e che sarebbe andato altrimenti perduto nella barbarie devastante.

Se tale definizione è inadeguata per qualsiasi ambito della scienza e della cultura, lo è in maniera particolare per la Logica che si veste, proprio nel Medioevo, di una dignità che non le sarà riconosciuta in età successive.

Scientia scientiarum, scienza delle scienze, fa parte delle arti del Trivio ed è pertanto considerata indispensabile, per la formazione di una *mens* abituata al corretto ragionare, sostegno necessario per intraprendere ogni altro studio.

Lungo il nostro percorso, sulle tracce delle radici storiche dell'informatica, siamo interessati alla raccolta di tutti quegli elementi che rendono evidente la spinta verso la formalizzazione; pertanto i risultati della ricerca logica medioevale saranno considerati e nella prospettiva della definizione di un sistema formale per la conduzione automatica dell'inferenza deduttiva e in quella dell'analisi semantica dei termini, nella misura in cui questa è necessaria per l'avvio di una analisi vero-funzionale delle proposizioni.

La prima necessaria riflessione va, dunque, fatta sull'impegno profuso dagli studiosi del tempo per la definitiva sistemazione della teoria del sillogismo aristotelico.

Nel Medio Evo, Aristotele fu, di fatto, il Filosofo; le sue opere tradotte e commentate costituirono un riferimento di autorevolezza indiscussa per l'attività intellettuale di docenti e discenti, di coloro che, successivamente, furono detti *Scolastici*.

In particolare l'*Organon* fu tradotto e commentato da Boezio (480-524) insieme alle *Isogoge* di Porfirio, un'introduzione alle *Categorie* e, infatti, Boezio è stato fino a tutto il XIII secolo, la fonte principale per la conoscenza delle opere logiche dello Stagirita.

La rilevanza del lavoro boeziano è giustificata dalla creazione, nei numerosi commentari, di un nuovo vocabolario filosofico che influenzò l'intero corso delle ricerche successive. La scientificità della traduzione fatta *ad verbum* comportò l'introduzione di vocaboli nuovi per le designazioni con la conseguente nascita di un registro tecnico per la comunicazione speculativa il quale assunse sempre più la connotazione di metalinguaggio, ossia di un linguaggio artificiale appositamente costruito per affrontare problemi di logica e la cui distanza dalla lingua naturale garantiva quella estraneità necessaria ad una analisi oggettiva dei termini usati.

La terministica, lo studio dei termini e più in generale del linguaggio, è stato il risultato più sottile dell'intera produzione scolastica.

Già Scoto Eriugena (IX secolo) aveva intuito che la *rationalis sophia* è *dialectica*, ma la chiara consapevolezza della logica come *sermocinalis scientia* ossia di scienza attraverso il linguaggio e del linguaggio, si ebbe solo nell'età aurea della scolastica con Pietro Abelardo, il professore di logica per antonomasia nella dottissima Parigi che, nella *Ingredientibus*, riduce l'ontologia delle categorie universali alla *sententia nominum* ossia a proprietà delle forme verbali mediante le quali la mente umana costituisce una serie di rapporti per la conduzione dell'inferenza.

Sulla stessa strada, Guglielmo di Ockham (1280-1349), della Scuola di Oxford, ribadita la distinzione tra *res* e *signa*, porta a maturazione una tesi sulla possibilità di un calcolo dimostrativo che trova le sue regole e la sua validità nelle proprietà di simboli astratti, nelle *proprietaes terminorum* e nelle *consequentiae* indicate da Abelardo. Con le *consequentiae*, in particolare, si riscoprirono una serie di teoremi di logica proposizionale mutuati dalla Scuola Stoica attraverso i commentari di Boezio e di Prisciano.

L'analisi linguistica, che annoverò tra i suoi più fervidi studiosi anche un successore sulla cattedra di Pietro, papa Giovanni XXII, al secolo Pietro Hispano (1215,-1277), rappresenta il contributo più significativo nella prospettiva della formalizzazione dell'inferenza sviluppato dai maestri della *logica modernorum* in aggiunta alla sistemazione dei risultati della *logica vetus* e quindi della teoria del sillogismo aristotelico. In tale ambito si colloca il lavoro di Guglielmo di Shyrewood con la costruzione del quadrato logico, l'indicazione consueta delle proposizioni universali e particolari, affermative e

negative, nonché con l'introduzione dei nomi, ancora oggi in uso, per la designazione dei modi sillogici nei quattro schèmata.

Nella tabella successiva sono riportati, per completezza, queste designazioni.

<i>I schèmata</i>	<i>II schèmata</i>	<i>III schèmata</i>	<i>IV schèmata</i>
BARBARA	BAROCO	BOCARDO	BARALIPTON
CELARENT	CAMESTRES	DARAPTI	CELANTES
DARII	CESARE	DATISI	DABITIS
FERIO	FESTINO	DISAMIS	FAPESMO
		FELAPTON	FRISESOMORUM
		FERISON	

In tali nomi, le prime tre vocali indicano il tipo di proposizione nella premessa maggiore, nella premessa minore e nella conclusione; la consonante iniziale indica a quale modo del primo schèmata sia riconducibile un sillogismo delle altre figure ; le consonanti seguenti ciascuna delle prime tre vocali indicano il tipo di trasformazione da effettuare sulla proposizione cui la vocale si riferisce, con l'assunzione che:

- **s** indichi una *conversio simplicis* (scambio di soggetto con predicato)
- **m** indichi una *mutatio praemissorum* (scambio delle premesse)
- **p** indichi una *conversio per accidens* (scambio di soggetto con predicato e della quantità)
- **c** indichi una *reductio in contradictorio* (dimostrazione per assurdo)

Confrontato con l'acutezza e la scientificità della ricerca di Abelardo e di Ockham, questo risultato sembra un deteriore esercizio di mnemotecnica, con nomi che evocano suggestioni alchimiche; esso ha, invece, un suo spessore nell'ottica di una automatizzazione del processo deduttivo.

Su tale scia si inserisce l'attività di uno degli intelletti più fecondi di tutto il XIII secolo: Raimondo Lullo. Questo appassionato e mistico poeta, cultore della ricerca alchimica e padre della mnemotecnica, incarna il prototipo del *vir sapiens* medioevale.

Tenacemente convinto di una gerarchizzazione della conoscenza, egli crede, di fatto, nella sua completa dimostrabilità ed acquisibilità. Ha piena consapevolezza della potenza formale della logica come scienza dei termini e, nell'*Ars magna generalis ultima* e nell'*Ars brevis compendiariam ad omnium artium encyclopediam*, sviluppa una teoria dell'inferenza basata tanto sul sillogismo quanto sull'assunzione di sei classi di termini, ciascuna delle quali contenenti nove elementi, combinando i quali è possibile non solo dimostrare e ordinare le conoscenze note, ma addirittura scoprirne altre. La logica è, dunque, non solo *scientia demonstrandi* ma anche *scientia inveniendi veritatem*. L'intelletto fervido di Lullo inventò anche il meccanismo per condurre automaticamente la ricerca. Si trattava di tre cerchi concentrici, ciascuno con movimento rotatorio indipendente. Su ogni bordo erano disposti i sei termini generali con i nove elementi. Ad ogni allineamento doveva corrispondere un ragionamento condotto sulla base di un sillogismo.

Al di là dell'ammirazione per il tentativo ingegnoso di costruire una macchina per inferire automaticamente, va fatta qualche considerazione sul presupposto teorico che ne sta alla base.

Per quanto numerosissime, le *verità* deducibili da una combinatoria di un numero finito di termini sono comunque in numero finito. In corrispondenza la conoscenza del sapiente, pur non perfetta, è perfettibile attraverso la *rationalis sophia*. D'altronde la Rivelazione è stato l'atto supremo e compendiario di ogni conoscenza: quanto c'era da dire è stato detto e, con le parole che Umberto Eco pone sulle labbra del venerabile Jorge nel *Nome della rosa*, "... non vi è progresso, non vi è rivoluzione di evi nella vicenda del sapere, ma al massimo continua e sublime ricapitolazione".

LA LOGICA DEL '600

Nei secoli XIV e XV si assiste ad un brusco arresto della ricerca logica. Su un fronte la diffusione e la maturazione del nuovo metodo filosofico-scientifico avviato da Ockham denunciava l'inefficacia euristica della sillogistica a fronte di una epistemologia che privilegiava la scoperta sulla sistemazione della conoscenza; su un altro la logica formale, regolarmente impiegata nelle disquisizioni teologiche, risultò gravata da connotazioni specifiche, tra le quali si smarrì la più genuina e libera spinta all'indagine.

Sono le scienze applicate a creare le prime crepe nel monumentale edificio scolastico.

Giovanni Buridano (1280-1358), nelle sue *Questioni di Fisica*, condusse una argomentata e convincente critica alla teoria del moto di Aristotele; la scoperta degli *Elementi* di Euclide (la prima traduzione dall'arabo disponibile nel mondo occidentale è del 1482), fornisce, nella geometria, un'alternativa alla deduzione sillogica, chiara, organica e svincolata da ogni disputa sull'ortodossia religiosa.

La reazione alla Scolastica non si limitò ad un rallentamento dell'indagine condotta secondo il vecchio metodo, ma giunse, talvolta, ad atteggiamenti di vera e propria derisione.

Già Cartesio (1596-1650) criticava la teoria del sillogismo sottolineando che la verità della conclusione è contenuta nelle premesse, per cui non vi è ampliamento di conoscenza attraverso la deduzione e la logica è solo una dote innata dell'intelletto e vani sono i tentativi di ingabbiarla in regole.

Se è fondata l'osservazione sulla inclusività del contenuto informativo della conclusione nelle premesse, è pur vero che egli confuse il piano della conoscenza con quello della consapevolezza della conoscenza che la deduzione conquista. Gli sfuggì, inoltre, l'acutezza dei risultati dell'analisi terministica, la sua scientificità, per la quale la logica era divenuta scienza del ragionamento attraverso lo studio del linguaggio e quindi scienza formale.

Su posizioni più moderate si mosse la critica di Pascal (1623-1662) il quale riconobbe la necessità di supporre regole precise e generali per la conduzione dell'inferenza, ma il suo spirito era già completamente catturato dalla natura formale dell'apparato geometrico di Euclide,

perché potesse riconoscere, senza pregiudizio, la natura formale della migliore sillogistica. Ne rilevò l'aspetto meno profondo, la tassonomia evocante reminiscenze magiche e cabalistiche, per cui scrisse: “non sono Barbara e Baralipon che formano un ragionamento” e altrove “Il metodo di non errare è cercato da tutti. I logici fan professione di condurvici, solo i geometri ci arrivano”.

Chiaramente mutata nei confronti della logica scolastica fu la posizione di Leibniz (1646-1716). Diversamente da Cartesio e da Pascal, egli penetrò nel cuore delle teorie aristoteliche e medioevali e ne comprese la grandezza sul piano della formalizzazione del processo inferenziale. Disse, infatti: “... la sillogistica è ritenuta la più inutile tra le teorie e si parla con scherno di Barbara, Celarent, ecc.; ma io l'ho trovata diversa (...). Non è cosa da poco che Aristotele abbia sottoposto queste forme a leggi esatte e sia stato così, in realtà, il primo a parlare matematicamente al di fuori della matematica”.

In questa espressione è, forse, racchiuso l'intero programma logico leibniziano.

Con *Scrivere matematicamente al di fuori della matematica* Leibniz intendeva la possibilità di utilizzare un simbolismo astratto con segni e regole codificate, similmente a quanto avviene in aritmetica e in geometria, ma per tradurre e condurre un qualsiasi ragionamento. Sono ancora sue queste parole: “Tutta la nostra attività razionale consistere semplicemente nel mettere insieme e sostituire dei caratteri, siano questi parole o simboli o immagini”.

Le nozioni umane dovevano, dunque, essere espresse in un linguaggio non preesistente. Attraverso la combinatoria di tali *characteres* sarebbe stato possibile esprimere anche i concetti più complessi. Costruita la *lingua characteristic*, ad essa resta associato un *calculus ratiocinator*, ossia un sistema di regole formali cui assoggettare l'inferenza, per cui, continuando con le parole di Leibniz, “... se qualcuno mettesse in dubbio i miei risultati, gli direi *Calculemus* di modo che, ricorrendo a penna e inchiostro, risolveremmo la questione in breve tempo”.

Si riscopriva il profilo di una *scientia demonstrandi veritatem*, superando le degenerazioni retoriche che avevano appesantito la ricerca negli ultimi anni, ma che per la sua astrattezza e completezza era anche *scientia inveniendi veritatem* secondo il senso dell'intuizione lulliana, una scienza formale come la matematica ma

che travalicava i limiti della matematica, una *mathesis universalis* all'interno della quale si inserivano le scienze specifiche.

Il *calculemus* di Leibniz è rivelazione esplicita di un sogno di razionalizzazione e di automatizzazione dell'inferenza. Descrivendo l'attività razionale come combinatoria di simboli, di caratteri, si prospettava la possibilità di affidare l'inferenza ad una macchina in grado di interpretare la *lingua characteristica* ed eseguire le operazioni. E' definitivamente aperta la strada all'informatica.

GEORGE BOOLE

George Boole (1815-1864) è tradizionalmente riconosciute il padre della logica matematica e senz'altro l'autore della grande svolta che conferisce all'indagine logica le connaturazioni attuali. Questo ingegnoso autodidatta, figlio di un povero calzolaio inglese, giunse senza titolo accademico, al ruolo di docente di matematica presso il Queens College di Cork, in Irlanda, in ragione di alcune pubblicazioni dalle quali si evinceva un coerente e mirato programma di ricerca sviluppato secondo tre direttrici:

- l'asse linguistico seguendo lo studio formale del linguaggio, nella misura in cui questo è necessario per esprimere nozioni generali e giustificare la capacità umana di concepire una classe
- l'asse psicologista, valutando le possibilità ed i limiti di una attività di simbolizzazione
- l'asse matematico, mutuando alla logica, dalla matematica, regole e metodi per il processo inferenziale.

Nell'*Analisi matematica della logica* e nella *Ricerca sulle leggi del pensiero sulle quali sono fondate le teorie matematiche della logica e della probabilità* è chiaramente espressa l'idea di una sostituzione simbolica dei termini logici all'interno di un sistema funzionale dal punto di vista operativo.

I pochi che apprezzarono il genio di Boole, tra cui il matematico tedesco Schroder, migliorarono prontamente le nozioni originali, conducendo alle consuete accezioni di *Algebra di Boole*, ossia una struttura astratta, non interpretata che può essere assiomatizzata, ossia tale da essere sottoposta a precise regole, pur senza una specifica definizione dei simboli.

Fu lo stesso Boole a suggerire la più importante e più nuova interpretazione.

Associando al simbolo 1 il valore "vero" e al simbolo 0 il valore "falso" si poteva applicare il calcolo simbolico a enunciati costruiti attraverso gli operatori (connettivi) previsti dal sistema, risalendo al loro valore di verità.

Negli anni recenti, l'interpretazione più utile è stata data nella teoria dei circuiti, che è fondamentale nella progettazione dei calcolatori

elettronici, pur non essendo limitata ai circuiti elettrici bensì estensibile a qualsiasi circuito che consente la trasmissione di energia, con apparati di connessione (corrispondenti agli operatori di connessione) che permettono di interrompere o di deviare il flusso.

Questa interpretazione dell'Algebra di Boole mediante circuiti elettrici fu suggerita da Ehrenfest nel 1910, ma la prima interpretazione importante nell'ambito della progettazione dei calcolatori fu presentata successivamente da Shannon nell'articolo "*A Symbolic Analysis of relay and switching Circuits*".

Dal tempo della pubblicazione dell'articolo di Shannon, l'Algebra di Boole è divenuta essenziale per la progettazione dei calcolatori dove è fortemente utilizzata per l'individuazione e la riduzione della componentistica.

Le operazioni del calcolatore e in generale di una macchina sono tradotte in enunciati logici, questi vengono semplificati e ridotti utilizzando il calcolo e, successivamente, tradotti in circuiti.

Il sogno di Leibniz sembra essersi avverato.