PERCHÉ I CALCOLATORI SONO BINARI?

Silvio Hénin

Si dà per scontato che i calcolatori debbano necessariamente operare mediante elementi a due stati e rappresentare i dati in codice binario. Esistono ragioni storiche o teoriche per questa scelta o è solo una soluzione tecnica fra le tante possibili? La storia della notazione binaria inizia nel seicento con gli studi di Leibniz e si impone definitivamente dopo il 1945 con l'avvento dei primi calcolatori elettronici per uso generale. Non è tuttavia scomparso l'interesse per altre possibilità, come quella del sistema ternario o altri sistemi multi-valore.

1. IL SISTEMA BINARIO

L'origine della notazione binaria si fa risalire a Gottfried Wilhelm Leibniz che per primo[1] la propose per il calcolo algebrico [1 - 4]. In un manoscritto del 1679, "*De Progressione Dyadica*", il filosofo-matematico dimostrò che il sistema binario poteva sostituire quello decimale per le operazioni aritmetiche e ne descrisse i procedimenti per l'addizione e la moltiplicazione. Nel breve testo e in uno successivo, presumibilmente del 1680, Leibniz propose anche il progetto di una macchina calcolatrice binaria a sferette e di un convertitore decimale-binario, necessario per evitare che l'operatore dovesse adattarsi totalmente all'uso dei numeri binari. Un modello funzionante della calcolatrice binaria fu costruito nel 1969 da Ludolf von Mackensen [5]. L'argomento fu ripreso da Leibniz nel 1703 in "*Explication de l'arithmétique binaire*" pubblicato a Parigi nel 1705 nelle *Memorie dell'Accademia Reale delle Scienze*, in cui l'autore sostiene che: "*queste operazioni sono così facili che non saremo più costretti ad indovinare o a procedere per tentativi ed errori (...) neppure dovremo imparare alcunché a memoria*", riferendosi alla fastidiosa memorizzazione delle tabelline decimali. Leibniz non pretese però di abbandonare definitivamente il sistema decimale, infatti sostenne: "*ci siamo ormai abituati, non c'è bisogno di re-imparare quello che già abbiamo memorizzato; l'uso del dieci è più rapido e i numeri non sono così lunghi*".

[1] Altri, prima di Leibniz, avevano studiato la codifica a due valori. Nel 1580 Francis Bacon aveva già proposto l'uso di due soli segni come metodo per trasmettere messaggi segreti usando le lettere A e B, in gruppi di cinque, nascosti all'interno di un testo generico; oggi diremmo che era un "codice a 5 bit", lo stesso principio utilizzato nelle telescriventi del ventesimo secolo. Nel 1670 Juan Caramuel, vescovo di Vigevano, scrisse il "*Mathesis Biceps*", in cui utilizzava i caratteri "0" e "a" per rappresentare i numeri. La notazione binaria fu studiata nel sedicesimo secolo da Thomas Harriot e da John Napier nel suo "*Rabdologia*" e ripresa nel Novecento anche da Peano come una sorta di stenografia. L'indubbia priorità di Leibniz consiste nel fatto fondamentale che lui per primo propose le regole di una vera e propria aritmetica binaria.

Nei secoli successivi la numerazione binaria riapparve saltuariamente nelle speculazioni dei matematici, senza mai entrare nella pratica dell'aritmetica. Tutte le macchine da calcolo antecedenti al moderno calcolatore, dalla *Pascalina* del diciassettesimo secolo, alle calcolatrici meccaniche del novecento - comprese quelle azionate tramite energia elettrica - mantennero la notazione decimale e così pure alcuni dei primi calcolatori programmabili, come lo Harvard Mark I di H. Aiken e l'ENIAC di J. Mauchly e P. Eckert. Anche i progetti delle famose "*difference engine*" e della "*analytical engine*" di Charles Babbage erano decimali [6, 7].
Sarà comunque l'uso dell'elettricità a riportare in auge la numerazione binaria. Già alla fine dell'Ottocento il filosofo americano Charles S. Peirce aveva notato l'isomorfismo tra i circuiti elettrici a relè, all'epoca usati nella telegrafia, e la logica algebrica di Boole, basata sui due soli valori, 1 (vero) e 0 (falso), e suggerì al suo studente Allan Marquand di costruire un calcolatore logico elettrico [8]. L'idea dell'isomorfismo fu proposta indipendentemente anche da Paul Ehrenfest in Russia nel 1910 e riapparve nel 1936 su una pubblicazione dei giapponesi Akira Nakasima e Masao Hanzawa [9].
Molto più determinante per la storia del calcolo automatico fu l'opera dell'americano Claude Shannon che nel 1938 pubblicò la sua tesi di dottorato dal titolo "*A symbolic analysis of relays and switching circuits*" [10] in cui dimostrava che le regole dell'algebra di Boole erano simulabili con i circuiti elettrici a due stati e che il comportamento di tali circuiti poteva essere analizzato con l'algebra a due valori. Lo studio di Shannon era finalizzato alla conoscenza del comportamento delle reti combinatorie e si orientava non solo ai circuiti telefonici di commutazione, ma a "*qualunque circuito progettato per eseguire automaticamente operazioni complesse*". Nella tesi, per la quale vinse il premio Alfred Noble[2] nel 1940 [11], descrisse anche il circuito di un addizionatore binario. Questo approccio teorico permise di stabilire che qualunque operazione logico/aritmetica poteva essere effettuata con circuiti elettrici a due stati in grado di simulare i connettivi logici elementari - la congiunzione (AND), la disgiunzione inclusiva (OR) e la negazione (NOT). Grazie all'applicazione dei teoremi dell'algebra di Boole, dovuti al matematico Augustus De Morgan, si potè anche dimostrare che i tre connettivi necessari potevano essere sostituiti da diverse combinazioni di un solo tipo di operatore (NAND o NOR).
All'oscuro degli sviluppi americani, ma contemporaneamente ad essi, il tedesco Konrad Zuse fu tra i primi ad imboccare questa strada e nel 1938 scrisse una memoria dal titolo "*Einführung in die allgemeine Dyadik*" in cui non solo riconosceva i vantaggi tecnico-costruttivi del sistema a due valori su quello decimale, ma che tutte le operazioni del calcolo algebrico potevano essere eseguite con relè a due stati [12]. Binari furono infatti i quattro prototipi di calcolatore programmabile da lui costruiti tra il 1938 e il 1944. Non fu solo la teoria ad indirizzare la scelta di Zuse, ma anche la carenza di mezzi nella Germania del periodo bellico: il sistema binario era più semplice da implementare e richiedeva componenti (i relè) di più facile reperibilità. Zuse, infatti, iniziò a progettare il suo Z1 senza neppure essere a conoscenza del calcolo proposizionale e dell'algebra di Boole, dei quali venne a conoscenza solo più tardi, grazie ad un suo insegnante di matematica [8, 13].
Nel suo scritto Zuse riconobbe la priorità dei francesi Raymond Valtat e Louis Couffignal e dell'inglese W. E. Phillips, che negli anni '30 avevano già proposto progetti di calcolatrici binarie, nessuna delle quali oltrepassò la fase di sperimentazione di singoli circuiti [14]. Negli stessi anni, dall'altra parte dell'Atlantico, anche George Stibitz (1939) e Vincent Atanasoff (1942) stavano costruendo macchine binarie, ma non per uso generale e non programmabili [6, 7, 15][3].

2 Da non confondere con il noto premio Nobel; lo "Alfred Noble Prize" è comunque un ambito riconoscimento assegnato da un gruppo di società di ingegneria degli Stati Uniti.

3 Quando distinguiamo tra macchine binarie o decimali, intendiamo dire che in esse, numeri, dati e istruzioni sono "rappresentati" internamente - tralasciando quindi gli organi di ingresso ed uscita - tramite due o dieci diversi valori, indipendentemente da quale codice venga usato. Su questa base i calcolatori come lo Harvard Mk. I o l'ENIAC sono classificati come decimali, mentre quelli di Zuse, il Relay Interpolator di Stibitz e lo ABC di Atanasoff sono classificati come binari. Tuttavia, se analizziamo il livello dei componenti fisici, i calcolatori decimali possono anche essere costituiti da elementi intrinsecamente binari; per esempio, gli accumulatori di ENIAC erano costituiti da contatori decadici composti da circuiti bistabili (i cosiddetti flip-flop).

Nel 1945 il matematico di origine ungherese John von Neumann, entrato in contatto con il gruppo di Mauchly e Eckert, che stava terminando il primo calcolatore elettronico, l'ENIAC, decise di riunire in un documento i principi teorici e tecnici per la progettazione razionale del successore dell'ENIAC, un futuro calcolatore digitale per uso generale, denominato EDVAC. Il manoscritto, sotto forma di bozza, fu messo rapidamente in circolazione presso i pochi esperti dell'epoca, con il titolo "*First Draft of a Report on the EDVAC*" [16] e divenne il documento fondante per molti progetti dei futuri calcolatori. Nel "*First draft*", mai completato in tutte le sezioni previste, erano esaminati molti aspetti dell'architettura di un calcolatore. Tra questi, il più innovativo era certamente il principio cosiddetto dello "*stored program*", cioè di una memoria centrale in cui si sarebbero immagazzinati, senza soluzione di continuità, sia i dati da elaborare, sia il programma di calcolo [17, 18]. Meno innovativa, ma altrettanto determinante per gli sviluppi futuri, fu la dichiarazione di Von Neumann, al paragrafo 5.2: "*un uso consistente del sistema binario semplifica considerevolmente le operazioni di moltiplicazione e divisione*" e aggiunse "*l'aritmetica binaria ha una struttura logica più semplice e più compatta di qualunque altra*" [16]. Da allora la scelta del binario non fu quasi mai messa in discussione, salvo qualche importante eccezione che vedremo.

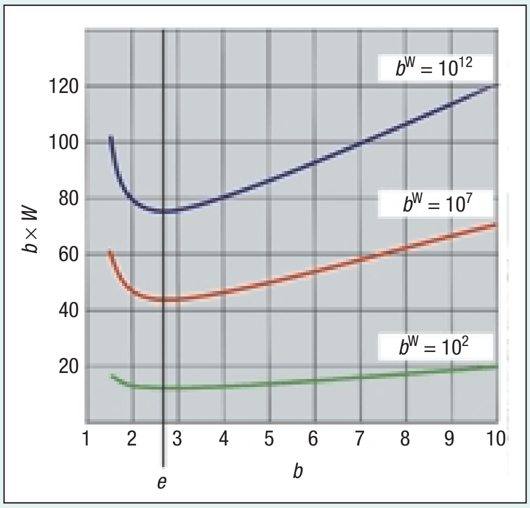
La maggiore efficienza del sistema binario rispetto al decimale può essere dimostrata teoricamente, anche se a costo di un'estrema semplificazione. Nel modello si assume che la complessità circuitale di un calcolatore sia proporzionale al prodotto $\boldsymbol{b} \times \boldsymbol{W}$, dove $\boldsymbol{b}$ è la base numerica scelta e $\boldsymbol{W}$ è la "lunghezza" del massimo numero che si dovrà elaborare. Risulta che la scelta del sistema binario dovrebbe garantire una minore complessità circuitale rispetto al decimale, quindi un costo minore ed una maggiore affidabilità [riquadro].

Nella pratica costruttiva la semplificazione teorica non è però del tutto giustificata. Innanzitutto le uniche parti del calcolatore che potrebbero essere assimilabili al modello, sono l'unità di calcolo e le memorie, mentre l'architettura delle altre parti del calcolatore, come le memorie di massa (dischi e nastri magnetici) e

La notazione posizionale

Inventata in India probabilmente tra il VI e lo VIII secolo d.C. e trasmessa dagli Arabi alla cultura europea nel tardo medioevo, la notazione posizionale in base 10 fu adottata definitivamente negli ambienti scientifici e commerciali del nostro continente solo nel '500. Senza di essa le procedure di calcolo che utilizziamo e, probabilmente, la stessa algebra non sarebbero comparse. La sua naturale conseguenza, il Sistema Metrico Decimale, doveva attendere il razionalismo illuministico e la rivoluzione francese per soppiantare le altre unità di misura e ancora oggi non è stato adottato dalla maggiore potenza industriale e tecnologica del mondo, gli USA.

Non solo il 10, il 2 e il 3 - considerati espressamente in questo articolo - ma qualunque numero reale maggiore di 1, anche irrazionale o trascendente, può essere scelto come base. Alcuni matematici hanno infatti studiato numerazioni a base $\boldsymbol{e}$, a base $\boldsymbol{\Phi}$ (rapporto aureo = 1.61803399....) ed altre soluzioni fantasiose, come la sequenza dei numeri di Fibonacci, che possono essere usati come base variabile in luogo delle successive potenze di una base fissa. Tutti questi sistemi posseggono interessanti proprietà matematiche che potrebbero avere qualche applicazione negli algoritmi di calcolo, difficilmente però se ne può immaginare una applicazione generale nei circuiti di un calcolatore.



Si può dire che la complessità circuitale, e quindi il costo, dell'unità di calcolo o della memoria di un calcolatore è approssimativamente proporzionale al prodotto $\boldsymbol{b} \times \boldsymbol{W}$, dove $\boldsymbol{b}$ è la base adottata e $\boldsymbol{W}$ è la "lunghezza" del massimo numero che si vuole rappresentare, che avrà un ordine di grandezza uguale a $\boldsymbol{b}^{\boldsymbol{W}}$. Analizzando come varia $\boldsymbol{b} \times \boldsymbol{W}$ in funzione di $\boldsymbol{b}$, mantenendo costante $\boldsymbol{b}^{\boldsymbol{W}}$, si osserva un minimo per $\boldsymbol{b}$ compreso tra 2 e 3, più precisamente per $\boldsymbol{b} = \boldsymbol{e}$ (Figura). Questo risultato conferma che, almeno nel modello semplificato, il sistema binario è una scelta più economica di quello decimale, ma quello ternario lo sarebbe ancora di più. Infatti un numero decimale di 8 cifre ($\boldsymbol{b} \times \boldsymbol{W} = 80$) in binario avrebbe al massimo 27 cifre ($\boldsymbol{b} \times \boldsymbol{W} = 54$) ed in ternario 17 cifre ($\boldsymbol{b} \times \boldsymbol{W} = 51$).

Nel ternario bilanciato, per esempio, il decimale 582 sarebbe scritto (usando $\bar{1}$, sopralineato, per indicare –1):

$$582_{10} = 1\,\bar{1}\,1\,1\,\bar{1}\,\bar{1}\,0_{3b} = 1 \times 3^6 - 1 \times 3^5 + 1 \times 3^4 + 1 \times 3^3 - 1 \times 3^2 - 1 \times 3^1 + 0 \times 3^0$$

le unità di entrata ed uscita, sono più difficilmente riconducibili allo schema semplificato. Inoltre, i calcolatori non usano sempre una notazione binaria "pura"; fin dai primordi dell'informatica, per rilevare - ed eventualmente correggere - gli errori dovuti a malfunzionamenti accidentali, i dati sono stati rappresentati con codici ridondanti in cui ogni cifra decimale è scritta con più cifre binarie del minimo necessario. Per i calcoli scientifici, infine, i numeri sono rappresentati nella notazione cosiddetta "in virgola mobile", usando due codici adiacenti, uno per la mantissa e l'altro per l'esponente. Nella pratica, quindi, la codifica dei valori numerici è molto meno compatta di quella usata nel modello semplificato. La drammatica diminuzione dei costi di produzione, la miniaturizzazione e la maggiore affidabilità dell'hardware, raggiunte nei decenni successivi, hanno reso ingiustificata quella spasmodica attenzione all'ottimizzazione dei circuiti che fu tipica degli anni '50.
Occorre infine considerare che, dal punto di vista degli algoritmi di calcolo, il sistema binario non sarebbe neppure il più efficiente. Per fare qualche esempio, i numeri negativi devono essere rappresentati con un bit dedicato al segno, ma questo comporta un'asimmetria nel range dei numeri utilizzabili o produce due diversi valori per lo zero, problemi che richiedono alcuni accorgimenti per essere superati. Nel sistema binario, inoltre, la sottrazione deve essere trasformata in un'addizione con il complemento del sottraendo, obbligando ad uno o due passi in più rispetto all'addizione, a meno di non ricorrere ad un organo aggiuntivo dedicato a questa operazione. Problemi simili sono comunque comuni anche ad altre notazioni, compresa la decimale.

2. CALCOLATORI TERNARI

Il modello semplificato, pur con tutti i suoi limiti, dimostra che la base più efficiente, quella per cui occorre il minimo numero di componenti, è esattamente uguale ad ***e*** (la base dei logaritmi naturali) e, non volendo ricorrere ad una base irrazionale, il numero intero più vicino sarebbe 3, non 2. Sembrerebbe quindi giustificato ricorrere a circuiti a tre stati, cioè ad una notazione *ternaria*. Disponendo di tre valori per ogni cifra si può usare un modo più interessante di rappresentare i numeri, quello chiamato "ternario bilanciato". In esso, due dei tre valori sono disposti simmetricamente attorno allo zero, cioè –1, 0 e 1. I coefficienti delle successive potenze di 3 possono quindi essere sia positivi, sia negativi [riquadro a p. 54].
L'uso pratico del ternario bilanciato fu proposto per la prima volta nel 1830 dall'inglese Thomas Fowler. Figlio di un povero bottaio di Torrington nel North Devon, all'età di tredici anni dovette iniziare a lavorare come apprendista pellaio, ma, ragazzo di grande intelligenza e volontà, continuò la sua educazione matematica come autodidatta, studiando la notte dopo lunghe ore di pesante lavoro. Le sue capacità gli garantirono più tardi un impiego in banca e il lavoro come tesoriere di una società di assistenza ai poveri. Questo incarico lo costringeva a lunghi calcoli col farraginoso sistema monetario britannico[4], per semplificare i quali scrisse il manualetto "*Tables for Facilitating Arithmetical Calculations*" in cui proponeva una notazione ternaria e le relative procedure di calcolo [19]. Terminato il manuale, l'immaginazione di Fowler lo spinse a progettare una calcolatrice meccanica che permettesse di eseguire la moltiplicazione di due numeri ternari. Il prototipo in legno, con la capacità di ben 55 cifre ternarie, fu dimostrato alla Royal Society di fronte ad importanti uomini di scienza dell'epoca, tra cui Charles Babbage, l'astronomo George Airy e il matematico Augustus De Morgan, che ne redasse l'unica descrizione oggi conosciuta. La macchina aveva l'aspetto di un pianoforte, sfruttava un meccanismo a leve - non a ruote come le altre calcolatrici dell'epoca - ed era lunga quasi due metri; funzionava correttamente, ma il suo punto debole rimaneva la necessità di ricorrere alle tavole di conversione per trasformare i numeri decimali in ternari. Di questa limitazione Fowler era ben conscio e spese i suoi ultimi anni cercando una soluzione. La calcolatrice di Fowler fu completamente dimenticata, ma nel 2000, sulla base della descrizione di De Morgan e sull'unica rappresentazione grafica - una vetrata della chiesa di Torrington - ne è stata ricostruita una

[4] Quattro *farthing* facevano un *penny*, dodici penny uno *scellino* e venti scellini una sterlina.

Logica e aritmetica ternaria

La logica algebrica del sistema ternario ammette 26 (escludendo l'identità) operatori ad una variabile e 729 operatori logici commutativi a due variabili, contro rispettivamente 1 e 8 nel sistema binario. Per esempio, le tre più comuni ed intuitive tavole della verità del ternario bilanciato sono:

NEGAZIONE NOT$_t$ (*a*)

a	NOT *a*
1	$\bar{1}$
0	0
$\bar{1}$	1

CONGIUNZIONE (MIN) [*a* AND$_t$ *b*]

b \ *a*	$\bar{1}$	0	1
$\bar{1}$	$\bar{1}$	$\bar{1}$	$\bar{1}$
0	$\bar{1}$	0	0
1	$\bar{1}$	0	1

DISGIUNZIONE (MAX) [*a* OR$_t$ *b*]

b \ *a*	$\bar{1}$	0	1
$\bar{1}$	$\bar{1}$	0	1
0	0	0	1
1	1	1	1

L'uso di una terminologia simile a quella degli operatori binari (AND, OR, NOT) per identificare gli operatori ternari può generare confusione; non esiste infatti una corrispondenza immediata tra le due famiglie di funzioni. Anche nel caso degli operatori ternari, come nel binario, è possibile ridurre il numero delle porte logiche necessarie per realizzare molte delle operazioni richieste.
Le tavole aritmetiche della moltiplicazione e dell'addizione possono essere così rappresentate:

MOLTIPLICAZIONE (*a* · *b*)

b \ *a*	$\bar{1}$	0	1
$\bar{1}$	1	0	$\bar{1}$
0	0	0	0
1	$\bar{1}$	0	1

ADDIZIONE (*a* + *b*)

b \ *a*	$\bar{1}$	0	1
$\bar{1}$	1	$\bar{1}$	0
0	$\bar{1}$	0	1
1	0	1	$\bar{1}$

RIPORTO DELL'ADDIZIONE AL TRIT PIÙ ALTO

b \ *a*	$\bar{1}$	0	1
$\bar{1}$	$\bar{1}$	0	0
0	0	0	0
1	0	0	1

Per un approfondimento sulla aritmetica ternaria e sulle sue proprietà vedi anche [31, 32, 33]

plausibile replica funzionante al North Devon College [19].
Il ternario bilanciato sembrava avere indubbi vantaggi rispetto al binario, tra cui quello di poter rappresentare i numeri negativi senza ricorrere al segno "meno" anteposto (il segno di un numero ternario essendo uguale a quello della sua cifra più significativa), e per trasformare un numero nel suo reciproco basta sostituire tutti gli 1 con –1 e viceversa, lasciando inalterati gli 0 (cioè applicando una negazione logica). Ne risultava una notevole semplificazione della sottrazione, che veniva eseguita come l'addizione. Con il ternario era più facile anche l'operazione di arrotondamento naturale di un numero, che si effettuava semplicemente troncandolo alla cifra desiderata, e si potevano utilizzare algoritmi più semplici e veloci per la somma, la moltiplicazione e la divisione.
L'idea di realizzare calcolatori basati su un sistema ternario non rimase solo un'ipotesi. Già tra le critiche elevate all'architettura proposta da von Neumann nel suo "*First draft*", si suggeriva: "*si dovrebbero prendere in considerazione sistemi numerici diversi da quello binario, a cominciare forse da quello ternario*" [18].
Più tardi anche Donald Knuth, nel suo ponderoso testo sull'*arte* della programmazione [20] immaginò che "un bel giorno" i calcolatori sarebbero diventati tutti ternari. Lo stesso Howard Aiken, il padre della serie di calcolatori di Harvard, rimase un combattivo avversario della notazione binaria e sostenne a lungo la superiorità del ternario bilanciato, anche se non lo utilizzò mai nei suoi progetti [21].
Un calcolatore ternario, battezzato SETUN, fu in effetti costruito e ciò avvenne nel 1956 all'Università di Mosca, per mano del gruppo di ricercatori guidati da Nikolai P. Brusentsov [22, 23]. La finalità del progetto era

quella di creare un calcolatore piccolo ed economico da usare nelle scuole e nei laboratori di ricerca. La disponibilità di tecnologia dei russi era molto minore di quella dei colleghi americani (nell'URSS le valvole termoioniche erano poco affidabili ed i transistor ancora una costosa rarità) e ciò li costrinse ad impiegare circuiti logici magnetici, implementandovi una rappresentazione a tre valori e ottenendo una maggiore velocità ed un minor consumo di energia rispetto ad una macchina binaria. SETUN operava su numeri composti di 18 cifre ternarie, battezzate *trit*. In realtà il sistema ternario non fu sfruttato completamente perché per ogni *trit* si utilizzavano due nuclei magnetici a due stati, sprecando una combinazione; SETUN era quindi ternario per quanto riguarda le operazioni logico-algebriche, ma restava binario per gli aspetti fisico-circuitali. Il calcolatore sovietico fu prodotto in piccola serie in due successive versioni.
SETUN rimase il primo ed ultimo calcolatore ternario[5] e, a questo proposito, l'informatico Dmitry A. Pospelov scrisse: "*Le barriere che si oppongono all'applicazione del sistema ternario nei calcolatore sono di carattere tecnico. Fino ad ora elementi efficienti ed economici a tre stati non sono ancora stati elaborati. Non appena tali elementi saranno sviluppati la maggioranza dei calcolatore universali e molti di quelli speciali saranno molto probabilmente progettati per funzionare con un sistema ternario bilanciato*" [24].

3. LOGICHE MULTIVALORE

Le ricerche su alternative al binario non si sono estinte con SETUN e il rinnovato interesse per le "logiche multivalore" (*Multi-Valued Logic*, MVL) è dimostrato dalla larga partecipazione all'annuale convegno *IEEE International Symposium on Multiple-Valued-Logic* che è giunto alla sua 35ª edizione, anche perché alcune delle barriere tecniche identificate da Pospelov oggi possono essere superate. Negli ultimi quindici anni si è notata una crescente attenzione verso la realizzazione di circuiti MVL, non necessariamente ternari, ma anche a quattro, otto o sedici stati [25, 26]. Tali ricerche hanno, in certi casi, portato alla realizzazione di prototipi di laboratorio e di prodotti commerciali.
Tre sono i settori dell'informatica che sembrano più interessati all'uso pratico delle MVL: i sistemi di trasmissione di informazioni digitali, le memorie e i circuiti logico-aritmetici.
Con l'aumentare della miniaturizzazione dei circuiti integrati, la trasmissione dei dati tra una parte e l'altra del calcolatore, anche all'interno dello stesso microchip, sta diventando uno scomodo collo di bottiglia. In un moderno microchip il 70% della superficie è occupata dai collegamenti tra le varie sezioni, il 20% dall'isolamento tra le linee e solo il 10% dai componenti attivi del circuito. Questo si traduce in uno spreco dello spazio disponibile, in un aumento della dissipazione termica e in una limitazione della velocità di trasferimento dei dati. Potendo trasmettere contemporaneamente più di un bit su ogni linea, per esempio sfruttando tre o più stati elettrici invece dei due attuali, il numero delle linee diminuirebbe a vantaggio di dimensioni, velocità e minor consumo di energia [27, 28].
Nel settore delle memorie, poter immagazzinare più di un bit per ogni cella è vantaggioso sia in termini di dimensioni, sia in termini di velocità di accesso. In questo settore, già dai primi anni '90, sono state realizzate memorie capaci di due/quattro bit per cella, utilizzando più livelli di potenziale, diminuendo proporzionalmente le dimensioni ed ottenendo anche un discreto aumento della velocità di accesso ai dati. Non sono lontani chip di memoria a 16 bit/cella. Grazie a questa innovazione oggi possiamo tenere nel palmo della

[5] Un proposta di costruire un computer ternario bilanciato apparve in "*High-speed Computing Devices*", una rassegna delle tecnologie informatiche dell'epoca, pubblicato dalla marina degli Stati Uniti nel 1950. Negli stessi anni H.R.J. Grosch, ingegnere della Engineering Research Associates, propose l'architettura ternaria per il progetto dello Whirlwind del MIT, che poi fu realizzato in binario e che divenne il "cervello" del sistema SAGE per la vigilanza radar del Nord America. Nel 1973 G. Frieder realizzò un sofware di emulazione per il progetto di TERNAC, un computer ternario che non vide mai la luce. (Frieder G., et al. "*A balanced-ternary computer*" International Symposium on Multiple-valued Logic, 1973, p. 68-88.)

mano 4 GByte di dati, in un oggetto grande quanto un accendino.
Queste applicazioni, diversamente da quanto verificato nel SETUN, sono multivalore solo dal punto di vista fisico-circuitale, ma rimangono binarie per quanto riguarda gli aspetti logico-algebrici: i dati sono pur sempre binari, per potere essere comunicati alle altre unità del calcolatore.
Sul fronte della MVL propriamente detta, molti centri di ricerca stanno studiando la realizzazione di circuiti logici multivalore a tre o più stati. L'obiettivo è quello di ottenere una diminuzione della dissipazione di calore, che riduce le prestazioni del microchip, e contemporaneamente sfruttare i vantaggi logico-aritmetici del ternario bilanciato di cui si è accennato [29, 30, 31]. Una delle prime realizzazioni sperimentali di circuiti logici a tre valori è stata la logica SUS-LOC (*SUpplementary Symmetrical LOgic Circuit*), progettata nel 1990 dall'americano Dan Olson dell'EDO Corporation. Questa piattaforma ha permesso di costruire, oltre ad una versione ternaria delle elementari porte logiche, anche circuiti completi di addizionatori e moltiplicatori.
I calcolatori del futuro diventeranno quindi ternari, come prevedevano Knuth, Aiken e Pospelov? Forse sì, ma solo in alcuni casi; per esempio là dove specifici problemi di calcolo potrebbero necessitare di algoritmi più efficienti. Più probabilmente, per motivi essenzialmente legati alla miniaturizzazione, ai consumi e alla dissipazione termica, si adotteranno logiche multivalore a quattro, otto o sedici stati, evitando così i non piccoli problemi di interfacciamento tra il sistema ternario e quello binario, che inevitabilmente sopravviverà in alcune parti del calcolatore.

Bibliografia

[1] Tabacco M.: *Leibniz e la numerazione binaria*. Edizioni Associate, 2004.

[2] Lodder J.: *Binary Arithmetic: From Leibniz to von Neumann- An Historical Project*. New Mexico State University, Department of Mathematical Sciences, http://www.math.nmsu.edu/hist_projects/binaryl.pdf.

[3] Losano M.G., (a cura di): *Leibniz, calcolo con zero e uno*. Etas Kompass, 1971.

[4] Glaser A.: *History of Binary and Other Nondecimal Numeration*. Tomash Publishers, 1971.

[5] von Mackensen L.: *Il calcolo binario nell'opera di Leibniz: il sistema e la macchina*. In: Convegno Internazionale sulla Storia e Preistoria del Calcolo Automatico e dell'Informatica; AICA, 1991, p. 293-307.

[6] Williams M.R.: *History of Computing Technology*. IEEE Computer Society, 1997.

[7] Goldstine H.H.: *The Computer from Pascal to von Neumann*. Princeton University Press, 1993.

[8] Buck G.H., Hunka S.M.: W. Stanley Jevons, Allan Marquand, and the Origins of Digital Computing. *IEEE Annals of the History of Computing*, Vol. 21, n. 4, 1999, p. 21-27.

[9] Aspray W. (a cura di): *Computing before computers*. Iowa State University Press, 1990, p. 117.

[10] Shannon C.: *A Symbolic analysis of relays and switching circuits*. Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Electrical Engineering, 1938.

[11] Golomb S.W., et al.: Claude Edwood Shannon (1906-2001). *Notices of the AMS*, Vol. 49, n. 1, 2002, p. 8-16.

[12] Zuse K.: *Einführung in die allgemeine Dyadik*. 1938, In: Konrad Zuse Internet Archiv, http://www.zib.de/zuse/Inhalt/Texte/Chrono/30er/Html/Dyadik3/dyadik3.html.

[13] Zuse K.: *The Computer my Life*. Springer Verlag, 1993, p. 46-47;

[14] Randell B.: *The origins of digital computer*. Springer Verlag, 1982, p. 121, 176, 293.

[15] Burks A.R., Burks A.W.: *The First Electronic Computer - The Atanasoff Story*. The University of Michigan Press, 1989.

[16] von Neumann J.: First Draft of a Report on the EDVAC. A cura di in: Godfrey M.D. *IEEE Annals of the History of Computing*, Vol. 15, n. 4, 1993, p. 27-43.

[17] Godfrey M.D., Hendry D.F.: The Computer as von Neumann planned it. *IEEE Annals of the History of Computing*, Vol. 15, n. 1, 1993, p. 11-21.

[18] Aspray W.: *John von Neumann and the Origins of Modern Computing*. The MIT Press, 1990.

[19] Glusker M., et al.: The Ternary Calculating Machine of Thomas Fowler. *IEEE Annals of the History of Computing*, Vol. 27, n. 3, 2005, p. 4-22. Vedi anche: http://www.mortati.com/glusker/fowler/index.htm;

[20] Knuth D.: *The art of computer programming, Vol. II, Seminumerical algorithms*. Addison-Wesley, 1969.

[21] Cohen I.B., Welsh W.G. (a cura di): *Makin' Numbers. Howard Aiken and the Computer*. The MIT Press, 1999, p. 131-132.

[22] Trogemann G., Nitussov A. Y., Ernst W. (a cura di): *Computing in Russia*. Vieweg Pub., 2001, p. 90-91.

[23] Brousentsov N. P., et al.: *Development of ternary computers at Moscow State University*. http://www.computer-museum.ru/english/setun.htm

[24] Stakhov A.: Brousentsov's Ternary Principle, Bergman's Number System and Ternary Mirror-symmetrical Arithmetic. *The Computer Journal*, Vol. 45, 2002, p. 221-236. In: [18].

[25] Perkowski M.: *Multiple Value Logic*. http://web.cecs.pdx.edu/~mperkows/ISMVL/=index.html

[26] Lablans P.: *Multi-Valued Logic*. http://www.multivaluelogic.com.

[27] Gulak P.G.: *A Review of Multiple-Valued Memory Technology*. The 28-th International Symposium of Multiple-Valued Logic, Fukuoka, Japan, May 1998, p. 222-231.

[28] Smith K.C.: Multiple Valued Logic: A Tutorial and Appreciation. *Computer*, Vol. 21, n. 4, 1988, p. 17-27.

[29] Sentieys O.: *Multiple Valued Logic*. http://www.irisa.fr/cosi/SEMINAIRE/transparents/MVL-juin%202001.pdf .

[30] Dubrova E.: *Multiple-Valued Logic in VLSI: Challenges and Opportunities*. 31-st International Symposium on Multiple-Valued Logic, Warsaw 2001.

[31] Bhattacharjee A.: *A polar place value number system*. http://www.abhijit.info/tristate/tristate.html

[32] Connelly J.: *Trinary Computer Systems*. http://xyzzy.freeshell.org/trinary/

[33] Hayes B.: Third Base. *American Scientist*, Vol. 89, n. 6, 2001, p. 490-494.

Silvio Hénin è cultore di storia della tecnologia, in particolare del calcolo automatico. Diplomato in Elettronica e laureato in Scienze Biologiche, ha lavorato per un decennio all'Università di Milano per poi passare alla farmaceutica Roche dove ha implementato sistemi computerizzati per l'information management e retrieval. Fondatore di un'associazione di information scientists (GIDIF-RBM), è stato membro del direttivo dell'Associazione Italiana Documentazione Avanzata (AIDA) e del Comitato per la documentazione di Federchimica. Collabora saltuariamente con la rivista Le Scienze nell'ambito della storia dell'informatica.
E-mail: silvio.henin@fastwebnet.it