

L'evoluzione dell'informatica: aspetti tecnologici (*)

FRANCO FILIPPAZZI

Honeywell Information Systems Italia

1. Introduzione

Poiché il futuro è, in una certa misura, la derivazione logica del passato, conviene cominciare brevemente da quest'ultimo. Ci sembra, a tale fine, appropriato limitarci a considerare quanto accaduto nell'ultimo quinquennio.

In questo periodo, relativamente breve, l'elaboratore ha registrato un ulteriore formidabile passo in avanti; usando una terminologia del settore, si può senz'altro dire che tra gli elaboratori dell'inizio degli anni '70 e quelli attuali esiste un salto di generazione. Da un punto di vista globale, il rapporto costo/prestazioni dei sistemi è infatti migliorato di circa un ordine di grandezza. Da un punto di vista più specifico, il periodo in

considerazione ha visto il sorgere di nuove tecnologie ed il contemporaneo tramonto di altre. Tra quelle tramontate, clamoroso è il caso del "nucleo magnetico", l'anellino di ferrite che per oltre tre lustri, ha dominato incontrastato il campo delle memorie veloci. Ancora agli inizi degli anni '70 la tecnologia concorrente, basata sui circuiti integrati a semiconduttore, era ben lungi dall'eguagliare le caratteristiche economiche e funzionali offerte dal nucleo magnetico. Tale condizione venne raggiunta nel 1974 (fig. 1) ed oggi le memorie a circuiti integrati hanno completamente soppiantato quelle a nuclei magnetici.

Il caso citato è doppiamente significativo: se, infatti, da un lato esemplifica un radicale cambiamento tecnologico intervenuto nel periodo considerato, dall'altro esso è rappresentativo di un orientamento di portata generale, applicabile a tutte le funzioni di base dell'elaboratore, al di là del caso specifico della memoria. Questa strada maestra del progresso tecnologico va sotto il nome di "integrazione circuitale".

(*) Presentato al "II° Convegno di aggiornamento sull'informatica per i giornalisti scientifici italiani", St. Vincent, 23 settembre 1977).

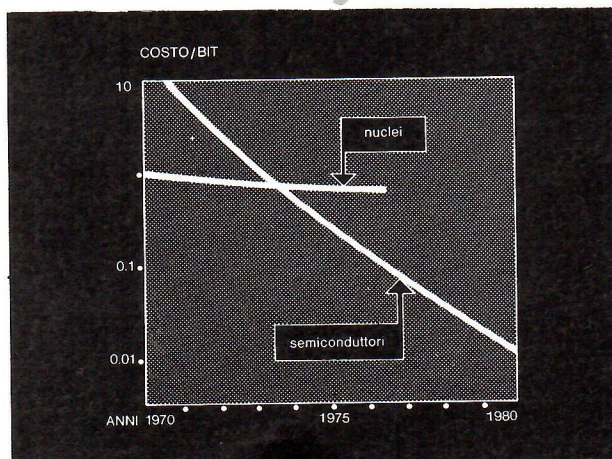


Fig. 1 - Un fondamentale cambiamento tecnologico degli anni '70: dalle memorie a nuclei magnetici alle memorie a semiconduttori.

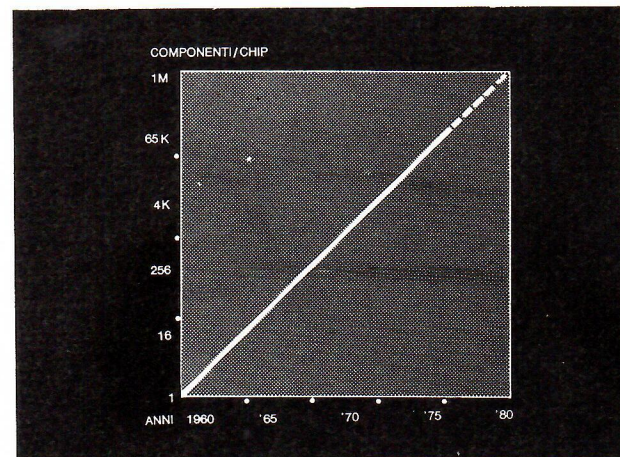


Fig. 2 - Andamento della complessità dei circuiti integrati: un raddoppio ogni anno.

2. L'integrazione circuitale

I circuiti integrati sono nati, come è noto, agli inizi degli anni '60 sotto la spinta delle esigenze delle imprese spaziali, e si sono poi estesi rapidamente ad altri settori di applicazione. L'indice fondamentale del progresso di questa tecnologia è rappresentato dalla complessità del "chip", ossia dal numero di componenti circuitali, tra loro interconnessi, realizzati in una singola, minuscola tessera di materiale. L'andamento storico di tale indice è illustrato nella fig. 2.

Occorre rilevare che il diagramma di fig. 2 si riferisce alla complessità praticamente utilizzata nelle varie epoche. Tali valori non corrispondono alla complessità massima tecnicamente realizzabile in ogni epoca, bensì alla complessità per cui risulta minimo il costo unitario (fig. 3). Una giustificazione dell'esistenza di tale minimo è fornita dalla fig. 4. Ogni curva si può infatti ritenere la risultante di due componenti aventi andamento opposto: il costo dell'elemento attivo (il "chip") e il costo di montaggio e prova del medesimo.

Il costo del chip dipende dal costo del processo e dallo scarto che esso comporta. Aumentando le dimensioni del chip, lo scarto aumenta a causa della incidenza dei difetti distribuiti casualmente sul substrato in lavorazione. In base ad un semplice modello, si ha che, se con una data dimensione del chip si ottiene uno scarto del 90%, raddoppiando tale dimensione lo scarto sale al 99%. In questo caso, un numero doppio di funzioni verrebbe a costare 20 volte di più. (Infatti, il costo del processo raddoppia in quanto tale diviene l'area di silicio usata, mentre un ulteriore fattore 10 è introdotto dal citato aumento degli scarti). Complessivamente, questa componente del costo risulta una funzione esponenziale del numero N di funzioni contenute nel chip. L'altro maggiore elemento di costo è dovuto al montaggio e alla prova del chip. La prima operazione include la realizzazione di interconnessioni microscopiche, che costituiscono la transizione meccanica dalle dimensioni proprie del chip (10 micron di distanza tra i terminali) a quelle tipiche del mondo esterno (circa 250 volte maggiori). In prima approssimazione, il costo di montaggio è indipendente dalla complessità del chip, mentre il costo di prova cresce molto più lentamente di tale complessità. Globalmente, si può quindi ritenere che questi fattori incidano sul costo unitario in modo inversamente proporzionale alla complessità N del chip.

Dalla fig. 2 si può rilevare come, dalla introduzione dei circuiti integrati ad oggi, il numero di funzioni contenute in un chip sia andato aumentando con ritmo costante, raddoppiando in media ogni anno. Se tale ritmo di incremento della complessità si dovesse mantenere, nel 1980 dovremmo disporre di chip con un milione di elementi e arrivare ad un miliardo dieci anni più tardi.

Ciò equivale alla disponibilità di chip di memoria con capacità da 64 K bit a 128Kbit agli inizi degli anni '80 e chip da un megabit (2^{20} bit) dieci anni dopo. Per strutture non regolari e ripetitive come le memorie, il livello di integrazione risulta minore; si può tuttavia prevedere di raggiungere i 25-50.000 circuiti logici ("gates") per

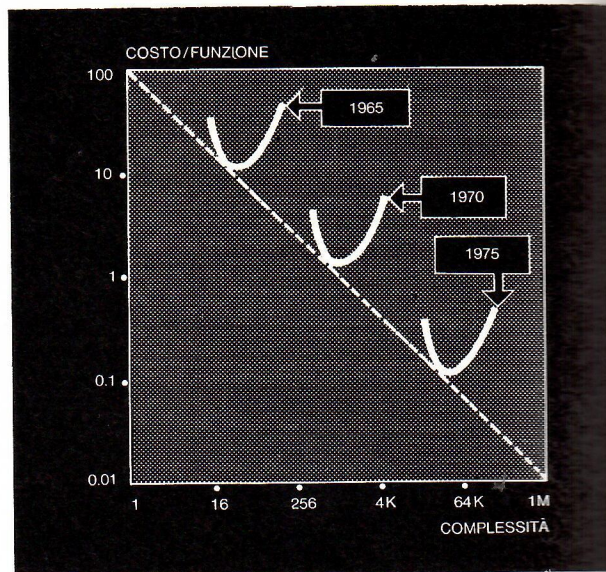


Fig. 3 - Andamento nel tempo del costo per funzione dei circuiti integrati. (La complessità adottata in pratica corrisponde al valore che minimizza il costo per funzione).

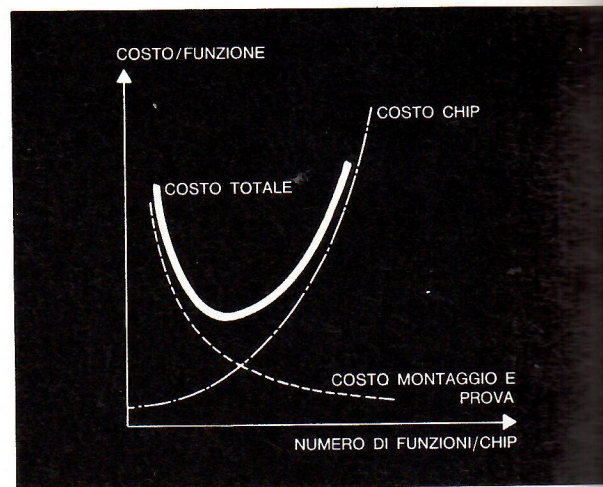


Fig. 4 - Componenti di costo dei circuiti integrati.

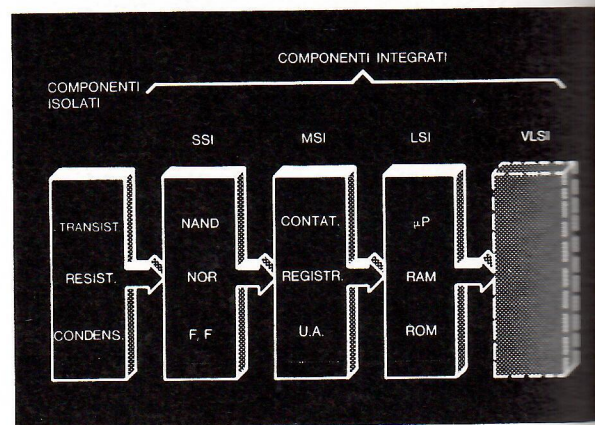


Fig. 5 - Tappe della evoluzione dei circuiti integrati.

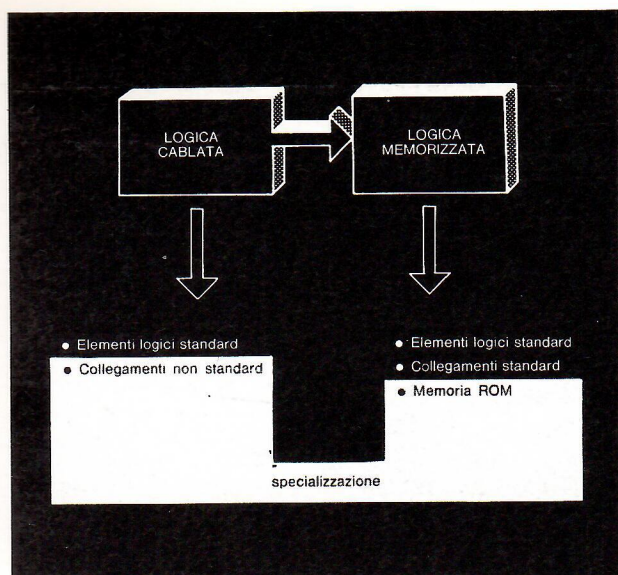


Fig. 6 - Un mutamento concettuale nel "modo di fare l'elaboratore"

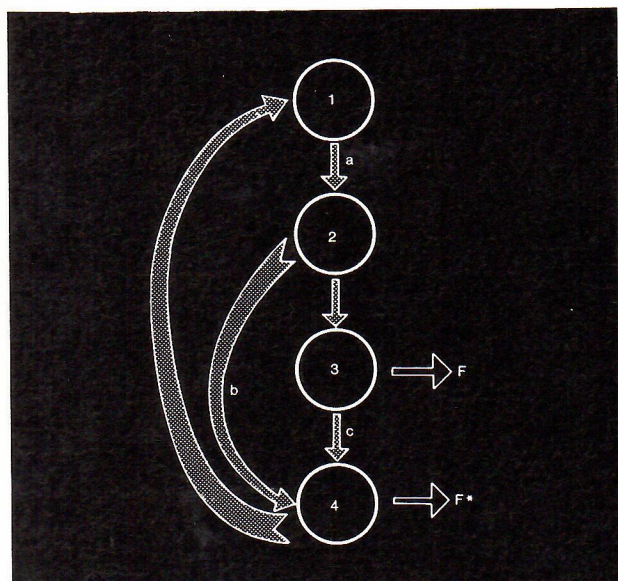


Fig. 7 - Concetto di elaboratore come "automa deterministico"

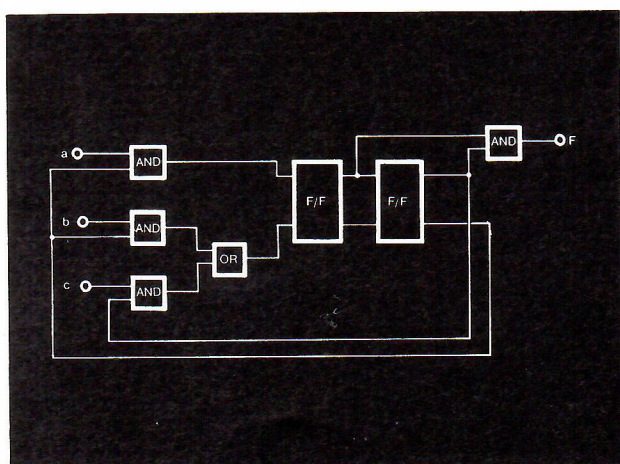


Fig. 8 - Realizzazione "cablata" di un automa deterministico.

chip nel 1980 e i 250-500.000 dieci anni dopo. Questi valori superano il numero complessivo di gates degli attuali elaboratori, rispettivamente di medie e grandi dimensioni.

Il sistematico e impressionante progresso della tecnologia dei circuiti integrati costituisce ormai il fattore determinante di evoluzione dell'intero "hardware" dell'elaboratore. Le tappe di tale evoluzione sono contrassegnate dal livello o "scala" di integrazione, come illustrato nella fig. 5: dopo le fasi di bassa (SSI), media (MSI) ed alta (LSI) integrazione, siamo ormai in vista di una nuova fase, che viene contrassegnata con la sigla VLSI (Very Large Scale Integration).

3. Dalla logica cablata alla logica memorizzata

Le possibilità offerte dalla tecnologia di integrazione circuitale sono alla base di mutamenti concettuali nel modo di progettare e costruire l'elaboratore.

Un primo aspetto è sinteticamente delineato nella fig. 6. Nella concezione tradizionale, il calcolatore era costituito da elementi logici standard, tra loro connessi in modo opportuno. I collegamenti (irregolari) assolvevano cioè la funzione di finalizzare il compito di elementi regolari, tra loro indifferenziati ("logica cablata"). L'avvento della integrazione circuitale su larga scala ha permesso un radicale cambiamento di impostazione che si traduce nell'impiego sia di elementi che di connessioni standard, confinando le irregolarità che finalizzano l'insieme in un organo intrinsecamente regolare quale è una memoria. È questo il concetto di "logica memorizzata".

L'identità funzionale dei due approcci menzionati può essere meglio compresa rifacendoci al modello dell'elaboratore come "automa deterministico" (o "automa a stati finiti"). Per chiarire questo concetto, si prenda in considerazione la fig. 7, che visualizza il funzionamento di un calcolatore elementare. La macchina può esistere in quattro stati differenti, contrassegnati con i numeri da 1 a 4. Il passaggio da uno stato ad un altro è, in generale, vincolato dalla presenza di "condizioni" dettate dal mondo esterno; nello schema ne sono presenti tre, indicate con le lettere a, b, c. Ad esempio, se manca la condizione b, la macchina passa dallo stato 2 al 3; in presenza di detta condizione, essa salta invece dallo stato 2 al 4. La macchina è predisposta per realizzare un determinato compito; ad esempio, nello schema in esame, quello di azionare un comando quando arriva nello stato 3 e di azzerarlo quando arriva nello stato 4. L'operazione della macchina non si svolge in modo univoco, ma presenta un ventaglio di possibili sequenze, a seconda le condizioni esistenti, in accordo col "diagramma di stato" di fig. 7.

La funzionalità descritta può essere realizzata nel modo tradizionale, collegando in modo opportuno un certo numero di elementi circuitali (ad esempio, come in fig. 8). Questo approccio (con "logica cablata") presenta chiaramente una scarsa flessibilità (verso modifiche o aggiunte alle funzionalità della macchina) e, inoltre, limitazioni di complessità (man mano che si conside-

rano macchine più grandi, diventa sempre più difficile progettarle in modo ottimale).

La soluzione a "logica memorizzata" si basa sulla considerazione che la macchina può essere descritta da un insieme di istruzioni elementari ("microistruzioni"), che altro non sono che indicazioni per passare da uno stato ad un altro (fig. 9). Lo schema di fig. 10 realizza questo concetto. Infatti, l'organo centrale dello schema è una memoria ("memoria di controllo") in cui sono registrate le micro-istruzioni, ossia i vari stati della macchina ed i comandi corrispondenti a ciascuno di essi. Un sequenziatore (essenzialmente un contatore) provvede, sulla base delle condizioni esistenti, a definire i successivi passi della macchina. Questa struttura di elaboratore presenta chiaramente una razionalità che quella tradizionale non possiede, e che consente di superarne le rigidità e le limitazioni.

La struttura a logica memorizzata è stata, in pratica, resa attuabile dall'avvento della integrazione su larga scala. Infatti, questa ha permesso di realizzare, in modo funzionalmente ed economicamente adeguato, la memoria di controllo su cui tale struttura si basa. Usualmente si impiega allo scopo un tipo di memoria di estrema semplicità costruttiva, detta memoria di sola lettura o ROM ("Read-Only Memory"), in cui le informazioni non sono modificabili.

4. Il microelaboratore

Se il progressivo aumento della capacità di integrazione trova una ovvia utilizzazione nel caso delle memorie (aumenta proporzionalmente il numero di informazioni registrate su un chip), non altrettanto chiaro fu all'inizio come si dovessero utilizzare le possibilità della LSI per le parti dell'elaboratore che non sono traducibili in strutture regolari come le memorie. Da una complessa gestazione del problema è emersa, infine, in tempi recenti, una soluzione che è ormai universalmente conosciuta col nome di "microprocessor" (o "microelaboratore").

In sostanza, il microprocessor riunisce in un chip tutte le funzioni di controllo e di calcolo di un elaboratore di piccola potenza (fig. 11). Esistono ormai diverse classi di microprocessor, con complessità e sofisticazione crescenti. Nella sua forma più flessibile, il microprocessor si allaccia direttamente allo schema di controllo a logica memorizzata visto in precedenza; in questo caso, la memoria ROM è realizzata normalmente in un chip a parte.

Più in generale, il microprocessor costituisce l'"Unità Centrale" (CPU = Central Processor Unit) di un sistema di elaborazione ("microcomputer") che comprende memorie vive (RAM = Random Access Memory), memorie morte (ROM) e unità di Ingresso/Uscita verso dispositivi periferici. Per realizzare un microcomputer la struttura universalmente usata è quella cosiddetta a "bus" (fig. 12). In questo schema, tutti i componenti del sistema comunicano tra loro attraverso una pista comune ("bus"), mediante la quale si scambiano dati, istruzioni e comandi.

La struttura di fig. 12 realizza in modo completo l'evoluzione dalla logica cablata alla logica memorizzata: un

Numero micro-istruz.	Equival. stato macchina	Micro-istruzione
1*	1	se a è vero, salta la prossima istruzione
2*		salta alla precedente istruzione
3*	2	se b è vero, salta alla istruzione 6; altrimenti passa alla prossima
4*	3	se c è vero, salta la prossima istruzione
5*		salta alla istruzione precedente
6*	4	salta alla istruzione 1

Fig. 9 - La descrizione di un automa deterministico come insieme di istruzioni elementari.

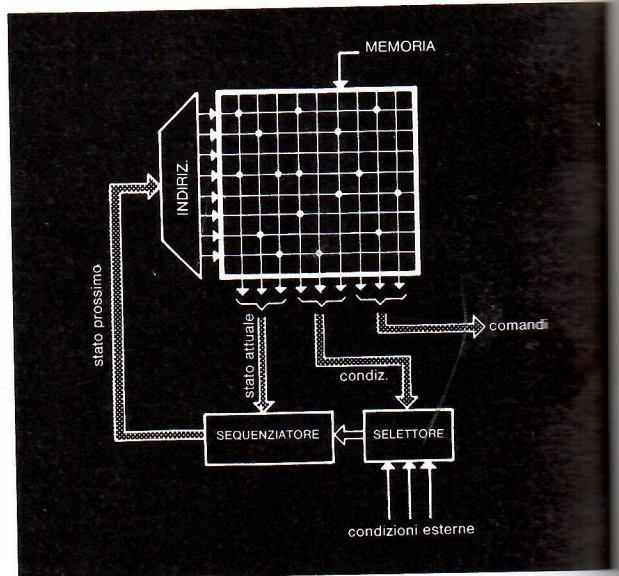


Fig. 10 - Realizzazione con "logica memorizzata" di un automa deterministico.

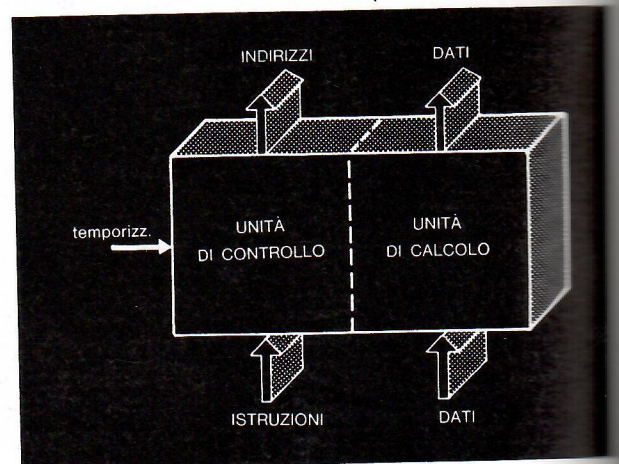


Fig. 11 - Il "microprocessor": una piccola unità centrale di elaborazione in un singolo chip.

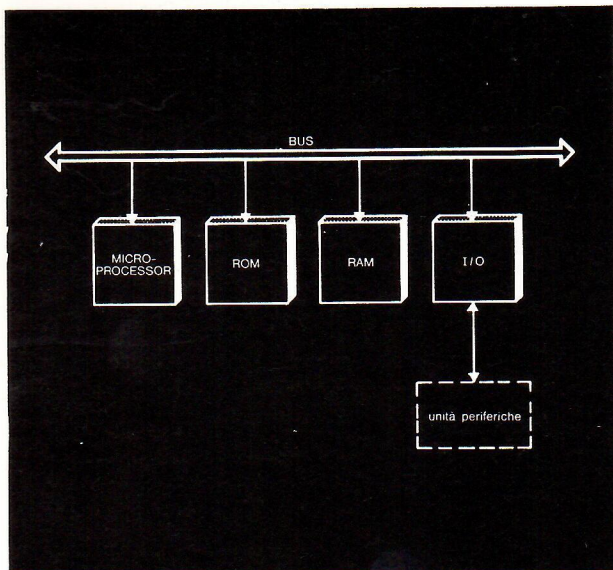


Fig. 12 - Il "microcomputer" come "scatola di montaggio" di chip LSI standard.

Tipica CPU	Numero di circuiti	Volume (m ³)	Prezzo (\$)
a valvole (1955)	10.000	20	10 ⁶
a transistori (1969)	10.000	2	10 ³
a LSI (attualm.) (microprocessor)	10.000	10 ⁻⁷	10 ²

Fig. 13 - L'unità centrale di elaborazione: dall'era delle valvole a quella dei circuiti integrati su larga scala.

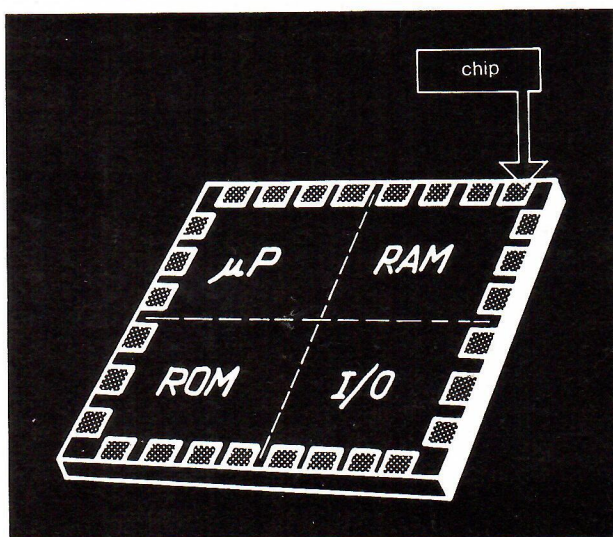


Fig. 14 - Il circuito logico "universale".

sistema viene costruito ormai con un approccio tipo "scatola di montaggio", cioè mediante un insieme ("kit") di pochi pezzi standard, ognuno dei quali costituito da un chip LSI contenente una intera unità funzionale logica o di memoria.

Il microprocessor rappresenta uno straordinario risultato della tecnologia, come è messo in evidenza dalla tabella di fig. 13. Esso costituisce, inoltre, un nuovo ed eccezionale mezzo per la diffusione delle tecniche dell'informatica non solo nei settori tradizionali, ma anche in una gamma vastissima di nuove applicazioni, sia professionali che non. I microprocessor sono stati paragonati ai motori aventi frazioni di HP: essi sono perciò destinati ad apparire ovunque nella normale vita quotidiana, in casa, in ufficio, nell'automobile, sul lavoro come negli svaghi. Una rivista americana ha recentemente pubblicato una lista di oltre 300 potenziali applicazioni del microprocessor.

L'ulteriore, prevedibile progresso della tecnologia condurrà in un futuro non lontano a realizzare l'intero microcalcolatore di fig. 12 in un unico chip, avente centinaia di migliaia di componenti (fig. 14). Ciò costituirà la realizzazione di una antica aspirazione nel campo dell'elaborazione e dell'automazione in generale: il circuito logico "universale", unico e sofisticato "mattoncino" nella costruzione di un qualsiasi sistema.

5. Verso l'intelligenza distribuita

Le accennate possibilità della tecnologia costituiscono lo stimolo per nuove idee e nuove concezioni sulla struttura dell'elaboratore. Fino ad oggi, la concezione dell'elaboratore è rimasta sostanzialmente quella originaria di Von Neumann: una struttura gerarchica, monoblocco, con funzioni di controllo accentrate.

La fig. 15 schematizza questa struttura "a cipolla", con le velocità di operazione tipiche di ciascuno strato. Le nuove concezioni costituiscono un sostanziale distacco da questo schema. Traendo vantaggio dalle possibilità della tecnologia, si va ora delineando un disegno modulare, costituito da un insieme di processor indipendenti, ma tuttavia in grado di concorrere ad un processo comune e di sostituirsi, all'occorrenza, l'uno all'altro. Questa architettura "multiprocessor" è schematizzata nella fig. 16, in una versione con collegamenti a "bus".

I vantaggi di una struttura come quella accennata sono innumerevoli: dall'aumento di velocità (dovuto al parallelismo di operazione), alla flessibilità (derivante dalla modularità), alla affidabilità e disponibilità del sistema (mentre in una macchina tradizionale un guasto dell'unità centrale mette fuori servizio l'intero sistema, in questo caso esso continua a funzionare, anche se con prestazioni ridotte). Non è privo di interesse accennare al fatto che il cervello biologico è probabilmente basato su una struttura di questo tipo, costituita da una miriade di microprocessor. Questa ipotesi giustificherebbe non solo le doti di reliability ma anche l'eccezionale capacità di elaborazione del cervello malgrado la bassa velocità di cui sono dotati i suoi componenti (i "neuroni").

Da quanto si è detto, un calcolatore multiprocessor si

può definire un sistema con "intelligenza distribuita". Questo stesso concetto si può estendere al caso in cui il sistema non sia fisicamente concentrato, ma le parti che lo costituiscono siano tra loro distanti e collegate mediante mezzi di telecomunicazione (linee telefoniche, ponti radio, ecc.). Si parla in questo caso di "sistema policentrico". Occorre osservare che il concetto cui ci riferiamo è molto diverso dalla elaborazione a distanza, come finora realizzata, in cui un calcolatore centrale viene utilizzato da punti periferici (terminali). Questo costituisce, infatti, ancora un sistema tradizionale, di tipo gerarchico. In un sistema policentrico, ogni nodo è invece in grado di svolgere localmente una attività di elaborazione autonoma, e allo stesso tempo di richiedere o prestare capacità di elaborazione a tutti gli altri nodi della rete. Il sistema può, cioè, essere visualizzato come un insieme di serbatoi di capacità di elaborazione tra loro comunicanti.

L'orientamento verso sistemi distribuiti territorialmente, in contrapposizione agli attuali sistemi centralizzati, trova giustificazione oltre che in ragioni funzionali e organizzative, in fattori economici. Dal grafico di fig. 17 si può infatti rilevare come, diversamente che in passato, il costo di elaborazione delle informazioni sia attualmente inferiore al costo di trasmissione delle medesime e come tale divario tenda a crescere in futuro. Da qui la convenienza di elaborare, per quanto possibile, le informazioni localmente in modo da diminuire il volume delle informazioni trasmesse. A fronte di queste considerazioni, si deve, invero, aggiungere che la diffusione di sistemi distribuiti geograficamente non potrà procedere che gradualmente; infatti, a parte i problemi tecnici ancora da risolvere, il passaggio dall'attuale concezione centralizzata ad una filosofia di decentralizzazione del sistema informativo comporta una profonda trasformazione organizzativa da parte dell'utente.

Il concetto di sistema distribuito è ulteriormente illustrato nella fig. 18, attraverso il confronto con una struttura tradizionale (in cui ogni componente comunica soltanto col livello gerarchico immediatamente superiore), nonché con una struttura di tipo biologico (in cui esistono tutte le possibili interconnessioni). Come si vede, un sistema distribuito rappresenta una soluzione che unisce i pregi di entrambe le strutture, evitando le ridondanze della seconda e le limitazioni della prima.

Le architetture distribuite, nelle loro diverse accezioni, costituiscono una fondamentale linea di tendenza dei sistemi di elaborazione per gli anni a venire. Vale la pena di ribadire che queste nuove architetture traggono origine e validità dal progresso della tecnologia: esse sarebbero semplicemente inconcepibili se i singoli processor avessero le dimensioni, la dissipazione ed il costo propri delle tecnologie precedenti.

6. La problematica del software

I temi di cui ci siamo fino a questo punto occupati afferiscono all'*hardware* dell'elaboratore. Come è noto, questo rappresenta però solo una delle due facce dell'elaborazione dei dati, l'altra essendo costituita dal *soft-*

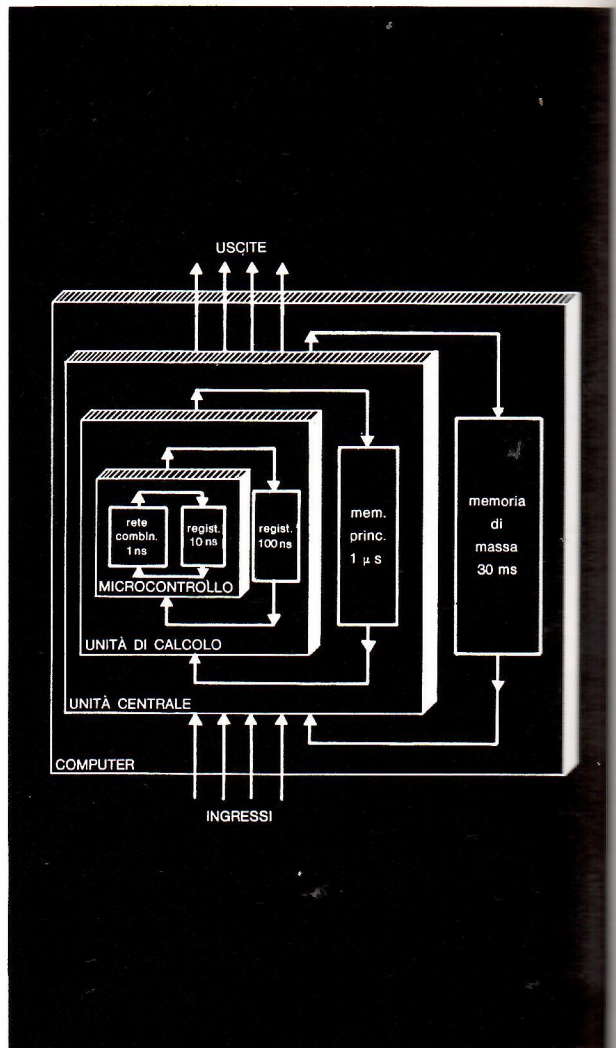


Fig. 15 - La concezione tradizionale dell'elaboratore: una struttura "a cipolla", con un controllo centralizzato.

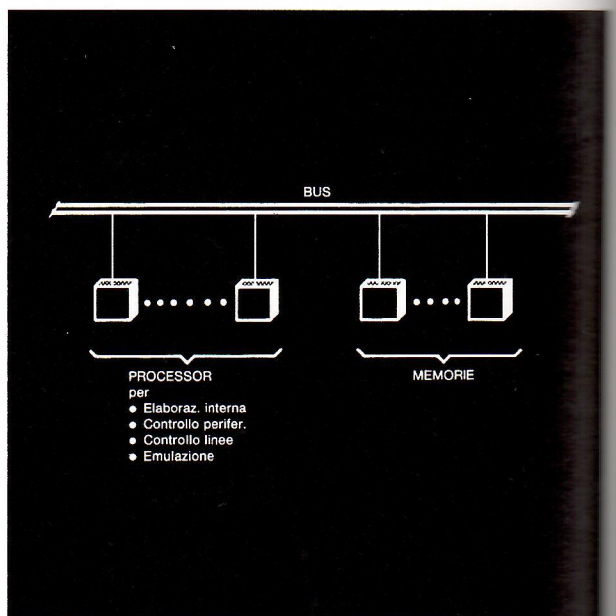


Fig. 16 - La nuova concezione dell'elaboratore: una struttura modulare, con controllo "distribuito" (architettura "multiprocessor").

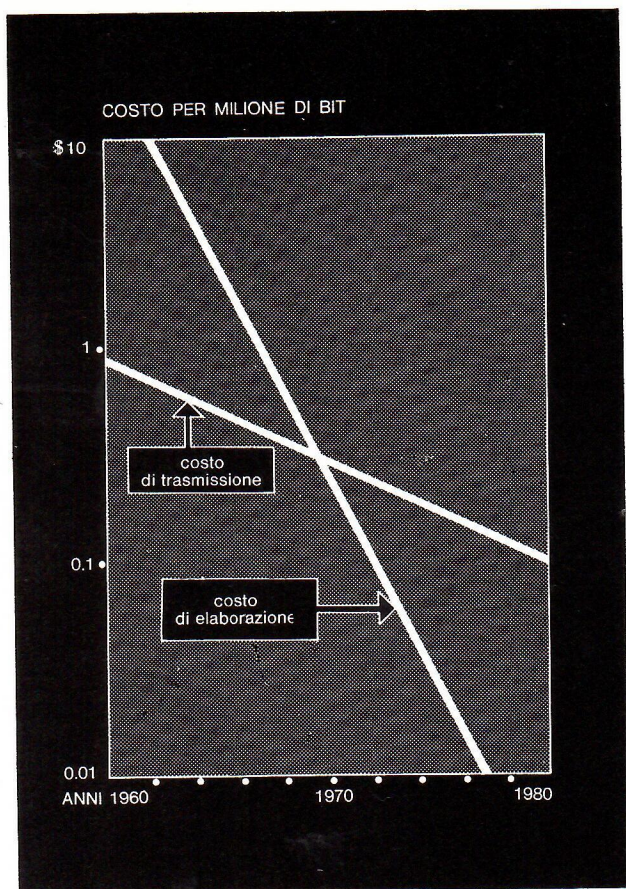


Fig. 17 - Costo di elaborazione e costo di trasmissione su una rete.

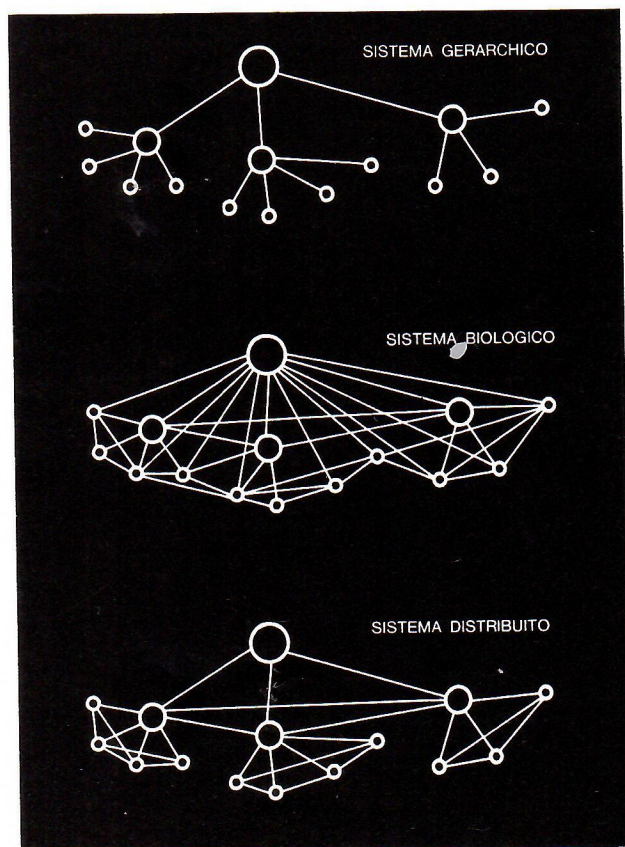


Fig. 18 - Il concetto di sistema distribuito, confrontato con i sistemi tradizionali e quelli biologici.

ware. Vale la pena di richiamare questi concetti rifacendoci (fig. 19) alla differenza di base tra "calcolatore" (computer) e "calcolatrice" (calculator). Nel caso della calcolatrice (ad es. una macchina che esegue le quattro operazioni), la sequenza delle operazioni da svolgere, cioè il "programma", risiede nella mente dell'operatore umano. In un calcolatore, invece, il programma è contenuto nella macchina stessa, che lo esegue quindi automaticamente. (Il programma è, analogamente, in questo caso, una sequenza di "istruzioni" che la macchina è in grado di riconoscere ed eseguire). La macchina costituisce l'hardware del sistema, mentre i programmi ne costituiscono il software. I programmi risiedono nella "memoria" della macchina, insieme coi dati su cui operare. Poiché nella memoria le informazioni possono essere cancellate e sostituite senza alterare la sua struttura fisica (come avviene ad es. per una lavagna), ne consegue che uno stesso hardware, cioè uno stesso calcolatore, può eseguire una serie virtualmente illimitata di programmi diversi su dati diversi.

Hardware e software costituiscono quindi aspetti complementari ed integranti del processo di elaborazione automatica dell'informazione. Il software che, in sostanza, traduce in istruzioni eseguibili dalla macchina il procedimento di soluzione di un problema, costituisce un tipico prodotto intellettuale, i cui strumenti di produzione sono, sostanzialmente, carta e matita. Malgrado questa semplicità di mezzi, il software tende ormai a costituire la parte preponderante del costo di elaborazione, nonché un vero e proprio collo di bottiglia per l'ulteriore diffusione di quest'ultima.

Se si esamina l'andamento storico dei costi hardware e software per l'utente si può constatare che, mentre all'inizio dell'era dei calcolatori il costo complessivo era sostanzialmente imputabile all'hardware, la situazione è andata modificandosi sino ad un totale capovolgimento. Ciò è illustrato dal diagramma di fig. 20. Anche se, in effetti, esso è riferito soprattutto a grandi utenti, rimane comunque rappresentativo del fenomeno. In previsione, il peso relativo del software sembra destinato ad aumentare; in alcuni settori si stima che nel 1985 esso ammonterà al 90% del costo totale. Alcuni dati possono ulteriormente chiarire le dimensioni del fenomeno. La NASA spende ogni anno per l'elaborazione dei dati 100 milioni di dollari per l'hardware contro 200 milioni per il software, pari quest'ultimo al 6% del budget annuale. Un singolo progetto, il programma per l'invio dell'uomo nello spazio, è costato complessivamente, nel periodo 1960-70, un miliardo di dollari in software. La spesa totale in USA per il software è stimata attorno ai 12 miliardi di dollari all'anno, pari a oltre l'1% del prodotto nazionale lordo, con un numero di addetti che si avvicina al mezzo milione.

Il fatto che ormai la spesa per i programmi superiori quella per la macchina è imputabile, da un lato, al continuo aumento delle applicazioni, e quindi al numero e alla complessità dei programmi richiesti, ma è dovuto soprattutto al fatto che mentre l'hardware ha registrato, a parità di prestazioni, una formidabile riduzione di costi, il costo unitario di fabbricazione del software non solo non è diminuito ma è andato anzi

man mano aumentando. Ciò è illustrato nella fig. 21, che mette a confronto il costo medio di realizzazione (software) e quello di elaborazione (hardware) per una istruzione. Mentre il secondo nel giro di 20 anni è diminuito di circa 10.000 volte, il primo, nello stesso periodo di tempo, è all'incirca raddoppiato.

Questo andamento del costo unitario di fabbricazione del software è la risultante di due fattori divergenti: infatti, pur essendo, in una certa misura, aumentata la produttività (numero di istruzioni pro capite nell'unità di tempo), essa è stata però più che bilanciata dal parallelo aumento del costo del personale. Vale la pena, a questo punto, di approfondire alcune differenze tra hardware e software.

Dall'introduzione dell'elaboratore ad oggi, l'hardware ha conosciuto non solo una serie continua di fondamentali innovazioni tecnologiche, ma anche un ininterrotto progresso sul piano metodologico, nella progettazione come nella fabbricazione. In entrambe queste attività sono stati infatti via via introdotti criteri di razionalizzazione che hanno condotto ad un alto livello di efficienza e di automazione, di cui la diminuzione dei costi costituisce la testimonianza tangibile.

Non altrettanto si può dire per il software. La produttività nella attività di programmazione, dopo un salto qualitativo verificatosi nel periodo 1955-65 in concomitanza con lo sviluppo dei linguaggi ad alto livello, si è attestata su un tasso di incremento molto basso, dell'ordine del 3% annuo (da confrontarsi con un 60% del rapporto costo/prestazioni dell'hardware). La fabbricazione del software è rimasta infatti una attività di tipo sostanzialmente artigianale, ossia con bassa automazione e largo impiego di uomini.

La mancanza di adeguate basi metodologiche è dunque ciò che oggi maggiormente contraddistingue il software dall'hardware. Nè ciò è imputabile ad un diverso ammontare di ricerca effettuato nell'un caso rispetto all'altro. Per capire meglio il fenomeno del software, è opportuno fare qualche ulteriore considerazione sulle sue caratteristiche.

Un primo punto riguarda la non linearità tra complessità di un programma e sforzo necessario per generarlo. Contrariamente a quanto potrebbe sembrare a prima vista, decuplicando lo sforzo non si costruisce un programma dieci volte più grande. In effetti, al crescere delle dimensioni del programma (cioè del numero di istruzioni di cui è composto), i mesi-uomo richiesti aumentano molto più rapidamente, con una legge di tipo esponenziale (si veda ad es. la fig. 22). Una giustificazione parziale si può trovare nel fatto che il numero di connessioni possibili in un sistema cresce col quadrato del numero dei suoi componenti (fig. 23); pertanto, la complessità di un programma, in termini di interazioni tra le sue parti, aumenta molto più che linearmente. Un secondo punto è costituito dal fatto che, in pratica, risulta impossibile provare un programma in modo completo. Infatti, per garantire che un programma funzioni correttamente, si dovrebbero provare tutti i cammini logici che esso contiene. Ma il numero di tali cammini è eccessivamente elevato; ad es., nel pur semplice programma schematizzato in fig. 24 con un grafo

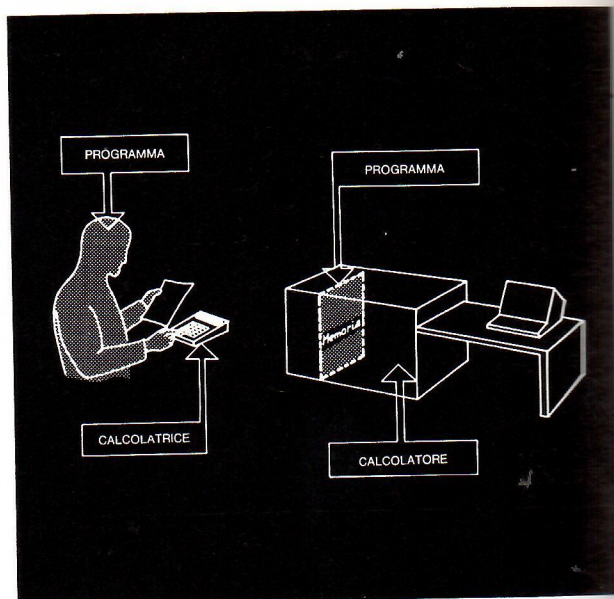


Fig. 19 - I concetti di hardware (la macchina) e di software (i programmi).

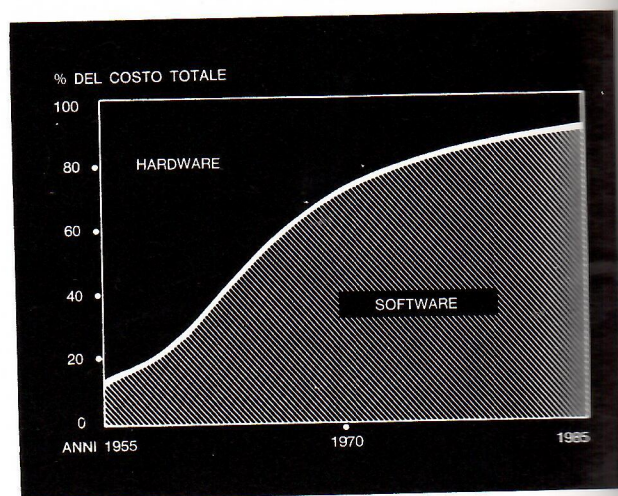


Fig. 20 - Andamento nel tempo dei costi di hardware e di software (costi globali).

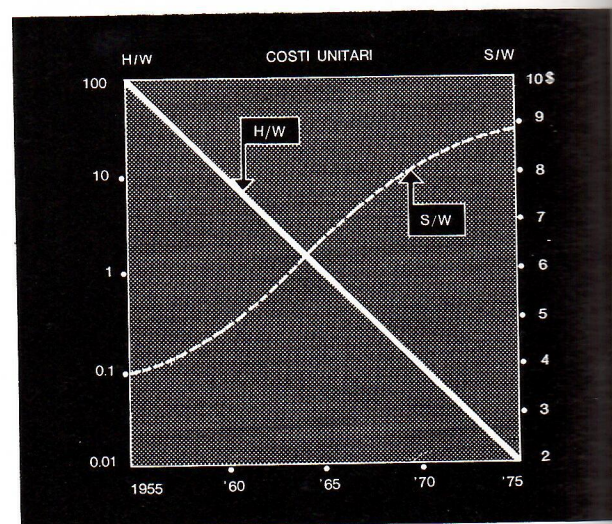


Fig. 21 - Costo di elaborazione (H/W) e costo di realizzazione (S/W) per una istruzione.

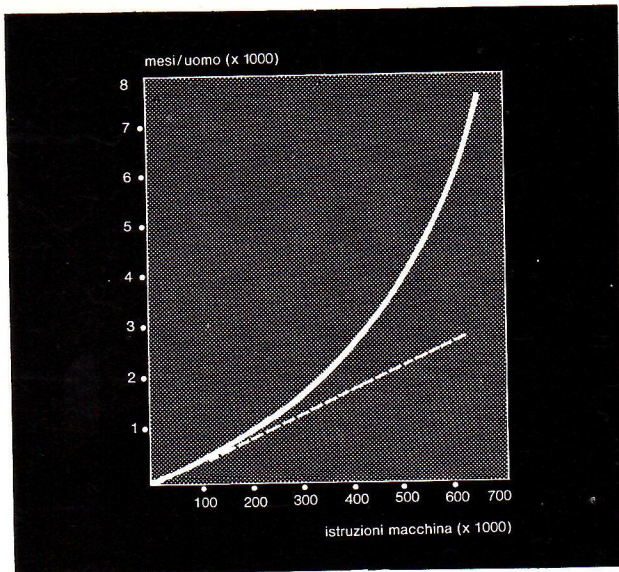


Fig. 22 - Aumento dello sforzo di progettazione al crescere delle dimensioni del programma.

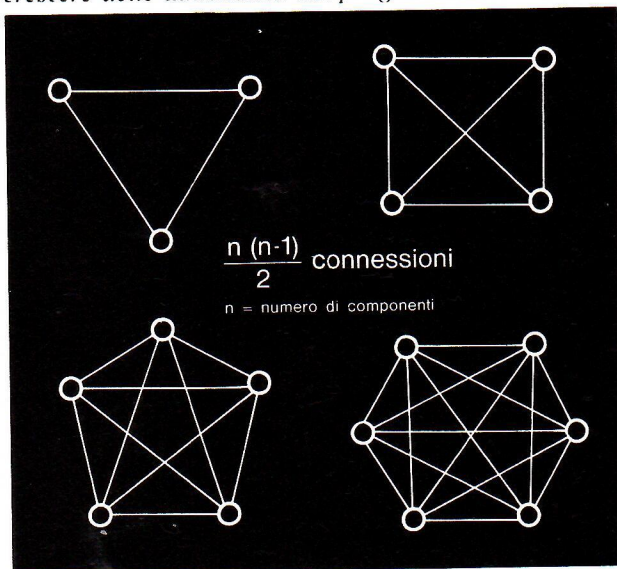


Fig. 23 - Esplosione combinatoria delle interconnessioni.

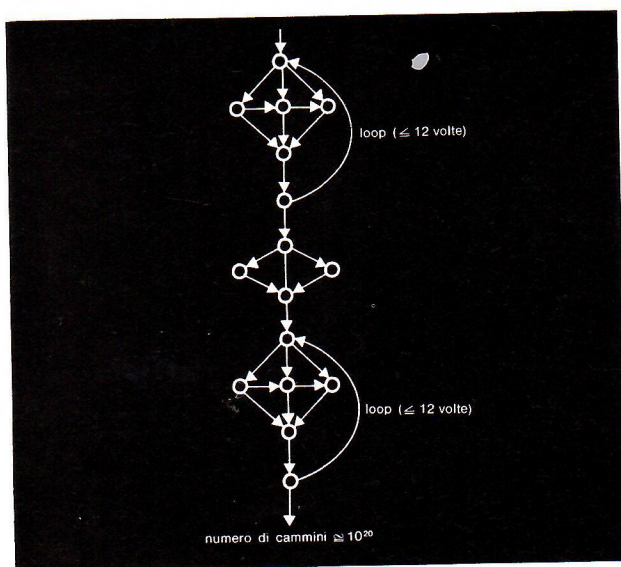


Fig. 24 - Impossibilità di prove esaustive sui programmi.

(i nodi rappresentano le decisioni interne del programma) il numero di cammini diversi è circa 10^{20} ; con un elaboratore che esaminasse un cammino ogni miliardesimo di secondo, occorrerebbero circa 40 secoli per eseguire la verifica! Ne risulta l'impossibilità pratica di prove esaustive del software e quindi l'incertezza della sua affidabilità. È questo un problema molto pesante: basti pensare che, secondo diverse valutazioni, almeno il 40% del costo di progettazione del software è dovuto alla necessità di correzione degli errori riscontrati. Inoltre, circostanza ancora più grave, una parte degli errori vengono scoperti successivamente al rilascio del software all'utente, e talora anche a notevole distanza di tempo. A riprova della difficoltà del problema, si possono citare dei casi di fallimento del software in progetti che, per la loro importanza e costo, avevano ricevuto il massimo di impegno e controllo: il software del progetto Apollo rivelò serie breccie durante i voli di Apollo 8, 11 e 14, mentre una delle missioni interplanetarie MARINER andò persa a causa di errori nel software. A conclusione, si può citare una stima secondo cui solo una parte minore (circa il 25%) del personale finora complessivamente dedicato al software è stato in effetti impiegato a sviluppare nuovi programmi. Il rimanente 75% si è infatti occupato della "manutenzione" del software esistente, cioè della correzione degli errori rilevati dopo il rilascio e degli aggiornamenti (miglioramenti e aggiunte di funzionalità).

Quali prospettive esistono di cambiare la situazione prima delineata? L'orientamento oggi più promettente è costituito da un corpo di metodologie che va sotto il nome di "programmazione strutturata". Un obiettivo di base di questo approccio è la correttezza dei programmi, che viene perseguita in duplice modo, e cioè adottando regole molto semplici di realizzazione, così da ridurre la possibilità di errori, e strutturando i programmi in modo da facilitarne il collaudo. A tali fini, il software da realizzare viene suddiviso in parti aventi un minimo di interconnessioni seguendo una metodologia "top-down", partendo cioè dal generale per arrivare al particolare e procedendo per successivi raffinamenti. Ad ogni livello di dettaglio, gli elementi del livello inferiore vengono considerati come "scatole nere", di cui è nota la funzione ma la cui definizione interna è rimandata al passo successivo. (Tradizionalmente si segue l'approccio opposto, "bottom-up", iniziando cioè dalle parti per arrivare al tutto). Oltre a ciò, nella realizzazione del programma viene impiegato un numero molto ristretto di strutture logiche semplificate (con un solo punto di entrata ed un solo punto di uscita), basate su un ormai celebre teorema degli italiani Bohm e Jacopini. La programmazione strutturata costituisce, sotto diversi aspetti, un approccio metodologico parallelo a quelli tipici dell'hardware; in particolare, essa tende a realizzare il software con un numero limitato di strutture logiche che assumono il ruolo che nell'hardware hanno i componenti.

La programmazione strutturata costituisce senza dubbio il tentativo più significativo sinora fatto per razionalizzare la costruzione del software. La Honeywell I.S.I. è stata antesignana in questo campo in Italia

ed ha contribuito a diffondere queste nuove idee nel nostro paese, dove sono in corso di sperimentazione. La ricerca metodologica è indubbiamente la strada maestra lungo cui proseguire per ottimizzare il problema del software. Ci si può chiedere se non esistano anche altre vie; in particolare, se un contributo alla soluzione del problema non possa venire dall'hardware, che mette a disposizione capacità logiche e di memoria continuamente crescenti a prezzi sempre più bassi. In linea di principio, questa prospettiva esiste, in particolare per quanto riguarda il software di base, cioè l'insieme di programmi che gestiscono in modo automatico il funzionamento del sistema. L'orientamento verso architetture distribuite potrebbe giocare positivamente in questo senso, così come la possibilità di passare dalla tradizionale impostazione onnicomprensiva ("general purpose") dell'elaboratore verso macchine orientate a classi di problemi. Una possibilità specifica, che il progresso della tecnologia lascia intravedere, è l'introduzione di un nuovo tipo di memoria, completamente diversa da quelle finora usate, che consentirebbe una semplificazione del processo interno di programmazione.

7. La memoria associativa

La memoria costituisce, come noto, il punto focale dell'intero sistema di elaborazione: tutte le informazioni — programmi e dati (iniziali, intermedi, finali) — transitano infatti attraverso questo organo. Una memoria si può, in generale, rappresentare come in fig. 25, cioè come un insieme di caselle, ognuna contraddistinta da un numero progressivo ("indirizzo"). Le singole celle (ciascuna di un bit) di cui ogni casella è costituita sono generalmente raggruppate in campi; ad es., se la memoria contiene i dati anagrafici di una popolazione, i campi A, B, C, ... corrisponderanno rispettivamente al cognome, nome, data di nascita, ecc. degli individui. Tutte le memorie sinora in pratica usate, di qualunque tipo esse siano, hanno una caratteristica fondamentale in comune: per accedere alle informazioni contenute in una casella occorre fornire alla memoria l'indirizzo ad essa corrispondente (fig. 26). Si tratta, cioè, di memorie "indirizzabili".

Nessun dato può essere rintracciato nella memoria senza la conoscenza del relativo indirizzo. Così se, con riferimento all'esempio precedente, si volessero conoscere i dati anagrafici di tutte le persone che, ad esempio, siano nate in un dato periodo, non rimane che indirizzare successivamente tutte le caselle della memoria, confrontando il campo C di ciascuna di esse con il dato di riferimento.

Un meccanismo di accesso completamente diverso è, invece, quello di tipo "associativo". In una memoria di questo genere, infatti, l'accesso ad una casella non viene realizzato fornendone l'indirizzo ma il suo stesso contenuto, o una parte di esso. Rifacendoci all'esempio precedente, basta cioè, presentare alla memoria il dato anagrafico relativo al campo C, perché automaticamente la memoria fornisca tutti gli indirizzi nei quali si riscontra tale dato. Lo schema di principio di una memoria di questo tipo (memoria "associativa" o "con-

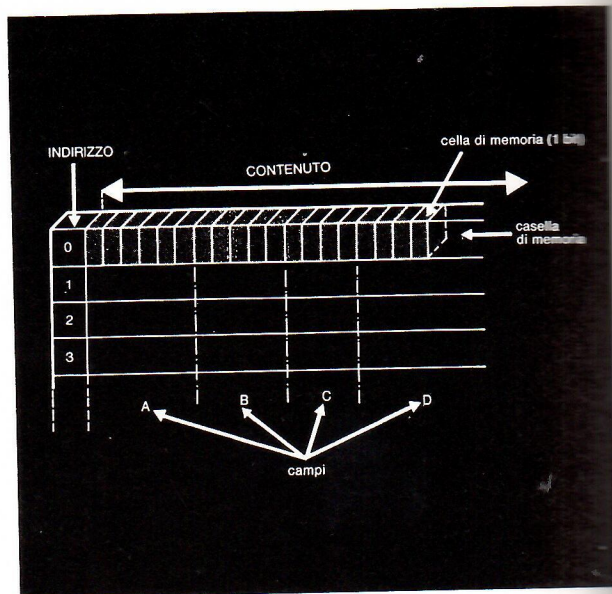


Fig. 25 - Schematizzazione di una memoria.

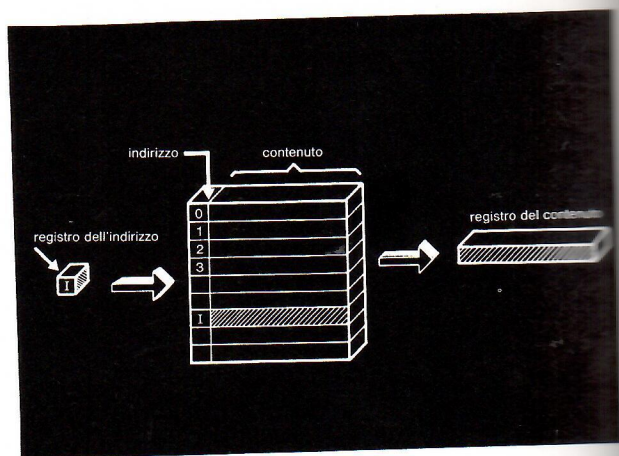


Fig. 26 - Memoria con accesso convenzionale (per indirizzo).

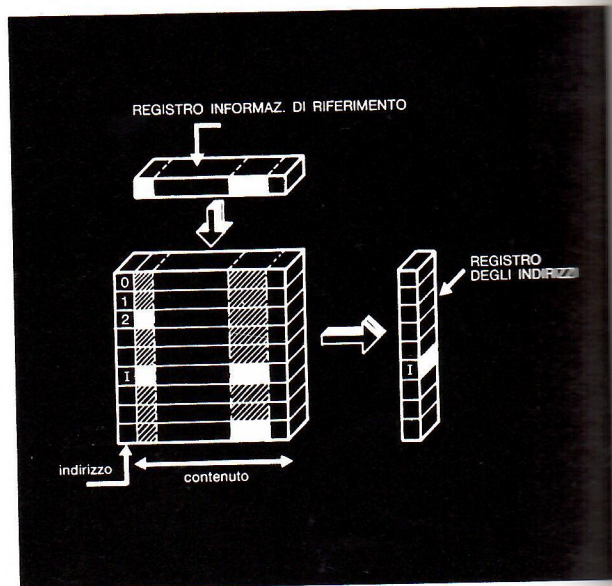


Fig. 27 - Memoria con accesso associativo (per contenuto).

accesso per contenuto") è dato in fig. 27. Una memoria associativa viene dotata, in generale, anche del meccanismo di accesso per indirizzo (non mostrato in figura); nell'esempio fatto, ciò consente di trovare, successivamente, i dati anagrafici completi delle persone individuate.

Con riferimento al lavoro di programmazione, è evidente la semplificazione derivante dall'impiego di una memoria associativa: in essa le informazioni possono essere messe a caso, senza preoccuparsi di conoscere la loro posizione iniziale o successiva, perché non vengono rintracciate in base a questa. L'uso di memorie associative pone in termini completamente nuovi e radicalmente più semplici il problema della organizzazione delle "basi di dati".

Una caratteristica fondamentale dello schema associativo è che l'accesso viene realizzato simultaneamente su tutte le posizioni di memoria. L'operazione anagrafica descritta in precedenza avviene cioè in un passo solo; con una memoria indirizzabile essa richiederebbe invece tanti passi successivi quanti sono gli indirizzi della memoria. L'accesso per contenuto comporta quindi un drastico aumento della velocità operativa. Se in certe applicazioni questo può essere relativamente importante, in altre può essere essenziale; si pensi all'interrogazione di grandi archivi, ad esempio, per ricerche bibliografiche o per l'automazione della diagnostica medica. In questi casi, anche con la velocità delle più moderne memorie indirizzabili, si hanno tempi di risposta inaccettabilmente lunghi.

Se tali sono quindi i vantaggi della memoria associativa, è ovvio chiedersi come mai non sia praticamente usata. La ragione risiede nel fatto che essa è assai più complicata, e quindi costosa, delle convenzionali memorie indirizzabili. Infatti, mentre in queste ultime ogni singola cella deve solo registrare l'informazione, in una memoria associativa ogni cella, oltre alla funzione di memoria, deve possedere funzioni logiche. L'informazione presentata alla memoria deve, infatti, essere "associata", bit per bit, con quelle in essa registrate. In ogni cella di memoria associativa avviene, in sostanza, il confronto tra il bit presente e quello esterno di riferimento (fig. 28). Se le due informazioni coincidono, la rete logica di confronto non emette alcun segnale. In caso contrario, dalla cella parte un segnale di discordanza, che viene inviato ad un apposito registro. Basta un solo segnale di discordanza in una casella di memoria, perché l'indirizzo corrispondente venga escluso da quelli cercati.

Il costo e la complessità della memoria associativa ne hanno precluso sinora l'impiego pratico. Si comincia ora ad avere qualche esempio di impiego, ma con capacità di memoria ridottissima, utilizzando la tecnica dei circuiti integrati su larga scala. I futuri progressi di tale tecnologia dovrebbero aprire la strada ad un effettivo impiego di queste memorie. Occorre però tenere presente che un bit di memoria associativa sarà sempre sensibilmente più costoso di un bit di memoria convenzionale e ciò porrà, anche in futuro, limitazioni al loro impiego.

La possibilità di realizzare convenientemente memorie

associative di grandissime dimensioni può derivare dall'impiego di nuove tecnologie particolarmente adatte allo scopo, oggi ancora in fase di ricerca. Ci si riferisce, in particolare, alle tecnologie di elaborazione ottica. L'impiego della luce offre infatti la possibilità di realizzare sistemi di memoria ad altissima densità e con elevatissimo parallelismo di operazione. Basti pensare che su una lastra fotografica ad alta definizione di un centimetro di lato è possibile registrare teoricamente cento milioni di bit, i quali vengono letti, tutti allo stesso tempo, semplicemente investendo la lastra con un fascio di luce. La neutralità elettrica dei fotoni che costituiscono la luce consente inoltre di affiancare e incrociare i singoli raggi senza che occorra isolarli l'uno dall'altro, come è necessario invece nei normali circuiti elettrici. Il sistema precedente equivale, in sostanza, ad una memoria (fissa) di cento milioni di celle, corredata da un equivalente numero di collegamenti (realizzati semplicemente in aria) che consentono un accesso simultaneo a tutta la memoria.

Un possibile schema di memoria ottica associativa è illustrato in fig. 29. Il sistema è costituito da lastre fotografiche, dove sono registrate le informazioni, alternate a dispositivi elettro-ottici che deflettono i raggi di luce. Ogni bit di informazione è rappresentato sulle lastre da una coppia di areole, di cui una trasparente ed una opaca, disposte come indicato nella stessa figura. I dispositivi di deflessione determinano il percorso dei raggi di luce: ogni stadio fornisce una deflessione verso l'alto o verso il basso in funzione del valore "1" o "0" del bit di riferimento contenuto nell'apposito registro. È evidente che un raggio di luce inviato all'ingresso del sistema potrà attraversarlo solo se tutti i bit che esso incontra sul suo percorso coincidono con quelli della informazione di riferimento: esso individua quindi uno degli indirizzi cercati.

Lo schema illustrato (originato nel laboratorio di Pregnana Milanese della Honeywell I.S.I.) realizza una memoria ottica associativa di tipo fisso; il principio può essere però esteso a memorie di tipo modificabile, sostituendo alle lastre fotografiche un supporto di memoria in cui le informazioni possano essere cancellate (sono note diverse soluzioni in proposito).

Anche se lo schema illustrato è concettualmente semplice, la sua realizzazione effettiva comporta la soluzione di una lunga serie di problemi tecnologici, che sono, sostanzialmente, gli stessi presentati dalle memorie ottiche di tipo non associativo. Memorie di tipo ottico sono allo studio ormai da tempo, ma non sono ancora uscite dallo stadio dei prototipi di laboratorio. Malgrado i progressi realizzati, si deve ritenere che occorrano ancora diversi anni prima che si possa arrivare a prodotti utilizzabili praticamente.

8. Nuove soluzioni per le unità periferiche

Il cenno alle memorie ottiche indica come l'integrazione su larga scala dei circuiti a semiconduttore costituisca un filone fondamentale ma non unico della tecnologia dell'elaboratore. Altre tecnologie sono in lizza, in particolare per realizzare le unità periferiche dell'elaboratore, che costituiscono l'interfaccia della macchina con

il mondo esterno. Esistono o sono in studio tutta una serie di soluzioni per realizzare dispositivi di ingresso e uscita delle informazioni e per facilitare l'interazione con l'operatore umano. Tra i possibili argomenti relativi a quest'area, ne scegliamo un paio che ci sembrano di particolare interesse.

Il termine "plasma" rievoca automaticamente i grandiosi fenomeni della fisica stellare o, più vicino a noi, i colossali apparati di ricerca volti a riprodurre e controllare tali fenomeni. In effetti il plasma non è soltanto il prodotto di reazioni termo-nucleari realizzabili con costose e complicate apparecchiature, ma può essere, più modestamente, ottenuto in una semplice lampadina del tipo a scarica. Per definizione, infatti, il plasma è lo stato ionizzato della materia; tale stato può riscontrarsi in natura o essere realizzato artificialmente, a diversi livelli di "temperatura" (fig. 30).

Una prima applicazione che riguarda l'elaborazione dei dati è rappresentata dal cosiddetto "display al plasma" (fig. 31). Esso è costituito, in sostanza, da due lastre di vetro parallele, separate da una piccola intercapedine riempita con un gas facilmente ionizzabile (elio, ad es.), e saldate ai bordi a tenuta ermetica. Sulle lastre di vetro sono depositati due gruppi di sottili conduttori trasparenti tra loro perpendicolari, i cui incroci individuano i punti del display. Applicando una opportuna tensione elettrica tra due conduttori ortogonali, il gas che si trova in corrispondenza del punto di incrocio viene fortemente ionizzato ed emette una radiazione che rende luminoso il punto medesimo. I punti dello schermo sono tra loro molto vicini così che le immagini (caratteri o grafici) sono praticamente continue. Il dispositivo in questione si propone come una alternativa al convenzionale tubo a raggi catodici, con una serie di vantaggi: è uno schermo "piatto", praticamente bidimensionale e quindi strutturalmente molto meno ingombrante, più solido e senza pericolo di implosioni; l'immagine è stabile, senza fluttuazioni, essendo ogni punto fissato rigidamente dai due conduttori che lo individuano; lo schermo presenta proprietà di memoria, in quanto un punto, una volta acceso, rimane tale fino ad un comando di spegnimento; essendo sottile e trasparente, si presta a interessanti applicazioni, non possibili con il tubo a raggi catodici, quale la proiezione di immagini in sovrapposizione ai dati provenienti dal calcolatore. I display al plasma sono ormai disponibili commercialmente, ma il loro impiego è limitato ad applicazioni particolari, non essendo ancora economicamente competitivi con il tubo a raggi catodici. Ciò dovrebbe avvenire nei prossimi anni soprattutto se questo dispositivo verrà adottato non solo in settori professionali, come l'elaborazione dei dati, ma anche in applicazioni quantitativamente molto più ampie, come la televisione. È da menzionare, infine, che sono in fase di realizzazione display al plasma a colori, ottenuti mediante l'impiego di una struttura contenente diversi tipi di gas.

Una ulteriore applicazione è costituita dalla "stampante a plasma". Il principio di questa stampante, sperimentata nei laboratori americani della Honeywell, è illustrato nella fig. 32. Un flusso di polvere di inchiostro

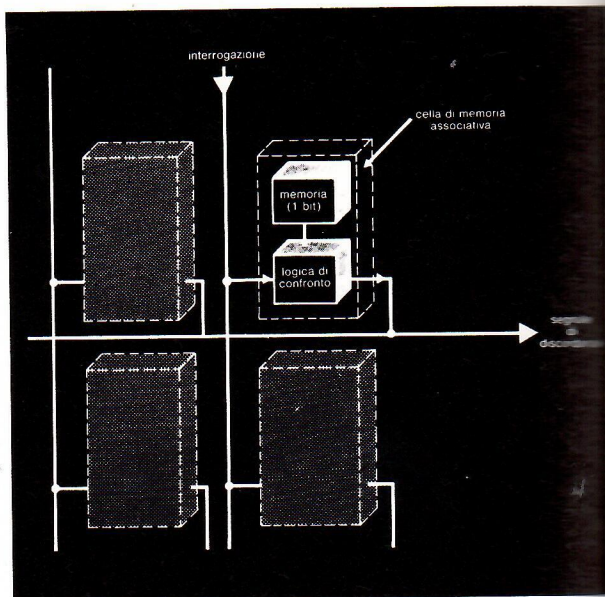


Fig. 28 - Cella di memoria associativa.

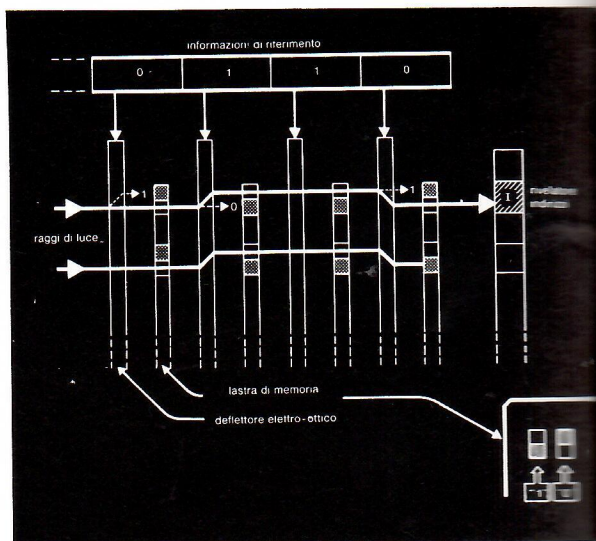


Fig. 29 - Principio di memoria ottica associativa.

Tipo di plasma	Densità (elettroni/m ³)	Temperatura degli elettroni
materia interstellare	$10^8 \div 10^9$	$10^2 \div 10^3$
ionosfera terrestre	$10^9 \div 10^{12}$	$10^2 \div 10^3$
lampada a scarica	$10^{14} \div 10^{17}$	$10^4 \div 10^5$
materia stellare reattori termonucleari	$10^{21} \div 10^{22}$	$> 10^6$

Fig. 30 - Il plasma, quarto stato della materia, in natura e nella tecnica.

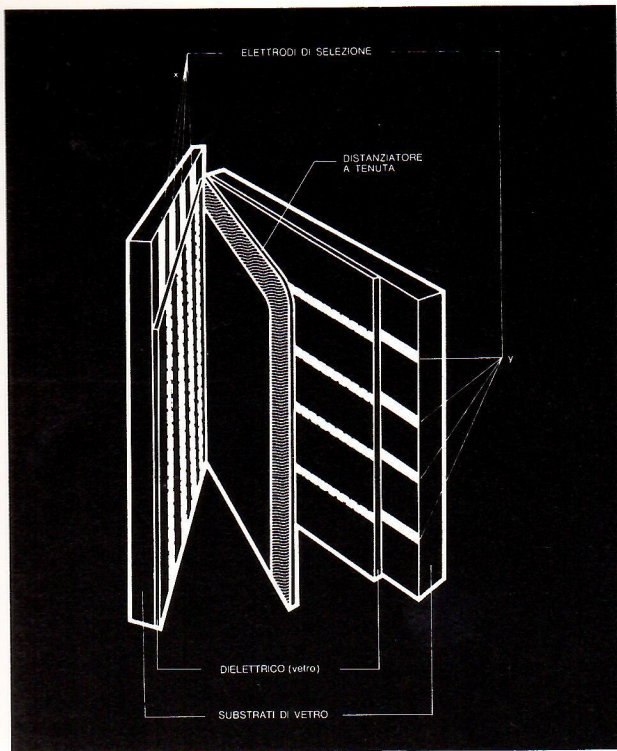


Fig. 31 - Videoschermo a plasma.

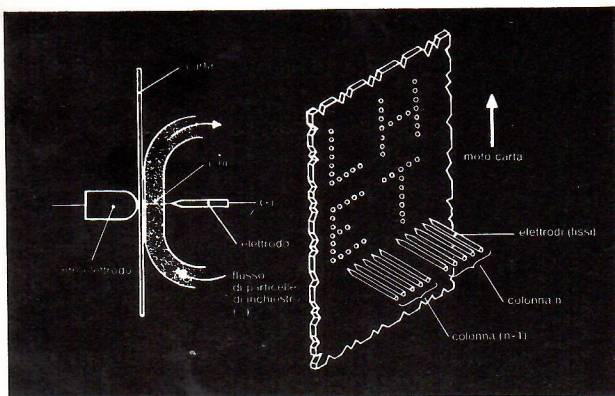


Fig. 32 - Stampante a plasma.

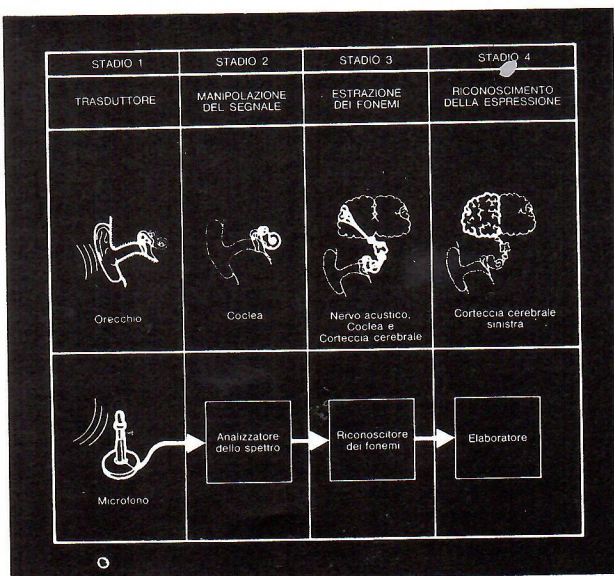


Fig. 33 - Processo di riconoscimento della voce: parallelo tra l'uomo e la macchina.

caricata negativamente lambisce la superficie della carta; gruppi di elettrodi puntiformi, posti di fronte ad essa, "sparano" ioni positivi che trascinano le particelle di inchiostro di segno opposto e le imprimono sulla carta. Attivando selettivamente gli elettrodi si possono stampare, per punti, caratteri e grafici a piacere. Come appare dalla descrizione, questo processo di stampa non impiega elementi meccanici che battono sulla carta come nelle stampanti convenzionali. Si tratta, cioè, di un metodo di stampa "non a impatto". Ciò comporta una serie di vantaggi: dal forte aumento della velocità operativa alla diminuzione di rumorosità all'incremento di affidabilità. Questa soluzione si aggiunge a quelle che promettono importanti miglioramenti al gravoso problema della stampa da elaboratore. Nell'ambito dei metodi di ingresso/uscita delle informazioni, un tema su cui è interessante fare il punto riguarda l'interazione diretta, "a voce", tra l'uomo e la macchina. Il tema è stato posto da tempo ed ha ricevuto finora solo risposte parziali. In effetti, occorre distinguere due momenti della comunicazione vocale e cioè la comunicazione dall'uomo alla macchina e quella in senso opposto.

Il secondo problema, cioè la risposta fonica da parte dell'elaboratore, conta ormai soluzioni pratiche. Negli USA, ad esempio, i calcolatori di molte banche sono dotati di sistemi di risposta vocale: un utente, facendo semplicemente da un telefono il numero del proprio conto bancario, ottiene la situazione direttamente dall'elaboratore. Molti sintetizzatori di voce non sono altro che dei sofisticati registratori magnetici, in cui sono registrate parole e frasi che vengono trasmesse sotto controllo dell'elaboratore. Esistono, però, anche soluzioni più evolute e flessibili, basate sulla sintesi dei "fonemi", cioè dei suoni elementari in cui si può scomporre un linguaggio (per l'italiano sono circa 150). I fonemi vengono registrati in forma digitale nella memoria dell'elaboratore che li combina opportunamente, generando la sintesi a viva voce di un testo qualsiasi. Di tutt'altra difficoltà è invece il problema di "parlare all'elaboratore", di rendere, cioè, ad esso intelligibile il normale eloquio dell'uomo. Il riconoscimento del parlato è un processo a più stadi che coinvolge nell'uomo una serie di strumenti appositi, come illustrato nella fig. 33. Occorre premettere che tutti i suoni di un discorso che arrivano all'orecchio sono riconducibili ad una combinazione lineare di onde sinusoidali con fasi differenti. Ogni dispositivo che misura le intensità relative delle onde sinusoidali componenti è chiamato analizzatore dello spettro di potenza. Si ritiene che tutte le informazioni acustiche rilevanti agli effetti del riconoscimento del discorso siano rappresentate dalla evoluzione nel tempo dello spettro di potenza del medesimo, ossia delle ampiezze delle componenti sinusoidali, mentre le informazioni di fase sono relativamente non importanti. (Queste ultime intervengono nella localizzazione delle sorgenti dei suoni, ma non nell'informazione in sé). L'orecchio umano agisce anzitutto come un analizzatore dello spettro di potenza. Successivamente, con l'intervento della corteccia cerebrale, avviene il riconoscimento dei singoli fonemi. Il passo finale ha

sede nel cervello, dove avviene l'aggregazione dei fonemi in parole e frasi ed il confronto con modelli interpretativi per dare senso appropriato al messaggio. Il processo delineato, trova riscontro, passo per passo, in apparecchiature realizzabili dall'uomo, come illustrato nella stessa figura 33. In effetti, i vari stadi hanno trovato, in varia misura, una loro soluzione tecnica, ma il risultato rimane, complessivamente, assai modesto. Le variazioni di accento e pronuncia di uno stesso individuo e, peggio, di più individui, tendono infatti a cancellare la distinzione tra i diversi fonemi. Oggi è quindi opinione comune che per riconoscere il parlato sia necessario capirlo. È questo un tema fondamentale delle ricerche sull'intelligenza artificiale che non ha ancora avuto risposta adeguata. Per riconoscere una parola non ben pronunciata o molto simile ad altre o disturbata da rumori estranei non basta, infatti, la conoscenza del vocabolario e delle regole grammaticali della lingua, ma occorre mettere in atto un processo di correlazioni coll'intero contesto in cui essa si colloca. Si tratta, in fondo, dello stesso tipo di difficoltà incontrato nel problema, sostanzialmente irrisolto, della traduzione automatica da un linguaggio ad un altro. In definitiva, si può parlare attualmente di comunicazione vocale verso l'elaboratore solo in termini molto limitativi, cioè ponendo ampie restrizioni alla varietà del discorso e degli interlocutori. Il problema generale del riconoscimento del parlato rimane in sostanza, per il momento, insoluto. È comunque da prevedere che negli anni '80 si possa superare parte delle limitazioni attuali così da dare una dimensione pratica all'interazione vocale.

9. Conclusioni

Quali conclusioni trarre da questa rapida scorsa sull'elaboratore?

Ci sembra anzitutto si possa dire che il ritmo di progresso tecnico in questo settore non mostra alcun segno di rallentamento, è vero, semmai, il contrario. Quello che è avvenuto negli ultimi anni e ciò che si sta ora preparando, rappresentano ben più che un processo

evolutivo. È cambiato e sta cambiando il modo stesso di concepire l'elaboratore: innovazioni come il microelaboratore o l'intelligenza distribuita o le altre cui si è fatto cenno, hanno una portata decisamente rivoluzionaria. Si aggiunga a ciò la prospettiva generale, altrettanto carica di conseguenze, della "Very Large Scale Integration", che significa, in definitiva, la disponibilità di grandi capacità di elaborazione in volumi minimi a costi ridottissimi.

Tutto fa ritenere che siamo ormai in vista di una nuova fase di impiego dell'elaboratore. Da una fase iniziale in cui esso era uno strumento accessibile ad un ristretto numero di esperti, si è passati alla attuale fase di ampio impiego anche da parte di utenti non specialisti. Tuttavia, fino ad ora, il calcolatore ha avuto scarso effetto sullo "stile di vita" dei singoli. La prevista disponibilità di potenza di elaborazione a basso prezzo e facile impiego, lascia ora intravedere una nuova fase di utilizzo dell'elaboratore, caratterizzata da una sua diffusione capillare, tipo bene di consumo. Il computer personale, il terminale domestico, come mezzo per lavorare, studiare, svagarsi, svolgere incombenze le più svariate, rientra ormai nel novero delle possibilità tecniche ed economiche, anche se non dell'immediato futuro. L'informatica si prospetta quindi, in questa ottica, come fattore di cambiamento sostanziale del nostro stesso modo di vivere.

10. Bibliografia

Data l'ampiezza del tema, conviene qui fare riferimento a pochi titoli, che forniscano però ulteriori rimandi a chi desidera approfondire gli argomenti. Sulla evoluzione dell'hardware si può consultare: F. Filippazzi, "Tecnologia dell'elaboratore elettronico: situazione attuale e prospettive", (Milano, 1977). Sulle tematiche del software, si segnala il testo di dispense, "Ingegneria del Software" (L'Aquila, 1977), in particolare il capitolo introduttivo di G. Lanzarone. Si segnala inoltre il numero speciale, del dicembre 1976, di "IEEE Transactions on Electronic Computers", che contiene una raccolta di articoli di sintesi sui vari aspetti tecnico-scientifici dell'informatica, con ampi riferimenti bibliografici. Per alcuni temi specifici accennati nell'articolo — in particolare i microelaboratori, i sistemi distribuiti, la correttezza del software, l'intelligenza artificiale — si può fare utile riferimento ad articoli apparsi su questa rivista e raccolti di recente nel volume "L'informatica oggi", (Milano 1977), a cura della Honeywell I.S.I.