

I - Introduzione

Rapporto sulle moderne calcolatrici elettroniche

Lo scopo principale di questo rapporto è di presentare le caratteristiche fondamentali di un certo numero di macchine calcolatrici a cifre, già in funzione, di media grandezza. Saranno prese in considerazione anche macchine di minore importanza, che pure hanno un notevole campo di applicazione e molte delle quali vengono già costruite in serie di numerosi esemplari a scopo commerciale.

Per rendersi conto del significato dei termini impiegati e delle possibilità di impiego di una calcolatrice elettronica, occorre una certa conoscenza della loro struttura e del modo in cui esse operano. Come introduzione sono particolarmente raccomandabili i seguenti articoli:

1) B. de Finetti:- Macchine che pensano (Tecnica e organizzazione - 1952) in cui, oltre ad una introduzione generale e ad una appendice contenente la descrizione di un certo numero di macchine, vengono discussi alcuni aspetti importanti dal punto di vista matematico. La particolare capacità di ripetizione automatica di certi schemi di calcolo ha condotto a sviluppare e perfezionare i metodi di calcolo numerico. Discussioni particolareggiate di questo punto, oltre a relazioni sia sui progressi tecnici che sui vari problemi che via via vengono affidati alla calcolatrici, sono regolarmente pubblicate sulla rivista specializzata: Mathematical Tables and other aids to Computation.

2) E. Aparò e D. Dainelli:- Esperienze sull'impiego di alcune calcolatrici elettroniche (La Ric. Scien. 23, oppure I.N.A.C. N° 387), in cui gli autori riferiscono sulle esperienze compiute su alcune macchine calcolatrici americane nel corso di una missione per conto del C.N.R.

3) E. Aparò e D. Dainelli:- Considerazioni sulle più recenti calcolatrici elettroniche ed il loro impiego (La Ric. Scien. 23, 1528, 1953 oppure I.N.A.C. N° 409), in cui oltre ad una descrizione delle varie parti delle calcolatrici elettroniche sono svolte diverse considerazioni circa l'organizzazione del lavoro su tali macchine e la convenienza del loro impiego, in relazione alla velocità ed alla costituzione logica.

4) B. de Finetti, G. Rodino', N. Kitz:- Relazione sul Symposium on automatic digital computation (La Ric. Scien. 23, 1248, 1953, oppure I.N.A.C. N° 403), in cui gli autori riferiscono sulle calcolatrici elettroniche e sui metodi di ricerca in tale campo in Inghilterra.

Per quanto riguarda piu' specificamente l'applicazione delle calcolatrici elettroniche alla fisica ed ai problemi dell'ingegneria, si veda l'articolo J. Sheldon e L. H. Thomas:- The use of Large Scale Computing Machines in Physics (Journ. of Appl. Phys. 24 , 235, 1953) in cui vengono forniti dati sul numero delle operazioni occorrenti per la soluzione dei principali tipi di problemi in tali campi di applicazione e sulla capacita' delle macchine piu' indicate per la loro soluzione. Per una illustrazione piu' completa delle applicazioni delle macchine calcolatrici elettroniche, compreso i campi della Statistica e delle Scienze economiche e sociali, si vedano i :- Proceedings of a second Symposium on Large Scale Digital Calculating Machinery Annals of the Comp. Lab. - Harvard University - vol. XXVI.

Per rendere tuttavia, almeno parzialmente indipendente la relazione presente da altre letture sull'argomento e per cercare, al tempo stesso, di porre in luce i principali problemi concernenti la progettazione di una calcolatrice elettronica, all'esposizione dei dati concernenti relativi a macchine esistenti, vera' premessa una descrizione sommaria del funzionamento e della struttura dei diversi organi di una calcolatrice.

E' conveniente mettere in rilievo sin d'ora che, mentre nelle questioni di dettaglio le macchine finiscono per essere notevolmente diverse tra loro, nelle linee generali funzionano tutte secondo gli stessi principi. Del resto, sebbene nella fase della progettazione definitiva è opportuno valutare accuratamente le particolari caratteristiche di cui dotare una macchina in vista di certe applicazioni, si puo' ben dire che quasi tutte le macchine sono ' universali ' nel senso che ciascuna di esse è in grado di risolvere qualunque problema che possa essere risolto da ogni altra calcolatrice elettronica a cifre. La specializzazione influisce piu' sul rendimento (costo di esercizio) della macchina rispetto a diversi tipi di applicazione, che non sulla capacita' di essere adoperata nei problemi piu' diversi. Il fattore principale dal punto di vista del rendimento, è indubbiamente la velocita'; questa puo' variare entro larghi limiti e dipende, in ultima analisi, dal costo dell'impianto.

Il costo di impianto è un dato difficilmente reperibile, perchè dipende da un gran numero di fattori. Spesso una notevole quota del costo complessivo è stata dedicata allo studio ed alla sperimentazione di nuove tecniche, col risultato che in pochi anni si è avuto un notevole progresso, tuttora aperto. Si puo' anzi dire che questo studi devono accompagnare anche le calcolatrici gia' in funzione, perchè l'esperienza ha insegnato che queste invecchiano con una certa rapidita', ma è sempre possibile apportare nuove modifiche, talora di rilevante entita', per migliorarne le doti originarie.

Dal punto di vista del costo forse il miglior riferimento è quello fornito dalle macchine commerciali. Questo varia da alcune decine di milioni per le macchine di minore capacita', a diverse centinaia di milioni per le macchine piu' complesse, con tutta u-

na gamma di prezzi intermedi. A parità di prestazioni queste cifre potrebbero essere parzialmente ridotte per una macchina costruita in Italia, ma bisogna tenere adeguato conto delle spese occorrenti nella fase preliminare di studio e di orientamento.

Non è facile trovare ragguagli sulla composizione dei gruppi che hanno contribuito alla costruzione di macchine. Molte di esse sono state costruite presso Istituti Universitari, in stretta collaborazione tra tecnici e matematici. Molte macchine invece sono state costruite presso enti militari o presso industrie elettroniche o con l'appoggio di queste. Più facile è avere indicazioni sul personale adibito al funzionamento delle macchine, che comprende un certo numero di tecnici, di operatori e di matematici. Questo numero varia fortemente con l'orario di lavoro, la velocità e la capacità della macchina. Esso varia comunque da un minimo di una persona per categoria fino a qualche diecina diversamente distribuite tra i vari compiti.

Chiuderemo questa parte introduttiva sull'organizzazione generale riportando per alcune macchine una lista di problemi a cui esse sono state adibite.

SWAC - Problemi di matematica pura, teoria dei numeri, calcolo combinatorio.

Sistemi di equazioni lineari (un programma per la soluzione di un sistema del 45° ordine ha richiesto 300 ore per fornire gli autovalori e le autosoluzioni associate, con la precisione di 9 cifre decimali).

Studi sulle funzioni associate di Legendre.

Analisi di Fourier delle figure di diffrazione dei raggi X in cristalli.

Analisi e riduzione di dati meteorologici.

Valutazioni di integrali definiti per problemi di probabilità, statistica, assicurazioni, biologia.

SEAC - Tavolo di funzioni ellittiche di Jacobi.

Soluzione di equazioni differenziali col metodo di Montecarlo.

Piani per il censimento.

Struttura dei cristalli.

Abbondanza relativa degli elementi.

Funzione d'onda per l'elio ed il litio.

Disegno di sistemi ottici.

Studi per il sincrotrone.

Analisi dei fenomeni transitori per oscillatori in classe C.

Studio delle tensioni transitorie nelle strutture di aerei.

Deformazioni plastiche di colonne eccentriche.

Problemi economici vari.

Diversi lavori riservati per la Commissione per l'Energia Atomica e le Forze Armate Americane.

FERRANTI - Inversioni di matrici e valutazione di autovalori.
Equazioni alle derivate parziali dei vari tipi e alle derivate ordinarie con applicazioni a questioni di: astronomia, fisica, biologia, ingegneria.
Tabulazione di funzioni speciali (Polinomi e funzioni di Laguerre).
Problemi di struttura logica (fra cui un programma per la soluzione di problemi di scacchi e per far giocare alla macchina intere partite contro giocatori umani).
Applicazioni commerciali e industriali vari (paghe agli operai, analisi dei mercati, rilievi statistici di varia natura, ecc.).

II - Cenni sulla costituzione di una macchina calcolatrice.

Tanto in campo scientifico, quanto in diversi campi applicativi, si incontrano, come si è visto, numerosi problemi di varia natura sia matematica che, piu' in generale, logica, i quali, facendo uso di opportuni metodi, possono essere ricondotti alla soluzione numerica di problemi di tipo aritmetico. (In tutto questo rapporto ci occupiamo esclusivamente delle cosiddette macchine numeriche o a cifre, escludendo ogni riferimento alla classe delle macchine analogiche). La soluzione di questi problemi richiede l'esecuzione di una lunga serie di operazioni semplici di natura aritmetica (somme, prodotti, etc..) o logica (decisioni sull'ordinamento delle operazioni da eseguire o sulla scelta degli operandi, spesso subordinatamente a certe condizioni prestabilite o anche a risultati ottenuti in precedenti fasi di calcolo).

Accade sovente che il numero delle operazioni da eseguire sia tanto elevato (anche diversi miliardi, cfr. Thomas e Sheldon art. cit.) da rendere praticamente del tutto impossibile, o comunque poco conveniente, l'esecuzione manuale di tali calcoli, sia pure munendo il calcolatore umano di una ordinaria calcolatrice da tavolo.

Le moderne calcolatrici elettroniche sono dei dispositivi fisici complessi capaci di immagazzinare un grande numero di dati numerici e di istruzioni, opportunamente codificate, e di eseguire successivamente a grande velocita' le operazioni richieste per la soluzione di un problema di natura aritmetica, seguendo automaticamente, in base alle istruzioni ricevute e immagazzinate, tutto un programma di calcolo, comunque lungo e complesso.

Per comprendere come cio' avvenga , e prima di passare a descrivere con qualche dettaglio i diversi organi, esporremo lo schema tipico della struttura e del funzionamento di una calcolatrice elettronica, che si applica praticamente a tutte le macchine esistenti.

Gli organi essenziali di una calcolatrice elettronica sono:

la memoria, in cui vengono immagazzinati i dati numerici e le istruzioni che la macchina deve eseguire,

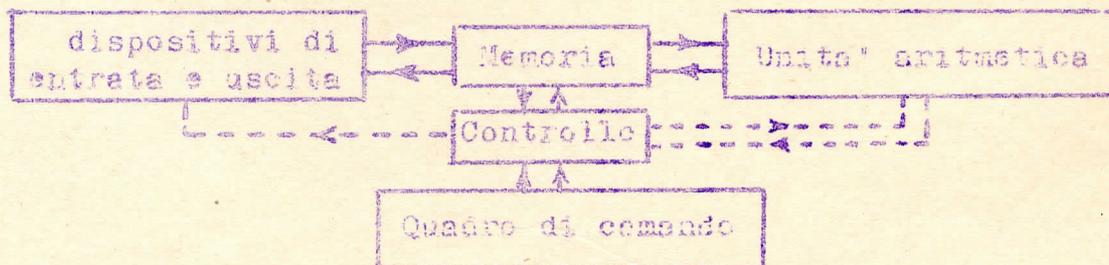
il controllo che richiede alla memoria le istruzioni nel giusto ordine, e le interpreta direndolo agli altri organi gli ordini o comandi necessari per la loro esecuzione,

l'unita' aritmetica, che in base a comandi del controllo, riceve dalla memoria gli operandi, esegue l'operazione comandata e invia alla memoria il risultato.

A questi organi interni bisogna aggiungere:

i dispositivi di entrata e di uscita mediante i quali si introducono nella memoria interna le informazioni necessarie per lo svolgimento automatico del programma di calcoli prestabilito, o si estraggono i risultati ottenuti,
il quadro di comando manuale per il controllo esterno della macchina parte dell'operatore.

Nelle grandi linee l'ordine di svolgimento dell'esecuzione di un calcolo, è il seguente. Preparato il programma relativo al problema da risolvere, questo viene trascritto in forma opportunamente codificata sul veicolo (nastro perforato, filo magnetico, ecc.) del dispositivo di entrata. Si comanda manualmente dal quadro di controllo interno, di procedere inizialmente al trasferimento alla memoria interna, di tutte o di parte delle informazioni contenute sul veicolo di entrata riguardanti sia le istruzioni che i dati numerici; e di passare automaticamente a leggere, e quindi ad eseguire, le istruzioni ricevute. Queste istruzioni riguarderanno in generale tanto ordini di operazioni da eseguire su certi operandi trasferiti da certi posti della memoria all'organò aritmetico, quanto ordini di trasferimento di informazioni fra l'esterno e la memoria (lettura o scrittura di dati nei dispositivi di entrata e di uscita) sia fra la memoria e le altre parti interne della macchina (conservazione di risultati parziali di calcolo nella memoria, trasferimento delle istruzioni dalla memoria al controllo stesso, ecc..). Tutto questo è indicato nello schema della figura seguente:



ove le linee tratteggiate indicano passaggi di comandi e segnali, mentre quelle piene rappresentano le linee o canali su cui avviene il trasferimento delle informazioni.

Dopo questi cenni preliminari passiamo a descrivere e discutere con maggiori dettagli i singoli organi di una calcolatrice.

III - La memoria

La memoria è formata da un complesso di dispositivi fisici che possono ricevere (cancellando un eventuale contenuto precedente) e conservare informazioni, opportunamente codificate, sotto forma di stati fisici (discreti) stabili o stazionari, e trasmetterle sotto forma di impulsi elettrici. Queste informazioni riguardano tanto la rappresentanza^{ione} dei dati numerici, quanto le istruzioni che il controllo deve interpretare ed eseguire. In alcune macchine si hanno però due memorie distinte, una per i numeri, l'altra per le istruzioni. Attualmente, per ragioni connesse con il comportamento fisico dei dispositivi con cui si realizzano le memorie, le informazioni vengono rappresentate con gruppi di cifre binarie (vale a dire cifre che possono assumere solo i valori 0 e 1) corrispondenti a uno dei due stati stabili di un certo elemento fisico o alla presenza o assenza di un impulso in una certa successione. Mentre il caso di sistemi a più di due stati stabili è del tutto eccezionale, è possibile avere una rappresentazione decimale utilizzando quattro, o più elementi binari per ogni cifra decimale.

La memoria può pensarsi suddivisa in celle, ciascuna delle quali può conservare un certo gruppo di cifre. Il contenuto di una cella, indipendentemente dal suo significato di numero o di istruzione, viene detto parola e il numero delle cifre (fisso per ogni macchina) di una parola, la sua lunghezza. Le celle della memoria sono contraddistinte da un numero che ne costituisce l'indirizzo. Il numero delle celle di una memoria viene detto la sua capacità in parole.

Si considera parte della memoria il sistema di selezione, cioè quei dispositivi che ricevendo dal controllo l'indirizzo di una cella e l'ordine di ricevere o di trasmettere, trascrive nella cella l'informazione portata dalla linea o invia nella linea l'informazione contenuta nella cella.

Vi sono due modi fondamentali in cui può avvenire la conservazione delle informazioni. Distingueremo così tra memorie statiche e memorie dinamiche o cicliche: nelle prime ogni cifra è conservata in un elemento o in una zona fissa nello spazio, nelle seconde ogni cifra è rappresentata da un elemento o da un impulso circolante lungo un percorso chiuso. Le prime hanno in generale un tempo di accesso costante e relativamente breve, mentre per le seconde il tempo di accesso varia tra un minimo e un massimo, a seconda della dislocazione della cella richiesta rispetto alla stazione di lettura nell'istante in cui viene richiesta la connessione alla linea. Si dice inoltre che una memoria funziona in serie se le diverse cifre di una parola sono trasmesse successivamente su un unico canale. Una parola è rappresentata in questo caso da una successione temporale di segnali: vi è un segnale per ogni po-

sizione e il carattere del segnale (per es. assenza o presenza di un impulso standard) indica la cifra nel posto corrispondente. Si parla invece di funzionamento in parallelo se gli impulsi corrispondenti alle diverse cifre di una parola viaggiano tutti contemporaneamente su tanti canali quanta è la lunghezza della parola. Sono possibili anche funzionamenti misti in serie-parallelo, quali si avrebbero in una macchina decimale codificata quando si trasmettessero in serie le singole cifre decimali, ciascuna delle quali però fosse rappresentata da quattro o più cifre binarie in parallelo, o viceversa.

Di regola le memorie statiche vengono usate in parallelo, e quelle cicliche in serie, ma vi sono numerose eccezioni a questo uso.

Le caratteristiche principali di una memoria sono la capacità e la velocità: quest'ultima è determinata dalla somma del tempo di accesso col tempo necessario per il trasferimento di una parola.

Poiché è molto importante avere una memoria rapida in cui il tempo di accesso sia dello stesso ordine di grandezza del tempo necessario per l'esecuzione delle operazioni, conviene fornire le macchine di una certa importanza di un sistema di memoria rapido. Tali sistemi, essendo in generale costosi e delicati, vengono costruiti con una capacità in parole relativamente piccola (tra le 500 e le 1000 e anche meno). Tale capacità essendo tuttavia spesso insufficiente, si dota la macchina di un secondo sistema di memoria (ausiliaria, rispetto a quella rapida principale) più lenta, ma molto più capace (fino a qualche diecina di migliaia di parole). La memoria ausiliaria non può scambiare direttamente il contenuto con i diversi organi della macchina, ma solo con la memoria principale. Il trasferimento tra le due memorie avviene in genere a gruppi di varie diecine di parole per volta, per diminuire le conseguenze della lunghezza del tempo di accesso. Oltre a questi due sistemi di memoria alcune macchine sono dotate di un ulteriore tipo di memoria detta esterna, ma di questa daremo un cenno parlando dei dispositivi di entrata.

Una caratteristica importante dei dispositivi di memoria, che dipende dal modo in cui esse conservano le informazioni, è la persistenza o meno (volatilità) della conservazione nel caso in cui venga a mancare la corrente. In molti sistemi di memoria (particolarmente in quelli rapidi) le informazioni devono essere continuamente rigenerate, sicché l'interruzione anche momentanea della corrente provoca la perdita completa del contenuto.

Riportiamo una descrizione dei principali tipi di memoria adottati, rimandando per ulteriori dettagli all'articolo di J.F.Eckert: A Survey of Digital Computer Memory Systems (Proc.I.R.E. 41, 1393, 1953).

Tamburo magnetico - è una memoria ciclica persistente. Le sin-

gole cifre binarie vengono conservate mediante la magnetizzazione di una certa zona sulla periferia del tamburo. Lungo la superficie le informazioni sono disposte a strisce chiuse ciascuna delle quali prende il nome di pista. Dinamicamente il tamburo è caratterizzato dalle dimensioni (lunghezza, raggio) e dalla velocità di rotazione. Le dimensioni più frequenti sono tra i 10 e i 20 cm. per il raggio, tra i 20 e i 50 per lunghezza; la velocità di rotazione è in genere compresa tra i 1000 e 6000 giri al minuto. Il tempo di accesso varia (non solo in base al tipo, ma anche rispetto alla posizione della parola richiesta) in genere tra un minimo di qualche millesimo di secondo e un massimo di qualche decina di millesecodi. Questa memoria può funzionare tanto in serie quanto in parallelo. Essendo piuttosto lenta viene usata di rado come memoria principale nelle macchine di una certa importanza, ma per la sua caratteristica di persistenza e per la sua elevata capacità in parole (fino a diverse migliaia) è presente in quasi tutte le macchine come memoria ausiliaria. Il suo costo non è molto elevato per ogni cifra binaria conservata; si richiede tuttavia una costruzione meccanica molto accurata. Una variante di questo tipo è data dai dischi magnetici.

Linee di ritardo - ve ne sono di diversi tipi. La più usata è quella ultraacustica a tubi di mercurio. ^{PM}Capacità molto limitate si possono impiegare linee di ritardo elettromagnetiche. Altri sistemi si fondano sulla magnetostriazione. Tutte queste memorie sono volatili: le informazioni circolano sotto forma di successioni di impulsi e devono essere continuamente rigenerate. Il funzionamento tipico è in serie. Il tempo impiegato per la rappresentazione di una parola prende il nome di ciclo minore, mentre si chiama ciclo maggiore il tempo necessario per percorrere un intero ciclo nella linea di ritardo, e che determina sostanzialmente il tempo di accesso. Sono da considerarsi tra le memorie rapide, il tempo di accesso essendo variabile tra alcune decine e alcune centinaia di microsecondi (milionesimi di secondo). In linea di principio sono piuttosto semplici, ma richiedono dispositivi elettronici di rigenerazione piuttosto delicati e un sistema di controllo della temperatura assai preciso. La capacità varia tra le 500 e le 1000 parole di una trentina di cifre binarie. È uno dei primi tipi di memoria rapida, ma viene tutt'ora montata anche su macchine di notevoli prestazioni.

Memoria elettrostatica - Si fonda sul fenomeno dell'emissione secondaria nei tubi a raggi catodici. È una memoria non persistente e alquanto delicata, ma molto usata perché ha un tempo di accesso assai rapido, anche di pochi microsecondi. Comunemente è utilizzata in parallelo, ma in qualche macchina è stata usata in serie. Nel caso più frequente le singole cifre vengono conservate su tubi diversi. Occorrono allora tanti tubi quante sono le cifre di una parola (in molti tipi di macchine se ne trova una quarantina). Si possono usare tanto tubi normali, quanto al-

lo di Williams. Questo tipo di memoria è sempre usato come principale con una capacità variabile fra le 250 e le 1000 parole circa.

Memoria a nuclei magnetici - È un tipo di memoria persistente in cui si sfruttano gli ^{stati} stabili di magnetizzazione residua di materiali ferromagnetici con cicli di isteresi particolarmente squadrati. La difficoltà di ottenere simili materiali è stata praticamente superata solo di recente, per cui essa ha avuto ancora poche applicazioni. Si tratta, tuttavia, di un sistema molto promettente perchè probabilmente piuttosto rapido e poco costoso e molto adatto sia per il funzionamento in serie che in parallelo.

Vi sono molti altri tipi di memoria allo studio, perchè si può dire che tutte le doti di una macchina dipendono in modo essenziale dalla capacità e velocità della memoria.

IV - L'unità aritmetica

L'unità aritmetica è quella parte della macchina che riceve dalla memoria i dati numerici per sottoporli, dietro opportuni ordini del controllo, all'operazione logica o aritmetica richiesta.

L'unità aritmetica è fornita in generale di più registri (accumulatore, registro del moltiplicando e registro del moltiplicatore) e di circuiti interno di controllo per l'esecuzione automatica di operazioni complesse quali, ad esempio, la moltiplicazione. Tali registri non sono semplici dispositivi per la conservazione di dati numerici, ma devono essere in grado di eseguire traslazioni, riporti e quanto altro occorra. Talvolta l'accumulatore ha lunghezza doppia di quella di una parola ordinaria per permettere la conservazione diretta delle $2n$ cifre di un prodotto di due fattori di n cifre l'uno.

Parlando dell'organo aritmetico, converrà chiarire alcune questioni sulla rappresentazione dei numeri. Innanzi tutto bisogna distinguere fra i numeri che sono entità matematiche astratte, e la rappresentazione dei numeri mediante opportune combinazioni di segni. Usando il sistema posizionale solito (sia in base 2 che 10) per rappresentare i numeri relativi dell'aritmetica occorre in generale un segno, una virgola e un numero di cifre grande a piacere. Poichè nelle macchine calcolatrici la lunghezza di una parola è fissa, questa è in grado di rappresentare i numeri solo con precisione limitata (in genere da venti a quaranta cifre binarie corrispondenti a sei-dodici cifre decimali). È possibile tuttavia, ove occorra, lavorare con precisione grande a piacere (purchè si abbia una adeguata capacità della memoria) rappresentando un numero solo con più parole. Naturalmente in questo caso le operazioni aritmetiche vanno eseguite in più tempi, secondo certi programmi logici. Quanto al segno si utilizza in genere una cifra binaria, seguita dal modulo del numero oppure dal complemento a due, o ancora con

altri sistemi. La prima rappresentazione è la più comoda per la moltiplicazione, mentre le altre rendono più facili l'addizione e la sottrazione. Un problema importante, che non ha ancora ricevuto soluzioni del tutto soddisfacenti, è quello della rappresentazione dell'ordine di grandezza dei numeri, vale a dire della virgola. È possibile progettare macchine che lavorano con virgola mobile, ma più spesso si preferisce rappresentare tutti i numeri come compresi tra 0 e 1 lasciando al matematico programmatore la cura di valutare a parte l'ordine di grandezza dei risultati. È importante rilevare che tutte le decisioni in proposito hanno una notevole influenza sulla facilità della programmazione, ma al tempo stesso influiscono grandemente sulla costituzione dell'organo aritmetico. Altre decisioni importanti riguardanti l'organo aritmetico concernano il tipo e il numero delle diverse operazioni logiche e aritmetiche che esso deve eseguire con ordini diretti. Questi variano da macchina a macchina e dipendono essenzialmente dalla struttura complessiva della macchina e dagli scopi per cui è stata progettata. Ogni macchina, come si è già rilevato, può considerarsi universale in quanto è possibile farle eseguire una qualsiasi operazione dietro programma. Così in molte macchine la divisione va eseguita con una serie di operazioni di somme e sottrazioni in base a un procedimento ricorrente, mentre vi sono macchine che contengono la divisione e alcune persino la radice quadrata come operazioni elementari.

L'organo aritmetico può funzionare anch'esso in serie o in parallelo. Il funzionamento in serie richiede un perfetto sincronismo ed opera su una cifra alla volta. Il funzionamento in parallelo può essere fatto sia in tempi costanti, che con un tempo variabile in relazione alla maggiore o minore presenza di riporti. In quest'ultimo caso l'unità aritmetica deve segnalare al controllo la fine dell'operazione, prima che questi passi ad eseguire l'istruzione successiva, dando al funzionamento della macchina un carattere asincrono.

Dal punto di vista costruttivo l'unità aritmetica implica la costruzione di flip-flop, di circuiti di coincidenze e di anticoincidenze e simili, che vengono realizzati sia mediante valvole che mediante vari tipi di raddrizzatori. In generale il funzionamento in serie richiede una minore apparecchiatura di quella in parallelo, ma richiede più tempo per l'esecuzione delle operazioni. In pratica, salvo qualche eccezione, il funzionamento dell'organo aritmetico è scelto concordemente con quello della memoria.

La caratteristica fondamentale dell'unità aritmetica, rispetto all'impiego, è la velocità con cui vengono eseguite le singole operazioni, naturalmente nella valutazione del numero delle operazioni che si possono eseguire in un secondo bisogna tenere conto del tempo di accesso, cioè del tempo impiegato per ricercare e trasmettere i numeri dalla memoria all'organo aritmetico.

Riportiamo alcuni dati caratteristici per diversi tipi di macchine e di funzionamento.

APE (x)C.
32 cifre binarie
funz. in

		+	x
Incl. acc.	Min.	0,6 m	0,6
	Max	2 m	20 m
Escl. acc.		0,6 m	

IAS
40 cifre binarie
funz. in π

		+	x
Inc. acc.	Min.	62 μ	435 μ
	Max.	62 μ	995 μ
Escl. acc.		25 μ	400-900 μ

SEAC
44 cifre binarie
funz. in

		+	x
Inc. acc.	Min.	0,2 m	2,4 m
	Max.	1,5 m	3,6 m
Escl. acc.		0,05 m	2,1 m

V - Il Controllo

Il controllo è costituito da tutto il complesso di apparecchiature, che provvede ad effettuare la selezione delle istruzioni, alla loro interpretazione ed esecuzione. Si può considerare parte del controllo l'orologio che scandisce i tempi (variabili da qualche diecina a qualche frazione di microsecondo) per le macchine a funzionamento asincrono, o il generatore fondamentale di impulsi per le macchine asincrone. Per comprendere sia pure sommariamente il funzionamento del controllo bisogna chiarire il modo in cui esse sono rappresentate le istruzioni e distinguere vari tipi.

Abbiamo già accennato che in generale le istruzioni vengono immagazzinate nella memoria al pari dei dati numerici. Questo richiede naturalmente che le istruzioni vengano presentate alla macchina in forma codificata e rappresentate esattamente come i dati numerici, mediante parole composte di cifre binarie. Non c'è nulla che distingua se una data parola rappresenta un numero o una istruzione. La differenza è puramente funzionale: In generale si può dire solo che una parola contiene o porta una certa informazione, la quale diviene effettivamente un dato numerico o una informazione nel momento in cui essa giunge all'unità aritmetica che opera su di essa secondo certe regole stabilite, oppure giunge al controllo che la decodifica e interpreta come istruzione traducendola in un complesso di segnali

e di comandi opportuni. Questo metodo introduce una ambiguità solo apparente, ma è molto conveniente non solo perchè permette lo sfruttamento più razionale della capacità della memoria (il rapporto fra il numero delle istruzioni e quello dei dati numerici varia da problema a problema), ma anche perchè è alla base di quei procedimenti di trasformazione delle istruzioni che rendono possibili quelle tecniche di programmazione che agevolano il compito del programmatore, sfruttando nel modo migliore la capacità di automatismo delle macchine elettroniche. In questo campo molto è stato fatto, ma sono possibili progressi che possono riflettersi in misura notevole sulla semplicità costruttiva o, comunque, sul rendimento di una macchina.

Ogni istruzione deve contenere una indicazione dell' operazione che la macchina deve eseguire, accompagnata dall' indicazione di uno o più indirizzi di celle della memoria da cui prelevare gli operandi o in cui trasmettere un risultato. Per il funzionamento automatico della macchina occorre che al termine di ogni istruzione la macchina sappia in quale cella della memoria deve trovare l'istruzione successiva. Questo può farsi sia aggiungendo ad ogni istruzione un ulteriore indirizzo specificante la cella della memoria in cui è contenuta l'istruzione successiva, sia fornendo il controllo di un dispositivo (numeratore) che al termine di un'istruzione, salvo specifico ordine contrario, passi senz'altro, aumentando di 1 il suo contenuto, ad indicare l'indirizzo della cella successiva a quella da cui era stata estratta l'istruzione appena eseguita.

La seconda via è quella seguita nelle cosiddette macchine a 1 o a 3 indirizzi. Nelle prime ogni istruzione contiene, accanto alle cifre che specificano l'operazione da compiere, un solo indirizzo della memoria da cui prelevare un operando o in cui inviare un risultato. Istruzioni tipiche sono:

Inviare il numero contenuto nella cella n della memoria dell'accumulatore sommandolo (oppure: sottraendolo) al suo contenuto.

Inviare il numero contenuto nella cella n della memoria nel registro del moltiplicatore e moltiplicarlo per quello contenuto nel registro del moltiplicando (il risultato di questa operazione in genere compare nell'accumulatore).

Inviare il numero contenuto nell'accumulatore nella cella n della memoria cancellando il suo eventuale contenuto precedente.

Etc....

Nelle macchine a tre indirizzi invece l'istruzione tipica è del seguente tipo:

Prelevare il numero contenuto nella cella n della memoria, e addizionarlo (moltiplicarlo, etc..) per il numero contenuto nella cella m, e inviare il risultato nella cella r della memoria.

Non occorre allora specificare i singoli registri della parte aritmetica. In ambedue questi tipi il controllo è munito di un numeratore che ha l'ufficio di contenere l'indirizzo in cui si trovava nella memoria l'istruzione da seguire: al termine di ogni istruzione tale numero viene aumentato automaticamente di una unità, cosicchè la macchina passa ad eseguire l'istruzione contenuta nell'indirizzo successivo della memoria. Naturalmente può essere necessario talvolta saltare da una certa successione di indirizzi per le istruzioni ad un'altra; per questo motivo esiste in tali macchine un ordine speciale di salto incondizionato, ricevendo il quale la macchina non esegue nessuna operazione ordinaria, ma viene cambiato il numero contenuto nel numeratore, cosicchè subito dopo la macchina passa a prelevare ed eseguire una nuova successione di ordini.

Nelle macchine a 2 e a 4 indirizzi viene scelta la prima alternativa. Le loro istruzioni sono rispettivamente del tipo di quelle ad 1 a 3 indirizzi, ma accanto ad essi è indicato l'indirizzo s della cella della memoria in cui, appena eseguita la istruzione ricevuta, il controllo troverà l'istruzione da eseguire immediatamente dopo. In pratica queste macchine equivalgono alle precedenti ove nelle prime si facesse eseguire ogni istruzione da un ordine di salto incondizionato.

Esistono macchine che funzionano secondo tutti e quattro i tipi, nè si può dire in generale quale sia il più conveniente, perchè ciò dipende largamente dagli scopi cui la macchina verrà impiegata. In generale si può solo dire che il tipo ad un indirizzo presenta una programmazione un po' più lunga di quello a 3 o a 4 ma in compenso essa è più elastica; dal punto di vista della rapidità, le macchine a 3 o a 4 indirizzi sono forse un po' più rapide, ma al tempo stesso più complicate e via dicendo.

Un ordine particolarmente importante, sempre incluso nella lista, è quello che permette di variare l'ordine di esecuzione delle istruzioni del programma in base a risultati precedenti del calcolo. In pratica è sufficiente un ordine di questo tipo (salto incondizionato): Se il contenuto dell'accumulatore è ≤ 0 passare all'istruzione contenuta nella cella p della memoria, se invece è > 0 passare all'istruzione q (o per le macchine a 1 e 3 indirizzi: all'istruzione successiva).

Oltre a queste istruzioni, per così dire di tipo aritmetico, che sono presso a poco le stesse per tutte le macchine, vi sono diversi altri ordini per ogni macchina che assolvono funzioni diverse, quali ordini per la lettura dal veicolo di entrata, o di scrittura su quello di uscita o di trasferimento di gruppi di informazioni da una memoria ad un'altra, più ordini di natura essenzialmente logica che operano per così dire direttamente sulle parole e non aritmeticamente sui numeri.

Per terminare queste osservazioni sul controllo diremo solo che questo è l'organo meno standard che ci sia nelle calcolatrici, perchè il suo funzionamento dipende piu' che mai da tutte le scelte che si sono fatte per gli altri organi e dal tipo di istruzioni che la macchina deve eseguire.

VI - I dispositivi di entrata e di uscita

I dispositivi di entrata e di uscita, benchè strutturalmente non facciano parte della macchina calcolatrice vera e propria, ne sono un complemento necessario e fondamentale. Gran parte della capacita' e della specializzazione di una macchina dipende da essi. In generale si tratta di dispositivi elettromeccanici complessi, sia di tipo gia' standardizzato per altri usi, sia di tipi appositamente studiati e realizzati su vasta scala commerciale per l'applicazione a macchine calcolatrici elettroniche. Il principale problema è costituito dalla lentezza sia della lettura che della scrittura rispetto alle velocita' proprie delle calcolatrici. Questo ha poca influenza per quei problemi in cui il numero delle informazioni da immettere nella macchina è piccolo rispetto a quello delle operazioni che la macchina dovrà compiere, ma acquista una particolare importanza per quelle applicazioni in cui occorre immettere molti dati dall'esterno. Per ovviare in parte a tale inconveniente, molte macchine sono state dotate di una memoria esterna a nastro o a filo magnetico, che puo' essere letta e scritta sia dalla macchina durante il suo funzionamento che dall'esterno. Talvolta questi nastri sono intercambiabili o comunque vi sono piu' dispositivi che possono essere usati separatamente. Le capacita' in parole di tali mezzi raggiungono anche diverse centinaia di migliaia. Un altro uso molto importante della memoria esterna è connesso con l'uso sistematico delle cosiddette souboutines o programmi parziali di calcoli. Non è possibile accennare ai problemi relativi in questa sede, ma è necessario tenere conto in sede di progettazione di queste tecniche che agevolano notevolmente l'opera sempre lunga e pesante della programmazione.

Un secondo problema relativo a tali mezzi di comunicazione sorge dal fatto che la codificazione binaria, enormemente conveniente all'interno della macchina, appare poco pratica per la formulazione del programma da parte del matematico. Per evitare la rappresentazione decimale all'interno si ricorre allora ad una doppia codificazione; una di tipo decimale per la trascrizione del programma sul veicolo del dispositivo di entrata ed una binaria all'interno. Naturalmente per effettuare il trasferimento occorre provvedere alla trascrizione tra i due co-

dici, ma questo puo' essere fatto dalla macchina stessa in base ad un particolare programma, conservato perennemente in una certa zona della memoria interna. Talvolta per agevolare questa trascrizione si fa uso all'esterno di un codice in base 8 o 16, che si avvicinano di piu' al tipo di rappresentazione decimale, ma che sono molto piu' rapidamente traducibili in forma binaria.

I problemi relativi a questi organi sono stati discussi in un convegno interamente dedicato a tale argomento. Il resoconto di tale convegno è stato pubblicato dall' American Institute of Electrical Engineers (A.I.E.E.) Review of Input and Output Equipments used in Computing Systems (Joint A.I.E.E. - I.R.E.- A.C.M. Computer Conference - 1953 -).

Riportiamo una lista dei tipi piu' usati con alcune indicazioni orientative sulle relative velocita' di lettura e di scrittura:

Flexowriter	10 caratteri/sec.
Schede perforate (Holleith)	120-150 schede al minuto, 4-5 parole di 30bit/sec.
Nastro perforato	10 caratteri/sec.
Nastro perforato letto foto- elettricamente	200-500 caratteri/sec.
Telescrivente	8-12 caratteri/sec.
Filo magnetico	3000-4000 cifre al secondo.
Nastro magnetico	un migliaio di parole al secondo

Descrizione delle caratteristiche di macchine esistenti

Riporteremo nella tabella seguente le principali caratteristiche di un certo numero di macchine di varia grandezza e di vario tipo. Tali dati sono stati ricavati da "A survey of Automatic Digital Computers" Office of Naval Research - Department of the Navy - Washington D.C. 1953; ove sono descritte un centinaio circa di macchine calcolatrici. Non sarebbe quindi difficile; estendere questa tabella per includere altri tipi che mostrebbero la grande varietà di tendenze finora adottate.

Per le macchine di piccola potenza costruite a scopo commerciale (del valore tra i 30 e i 60 milioni) si è tenuto un congresso in America nel 1952. I resoconti sono stati pubblicati dal Pentagono (Washington - 1952) " A Symposium on Commercially Available General Purpose Electronic Digital Computers of Moderate Price ".

Delle 8 macchine ivi descritte abbiamo riportato solo la CADAC IO2A.

Del tipo della IAS (Institute of Advanced Study-Princeton) oltre alla ILLIAC e alla BESK (Stoccolma) vi sono molti altri esemplari (AVIDAC, JOHNNIAC, MANIAC, NAREC, ORACLE, ORDVAC).

Analogamente hanno seguito i principi della SEAC la DYSEACFLAC, MIDAC.

Numerosi sono infine altri esemplari di tutte le grandezze e tendenze costruite sia in America che in vari paesi d'Europa (Inghilterra, Francia, Germania, Olanda, Svizzera, Norvegia, ecc.) oltre che in Australia e in Giappone.

Nella tabella sono anche indicati, per confronto, i dati relativi alla FERRANTI, che è la macchina che si sta installando presso l'Ist. Naz. App. Calc. a Roma.

Nome	APE (x)C Londra	ARRA Amsterdam	CADAC 102A California	G2 Göttingen	TRE Inghilterra	ACE Pi1 National Phys. Lab.	BESK Stoccolma	IAS Princeton	ILLIAC Illinois	SEAC Washington	CRC 107 California	SWAC Los Angeles	FERRANTI Manchester
Superficie m ²	2	6	1	20	8	15	7	10	25	15	50	75	30
Potenza Kw	2	3	6	5	10	?	14	15	35	15	18	30	26
Raffreddamento	-	-	si	-	si	-	si	si	si	si	si	si	si
Base int. (est.)	2(8-10)	2(10)	2(8-10)	2(10)	2(10)	2	2(10)	2(10)	2(16)	2(16)	10	2	2(10)
Lungh. parola	32	30	36	50	24	32	40	40	40	45	9+segno	36	20 o 40
Campo numerico	-1,+1	-1,+1	-1,+1	-8+8	-1,+1-2 ²⁵	P	-1+1	-1,+1-2 ³⁹	-1,+1-2 ³⁹	-4,+4	-1+1	-1+2	
Rappres. negat.	comp.	comp.	± mod.	± mod.	comp. 2		com. 2	com. 2	com. 2	± mod.	± mod.	± mod.	comp.
Numero indir.	2	1	3	1	1	2	1	1	1	4 o 3	3	4	1
Funz. org. arit.	Σ	Σ	Σ	Σ	π	Σ	π	π	π	Σ	Σ	π	Σ
Tempo medio +	10 m	17 m	12 1/2 m	20 m	40 μ		50 μ	60 μ	70 μ	0.7 m	15 m	64 μ	1.2 m
Tempo medio x	10 m	30 m	25 m	80 m	progr.	2 m	300 μ	400-900 μ	700 μ	3 m	40 m	384 μ	3.3 m
Memoria princ.	T.M.	T.M.	T.M.	T.M.	ES	Hg	ES	ES	ES	Hg - ES	T.M.	ES	ES
Capac. par.	1024	1024	1024	2048	512	360	256	1024	1024	512 512	1000	256	256
Funz. tempo acc.	Σ 20-1/2 m	Σ 22-2 m	Σ 25-1 m	Σ 20 m	π 5 μ	Σ 1024-30 μ	π 20 μ	π 25 μ	π 27 μ	Σ π	Σ 4 m	π 1 μ	Σ 240 μ
Memoria ausil.	-	-	-	-	T.M.	-	T.M.	T.M.	T.M.	-	T.M.	T.M.	T.M.
Capcit. par.	-	-	-	-	65.536	-	8192	in costr.	in costr.	-	10.000	4096	16384
Funz. tempo acc.	-	-	-	-	π 1 sec-10 μ	-	Σ 20, 1/2 m	-	-	-	Σ 40 m	Σ 16 m	Σ 30 m
Memoria est.	-	-	N.M.	-	oppure	-	-	-	-	N.M.	N.M.	-	-
Capacita' par.	-	-	800.000	-	2048	-	-	-	-	400.000	1.000.000	-	-
Funz. tempo acc.	-	-	Σ π, 2 min.	-	π 40 m 10 μ	-	-	-	-	Σ 0.1 sec.	Σ 80 sec.	-	-
Valvole	310	500	300	1100	2000	800	2250	2300	2784	1300	850	2500	1800+2000
Cristalli	-	2000	4000	-	1000	-	200	-	-	16.800	8000	3000	-
Relays	3	15	-	-	25	-	-	-	-	10	50	-	-
Freq. fond. Kc	60	-	100	92	100	1000	160	asincr.	asincr.	1000	100	125	100
Disp. entrata ed uscita	Schede p. Telescriv.	Nastro per. Telescriv.	Nastro mag. Schede per. Nastro per.	Telescriv. Nastro per	Nastro per. Telescriv.	Schede per. Telescriv.	Nastro per. Telescriv.	Schede per. Nastro per.	Nastro per. Schede per. Telescriv.	Telescriv. Nastro per. Fito mag.	Telescriv. Schede per. Nastro mag.	Telescriv. Nastro per. Schede per.	Nastro per. Telescriv.