

guida alla
elettronica

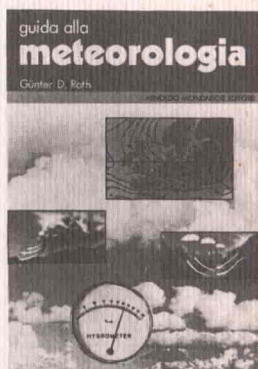
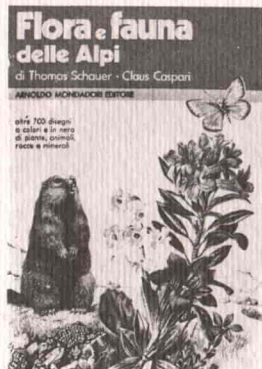
Andrea Vismara

ARNOLDO MONDADORI EDITORE

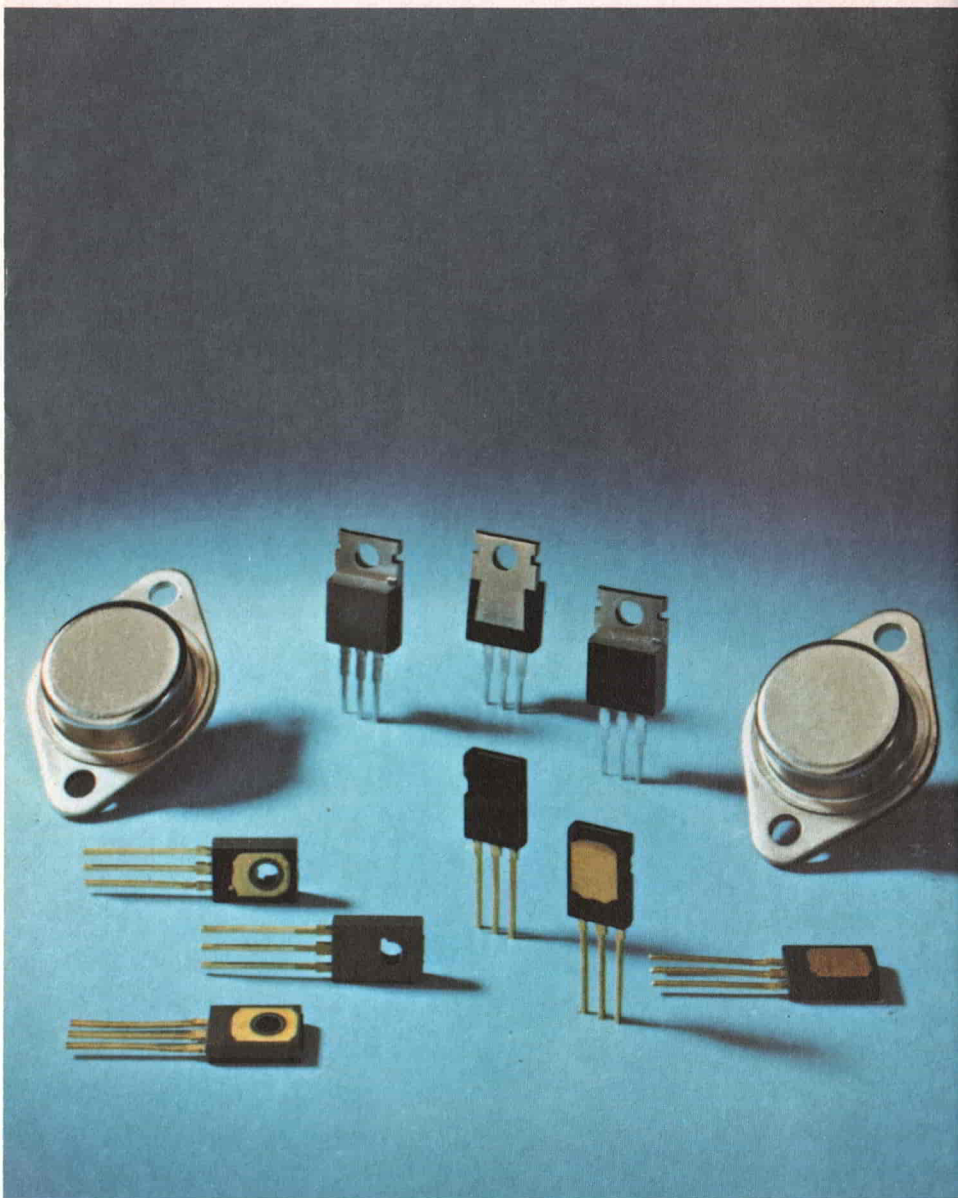


Guide pratiche e manuali Mondadori

Le informazioni più complete e le illustrazioni più dettagliate in grandi volumi di piccolo formato ad un prezzo accessibile.



Guide pratiche e manuali



guida alla
elettronica

testi di Andrea Vismara

ARNOLDO MONDADORI EDITORE

© 1979 Arnoldo Mondadori Editore S.p.A., Milano
Libri Illustrati Mondadori
Guide pratiche e manuali
Redazione di Gian Luigi Adamoli
Impaginazione di Raffaele Curiel
e Andrea Pilon
Fotocomposizione di Nerino Salvadori
Sarego (Vicenza)
I edizione: settembre 1979

- 9 Elettronica, ovvero l'arte di controllare gli elettroni**
- 17 I materiali elettronici**
Atomi e molecole **17** Gli elettroni **20** La tavola periodica degli elementi **22** Conduttori, semiconduttori e isolanti **24**
- 31 Componenti dei circuiti elettronici**
Componenti attivi e passivi **31** La legge di Ohm **32** I resistori **36** I condensatori **38** Gli induttori **42** I trasformatori **44** I diodi **48** I triodi **51** I cinescopi **65** I circuiti integrati **72**
- 83 Il magnetismo nella registrazione dei dati**
- 93 Circuiti elettronici fondamentali**
Circuiti attivi e passivi, circuiti lineari e digitali **93** I circuiti passivi **95** L'amplificatore **96** L'oscillatore **101** Il modulatore **102** I circuiti digitali **104** I componenti di memoria e i contatori **114** Codifica e decodifica **121** I circuiti aritmetici **127**
- 133 L'elettronica e la trasmissione delle informazioni**
- 149 Una tecnica per moltissime applicazioni**
Automatismi e apparecchiature di controllo **151** L'elaborazione dell'informazione **156** Dagli automatismi digitali ai robots **174**
- 187 Controllo delle onde elettromagnetiche**
Le onde sul lago **187** La radio **188**
- 199 Immagini attraverso l'etere**
La televisione **199**
- 221 Automatismi elettronici nella telefonia**
- 239 Il radar e gli aiuti alla navigazione**
- 249 Glossario**

Elettronica, ovvero l'arte di controllare
• gli elettroni

Elettronica, ovvero l'arte di controllare gli elettroni

Definire, cioè delimitare o circoscrivere, è sempre stato un problema. Lo è certamente nel nostro caso in cui siamo di fronte a una tecnica giovane dai confini non raggiunti e neanche prevedibili. Accontentiamoci dunque della definizione semiseria ma veritiera presentata nel titolo e tentiamo dapprima più modestamente di descrivere l'elettronica anziché definirla. Un modo indiretto ma efficace può essere quello di descrivere i *principi* su cui si basa, i *mezzi* che impiega e i *fini* che si propone.

I principi: sono quelli, comuni all'elettronica e alla fisica, che governano i fenomeni elettromagnetici. Può interessare sapere che un professore universitario scozzese, J.C. Maxwell, riuscì, nella seconda metà del secolo scorso, a condensare in una coppia di equazioni tutte le leggi relative non solo ai fenomeni elettromagnetici noti a quel tempo, ma anche, e questo è il lato più sorprendente, relative ai fenomeni scoperti e utilizzati nel nostro secolo.

A fondamento di queste due equazioni sta il fatto che tutti i fenomeni elettromagnetici, ovunque si manifestino, possono essere descritti completamente tramite quattro grandezze fisiche, e cioè:

- il campo elettrico
- il campo magnetico
- l'induzione elettrica
- l'induzione magnetica

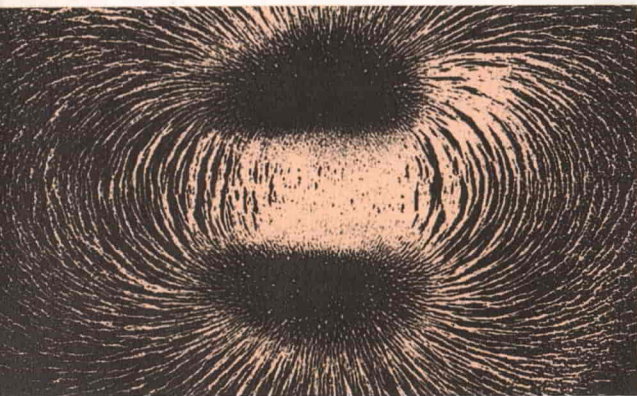
Le due equazioni esprimono le relazioni che sussistono tra queste grandezze in qualunque regione dello spazio, sia vuoto sia occupato da un materiale qualsiasi.

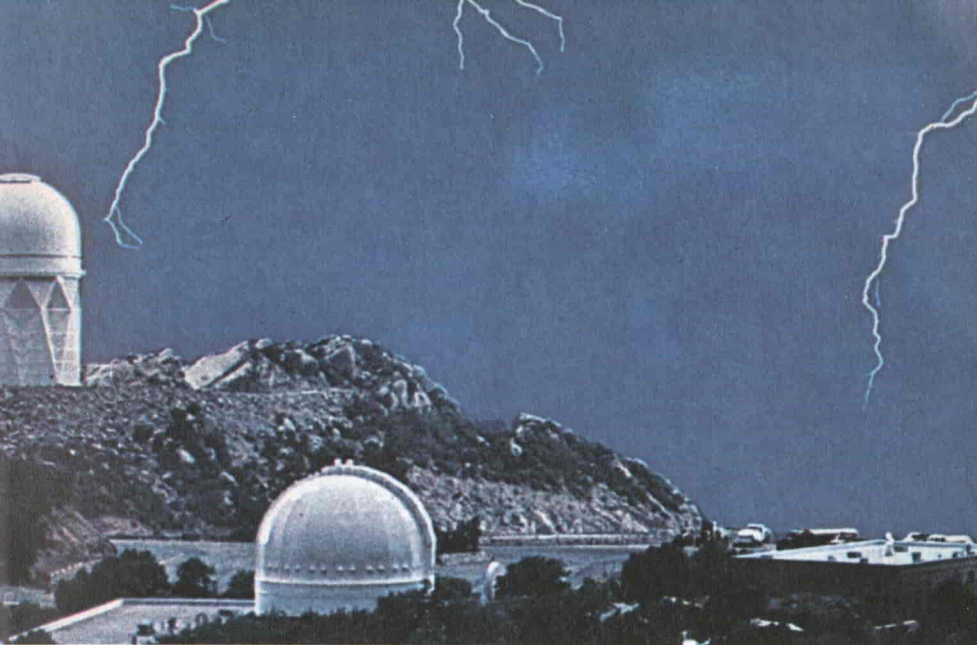
Facciamo due esempi per meglio chiarire questa affermazione. Consideriamo dapprima lo spazio vuoto: le due equazioni opportunamente applicate spiegano completamente la propagazione delle onde elettromagnetiche, quali quelle su cui sono convogliati ad esempio i segnali televisivi.



© Gary Ladd 1972

I fenomeni elettrici e magnetici, la cui comprensione è stata in gran parte frutto del lavoro dei fisici dell'Ottocento, sono qui rappresentati da alcuni loro aspetti fra i più spettacolari: un violento temporale scatenatosi sopra l'osservatorio astronomico di Kitt Peak (USA); il fulmine è una forte scarica di elettricità nell'aria, che avviene tra due nubi o tra una nube e la terra. Sotto, a sinistra: le linee di forza del campo magnetico di una calamita sono evidenziate dalla disposizione della limatura di ferro che si trova immersa in esse; a destra: la terra può essere pensata come una enorme calamita in quanto genera attorno a sé un campo magnetico.





Se consideriamo invece una regione di spazio occupata da un materiale "conduttore" di elettroni, come un filo di rame, si ottiene dalle stesse equazioni la legge di Ohm, cardine e fondamento di tutti i circuiti elettrici. Di questa legge, come delle equazioni di Maxwell e di ogni dispositivo elettronico menzionato in questo capitolo, torneremo a parlare in sufficiente dettaglio nei prossimi capitoli. Tentiamo ora, per concludere il paragrafo, di giustificare un po' la definizione del titolo. A tale fine consideriamo il cinescopio televisivo, e cioè quel dispositivo elettronico che è capace di riprodurre immagini in movimento, impiegato nei comuni ricevitori televisivi. Esso consiste essenzialmente nelle seguenti parti:

- *catodo* che emette un fascio di elettroni
- *griglia* che controlla l'intensità di questo fascio
- *giogo di deflessione* che controlla la direzione del fascio
- *schermo*, ricoperto di fosfori, che, colpito dal fascio di elettroni in successivi e diversi punti, genera una immagine costituita da un insieme di punti luminosi
- *anodo* che attira prima verso lo schermo e poi verso di sé gli elettroni assorbendoli.

Da questo esempio si comprende perché talvolta si definisca l'elettronica come quella tecnica che controlla l'emissione, il moto e l'assorbimento degli elettroni liberi, cioè non vincolati alla struttura atomica della materia. Da questa alla definizione del titolo il passo è certamente audace, ma breve.

I mezzi: sono costituiti dai "componenti elettronici", dispositivi che

consentono il controllo degli elettroni liberi nei materiali, cioè quegli elettroni il cui flusso nei circuiti genera la corrente elettrica.

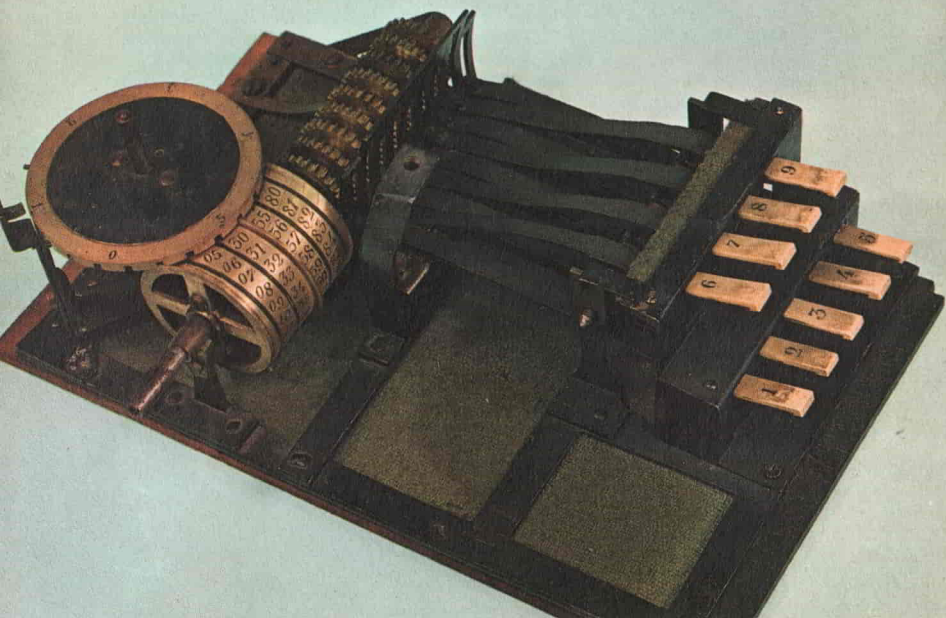
Il numero e il tipo dei componenti elettronici è vastissimo e in continuo aumento. Nel classificarli si può comunque iniziare a raggrupparli in due classi:

- *componenti comuni all'elettrotecnica*: conduttori, condensatori, induttori, trasformatori e resistori. Le versioni "elettroniche" di tali componenti sono generalmente piuttosto diverse dal punto di vista realizzativo e sono anche molto più piccole, in quanto l'energia elettrica in gioco in elettronica è molto più piccola;
- *componenti elettronici tipici*: sono quelli la cui invenzione ha fatto nascere l'elettronica. In contrapposizione alla prima classe di componenti, questi godono della proprietà, tipica dell'elettronica, di consentire la generazione, il controllo e l'assorbimento degli elettroni. Componenti tipici di questa classe sono i diodi e i triodi. Il ben noto transistor è un triodo particolare.

In conclusione, si può dire che le apparecchiature elettroniche sono composte di circuiti elettronici, costituiti da componenti elettronici attivi e passivi opportunamente collegati e comandati.

I fini: sono i più vari, difficilmente classificabili e prevedibili.

Si può anzitutto dire in che modo i fini dell'elettronica si distinguono-





Il terminale di un elaboratore elettronico. Nella pagina a fianco: una calcolatrice meccanica dell'Ottocento. L'elettronica è entrata molto tardi nella storia delle macchine calcolatrici, ma se oggi si vogliono raggiungere determinati risultati questa tecnologia è irrinunciabile.

no da quelli dell'elettrotecnica, che studia e applica la generazione, il trasporto e l'utilizzazione dell'energia elettrica. Esempi di generatori elettrici sono la dinamo e l'alternatore; il trasporto dell'energia elettrica a distanza viene effettuato impiegando trasformatori e linee elettriche; infine l'energia elettrica viene utilizzata impiegando motori elettrici per ottenere energia meccanica, resistori per ottenere energia termica, lampade per ottenere illuminazione.

Al contrario, per l'elettronica l'energia elettrica è solo un mezzo. Infatti, benché le apparecchiature elettroniche funzionino con energia elettrica, il loro scopo generalmente ha poco a che fare con essa. Citiamo solo due esempi: la televisione e i calcolatori elettronici, aventi come rispettivi scopi la riproduzione a distanza di immagini in movimento e l'effettuazione di programmi di calcolo.

Per meglio ribadire questo concetto fondamentale consideriamo l'evoluzione passata della macchina calcolatrice. Questa, nata come macchina puramente meccanica, in cui l'operatore doveva, oltre che battere i tasti e leggere i risultati, azionare con una manovella i meccanismi interni, è divenuta elettrica solo in un secondo tempo, eliminando l'azionamento manuale dei meccanismi. Successivamente è diventata elettronica e quindi completamente diversa nelle prestazioni e nella struttura realizzativa. Una sola cosa non è cambiata: lo scopo della macchina, che è rimasto il primitivo, e che non ha

nulla a che fare con gli elettroni né con l'elettronica, non ancora esistente al tempo dell'invenzione della prima macchina calcolatrice. Possiamo dire che talvolta l'elettronica è usata come una nuova tecnica per realizzare in modo più efficace vecchie idee, come la macchina calcolatrice, talvolta per realizzare ciò che prima non era possibile, come la televisione: in entrambi i casi viene fornita un'informazione (immagini alla telecamera e cifre alla tastiera) che, trattata o elaborata dai rispettivi circuiti elettronici, viene restituita in una forma intelleggibile all'uomo, e cioè sotto forma visiva.

Da questa constatazione possiamo trarre lo spunto per dire che l'elettronica ha per scopo l'elaborazione dell'informazione.

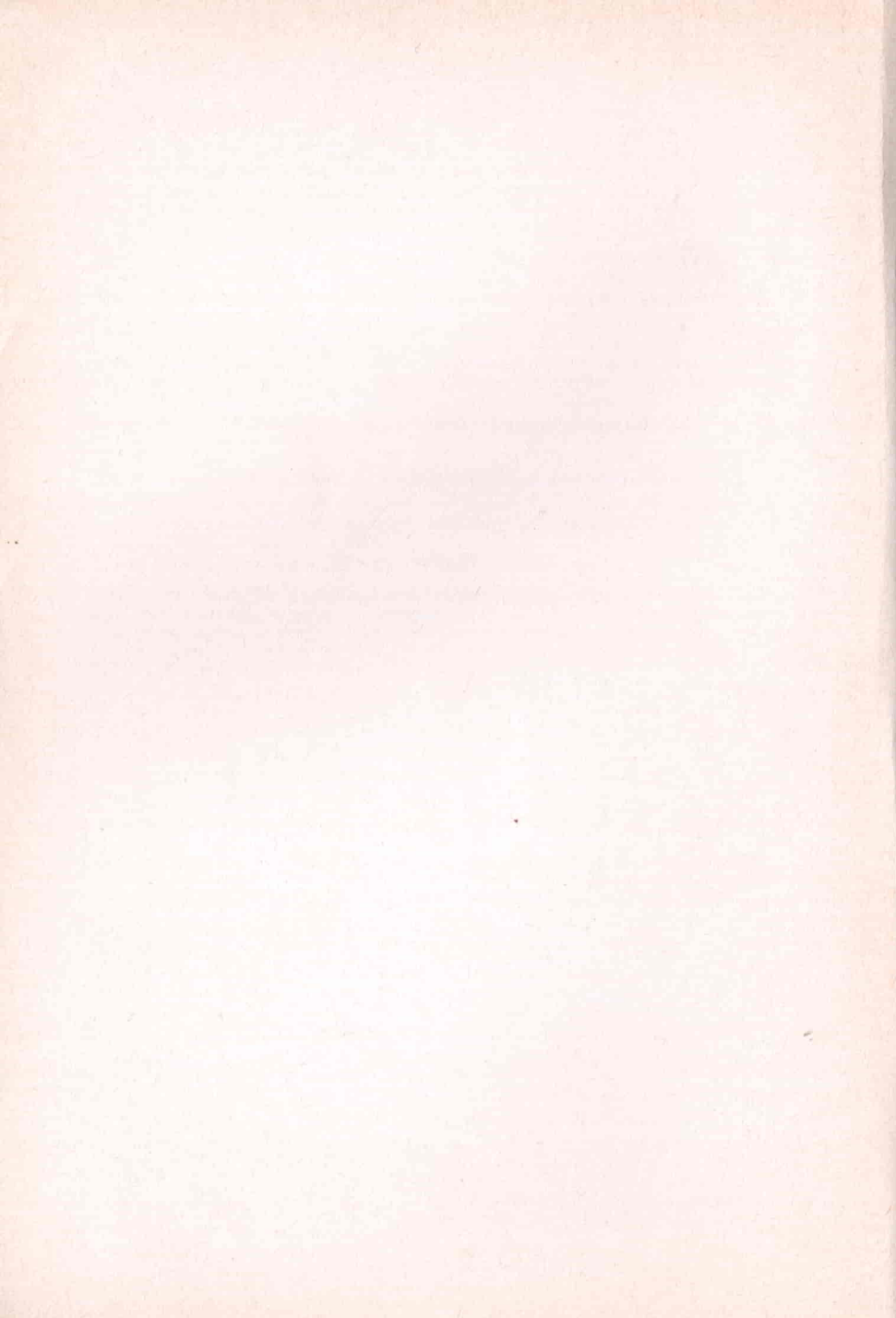
Conclusione: abbiamo visto che, pur procedendo con la dovuta prudenza, è stato possibile formulare tre diverse definizioni, sia pure incomplete, dell'elettronica a seconda che si considerino i principi che sfrutta, i mezzi che impiega o il fine che si propone.

Riassumendo, le tre definizioni dicono che l'elettronica è quella tecnica che:

- sfrutta l'emissione, il moto e l'assorbimento di elettroni liberi (il principio)
- impiega dispositivi, i componenti elettronici, che comportano l'uso di elettroni liberi (i mezzi)
- consente l'elaborazione dell'informazione (il fine).

Si spera così che tre definizioni incomplete possano supplire alla mancanza di una definizione completa.

I materiali elettronici



I materiali elettronici

Atomi e molecole

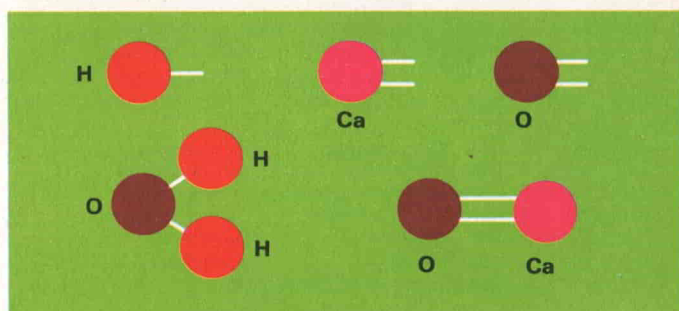
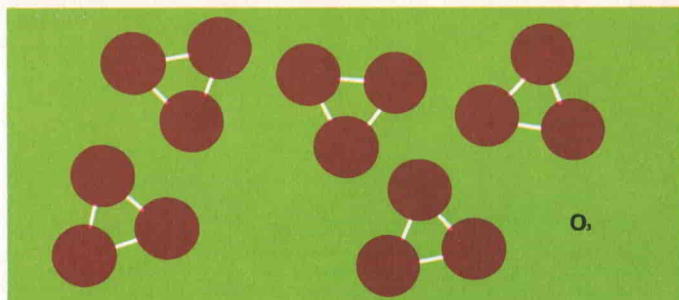
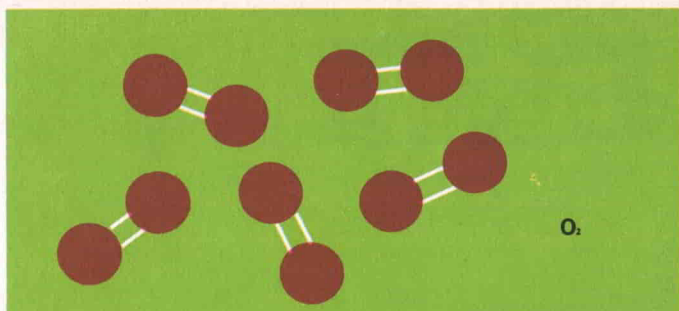
Ogni tecnica impiega materiali particolari per le sue realizzazioni tipiche. L'elettronica per esempio usa generalmente il rame per realizzare i conduttori, il germanio ed il silicio per i transistor. Prima però di parlare dei materiali impiegati in elettronica, è bene riassumere i principali concetti relativi alla struttura generale dei materiali, in modo da poter meglio comprendere le differenti proprietà di essi e le ragioni di preferenza per alcuni rispetto ad altri.

Per analizzare la struttura di un qualsiasi materiale dobbiamo pensare di procedere a una sua suddivisione sempre più spinta, prendendone cioè parti sempre più piccole, verificando ogni volta che queste particelle conservino le proprietà fondamentali che ci fanno distinguere il materiale in esame da un altro.

Con questo modo di procedere giungeremo a determinare la più piccola particella della sostanza in esame che conserva ancora le proprietà d'origine: questa particella è detta *molecola*.

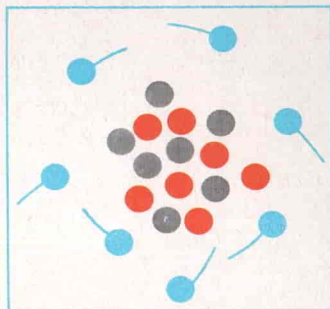
Se vogliamo suddividere anche la molecola, ciò è possibile, ma troveremo particelle che hanno proprietà generalmente diverse da quelle della molecola. Se per esempio consideriamo l'acqua, una sua molecola può ancora chiamarsi acqua, mentre un'ulteriore sua suddivisione ci porta a trovare particelle di due sostanze diverse: idrogeno e ossigeno. Più precisamente una molecola d'acqua è composta da due parti di idrogeno e da una di ossigeno. Quanto possano essere diverse le proprietà dell'acqua e quelle dei suoi componenti lo si vede chiaramente osservando che alle temperature in cui viviamo normalmente l'acqua è un liquido, mentre idrogeno e ossigeno sono gas.

Le particelle costituenti la molecola sono dette *atomi* e rappresentano gli *elementi chimici fondamentali* che compongono la sostanza in esame. Idrogeno e ossigeno sono infatti due elementi chimici. Oggi si conoscono 105 elementi chimici fondamentali, dei quali 92 naturali e 13 artificiali. Qualsiasi sostanza, sia essa naturale oppure



artificiale, non è che una combinazione di questi 105 elementi. Si può anche dire che la *molecola* di qualsiasi sostanza è una combinazione di *atomi* degli elementi chimici fondamentali. In una *sostanza composta* le molecole sono costituite da atomi di elementi diversi (per esempio l'acqua è una sostanza composta). In una *sostanza semplice* invece le molecole sono costituite da atomi tutti uguali. L'ultima frase scritta rappresenta qualcosa di più di una definizione. Essa significa in realtà che anche nel caso di sostanze semplici si

Nella pagina a fronte, dall'alto: molecole di ossigeno formate ciascuna di due atomi (O_2); molecole di ozono, formate di tre atomi (O_3), meno stabili dell' O_2 (infatti fra atomo e atomo c'è un solo legame di valenza anziché due); atomi singoli di idrogeno, calcio, ossigeno (accompagnati da tanti trattini neri quant'è la valenza) e molecole d'acqua (H_2O) e calce viva (CaO). Qui a destra: rappresentazione dell'atomo: protoni e neutroni (in grigio) nel nucleo, elettroni che vi orbitano intorno ad altissima velocità.



deve distinguere tra molecola e atomo. Prendiamo per esempio gli atomi dell'elemento chimico fondamentale che è l'ossigeno: la combinazione di due atomi di ossigeno è una molecola della sostanza semplice chiamata ancora *ossigeno*. La combinazione di tre atomi di ossigeno è una molecola di *ozono*, che ha proprietà abbastanza diverse da quelle della sostanza detta ossigeno.

La caratteristica fondamentale di un atomo è quella proprietà chimica detta *valenza*, che esprime la sua capacità di combinarsi con altri atomi. Per dare una misura della valenza si usa generalmente come riferimento l'atomo di idrogeno. La misura della valenza di un atomo è espressa dal numero di atomi di idrogeno con cui può combinarsi o dal numero di atomi di idrogeno cui l'atomo considerato può sostituirsi in un composto chimico.

Così, sapendo che nella molecola dell'acqua un atomo di ossigeno si combina con due atomi di idrogeno, diremo che l'atomo di ossigeno ha valenza 2 o anche che è bivalente.

Consideriamo ora la calce viva: la sua molecola è costituita da un atomo di calcio e da uno di ossigeno. Possiamo immaginare che questo atomo di calcio abbia sostituito nella molecola dell'acqua i due atomi di idrogeno per combinarsi con l'atomo di ossigeno: diremo quindi che l'atomo di calcio è bivalente.

In chimica si usa una rappresentazione grafica molto semplice dell'atomo e della sua valenza; una o due lettere rappresentano l'atomo e uno o più tratti uscenti dall'atomo rappresentano la misura della valenza. Nella figura della pagina accanto sono rappresentati appunto i singoli atomi di idrogeno (H, monovalente), di ossigeno (O, bivalente) e di calcio (Ca, bivalente), nonché le molecole di acqua e di calce viva. Oltre alla rappresentazione grafica, nei testi si usa una formulazione simbolica ottenuta con le lettere rappresentanti gli atomi seguite da un numero che indica la quantità di atomi presa in considerazione. Le molecole finora considerate possono essere così scritte:

- ossigeno: O_2
- ozono: O_3
- acqua: H_2O
- calce viva: CaO .



Alessandro Volta, uno dei primi fisici che si occuparono dei fenomeni elettrici, esegue un esperimento scientifico alla presenza di Napoleone, per evidenziare e misurare la carica elettrica su un "elettroforo". Si dice che Volta avesse scarsissime attitudini per la matematica, ma un intuito fisico non comune. Nella pagina a fronte: modello tridimensionale che rivela la complessità dei percorsi compiuti dagli elettroni dell'uranio attorno al nucleo: sono riconoscibili vari "gusci" concentrici che contengono ciascuno un certo numero di elettroni.

Poiché la valenza di un atomo è determinata dalla struttura dell'atomo stesso, vediamo ora come questo è costituito.

Gli elettroni

L'atomo consiste di una nube di elettroni rotanti attorno a un nucleo, così come i pianeti ruotano attorno al sole.

Il nucleo è costituito da due tipi di particelle: *i neutroni* e *i protoni*, gli ultimi portatori di cariche elettriche positive (mentre i neutroni sono scarichi). Gli *elettroni* sono altre particelle, portatrici queste di cariche negative. La carica elettrica di un elettrone è uguale a quella del protone; la prima è negativa, la seconda è positiva. Si dice anche che sono uguali, ma di segno opposto.

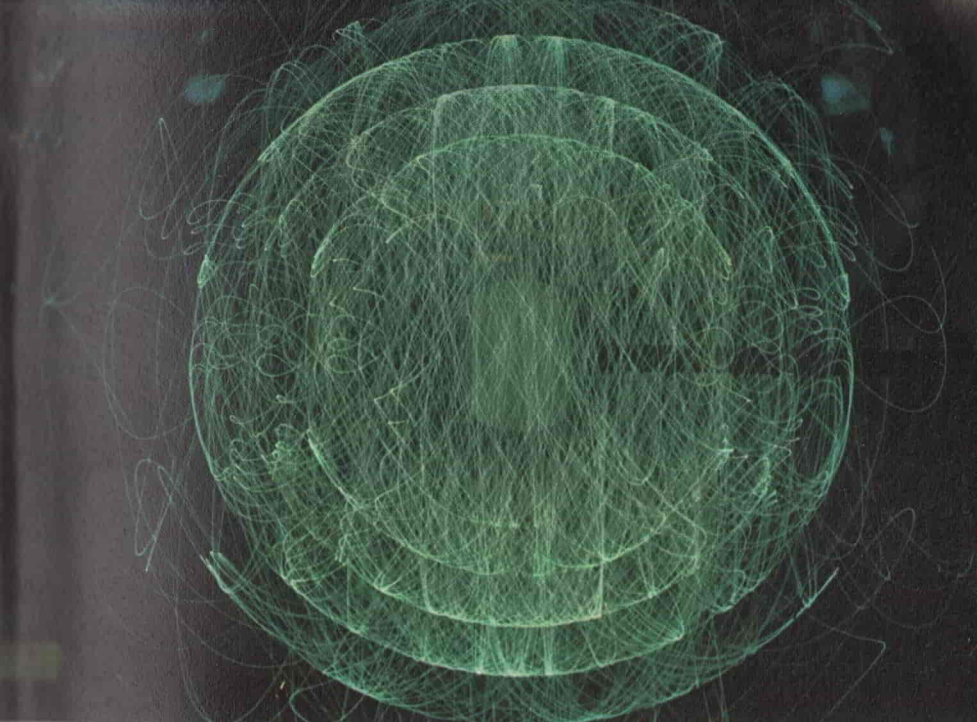
Le cariche elettriche dello stesso segno si respingono, quelle di segno opposto si attraggono. Si può immaginare che la velocità di rotazione degli elettroni intorno al nucleo sia tale da generare una forza centrifuga che compensi la forza che li attira verso il nucleo, dovuta appunto al fatto che nucleo ed elettroni hanno cariche elettriche di segno opposto.

L'atomo, in condizioni di equilibrio, possiede tanti elettroni quanti sono i protoni nel nucleo. All'esterno dell'atomo non si sviluppano forze di attrazione o di repulsione su altre cariche elettriche in quanto le cariche negative degli elettroni compensano esattamente quelle positive del nucleo. Si dice che l'atomo "visto" dall'esterno è elettricamente neutro e cioè si comporta esternamente come se non possedesse alcuna carica elettrica.

I 105 elementi chimici fondamentali possiedono atomi di diversa dimensione, cioè con diverso numero di protoni e di elettroni, e solo a questa diversità debbono le loro differenti proprietà.

Ciò equivale a dire che tutte le sostanze, compresi i 105 elementi, sono fatte di un'unica materia aggregata in atomi di diversa dimensione.

Il numero di protoni contenuti in un atomo si dice *numero atomico*



e costituisce un ottimo criterio per distinguere e numerare gli atomi di tutti gli elementi. Ogni elemento chimico fondamentale ha infatti un numero atomico, diverso da quello di ogni altro elemento, che lo individua e da cui dipendono quasi tutte le sue proprietà.

L'atomo più semplice è quello di idrogeno, che ha un solo protone e un solo elettrone rotante intorno a esso; l'atomo più complesso è quello dell'ultimo elemento artificiale finora realizzato, il 105esimo dal nome non ancora definito, che possiede 105 protoni e altrettanti elettroni.

Si può fare una classificazione molto più significativa degli elementi se si considera oltre al numero degli elettroni anche la loro disposizione intorno al nucleo.

Gli elettroni, che ricordiamo possono essere anche 105, ruotano intorno al nucleo distribuiti su più orbite. La loro disposizione è così governata:

- esistono sette possibili orbite designate, a partire dalla più vicina al nucleo, con le lettere K, L, M, N, O, P e Q;
- per ogni orbita vi è un limite superiore al numero di elettroni che può possedere, limite che è teoricamente tanto più alto quanto più l'orbita è distante dal nucleo; il numero massimo di elettroni che in realtà si riscontrano sulle sette orbite, da K a Q, è nell'ordine 2, 8, 18, 32, 32, 9 e 2;
- quando un'orbita è la più esterna non può comunque possedere

- più di otto elettroni, indipendentemente dal proprio numero d'ordine;
 - gli elettroni tendono a riempire le orbite dall'interno all'esterno.

La tavola periodica degli elementi

Dopo averli ordinati secondo il numero atomico, possiamo ora suddividere gli elementi in più classi secondo il numero di orbite occupate dagli elettroni del rispettivo atomo. Per ciò che si è appena detto è chiaro che atomi a basso numero atomico, e cioè con pochi elettroni, avranno poche orbite occupate e viceversa atomi complessi avranno molte orbite occupate.

Poiché sette sono le orbite possibili, considereremo sette classi o *periodi* di elementi: nel primo periodo porremo gli elementi che hanno solo la prima orbita (K) impegnata; nel secondo quelli che oltre alla prima hanno anche la seconda orbita (L) impegnata e così via. Nell'ambito di un periodo, considerare gli elementi nell'ordine dei loro numeri atomici vuol dire anche disporli secondo il numero di elettroni nell'orbita più esterna. Infatti ogni periodo inizia con l'occupazione di una nuova orbita, che diventa la più esterna, da parte di un primo elettrone e finisce con l'ottavo elettrone che "satura" l'orbita stessa.

La tavola periodica degli elementi di Mendeleev. In essa tutti gli elementi che appartengono a una stessa colonna hanno proprietà chimiche simili. I metalli sono stati colorati in azzurro, i non metalli in rosa. Questa classificazione non è però rigorosa. I "periodi", descritti nel testo, costituiscono le righe orizzontali della tavola (i Lantanidi appartengono al sesto periodo, gli Attinidi al settimo). Il numero progressivo ci dice quanti sono i protoni nel nucleo e gli elettroni che orbitano attorno all'atomo neutro. In natura si trovano solo i primi 92 elementi, gli altri sono stati sintetizzati con i moderni acceleratori.

I	H 1						
II	Li 3	Be 4					
III	Na 11	Mg 12					
IV	K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25
V	Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43
VI	Cs 55	Ba 56	La 57	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75
VII	Fr 87	Ra 88	Ac 89	Ku 104	Ha 105		
Lantanidi				Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61
Attinidi				Th 90	Pa 91	U 92	Np 93

Se verifichiamo quanto abbiamo detto, non troviamo alcun imprevisto con i primi tre periodi. Infatti il 1° periodo consiste dei due elementi che si distinguono per il numero di elettroni che hanno sulla 1ª orbita (K). Essi sono:

- l'idrogeno, di numero atomico 1, con un elettrone su detta orbita
- l'elio, di numero atomico 2, con due elettroni sempre su questa stessa orbita.

Il 2° periodo consiste di 8 elementi, che hanno tutti due elettroni sull'orbita interna K e da uno a otto elettroni sulla nuova orbita L. Tale periodo inizia con il litio, di numero atomico 3, con un elettrone sull'orbita L, e termina con il neon, di numero atomico 10, con otto elettroni sulla stessa orbita.

Il 3° periodo consiste ancora di 8 elementi, tutti con due elettroni sull'orbita K e otto sull'orbita L; gli elettroni sulla nuova orbita M vanno al solito da uno a otto. Questo periodo inizia con il sodio (n. atomico 11) e termina con l'argon (n. atomico 18).

Passiamo ora a considerare il 4° periodo, in cui compare la nuova orbita N. Oltre ai soliti otto elementi per saturare tale orbita, dobbiamo considerare anche altri dieci elementi che possono appartene-

										He 2
					B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
					Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71	
Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103	

nere a tale periodo. Infatti l'orbita M, che era esterna nel periodo precedente, e quindi poteva accogliere solo otto elettroni, ora che è interna può accogliere diciotto elettroni e cioè altri dieci rispetto a quelli sistemati nel periodo precedente.

In totale avremo quindi diciotto elementi in tale periodo: otto corrispondenti agli otto elettroni sistemabili sull'orbita esterna N e dieci corrispondenti ai dieci sistemabili su quella interna M. Il periodo inizia con il potassio, di numero atomico 19 con due elettroni sull'orbita K, otto sull'orbita M, e uno sull'orbita N, e termina con il cripto di numero atomico 36, che ha due elettroni sull'orbita K, otto sulla L, diciotto sulla M e otto sulla N.

In modo simile si compongono anche i successivi periodi, il 5° (con 18 elementi), il 6° (32 elementi) e il 7° (32 elementi, ma in realtà questo periodo si ferma al 19°, l'ultimo finora scoperto, o meglio "costruito", in laboratorio, dato che si tratta - come già abbiamo detto - di un elemento artificiale).

Si può ora fare un'interessante osservazione: il numero di elettroni sull'orbita esterna coincide generalmente per ogni elemento con il valore della valenza. Un'orbita satura (2 elettroni per la K, 8 per le altre orbite) significa valenza zero, ovvero incapacità di unirsi in composti chimici con altri elementi.

Tutto ciò che abbiamo detto può essere rappresentato in una tabella, detta *tavola periodica degli elementi* o di *Mendeleiev*, dal nome dello scienziato russo del secolo scorso che per primo la concepì. Questa tavola è composta di righe e di colonne: in ogni quadrato risultante dall'incrocio di una colonna con una riga sarà generalmente sistemato un elemento. Su ogni riga saranno sistemati gli elementi appartenenti a un periodo e cioè tutti gli elementi che hanno la medesima orbita esterna. Lungo ogni colonna saranno sistemati gli elementi, appartenenti a periodi diversi, ma aventi lo stesso numero di elettroni sulla orbita esterna, e cioè la stessa valenza.

Conduttori, semiconduttori e isolanti

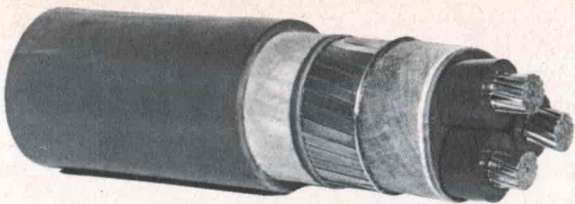
La proprietà più importante dei materiali impiegati in elettronica è la *conducibilità elettrica*, cioè la proprietà di consentire nel loro corpo il moto di cariche elettriche, che sono quasi sempre elettroni.

I materiali ad alta conducibilità, e cioè quelli in cui è facile spostare gli elettroni, sono detti *conduttori*; quelli in cui è molto difficile o praticamente impossibile sono detti *isolanti*. I *semiconduttori*, come dice il loro nome, hanno un comportamento intermedio.

La conducibilità elettrica per manifestarsi necessita della presenza di *elettroni liberi* di spostarsi, detti anche *elettroni di conduzione*.

Gli elettroni di conduzione sono parte degli elettroni sistemati sull'orbita esterna degli atomi, e cioè degli elettroni di valenza. Questi elettroni, nei conduttori, non appartengono rigidamente a un atomo particolare, ma sono relativamente mobili, così da costituire una *nube di elettroni* che appartiene a tutto il corpo del conduttore. I conduttori sono usati per convogliare correnti elettriche, per spostare cioè elettroni da un punto all'altro di un circuito elettronico. Con questi materiali sono realizzati "tutti quei fili" che si vedono nelle apparecchiature elettroniche.

I tipici materiali conduttori sono i *metalli*; quelli di maggior interesse



Uno dei motivi per i quali l'elettricità si è largamente affermata è senz'altro la netta distinzione che c'è in natura fra le sostanze isolanti e quelle conduttrici. La possibilità di spostare al loro interno degli elettroni, cioè di creare una "corrente elettrica", è infatti totalmente inibita nelle prime, e largamente permessa nelle seconde. Per "incanalare" la corrente basta dunque avvolgere i fili del conduttore in una guaina isolante (anche l'aria è un ottimo isolante). Sopra: un cavo tripolare con isolamento dei conduttori. In basso: nei metalli, tipici conduttori, gli elettroni di valenza sono liberi di spostarsi tra un atomo e l'altro.

in elettronica debbono avere alta conducibilità ed essere facilmente lavorabili. I migliori conduttori, appartenenti all'undicesima colonna della tavola degli elementi, sono:

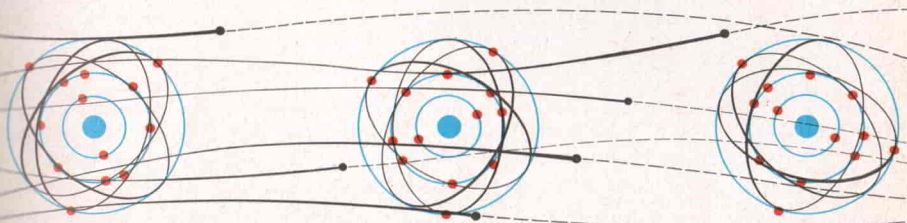
- il rame, di n. atomico 29, del IV periodo
- l'argento, di n. atomico 47, del V periodo
- l'oro, di n. atomico 79, del VI periodo.

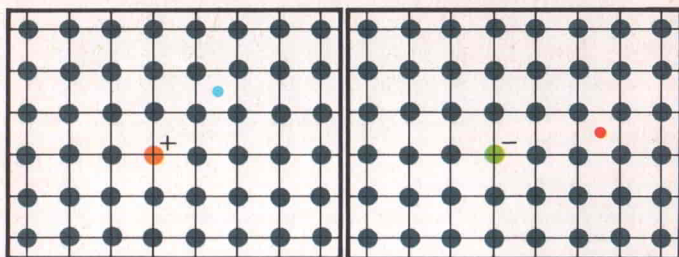
Poiché appartengono a una stessa colonna, hanno tutti la stessa valenza (pari a 1) e proprietà molto simili.

Tutti e tre sono usati in elettronica, sia pure in misura diversa a causa del diverso costo. L'oro è usato per esempio per collegamenti interni all'involucro dei circuiti integrati; l'argento è preferito in circuiti di dimensioni molto piccole. Il rame è d'impiego generale.

Gli *isolanti* sono materiali nei quali non vi sono elettroni liberi, disponibili per la conduzione elettrica: tutti gli elettroni sono fortemente vincolati agli atomi.

Gli isolanti vengono dunque impiegati per impedire che vi sia un passaggio di elettroni da un conduttore ad altro conduttore che si trovi in contatto con il primo. Un esempio lo abbiamo quando si usano due fili conduttori avvolti uno sull'altro: ogni filo è rivestito da una guaina di materiale isolante allo scopo di impedire che elet-





troni e quindi una corrente elettrica possa fluire da un filo all'altro. Consideriamo infine i *semiconduttori*, i materiali usati per realizzare i transistor. I due elementi semiconduttori di nostro interesse sono il silicio e il germanio e appartengono alla quarta colonna della tavola degli elementi nella quale si trova anche il carbonio.

La struttura atomica di questi elementi è la seguente:

orbita	K	L	M	N	numero
	elettroni	elettroni	elettroni	elettroni	atomico
carbonio	2	4	—	—	6
silicio	2	8	4	—	14
germanio	2	8	18	4	32

Questi materiali hanno una *struttura cristallina*: i loro atomi sono sistemati in modo ordinato e regolare, secondo un modello che si ripete in tutto il corpo del materiale. Ogni atomo è *legato* a 4 atomi vicini dai legami realizzati dai 4 elettroni di valenza. Così un atomo tetravalente, come quelli di silicio o di germanio, è legato dai suoi quattro elettroni di valenza ad altri quattro atomi dello stesso elemento. Ogni legame tra due atomi è costituito da due elettroni di valenza, uno per ognuno dei due atomi tra loro legati.

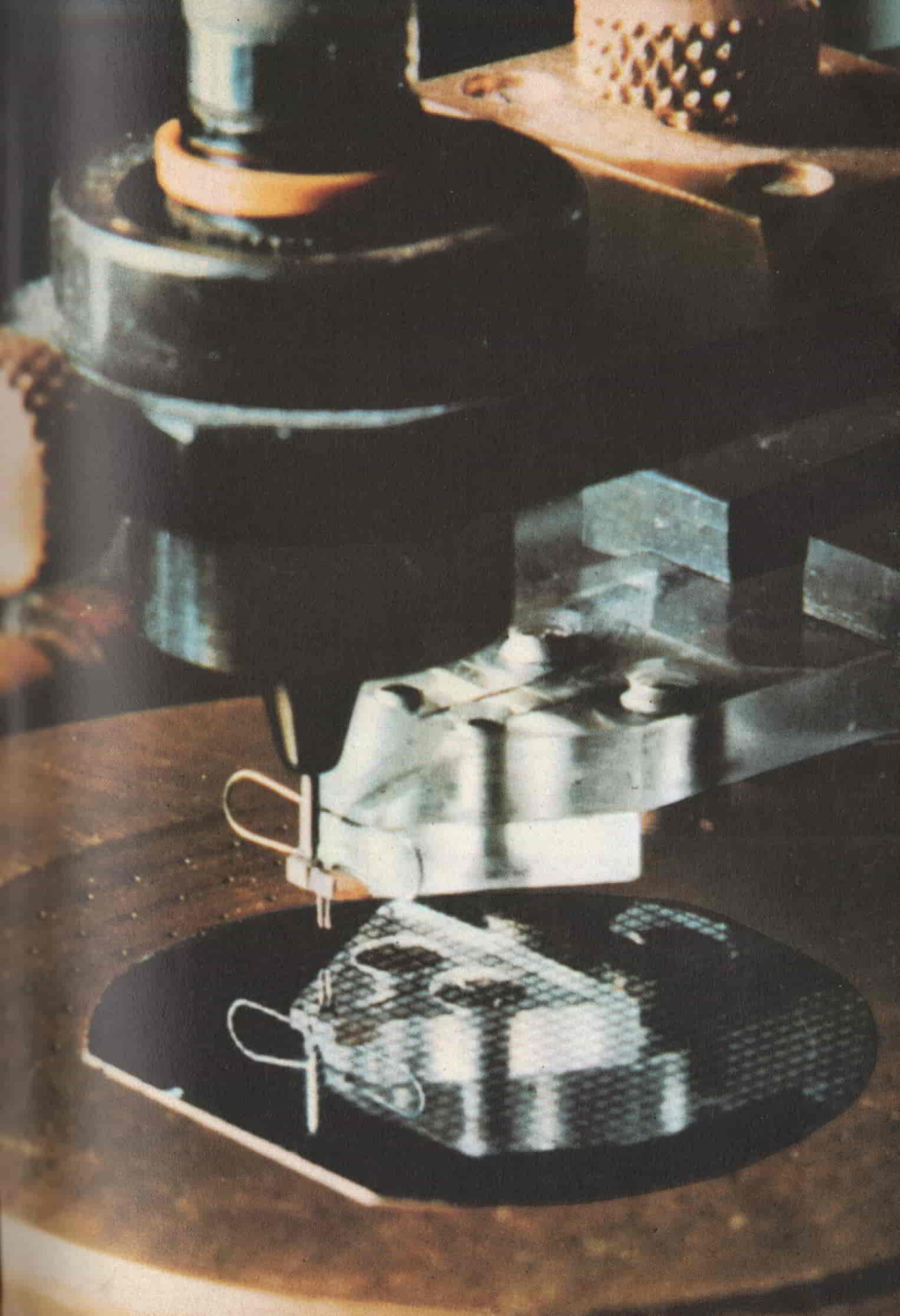
Nel caso che stiamo considerando, i quattro legami dell'atomo tetravalente impegnano un totale di otto elettroni, che coincide con il numero di posti disponibili sull'orbita esterna.

Questi elettroni non sono mobili e quindi non sono disponibili per la conduzione elettrica; i semiconduttori puri hanno perciò un comportamento simile a quello degli isolanti, ma non qualità tali da poterli usare in pratica come isolanti. Al contrario, ai semiconduttori si preferisce aggiungere sostanze estranee, dette *impurità*, allo scopo di migliorarne la conducibilità elettrica.

Si possono usare per tale scopo due tipi di impurità:

— impurità trivalenti, della colonna della tavola degli elementi più vi-

In alto, a sinistra: un'impurità pentavalente, trovato posto in un punto del reticolo di semiconduttore, libera l'elettrone in eccesso (ne servono solo quattro per legare l'atomo agli altri); a destra: un atomo trivalente allo stesso posto tende invece ad assorbire l'elettrone che gli manca, creando una "lacuna" positiva libera. Nella pagina a fronte: su una singola lastrina di silicio, grazie al "drogaggio", si creano decine di piccolissimi ma perfetti "circuiti integrati".



cina a sinistra ai semiconduttori, cioè elementi come il boro, l'alluminio, l'indio e il gallio;

- impurità pentavalenti, della colonna più vicina a destra, come l'arsenico, l'antimonio e il fosforo.

Immaginiamo ora di sostituire nel cristallo di semiconduttore uno dei suoi atomi con un atomo di arsenico, pentavalente e quindi con cinque elettroni di valenza sull'orbita esterna.

Solo quattro dei cinque elettroni, tipici di un atomo pentavalente, sono ora impegnati in luogo dei quattro elettroni dell'atomo tetra-valente preesistente. Il risultato è duplice:

- l'atomo pentavalente, conservando solo quattro elettroni, non è più elettricamente neutro, ma ha una carica positiva;
- il quinto elettrone dell'atomo pentavalente è libero e quindi disponibile per la conduzione elettrica.

Il materiale così ottenuto, che contiene elettroni liberi e atomi con carica positiva, è detto *semiconduttore di tipo n* e possiede una conducibilità elettrica tanto maggiore quanto più numerosi sono gli atomi pentavalenti che si sono insinuati nel suo reticolo cristallino. Gli atomi aggiunti sono detti *impurità* e il semiconduttore che li contiene è detto *drogato*. Gli atomi pentavalenti, che come abbiamo visto creano elettroni liberi, sono detti *donatori*.

Pensiamo ora invece di sostituire alcuni atomi di un semiconduttore puro con atomi di indio, trivalenti e quindi con tre elettroni di valenza; per poter sostituire completamente i quattro elettroni dell'atomo tetra-valente, l'atomo trivalente necessita di un elettrone che viene sottratto ad altri atomi.

Nel materiale troveremo ora atomi trivalenti, con carica negativa dovuta all'elettrone in eccesso, e delle *lacune*, cioè dei posti in cui manca un elettrone.

Una lacuna consente agli elettroni di spostarsi, creando così una forma di conducibilità elettrica. Infatti un elettrone, impegnato in un legame, può *riempire* tale lacuna, creandone un'altra nel posto da lui prima occupato. A sua volta un altro elettrone può occupare la seconda lacuna creandone una terza e così via. Si comprende come la lacuna consenta agli elettroni di spostarsi in un senso e come la lacuna stessa appaia spostarsi nel senso opposto.

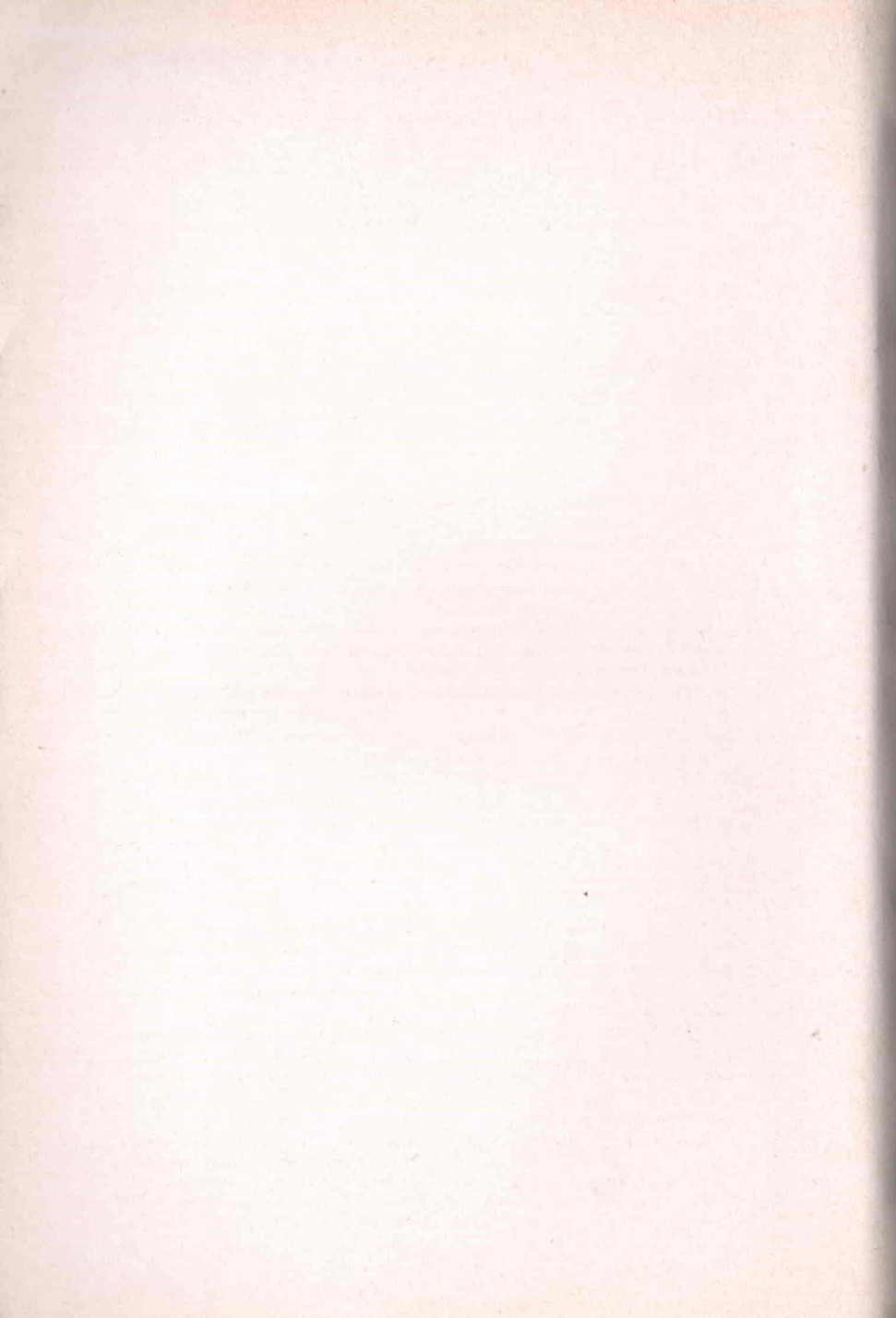
La mancanza di un elettrone, il quale è una carica negativa, equivale a una carica positiva: il moto di lacune è quindi equivalente al moto apparente di cariche positive.

Questo modo, se vogliamo un po' artificioso, di vedere le cose è necessario per spiegare il funzionamento dei diodi e dei transistor. Un materiale semiconduttore, *drogato* con atomi trivalenti, si dice di *tipo p*, con evidente richiamo alle cariche positive rappresentate dalle lacune.

Gli elementi trivalenti che provocano la comparsa di lacune si chiamano *accettori*, in quanto le lacune creano appunto la possibilità di accogliere elettroni.

In conclusione, i materiali che sono usati in elettronica sono *conduttori*, *isolanti* e *semiconduttori di tipo n* o di *tipo p*.

Componenti dei circuiti elettronici



Componenti dei circuiti elettronici

Componenti attivi e passivi

Anche se possiamo identificare per ogni tecnica dei materiali che le sono tipici, nella pratica si tende però a utilizzare non questi materiali allo stato originario, ma piuttosto dei *componenti* prefabbricati, che sono sí realizzati con materiali caratteristici, ma che possiedono già una propria funzionalità individuale che può essere più o meno complessa.

Nella costruzione di una casa non si parte certo dall'argilla, ma piuttosto dal mattone; la produzione di un'automobile fa uso di viti, bulloni, pneumatici e addirittura di organi complessi quali il carburatore e l'alternatore, tutti prefabbricati.

Le ragioni d'impiego dei componenti nelle realizzazioni delle più diverse tecnologie sono sia tecniche, sia economiche.

Da un punto di vista tecnico, il progetto e la costruzione di una macchina o di un'apparecchiatura complessa si riducono alla sola fase di organizzazione e montaggio dei componenti, progettati e prodotti in quantità tali da garantirne la qualità e la convenienza economica.

I vantaggi economici di questo modo di procedere risultano ancora di più se si considera che i medesimi componenti possono essere usati per costruire macchine o apparecchiature di diverso tipo: per esempio, lo stesso tipo di pneumatici può venire montato su tipi diversi di automobili.

La maggior produzione di un determinato componente ne riduce ovviamente il costo. Infine – e questo non è certo il vantaggio minore – l'uso di componenti prefabbricati rende possibile ed economica la manutenzione di una macchina: le *parti di ricambio* sono appunto componenti.

Anche nell'elettronica ritroviamo elementi e dispositivi prefabbricati che vengono adoperati nella costruzione delle apparecchiature elettroniche: sono questi i *componenti elettronici*, numerosissimi ma tuttavia classificabili.

Così, nella costruzione di un ricevitore televisivo si usano cinescopio, altoparlante, transistor, circuiti integrati, resistori, condensatori, ecc. che sono tutti componenti elettronici.

Una prima e consueta classificazione dei componenti elettronici è quella fra *componenti attivi* e *componenti passivi*.

I *componenti attivi* sono tipici dell'elettronica: con essa sono nati e si sono sviluppati. Valvole e transistor sono componenti attivi. La denominazione di attivo è stata in origine data ai dispositivi in grado di "amplificare" un segnale, come vedremo che possono fare la valvola e il transistor.

I *componenti passivi*, che sono tutti gli altri componenti non attivi, sono invece nati prima, con l'elettrotecnica. Resistori e condensatori sono componenti passivi.

Volendo dare una pennellata storica alla nostra classificazione, possiamo dire che i componenti passivi sono nati nell'ottocento, mentre i componenti attivi sono di questo secolo; si può completare il quadro dicendo che le valvole sono nate nella prima metà del nostro secolo, mentre i transistor, con i circuiti integrati, appartengono alla seconda metà.

Un breve paragrafo sulla legge di Ohm aprirà la strada alla comprensione dei componenti, che considereremo poi in un ordine storico (da passivi ad attivi), che coincide anche con un ordine di complessità di funzionamento.

La legge di Ohm

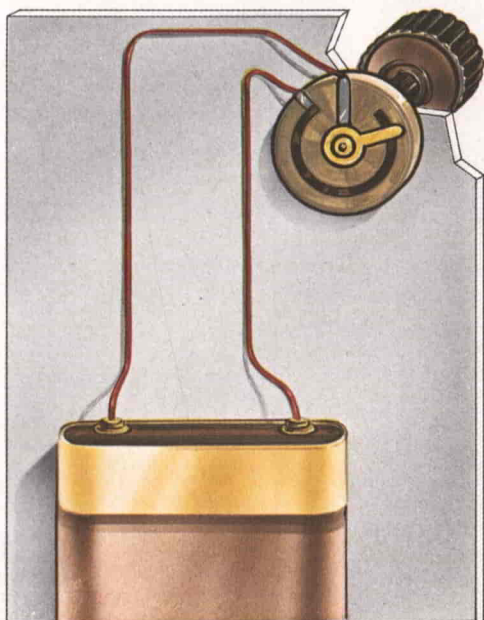
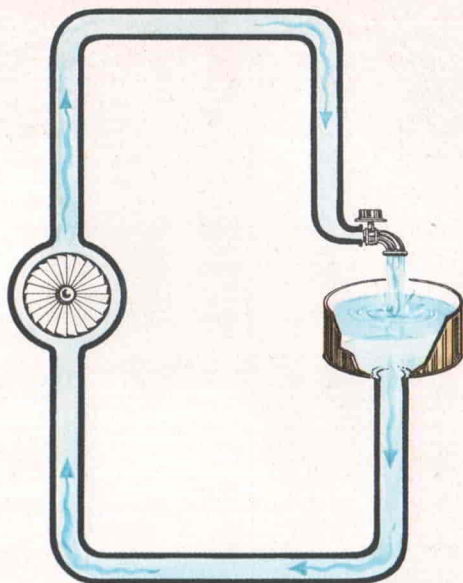
Il flusso degli elettroni in un conduttore elettrico è del tutto simile al flusso di un liquido in una tubatura. Un sistema di tubi e di componenti idraulici, in cui circola dell'acqua, costituisce un *circuito idraulico*; similmente, un sistema di conduttori e di componenti elettronici, in cui circola un flusso di elettroni, si dirà *circuito elettronico*. Consideriamo due semplici circuiti, uno idraulico e uno elettronico: il circuito idraulico è costituito da una pompa, da un tubo di collegamento, da un rubinetto e da una vasca per il ritorno dell'acqua alla pompa. È evidente che, per effetto della *pressione* sviluppata dalla pompa, si stabilisce nel circuito idraulico una *corrente* d'acqua. L'entità di questa corrente dipenderà dalla pressione esercitata dalla pompa e da come è stato regolato il rubinetto, cioè da quanta *resistenza* questo offre al passaggio dell'acqua. È intuitivo che la corrente è tanto maggiore quanto più alta è la pressione della pompa e quanto più bassa la resistenza del rubinetto.

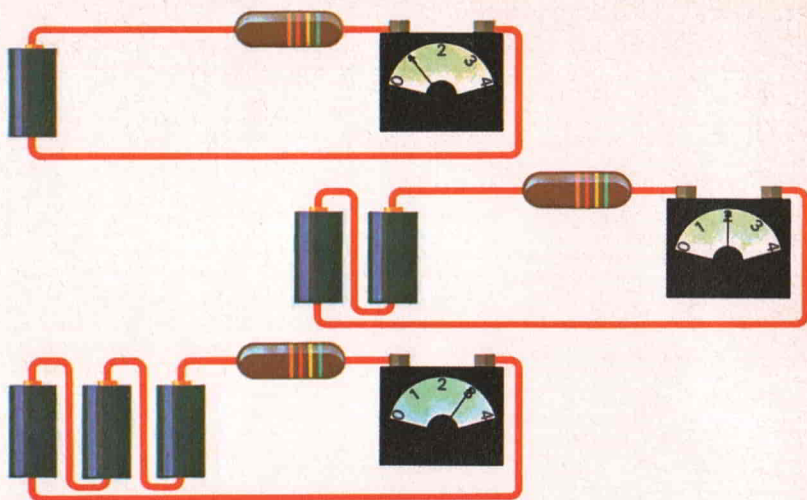
Consideriamo ora l'equivalente circuito elettronico: in luogo della pompa abbiamo una dinamo, al posto del tubo un *conduttore* di collegamento, al posto del rubinetto un *reostato*; infine una *massa* o *terra* in sostituzione della vasca.

Così come la pompa genera una pressione, la dinamo genera una *tensione elettrica*, che provoca la circolazione di una corrente elettrica e cioè un flusso di elettroni; il reostato è un componente regolabile che offre una *resistenza elettrica* al passaggio della corrente elettrica; la massa o terra, infine, serve per il ritorno degli elettroni alla dinamo.

Se indichiamo con V la tensione sviluppata dalla dinamo, con R la resistenza del reostato, la corrente elettrica I , che si stabilisce nel

Nel disegno, in alto: un semplice circuito idraulico nel quale una pompa (a sinistra) forza l'acqua a salire nel condotto e fornisce perciò la forza motrice a tutto il sistema. L'acqua esce dal rubinetto in una vasca dalla quale poi scola per ritornare alla pompa. L'intensità della corrente d'acqua dipende, oltre che dalla potenza della pompa, dalla resistenza più o meno elevata che l'acqua incontra nel passare dal rubinetto. Al limite, quando il rubinetto è chiuso (resistenza infinita) la corrente si arresta. Tutto ciò è analogo a quanto avviene in un circuito elettrico, in cui vale la legge di Ohm: vale a dire, la corrente è direttamente proporzionale alla tensione applicata (la potenza della pompa idraulica), ma inversamente proporzionale alla resistenza elettrica (di quanto è chiuso il rubinetto). Nel disegno in basso, viene illustrato l'equivalente elettrico del circuito idraulico: una batteria forza i due fili a mantenersi a una certa tensione, che causa il passaggio di corrente elettrica, ma un dispositivo a resistenza variabile (il potenziometro provvisto di manopola) ne riduce l'intensità al valore voluto (il punto di resistenza del circuito è la striscia di carbone del potenziometro, di lunghezza variabile, attraverso la quale è costretta a passare la corrente).





circuito considerato, si può calcolare con la seguente semplice relazione:

$$I = \frac{V}{R}$$

cioè, la corrente elettrica in un circuito si ottiene dividendo la tensione applicata per la resistenza del circuito stesso.

Questa, sia pure in forma semplificata, è la legge di Ohm.

La stretta somiglianza tra i circuiti idraulici ed elettronici risulta evidente dalla tabella seguente, in cui si mettono in corrispondenza componenti e grandezze delle due diverse tecniche.

Circuito idraulico

Pompa
Pressione

Tubo
Corrente

Rubinetto
Resistenza

Circuito elettronico

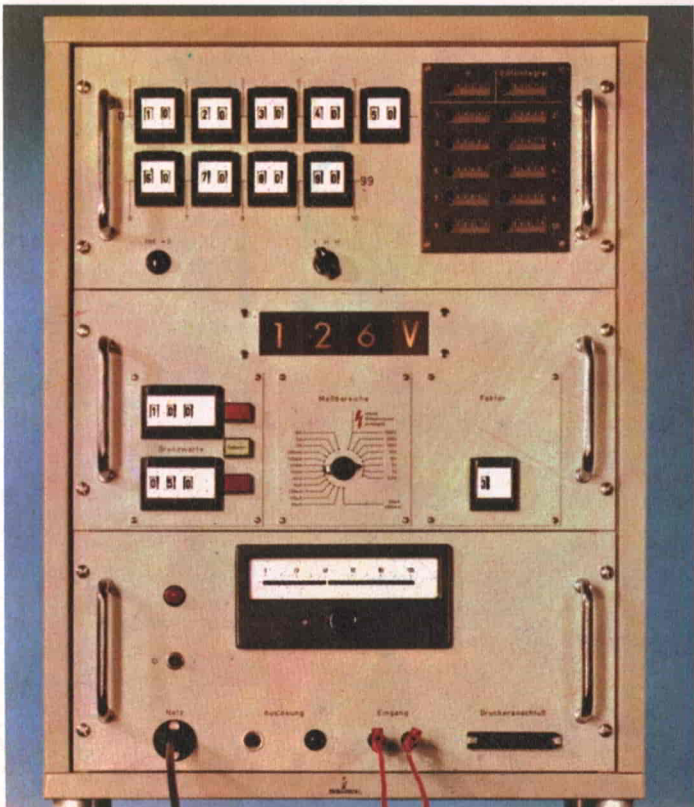
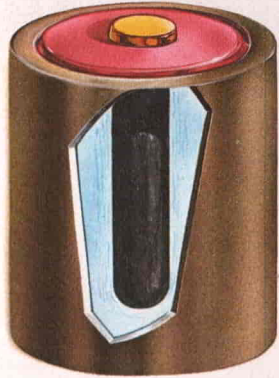
Dinamo
Tensione

Conduttore
Corrente

Reostato
Resistenza

Molti dei circuiti elettronici d'uso più comune sono alimentati da una *pila*: questa è un componente che genera una tensione elettrica come la dinamo, ma che con l'uso si esaurisce. Il suo equivalente idraulico è un serbatoio d'acqua posto in una posizione abbastanza elevata per esercitare una sufficiente pressione; il serbatoio, dopo un tempo dipendente dalla corrente richiesta, si svuoterà e sarà quindi "esaurito" o "scarico" come la pila.

Pagina a fronte: dimostrazione pratica della legge di Ohm, che stabilisce la proporzionalità diretta fra la tensione applicata ai capi di un resistore (schematizzata dal numero di pile in serie) e la corrente che circola in quest'ultimo (indicata dall'ago dell'amperometro). Il rapporto costante fra tensione (in Volt) e corrente (in Ampère) viene detto resistenza, ed è espresso in Ohm. A destra: disegno di una comune pila elettrica. Al centro si nota la bacchetta di carbone (polo positivo), mentre il polo negativo è costituito dall'intero involucro metallico. Sotto: un sofisticato strumento elettronico che misura la tensione fra due terminali e la riporta numericamente sul pannello: si tratta di un voltmetro digitale.



Concludiamo questo paragrafo con un cenno alle unità di misura della corrente, della tensione e della resistenza elettriche, unità che hanno tutte preso nome dai fisici che hanno studiato i fenomeni elettrici.

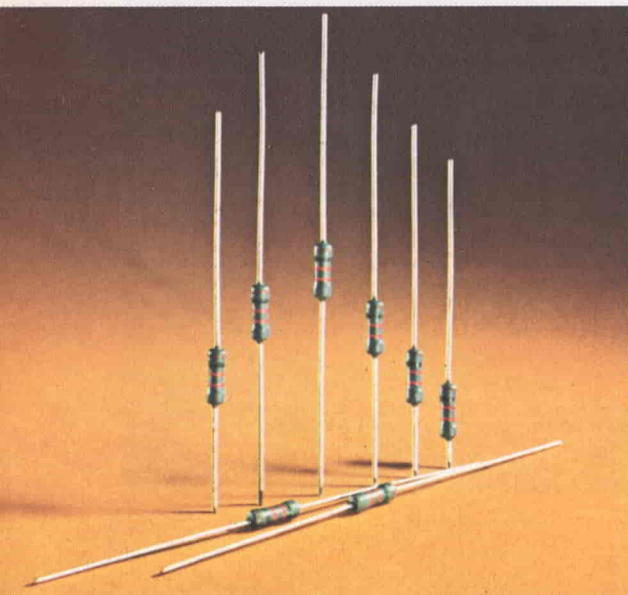
La corrente elettrica si misura in *Ampere*, essendo un Ampere pari al flusso di sei miliardi di miliardi di elettroni al secondo; la tensione si misura in *Volt* e la resistenza elettrica in *Ohm*.

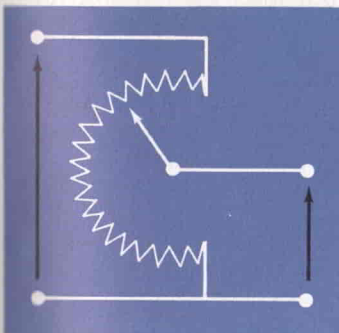
Così diremo che 1 Volt applicato a una resistenza di 1 Ohm vi fa fluire una corrente di 1 Ampere.

I resistori

Sono componenti caratterizzati dal valore della resistenza che offrono al passaggio della corrente elettrica. Esistono resistori a valore fisso – quelli a cui viene solitamente riservato tale nome – e altri a valore di resistenza variabile o mediante una regolazione manuale (reostati e potenziometri), oppure in funzione della temperatura (termoresistori) o anche in funzione della luce (fotoresistori). Un resistore è individuato oltre che dal valore della sua resistenza, dalla precisione con cui tale valore è garantito e dalla potenza che può dissipare. Quest'ultimo punto richiede un breve chiarimento. Una dinamo o una pila quando forniscono una corrente erogano una *potenza elettrica* il cui valore, espresso in Watt, è il prodotto della tensione in Volt per la corrente in Ampere. Così la batteria di un'automobile, che come sappiamo fornisce una tensione di 12V (Volt), quando sono accese le luci di posizione e di targa eroga 2,5A (Ampere) e quindi una potenza di 30W (Watt) ($12V \times 2,5A$). Il Watt è appunto l'unità di misura della potenza (nel nostro caso della potenza elettrica).

Supponiamo ora di applicare ai terminali della batteria un resistore





A sinistra: schema elettrico di un resistore variabile o potenziometro (per variare la resistenza "vista" dai terminali di destra si gira il cursore). A destra: resistore « campione » da 1 Ohm. In basso, da sinistra verso destra, vari tipi di resistori (a resistenza di precisione, a resistenza variabile con il voltaggio e ad alta dissipazione).



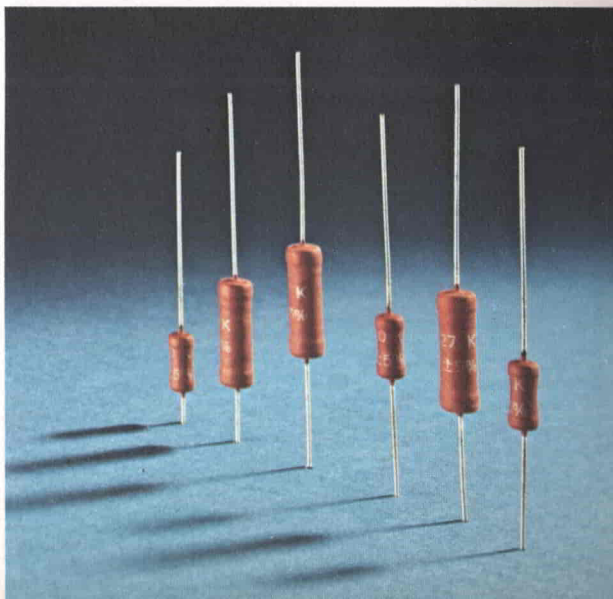
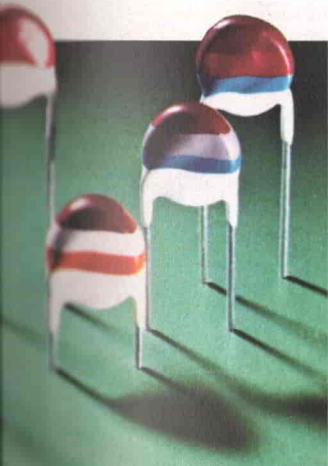
di $4,8\Omega$ (Ohm): secondo la legge di Ohm fluirà dalla batteria nel resistore una corrente

$$I = \frac{V}{R} = \frac{12V}{4,8\Omega} = 2,5A$$

La potenza fornita dalla batteria al resistore è quindi:

$$V \times I = 12V \times 2,5A = 30W$$

Questa potenza viene *dissipata* dal resistore, cioè convertita in calore. La temperatura raggiunta dal resistore dipenderà dalle sue dimensioni e non deve essere tanto alta da danneggiarlo.



È per questa ragione che, tra le caratteristiche che definiscono un resistore, oltre al suo valore e alla sua precisione, troviamo la potenza massima che gli si può fornire.

Possiamo osservare che la trasformazione di energia elettrica in calore è alla base dell'impiego dei resistori per il riscaldamento, per esempio nelle stufe elettriche.

Abbiamo detto che i resistori variabili manualmente sono detti reostati o potenziometri. Il nome reostato, usato per lo più nell'elettrotecnica, si riferisce di solito a grandi potenze; in elettronica si usano i potenziometri con funzione di organi di regolazione. Per esempio i comandi del volume del suono, della luminosità e del contrasto dell'immagine in un televisore sono potenziometri.

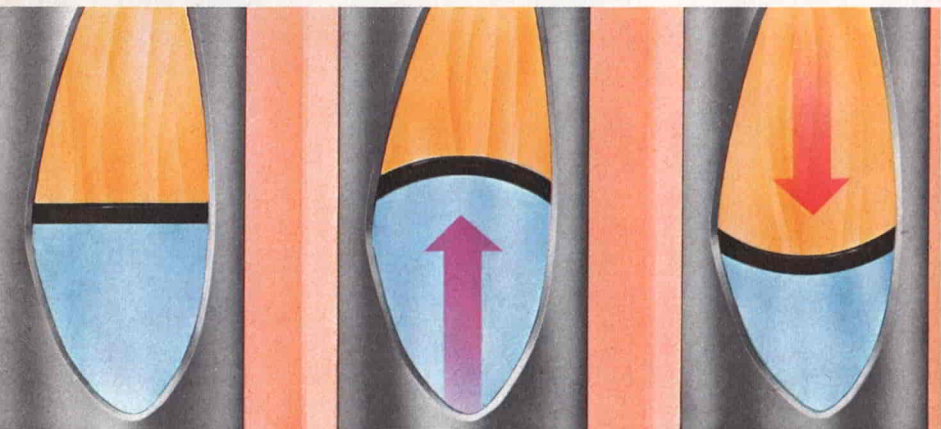
I resistori variabili con la temperatura sono usati per realizzare termometri elettronici: li ritroviamo, per esempio, nelle unità di controllo elettronico di riscaldatori e refrigeratori.

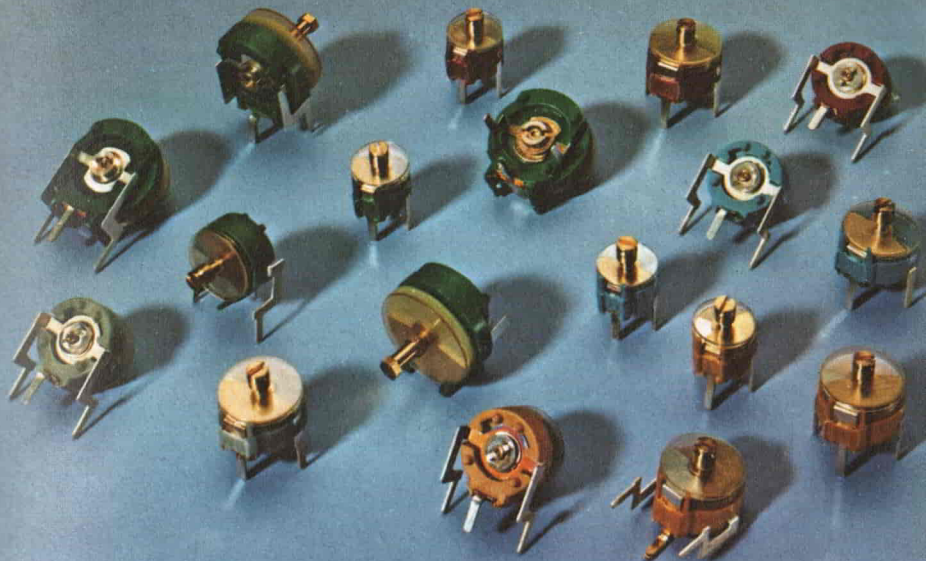
Analogamente, i resistori variabili con la luce possono essere usati per misurare l'intensità della luce e trovano impiego nei misuratori d'illuminazione per impianti luce e negli esposimetri per fotografia.

I condensatori

Per chiarire la funzione dei condensatori in elettronica useremo due diversi esempi idraulici, che corrispondono a due importanti impieghi che di essi si fanno.

Il primo esempio si riferisce al cosiddetto uso per *livellamento*. Supponiamo di avere un circuito idraulico alimentato da una pompa a pistone: per ogni mandata del pistone vi sarà all'uscita della pompa un afflusso d'acqua e di conseguenza la corrente d'acqua erogata dalla pompa sarà pulsante. Se desideriamo però una corrente d'acqua continua, possiamo porre subito a valle della pompa un recipiente di sufficiente capacità: un tubo che esce da questo recipiente può fornire una corrente d'acqua approssimativamente costante. Allo stesso modo se in un circuito elettronico abbiamo un genera-





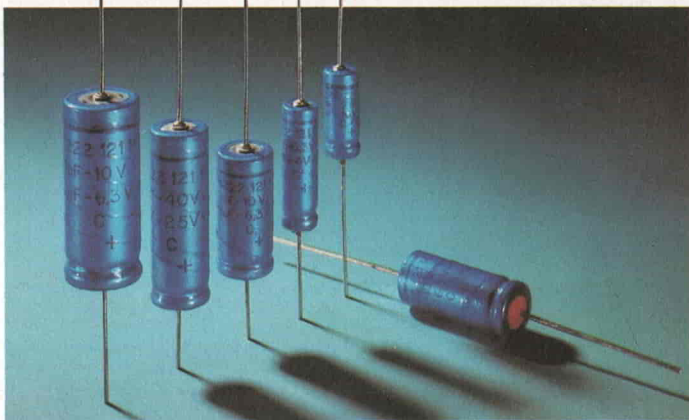
Condensatori variabili o "trimmer". Un uso comune del condensatore è quello di "disaccoppiare" elettricamente due circuiti. Nella pagina a fronte viene illustrato l'equivalente idraulico del condensatore, descritto nel testo qui sotto.

tore elettrico che eroga corrente pulsante, possiamo impiegare a valle di questo un *condensatore*, dal quale derivare poi una corrente costante. In modo del tutto analogo al recipiente d'acqua del circuito idraulico, il condensatore riceve dal generatore elettrico degli elettroni in "mandate" successive, li accumula e li fornisce al resto del circuito in forma di un flusso continuo.

L'altro impiego del condensatore che qui considereremo è quello per il *disaccoppiamento*. Immaginiamo un componente idraulico costituito da un tratto di tubo suddiviso in due da una membrana elastica in modo tale che il liquido che si trova da un lato della membrana non possa mescolarsi al liquido che si trova dall'altro lato. Un tale dispositivo, che a prima vista sembrerebbe impedire il trasferimento di energia attraverso di esso, ha invece un'applicazione fondamentale.

Pensiamo infatti che da un lato della membrana vi sia una pompa che generi una corrente d'acqua che fluisca non in un solo senso, ma alternativamente e periodicamente nei due sensi opposti. Questo movimento oscillatorio del liquido compreso tra la pompa e la membrana si trasmetterà al liquido situato all'altro lato della membrana senza che i due liquidi si mescolino. Abbiamo in sostanza collegato tra loro due tratti in un circuito idraulico *disaccoppiando* i relativi liquidi, che potranno quindi essere diversi, per esempio acqua e olio.

Allo stesso tempo abbiamo introdotto il concetto di *corrente alternata*, e cioè di corrente con senso di circolazione che si inverte pe-



Il condensatore, di cui si vedono qui sopra alcuni esemplari, è un componente elettrico caratterizzato da una "capacità", cioè da un rapporto costante fra carica elettrica immagazzinata e differenza di potenziale ai suoi capi.

riodicamente. Anche se si possono immaginare applicazioni idrauliche della corrente alternata, per esempio nel comando di meccanismi a moto alternativo od oscillante, i suoi impieghi sono molto più intuitivi e in realtà molto più diffusi nei circuiti elettronici.

Consideriamo quindi un circuito elettronico in cui si trovi un condensatore di disaccoppiamento: questo circuito potrà, per esempio, consistere di un generatore di corrente elettrica alternata, di un resistore e di un condensatore che, analogamente alla membrana del circuito idraulico, divide in due il circuito, "disaccoppiando" il generatore dal resistore. Grazie alle proprietà del condensatore anche il resistore sarà attraversato da corrente alternata, se il generatore è in funzione. È intuitivo che il resistore, insensibile al senso di circolazione della corrente, assorbirà potenza sia quando è attraversato dalla corrente in un senso che nel senso opposto.

Siamo così riusciti a fornire potenza al resistore anche interponendo nel circuito, tra il generatore e il resistore, un componente che impedisce agli elettroni, che costituiscono la corrente del generatore, di mescolarsi a quelli che attraversano il resistore.

Si comprenderà ancora meglio il concetto di disaccoppiamento se pensiamo che a monte del condensatore può essere presente anche una tensione continua: mediante l'impiego del condensatore consentiamo il "passaggio" della corrente alternata, "bloccando" allo stesso tempo la corrente continua.

Riguardo alle ragioni di preferenza della corrente alternata in elettrotecnica e in elettronica, esse sono molte e complesse: ci basti per ora dire che è più facile generare, trasportare e utilizzare l'energia elettrica sotto forma di corrente alternata anziché continua.

La dimensione caratteristica dei condensatori è la capacità, e ciò è

Alcuni grossi condensatori impiegati nelle lampade a scarica a vapore di mercurio o di sodio, che vengono di solito utilizzate per illuminazione pubblica. Si tratta di componenti intesi ad aggiustare al livello voluto la potenza dissipata e a evitare le conseguenze dannose di eventuali guasti.



intuibile se si pensa all'esempio del serbatoio idraulico. Detta capacità si misura in Farad: essendo però nella pratica tale unità di misura troppo grande, normalmente si usano suoi sottomultipli come il μF (microFarad = un milionesimo di Farad) e il pF (picoFarad = un milionesimo di milionesimo di Farad).

Oltre che dal valore della sua capacità e dalla precisione con cui essa è garantita, un condensatore è specificato dalla tensione massima che può sopportare senza degradarsi oppure addirittura distruggersi.

Come esistono resistori variabili, esistono anche condensatori variabili: il comando di sintonia dei comuni ricevitori radio a modulazione d'ampiezza è realizzato tramite un condensatore variabile.

La matita offre un elemento di riferimento per valutare le dimensioni di questi piccoli condensatori da 68 microfarad (milionesimi di Farad).



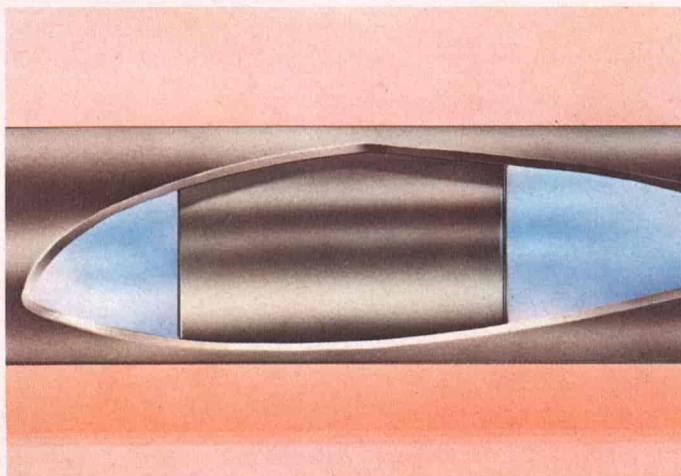
Gli induttori

L'*inerzia* è una proprietà caratteristica dei corpi, legata alla loro massa e quindi al fatto di possedere sulla nostra terra un peso. Questa proprietà si manifesta quando si vuole variare la velocità di un corpo: la "resistenza" che si sente quando si vuole accelerare o frenare un corpo è dovuta all'inerzia.

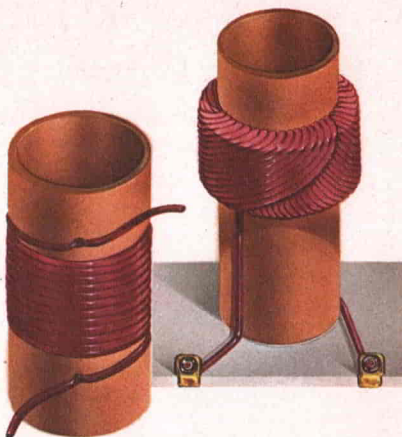
Gli *induttori* sono componenti elettronici che presentano inerzia contro le variazioni della corrente elettrica.

Riferiamoci, come è ormai nostra abitudine, a un circuito idraulico. Questo presenta alla pompa un'inerzia dovuta all'acqua nella tubatura, inerzia che cresce con la lunghezza della tubatura e quindi con la massa d'acqua che dev'essere mossa dalla pompa. È possibile aumentare l'inerzia del circuito, senza allungare la tubatura, inserendo in essa un cilindro scorrevole di metallo molto più pesante dell'acqua. In tal modo quando la pompa dà pressione al circuito la corrente d'acqua nella tubatura, sia a monte sia a valle del cilindro di metallo, inizierà a fluire lentamente e gradualmente opponendo una certa "resistenza" alla pressione. Quando la pompa smetterà di generare pressione la corrente d'acqua continuerà, sempre per inerzia, a scorrere nella tubatura rallentando gradualmente fino ad arrestarsi.

Nel circuito elettronico introduciamo l'inerzia tramite un *induttore*, fisicamente realizzato da un conduttore avvolto in spire su un supporto a forma di cilindro o di anello. Come nel circuito idraulico è possibile aumentare l'inerzia, sostituendo all'acqua un cilindro di metallo pesante, così nel circuito elettronico è possibile aumentare l'"inerzia" dell'induttore, e cioè ciò che si chiama *induttanza*, usando particolari materiali detti *magnetici* per realizzare il cilindro o l'anello su cui è avvolto l'induttore; il tipico e più antico esempio di materiale magnetico è il ferro.



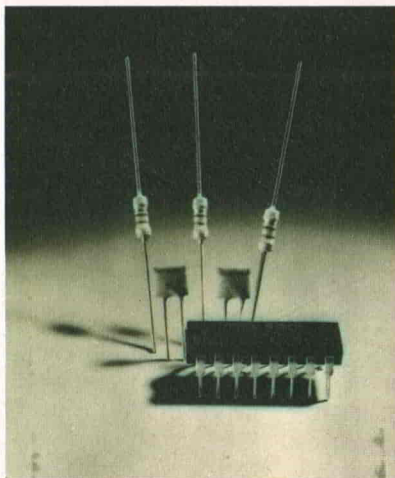
Due induttori fra i piú semplici che si possano costruire. Per avere il fenomeno di induttanza basta avvolgere un filo conduttore in molte spire, anche usando un semplice rocchetto. Piú numerose sono le spire, maggiore è l'induttanza che presenta il dispositivo, cioè la capacità di opporsi a brusche variazioni di corrente. A tal fine è anche utile inserire nel rocchetto un bastone di metallo ferromagnetico, che evita la dispersione delle linee di flusso del campo che servono a creare l'effetto di induttanza.



L'unità di misura dell'induttanza è lo Henry; anche di questa si usano normalmente in elettronica dei sottomultipli quali il mH (milli-Henry = millesimo di Henry) e il μ H (microHenry = milionesimo di Henry). Oltre che dal valore della sua induttanza e dalla sua tolleranza (cioè l'incertezza con cui viene dato tale valore), un induttore è caratterizzato dall'intensità della corrente elettrica che lo può percorrere.

Tra gli impieghi dell'induttore citiamo l'uso per il *livellamento* delle correnti pulsanti e quello per il *blocco* delle correnti alternate. Riguardo al livellamento, è chiaro che un elemento a elevata inerzia

Pagina a fronte: per spiegare l'effetto di induttanza conviene rifarsi a un paragone idraulico: un cilindro di metallo introdotto in una condotta d'acqua, scorre, spinto dall'acqua, avanti e indietro. È evidente l'ostacolo che l'inerzia del cilindro pone alle variazioni di corrente, mentre un flusso costante non viene troppo influenzato dal cilindro, che dopo un po' scorre con la velocità dell'acqua e, anzi, tende a mantenere il flusso d'acqua anche quando cessa la spinta della pompa. A destra: componenti (un circuito integrato, tre resistenze, due condensatori) che, collegati, possono dare luogo a un effetto di induttanza.



se sollecitato da una pressione o da una tensione pulsante fa scorrere attraverso se stesso una corrente sostanzialmente costante, perché si oppone ugualmente ad arresti o aumenti di velocità della corrente.

È altresì intuitivo che una pressione o una tensione alternata, applicate all'elemento ad alta inerzia, avranno poco effetto in termini di corrente circolante: infatti, quanto più sono rapide le inversioni della pressione o della tensione alternata tanto meno l'inerzia consentirà alla corrente di seguirle. Al limite per inversioni molto frequenti non scorrerà praticamente alcuna corrente. Si capisce quindi che un induttore con induttanza sufficientemente alta può *bloccare* il passaggio di corrente alternata di frequenza elevata.

I trasformatori

Con il trasformatore, che è il più complesso dei componenti passivi, concludiamo la nostra breve rassegna di questi componenti.

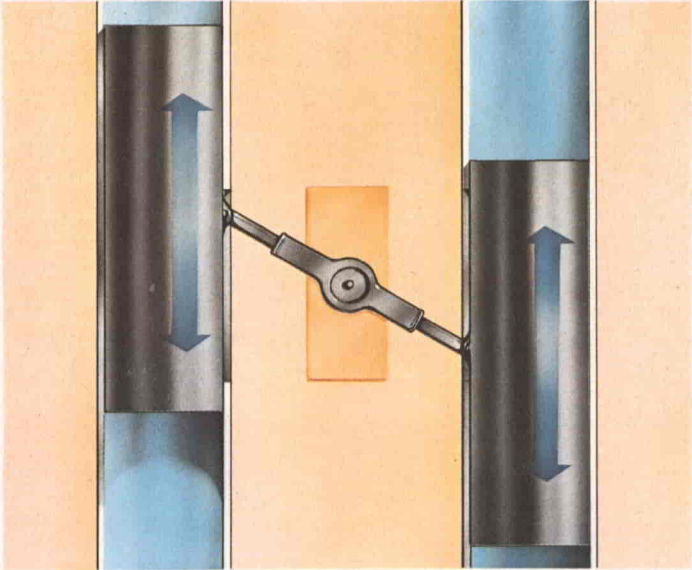
Anche del trasformatore tenteremo di presentare un modello idraulico. Consideriamo a tale scopo due circuiti idraulici separati, contenenti ciascuno quel componente idraulico, equivalente all'induttore, che abbiamo appena visto nel paragrafo precedente, cioè il pesante cilindro metallico. Accoppiamo ora meccanicamente questi due componenti mediante una leva, con il fulcro al centro, che unisca i due cilindri metallici. Se in uno dei due circuiti idraulici vi è una pompa che genera una pressione e quindi una corrente a senso alternato, il cilindro metallico di questo primo circuito si muoverà di moto oscillatorio. A causa della leva anche il cilindro del secondo circuito oscillerà generando una pressione a senso alternato, come quella della pompa del primo circuito, capace quindi di generare una corrente a senso alternato nel secondo circuito. In conclusione, il nuovo componente idraulico che abbiamo immaginato consente l'accoppiamento di due circuiti completamente separati; grazie a tale accoppiamento, se in un circuito vi è una "corrente alternata", nell'altro si stabilirà una "pressione alternata". Tutto avviene cioè come se la pressione della pompa del primo circuito venisse *trasferita* al secondo circuito.

Se si varia la posizione del fulcro, e quindi il rapporto tra i due bracci della leva, si può trasferire al secondo circuito una pressione maggiore o minore di quella del primo circuito: i due circuiti accoppiati possono così essere a pressione diversa.

Nei circuiti elettronici il trasformatore è realizzato, in modo simile a quello appena visto, con due induttori che vengono accoppiati avvolgendoli sullo stesso cilindro o anello. L'accoppiamento che così si realizza tra i due induttori è dovuto al fenomeno fondamentale dell'*induzione elettromagnetica*.

Secondo questo, una corrente alternata circolante in un conduttore genera nello spazio circostante un "campo elettromagnetico" alternato che su un altro conduttore *induce* una tensione alternata (che a sua volta può dar luogo a una corrente alternata). Sui campi elettrici e magnetici torneremo in seguito, parlando delle onde elettromagnetiche.

L'avvolgimento dell'induttore inserito nel circuito in cui si trova il generatore di tensione alternata è detto *primario*; l'avvolgimento



Il paragone idraulico del trasformatore. Due condutture, apparentemente disaccoppiate, possono scambiarsi moto ed energia tramite i due cilindri vicendevolmente collegati.

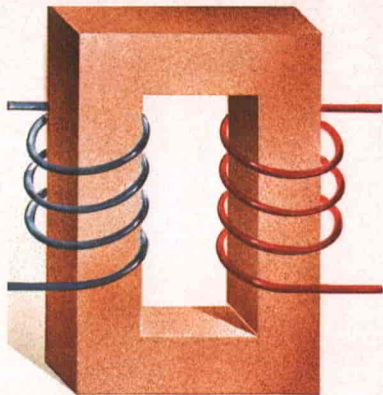
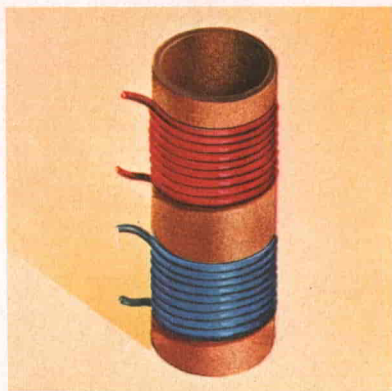
dell'altro induttore, accoppiato al primo, è detto *secondario*. La proprietà fondamentale del trasformatore consiste nel fatto che il rapporto fra i valori delle tensioni del primario e del secondario è pari al rapporto fra i numeri delle spire dei due avvolgimenti. In altre parole la tensione che si stabilirà nel secondario sarà tante volte maggiore (o minore) di quella del primario, quante volte il numero delle spire del secondario è maggiore (o minore) di quello del primario. Se i due avvolgimenti hanno lo stesso numero di spire, troveremo nel secondario la stessa tensione del primario. Questa regola è espressa dalla semplice relazione:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

dove

- V_2 : tensione al secondario
- V_1 : tensione al primario
- N_2 : numero di spire del secondario
- N_1 : numero di spire del primario

Osserviamo che il trasformatore non può *generare* potenza: di con-



sequenza la potenza che il secondario può fornire al circuito in cui è inserito sarà, trascurando la inevitabile perdita di potenza dovuta al passaggio nel trasformatore, pari al massimo a quella erogata dal generatore al primario. Questo fatto si può così esprimere:

$$P = V_1 I_1 = V_2 I_2$$

dove

P: potenza (primaria = secondaria)
 I_1 : corrente nel primario
 I_2 : corrente nel secondario

È evidente che la stessa potenza elettrica può essere ottenuta con una tensione alta e una corrente proporzionalmente bassa o viceversa; per esempio, la potenza di 10W può essere fornita con la tensione di 10V e la corrente di 1A, ovvero con 5V e 2A, dato che in entrambi i casi il prodotto della tensione per la corrente è lo stesso e cioè pari a 10W.

Un semplice esempio d'impiego del trasformatore si ha quando si vuole collegare alla rete domestica a 220V una lampada adatta alla tensione di 110V. Ciò si realizza inserendo tra la rete e la lampada un trasformatore con rapporto spire (N_1/N_2) pari a 2. In tal modo, mentre ai capi del circuito primario vi sono i 220V da rete, ai capi del secondario, ai quali è collegata la lampada, vi sono i 110V che desideriamo.

È evidente che il trasformatore prende il nome dal fatto che può "trasformare", cioè abbassare o elevare, la tensione. L'impiego del trasformatore nelle apparecchiature elettroniche è dovuto appunto a questa possibilità, oltre a quella di separare i circuiti primario e secondario.

Il trasformatore è generalmente adoperato per realizzare l'alimentazione da rete, cioè per fornire la potenza elettrica necessaria al funzionamento delle apparecchiature ricavandola dalla rete elettrica. Il trasformatore in tal caso svolge di solito le due funzioni prima ci-

Nella pagina a fronte, a sinistra: il tipo più semplice di trasformatore si fa avvolgendo vicini, sullo stesso rocchetto, due fili elettrici; a destra: per limitare le perdite di potenza si usa avvolgere i fili attorno a un "nucleo" di materiale ferromagnetico che "imprigiona" e convoglia dentro di sé le linee di forza del campo magnetico. A destra: un trasformatore variabile, che fornisce una tensione in uscita regolabile.



Sotto: anelli di materiale ferromagnetico che vengono impiegati come "nuclei" in trasformatori di varie dimensioni.



tate: abbassa o innalza la tensione al valore opportuno per il funzionamento dei circuiti dell'apparecchiatura e provvede l'*isolamento* dalla rete elettrica, anche per la sicurezza delle persone che devono impiegare l'apparecchiatura.

Un trasformatore può essere caratterizzato dalla tensione primaria, da quella secondaria, dalla potenza che può "trasformare" e dalla frequenza della tensione (alternata) a esso applicata, cioè dal numero di volte al secondo, o "Hertz", con cui varia il senso della tensione sugli avvolgimenti.

I diodi

Come abbiamo detto nel primo paragrafo di questo capitolo sui componenti elettronici, sono stati chiamati attivi quei componenti che sono in grado di "amplificare", come i triodi, che vedremo nel prossimo paragrafo.

Anche i diodi sono spesso considerati tra i componenti attivi, sebbene non assolvano in genere a questa funzione; le ragioni di questa scelta sono invece altre: anzitutto, i diodi possono essere considerati casi particolari di triodi, cui manca un elettrodo; le loro tecnologie costruttive sono sostanzialmente le stesse usate per i triodi; infine e non ultime vi sono le ragioni storiche, che accomunano i diodi agli altri componenti ideati e realizzati in questo secolo, contribuendo alla nascita dell'elettronica vera e propria.

Il diodo, che è il più semplice di questi componenti, ha due soli terminali come un resistore. La proprietà caratteristica del diodo è quella di consentire il passaggio della corrente, attraverso di esso, in un solo senso.

Il principio di funzionamento del diodo è del tutto simile a quello di una valvola automatica per fluidi, che consenta il passaggio di un fluido in un solo senso.

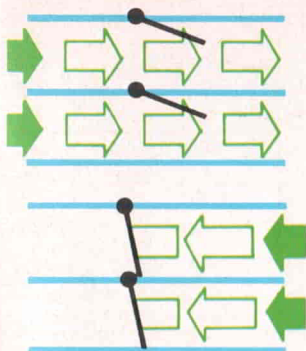
Tutti abbiamo ben presente una valvola di questo tipo - quella montata sulle camere d'aria dei pneumatici - che consente un flusso d'aria solo se diretto verso l'interno della camera d'aria e non nel senso opposto.

Tale valvola è detta *automatica* perché diventa automaticamente "passante" quando la pressione esterna supera quella interna alla camera d'aria e va automaticamente "in blocco" quando si verifica la condizione inversa.

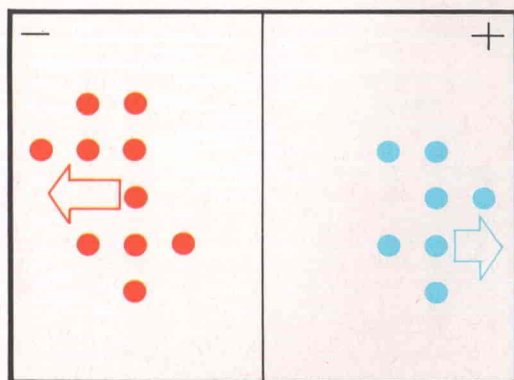
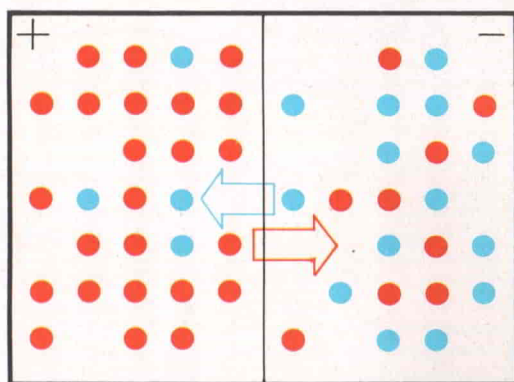
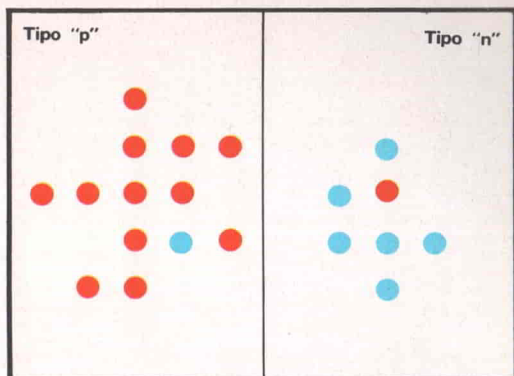
Vediamo ora l'impiego di una valvola di questo tipo in un circuito idraulico costituito da una pompa a pressione alternata, da un primo tratto di tubatura, da un rubinetto e infine da un secondo tratto di tubatura. Come già sappiamo, a causa della pressione alternata esercitata dalla pompa si stabilirà nel circuito una corrente d'acqua a senso successivamente alternato e cioè una corrente alternata. Se ora inseriamo nel circuito una valvola del tipo prima definito, l'acqua potrà circolare in un solo senso, in quello cioè consentito dalla valvola.

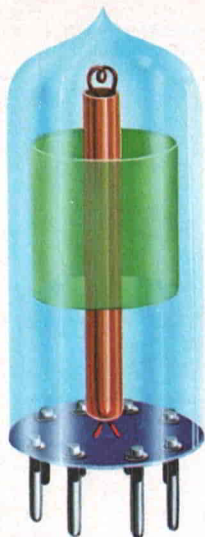
Grazie all'inserimento della valvola abbiamo ottenuto una corrente d'acqua pulsante "unidirezionale", anche se la pompa esercitava una pressione alternata.

Consideriamo ora il circuito elettronico equivalente costituito da un generatore di tensione alternata, da un primo tratto di conduttore,



In alto a sinistra: il principio della valvola. Essa è un componente meccanico che, come si vede, lascia passare solo l'aria o il fluido che "spinge" da sinistra verso destra, chiudendosi ermeticamente nell'altro caso. Sotto i due disegni è raffigurato il simbolo elettrico del diodo, la valvola elettronica che permette il passaggio della corrente solo in un senso (quello indicato dalla freccia). Nei tre disegni a destra: in alto è raffigurato schematicamente lo stato di cose nei pressi della giunzione "p-n" di un diodo; nella regione di tipo "p" fra i portatori liberi prevalgono le lacune (rosse), in quella di tipo "n" gli elettroni (blu); al centro: applicando una tensione positiva a sinistra e negativa a destra lacune ed elettroni tendono ad attraversare la barriera, dando luogo a corrente elettrica, mentre applicando una tensione inversa (in basso) tutti i portatori vengono allontanati dalla giunzione e la corrente non può fluire.





Disegno di un diodo a valvola termoionica, come quelle che ancora si vedono nelle radio e negli apparecchi televisivi dell'era anteriore allo sviluppo del transistor e del diodo a semiconduttore. Si vede il filamento incandescente che riscalda il catodo (al centro, il tubo stretto) e l'anodo (il cilindro esterno che li raccoglie). In basso il simbolo elettrico del dispositivo: il filamento è la linea intrecciata, che è vicina al catodo, l'anodo è la placchetta disegnata nella parte alta del simbolo.



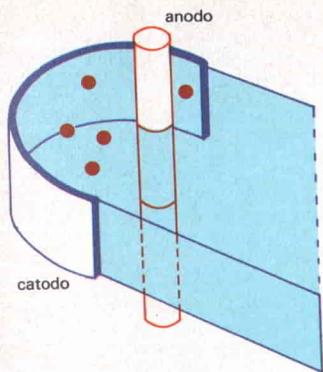
da un resistore e da un secondo tratto di conduttore; questo circuito sarà, come sappiamo, sede di una corrente elettrica alternata. Se nel circuito inseriamo ora quella "valvola elettronica automatica" che chiamiamo *diodo*, nel circuito circolerà una corrente elettrica pulsante unidirezionale.

L'impiego più comune del diodo si ha proprio nel caso scelto come esempio, in cui si dice che il diodo funziona come *raddrizzatore*. Osserviamo in proposito che i circuiti elettronici sono generalmente alimentati con corrente unidirezionale detta *corrente continua*, mentre la tensione della rete di distribuzione – nelle industrie come nelle abitazioni – è una *tensione alternata*: i diodi sono usati in tal caso per ricavare dalla *tensione alternata* distribuita la *corrente continua* necessaria per alimentare i circuiti elettronici (come per esempio quelli di una radio o di un televisore).

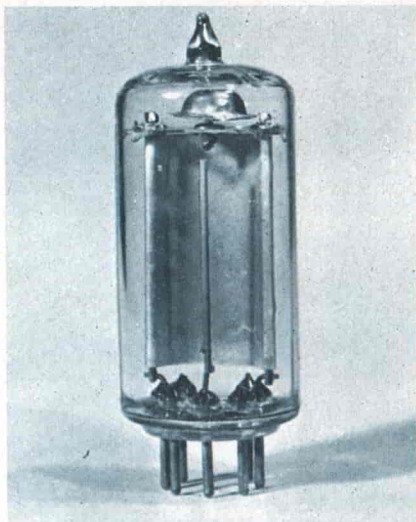
Considereremo ora brevemente i due tipi fondamentali di diodi, e cioè il *diodo a vuoto* e il *diodo a semiconduttore*.

Il diodo a vuoto consiste essenzialmente di due elementi metallici, detti uno anodo e l'altro catodo, disposti uno di fronte all'altro in un'ampolla di vetro in cui si è praticato il vuoto; sempre dentro l'ampolla, molto vicino al catodo, è disposta una resistenza detta *filamento*, che ha lo scopo di riscaldare il catodo a oltre 1000°C. A queste temperature, una tensione positiva applicata all'anodo rispetto al catodo fa sì che da questo vengano estratti degli elettroni (che hanno carica negativa) e che tali elettroni vengano attirati verso l'anodo; se la tensione è nulla o negativa il catodo invece non emetterà elettroni.

In conclusione, il diodo può essere percorso da un flusso di elettroni, e quindi da una corrente elettrica, solo in un senso e soltanto



Schema (sopra) e foto (a destra) di un fotodiodo. L'emissione di elettroni dal catodo è stimolata non da un filamento incandescente, ma dalla luce che incide sul dispositivo e che può essere misurata (più intensa è la luce maggiore è la corrente di elettroni indotta verso l'anodo).



quando la tensione dell'anodo è superiore a quella del catodo. Il funzionamento è quindi quello tipico di una valvola automatica. Il *diodo a semiconduttore* è detto anche allo *stato solido*, perché il moto degli elettroni non avviene nel vuoto, ma in un solido, appartenente alla classe dei semiconduttori. Anch'esso ha due terminali, detti ancora anodo e catodo; non esiste più il filamento riscaldatore perché non è più necessaria l'alta temperatura.

Il semiconduttore è in realtà costituito da due regioni drogate in modo opposto: una di tipo p, che costituisce l'anodo, l'altra di tipo n che è il catodo. Il confine tra le due regioni si chiama *giunzione* e possiede la proprietà fondamentale di consentire il passaggio di elettroni in un solo senso.

La regione di tipo n (catodo), come sappiamo, contiene elettroni liberi, quella di tipo p (anodo) contiene lacune.

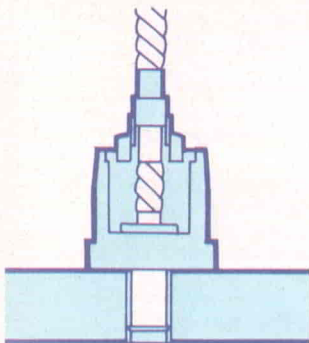
Applichiamo ora all'anodo una tensione più alta rispetto a quella del catodo; questo attirerà gli elettroni (negativi) della regione n verso l'anodo, e le lacune (positive) della regione p verso il catodo; cioè entrambi i portatori di carica potranno attraversare la giunzione e dare luogo a corrente elettrica lungo il circuito collegato al diodo. Viceversa, invertendo la polarità imposta agli elettrodi, entrambi i tipi di portatori saranno inibiti ad attraversare la giunzione, e la corrente elettrica cesserà.

I triodi

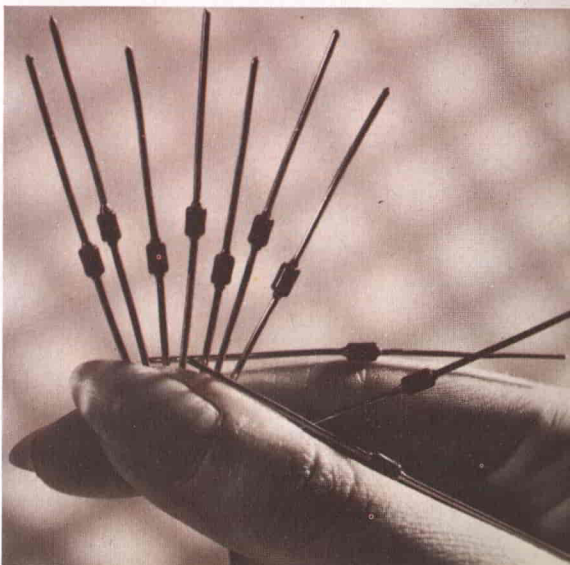
Si ricorderà che, all'inizio di questo libro, abbiamo definito l'elettronica come l'arte di controllare gli elettroni.

Ebbene, il *triolo* è proprio il componente che consente di controllare un flusso di elettroni e quindi l'entità di una corrente elettrica.





Nell'illustrazione della pagina accanto: i fiori e le foglie che si trovano all'interno del tubo a raggi catodici brillano perché sono stati cosparsi di speciale materiale che diventa fluorescente quando si verifica passaggio di elettroni. Qui sopra: lo schema e una fotografia di raddrizzatori al silicio (essi sono costituiti da diodi di potenza). Sotto, a sinistra: un diodo emettitore di luce. Il diodo si illumina cioè quando viene fatta passare corrente elettrica. A destra: alcuni diodi di tipo più comunemente adoperato.



Si comprende quindi facilmente come questo sia il componente elettronico più importante.

Il triodo ha tre terminali: tra due di essi scorre la corrente da controllare, il terzo è il terminale con cui si esercita il controllo.

Come per i diodi, anche per il triodo esistono la versione a vuoto e quella a semiconduttore, che è il ben noto *transistor*.

Il componente idraulico equivalente al triodo è la *valvola comandata*; questa è essenzialmente costituita da un corpo, detto *otturatore*, posto in una sezione della tubatura in modo tale che, comandandolo dall'esterno, lo si può muovere ostruendo parzialmente o totalmente la sezione stessa: si regola così la portata dell'acqua che scorre nelle tubature.

Il tipo più noto di valvola comandata è il comune rubinetto ad azionamento manuale; esistono anche altre valvole comandate ad acqua, a vapore, ad aria o elettricamente: in questi casi l'otturatore sarà comandato da uno stantuffo, azionato da un fluido o da un motore elettrico.

Le applicazioni delle valvole idrauliche, come si può immaginare, sono illimitate; la più significativa per noi è quella per la regolazione della potenza erogata a una turbina ad acqua. Con questo esempio possiamo infatti introdurre il concetto di *amplificazione*, che è fondamentale in elettronica.

È intuitivo che, grazie alla valvola, si può far variare la portata d'acqua e quindi la potenza erogata alla turbina di una quantità molto grande mediante l'erogazione di una potenza molto modesta all'otturatore della valvola.

Il rapporto tra la variazione della potenza erogata dalla turbina e quella fornita all'otturatore della valvola per ottenere questa variazione è detto *amplificazione di potenza*.

Così, se in conseguenza all'erogazione di una potenza di 100W all'otturatore della valvola, otteniamo una variazione di potenza erogata dalla turbina di 100KW (100 000W), diremo che l'amplificazione di potenza è pari a 1000.

Il triodo a vuoto fu realizzato nel 1906 dall'americano De Forest inserendo, tra anodo e catodo di un diodo a vuoto e a breve distanza dal catodo, una *griglia* metallica che non ostruisse il passaggio degli elettroni dal catodo all'anodo.

Sappiamo già, dalla descrizione del funzionamento del diodo, che una tensione positiva sull'anodo estrae e attira a sé elettroni dalla superficie del catodo. È intuitivo che, se applichiamo una tensione anche alla griglia, la forza d'attrazione sugli elettroni dipenderà ora non solo dalla tensione anodica, ma anche dall'entità e dalla polarità della tensione di griglia, la quale avrà un'influenza prevalente, perché più vicina al catodo.

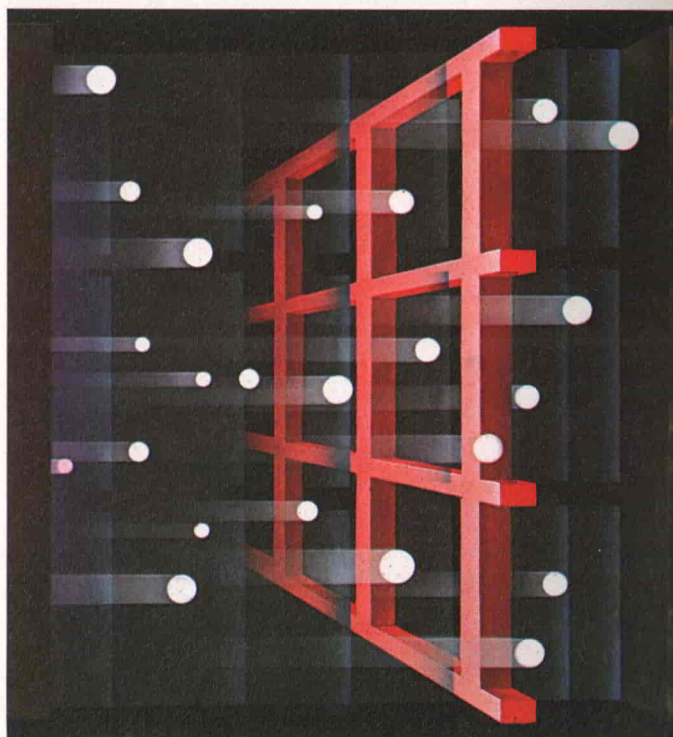
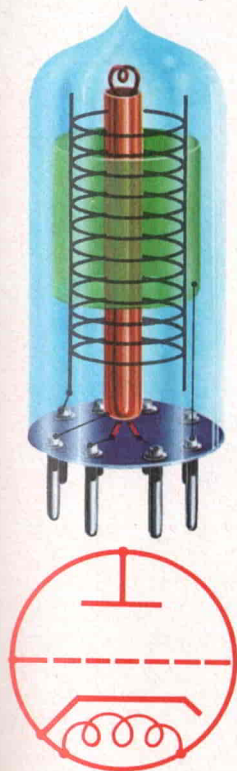
Una tensione di griglia negativa, come normalmente usata, diminuirà l'attrazione globale esercitata sugli elettroni del catodo: se si varia l'ampiezza di questa tensione negativa di griglia sarà possibile modificare l'intensità della corrente di elettroni che scorre verso l'anodo.

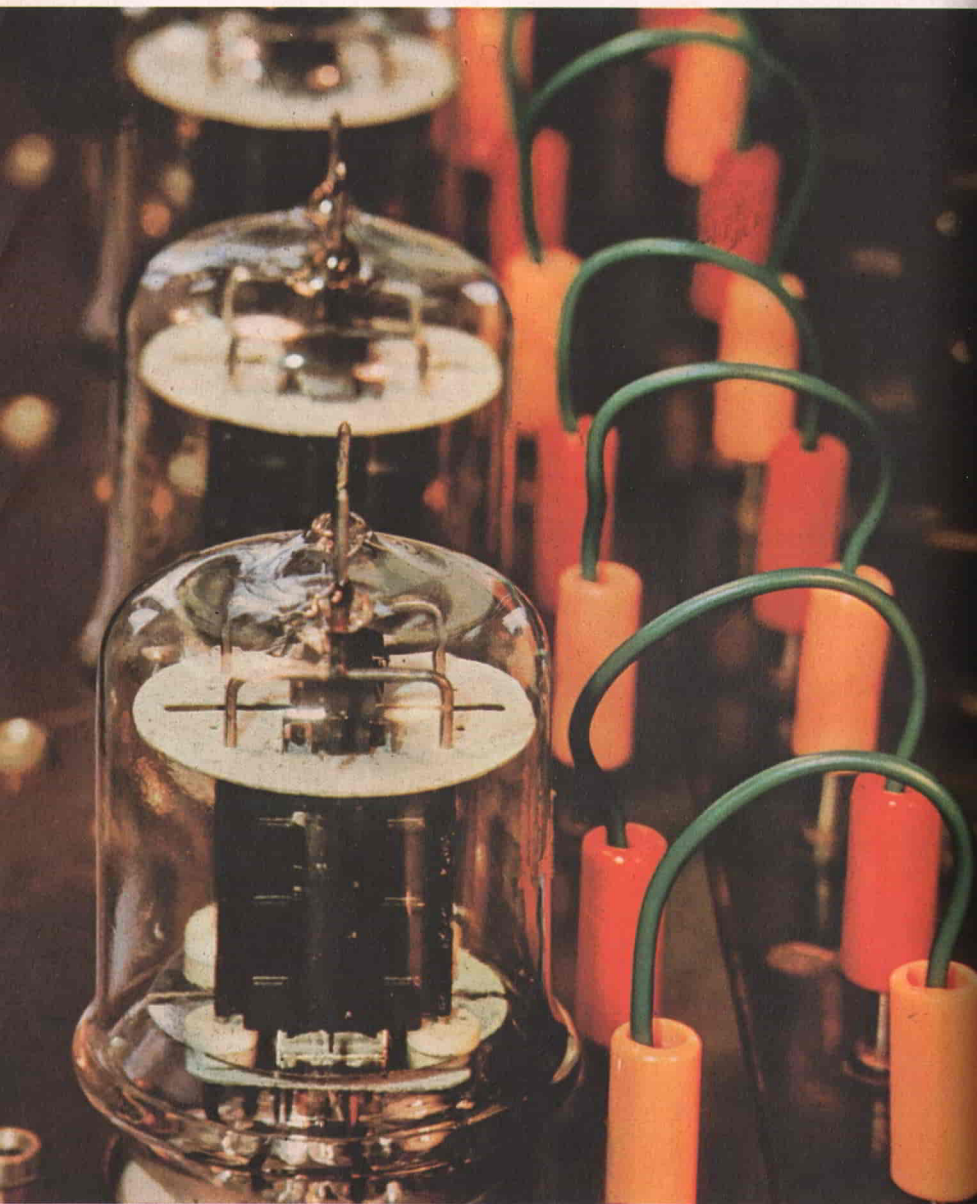
Con il triodo a vuoto si può quindi risolvere il problema fondamentale del controllo dell'intensità di un fascio di elettroni e quindi di una corrente elettrica.

È possibile applicare alla griglia di un triodo una tensione sufficientemente negativa da compensare e quindi annullare esattamente la forza d'attrazione esercitata dall'anodo: in tale condizione la corrente del triodo è nulla e il triodo si dice appunto *interdetto*; la tensione negativa di griglia corrispondente a tale condizione si dice *tensione d'interdizione* ed è ovviamente tanto maggiore, quanto più alta è la tensione anodica, che deve compensare. Poiché, come si è detto, la griglia è molto più vicina al catodo di quanto non lo sia all'anodo, la tensione d'interdizione sarà molto minore della tensione anodica corrispondente.

Il rapporto tra la tensione anodica e la tensione d'interdizione, che

A sinistra: disegno di un triodo e dell'equivalente simbolo elettrico. Questo componente non è che un diodo termoionico al quale è stata aggiunta una particolare griglia metallica. Detta griglia viene interposta fra il catodo e l'anodo. Essa, opportunamente polarizzata da una tensione esterna, provoca un rallentamento oppure una accelerazione degli elettroni, e quindi, in ultima analisi, regola la corrente elettrica che scorre nel dispositivo. Il disegno a destra offre una immagine idealizzata della "griglia metallica" con elettroni che la attraversano.





esprime bene l'efficacia del controllo effettuato tramite la griglia, è detto *coefficiente di amplificazione* di tensione ed è indicato con la lettera greca μ . Un μ pari a 100 significa che la tensione di 1V applicata alla griglia ha lo stesso effetto, sulla corrente del triodo, di 100 V applicati all'anodo.

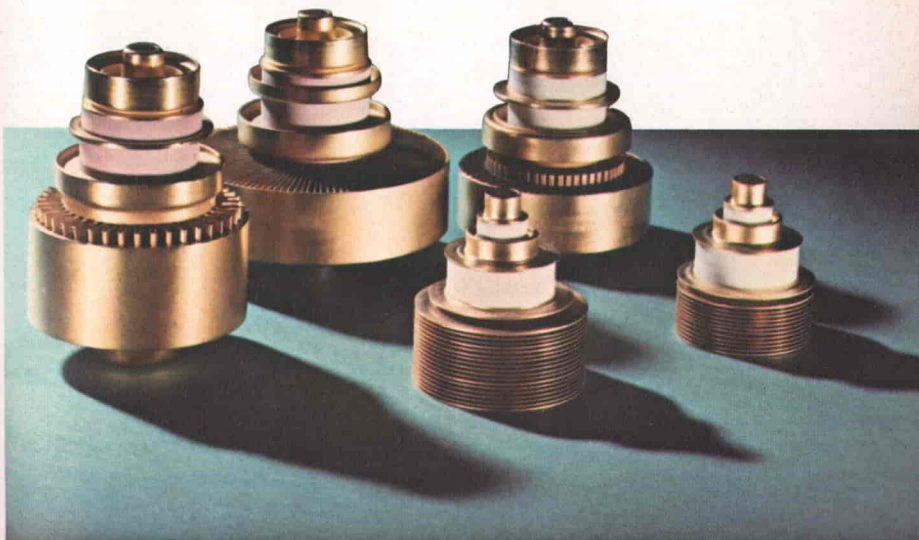
Tecnicamente si trova più comodo il concetto, di *transconduttanza* – contrassegnata con il simbolo g_m ; essa indica la variazione della corrente anodica ottenuta per una variazione di 1V della tensione di griglia. Così una transconduttanza g_m pari a 10mA/V indica che variando la tensione di griglia di 1V, la corrente anodica avrà una variazione di 10mA.

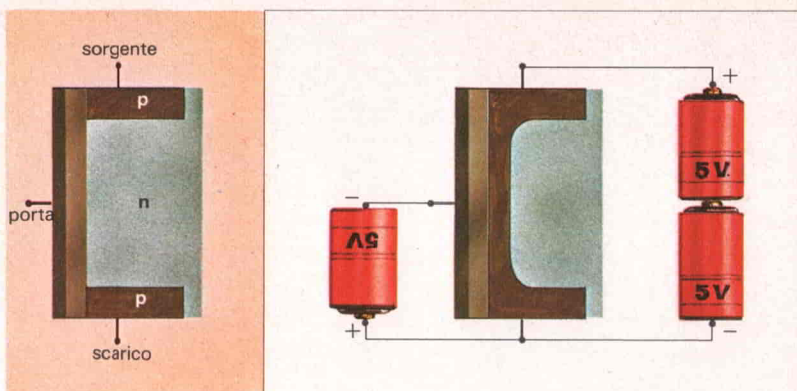
Dal triodo a vuoto sono stati derivati altri tipi di valvole, quali il *tetrodo* e il *pentodo*, valvole che hanno rispettivamente una e due griglie in più.

Nell'uso più comune, alle griglie aggiunte sono applicate tensioni fisse, mentre solo alla prima griglia è applicata la tensione variabile di controllo; queste valvole più complesse possono cioè essere usate come triodi, ma le loro caratteristiche di controllo sono molto migliori.

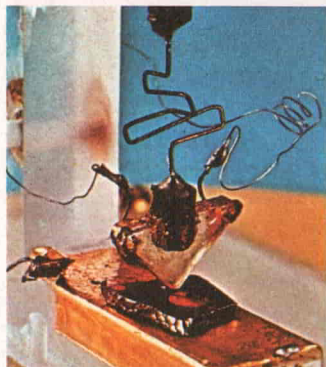
Come abbiamo accennato esistono anche i triodi allo stato solido, detti *transistor*. Vi sono due tipi fondamentali di transistor: il tipo a *controllo di campo* e il tipo a *controllo di corrente*.

A fronte: valvole o tubi elettronici appartenenti a un'epoca passata; sotto: triodi moderni, che assolvono le stesse funzioni dei tubi elettronici, costruiti tuttavia secondo criteri che li rendono mille volte più affidabili delle valvole.

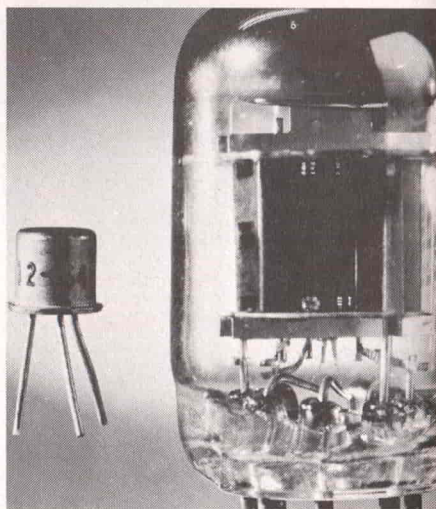




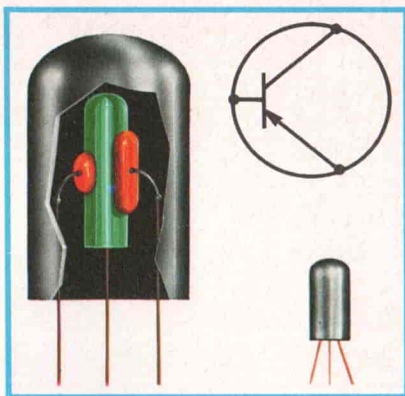
I transistor a controllo di campo sono detti comunemente a *effetto di campo* e indicati pertanto con la sigla FET (*field effect transistor*); un tale tipo di transistor consiste essenzialmente di un elemento semiconduttore di un unico tipo (p oppure n), a due estremi del quale sono collegati i due terminali corrispondenti al catodo e all'anodo, detti in questo caso "*source*" (sorgente) e "*drain*" (scarico); il terminale di controllo dev'essere isolato dal semiconduttore ed è chiamato *gate* (porta). Esistono due tipi di transistor FET, che si distinguono appunto dal modo in cui è ottenuto l'isolamento del gate.



Il primo transistor, costruito nel 1948 nei "Bell Laboratories" (USA); a destra: raffronto fra le dimensioni di un transistor di oggi e una vecchia valvola termoionica.



Pagina a fronte, a sinistra: schema di transistor FET. Sorgente e scarico sono costituiti da due "pozzetti" di semiconduttore di tipo "p", il resto del transistor è drogato "n"; a destra: la pila da 5V dà lungo lo strato isolante una tensione negativa che attira le cariche positive della zona n e crea un passaggio (canale p) alla corrente indotta dai 10V fra sorgente e scarico. Qui a destra: "spaccato", schema elettrico e disegno in dimensioni reali di un transistor "p-n-p".



Il più importante è il tipo MOS-FET, dove la sigla MOS (*metal oxide semiconductor*) indica che il gate è metallico ed è isolato dal semiconduttore mediante uno strato di ossido di silicio.

I due terminali S (source) e D (drain) sono ognuno collegato all'elemento semiconduttore di base – supponiamo di tipo n – mediante due pozzetti di tipo p; il gate, come abbiamo accennato, è costituito da una lamina metallica, parallela all'elemento semiconduttore, da cui è isolata con uno strato di ossido di silicio, che è in sostanza un vetro.

Se non si applica alcuna tensione al gate, nel semiconduttore di base non si ha corrente, perché nel percorso, interno al semiconduttore, tra S e D troviamo due giunzioni p-n ed n-p – e cioè due diodi – collegati tra loro in modo tale che se uno di essi può condurre, perché per esempio disposto nel senso diretto, non lo può l'altro perché disposto in senso inverso.

Applichiamo ora al gate una tensione negativa: nella regione di semiconduttore, che è compresa tra S e D e che si trova sotto al gate, verranno attratte delle cariche positive (lacune) che potranno collegare i due pozzetti p del D e dell'S, realizzando in tal modo un canale p, che sotto l'azione della batteria connessa tra D e S, può condurre corrente.

Se si varia l'intensità della tensione negativa applicata al gate si può variare l'intensità della corrente che scorre nel canale.

Se si usa invece un elemento di semiconduttore di tipo "p" e si applica al gate una tensione positiva, si ha un transistor MOS-FET a canale n.

Oltre ai transistor MOS-FET esistono anche i transistor J-FET, dove J significa junction (giunzione): in essi il gate è collegato al semiconduttore di base mediante una giunzione p-n, cioè un diodo. La tensione applicata al gate dovrà essere sempre di una polarità tale che la giunzione stessa non conduca: in tal caso si realizza ancora una volta un "isolamento" dal corpo sottostante del semiconduttore che viene così influenzato solamente dalla tensione ap-



plicata al gate e non dalla corrente che questo potrebbe erogare. I transistor a controllo di corrente sono detti *transistor bipolari*. Questi sono essenzialmente costituiti da tre parti di materiale semiconduttore di tipo e disposizione tali da costituire una struttura a tre strati p-n-p o n-p-n. In tal modo si ottengono due diodi con il catodo o l'anodo dei diodi in comune, rispettivamente.

Ai due strati esterni di questa struttura sono collegati i due terminali corrispondenti all'anodo e al catodo del triodo, che ora sono chiamati il primo *collettore* e il secondo *emettitore*; allo strato centrale è collegato l'elettrodo di controllo, equivalente alla griglia e ora detto *base*.

È evidente che, lasciando aperto il terminale di base, comunque si colleghi una batteria tra collettore ed emettitore, non si avrà alcuna circolazione di corrente: ciò perché almeno uno dei due diodi sarà disposto, rispetto alla tensione esterna applicata, nel senso "inverso", cioè nel senso in cui non può consentire il passaggio di corrente. Una circolazione di corrente controllata dalla base si può ottenere applicando ai terminali del transistor opportune tensioni.

Osserviamo anzitutto che il transistor, se si guarda solo alla natura degli strati di semiconduttore da cui è composto, è un dispositivo simmetrico. In realtà, salvo casi molto particolari, il collettore e l'emettitore, che corrispondono ai due strati esterni dello stesso tipo, hanno dimensioni, strutture e "drogaggi" molto diversi e ciò per ragioni di efficienza del transistor; i transistor reali sono quindi dispositivi fortemente asimmetrici. Ciò significa che, nell'applicare al transistor le opportune tensioni che gli consentono di funzionare, occorre ben distinguere fra collettore ed emettitore.

Ciò premesso consideriamo il caso del transistor n-p-n.

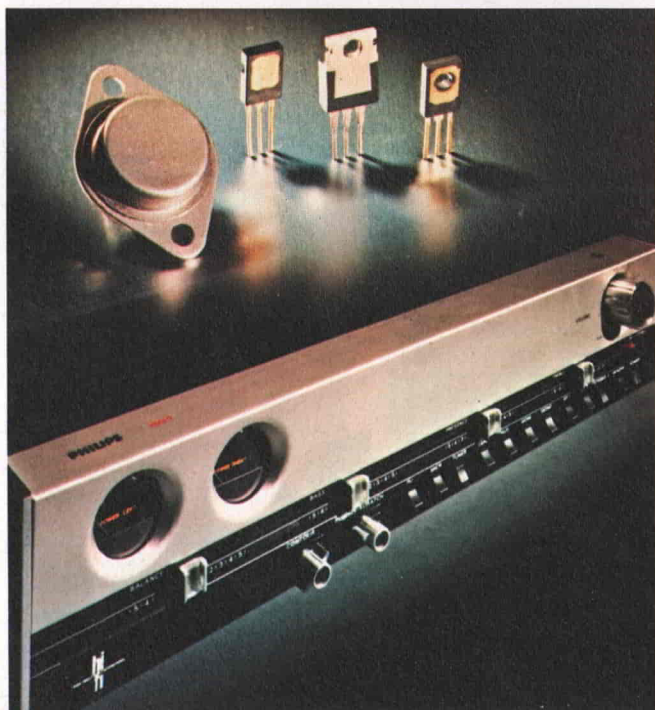
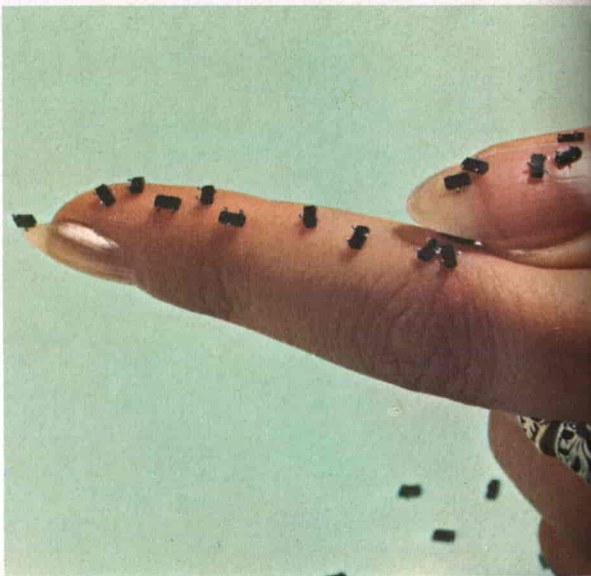
Applichiamo al collettore, tramite un resistore, il polo positivo di una batteria, il cui polo negativo è collegato all'emettitore. Come già sappiamo, se il terminale di base è lasciato aperto, non vi scorrerà corrente perché il diodo collettore-base si trova disposto nel senso "inverso" rispetto alla tensione applicata.

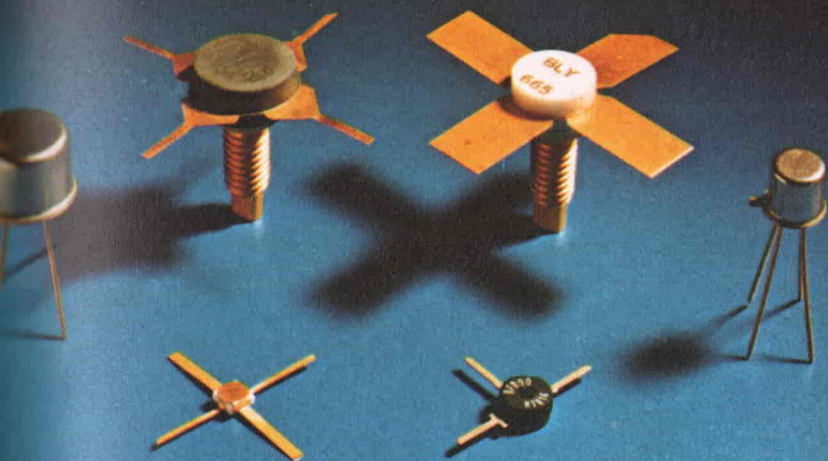
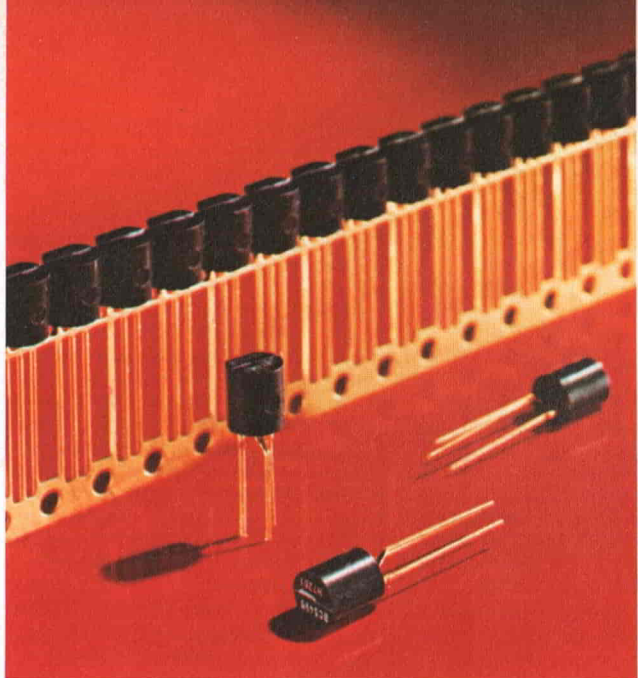
Forniamo ora alla base, sempre tramite un resistore, una tensione positiva ricevuta da un'altra batteria, il cui polo negativo è ancora collegato all'emettitore. Il diodo base-emettitore sarà percorso da una "corrente di base" perché disposto nel senso "diretto" rispetto alla tensione applicata. L'effetto fondamentale di questa corrente di base è quello di "sbloccare" il diodo collettore-base che, pur restando ovviamente disposto nel senso inverso, consente il passaggio di corrente dal collettore verso l'emettitore. Il meccanismo con cui questo fenomeno avviene è piuttosto complesso, per cui non è il caso di esporlo qui, considerato che ciò non impedisce affatto la comprensione dei circuiti a transistor.

È essenziale osservare che l'entità della corrente controllata, che scorre tra collettore ed emettitore, si può ritenere sostanzialmente proporzionale alla corrente di base, che è molto inferiore alla corrente controllata. Il rapporto tra la corrente controllata e quella di

Fotografia molto ingrandita del cuore di un transistor in grado di operare su frequenze audio (fino a 20 000 Hertz). Le sue ridotte dimensioni, la grande affidabilità e il basso costo di produzione fanno del transistor il componente fondamentale dell'elettronica.

Alcuni fra le centinaia di tipi di transistor impiegati nei circuiti elettronici. Gli esemplari piccolissimi "disseminati" sulle dita trovano uso nei cosiddetti "circuiti ibridi", la cui miniaturizzazione è inferiore solo a quella dei circuiti integrati. Nelle due foto sotto si vedono alcuni transistor di media e alta potenza, in grado cioè di lavorare a medi e alti regimi di tensione e corrente; sono riconoscibili per la maggiore robustezza costruttiva e per la presenza in essi di placche metalliche destinate a smaltire più in fretta il calore accumulato. A destra, in alto una schiera di transistor "nnp" a basso rumore (atti cioè a limitare i disturbi spuri nei segnali trasmessi).





controllo (quella di base) è detto *coefficiente di amplificazione di corrente* del transistor.

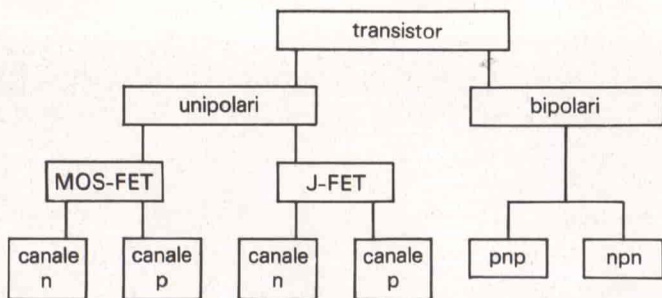
A seconda del tipo di transistor, questo coefficiente – chiamato talvolta “ β ” (beta) – può assumere valori da 10 a 1000.

Possiamo ora fare un’osservazione fondamentale: i triodi a vuoto e i transistor a effetto di campo sono controllati variando l’ampiezza della tensione applicata rispettivamente alla griglia o al gate, per cui per calcolare l’entità della corrente controllata occorre conoscere la *transconduttanza* del dispositivo. I transistor bipolari sono invece controllati variando la corrente iniettata nella base: in tal caso per il calcolo della corrente controllata occorre conoscere il *coefficiente di amplificazione di corrente*.

Così una transconduttanza pari a 20mA/V significa che 1V applicato alla griglia o al gate provoca una corrente di 20mA tra anodo e catodo oppure tra “source” e “drain”; un coefficiente di amplificazione di corrente pari a 20 significa che, per ottenere una corrente di 20mA tra collettore ed emettitore, occorre iniettare nella base una corrente di 1mA.

L’altro tipo di transistor, e cioè il tipo p-n-p, ha un funzionamento del tutto simile, salvo il fatto che le polarità delle batterie di collettore e di base devono essere invertite.

In figura è rappresentato un “albero genealogico” dei transistor che abbiamo finora visto.



Non si può concludere un discorso sul transistor senza accennare alle ragioni del suo successo senza precedenti nel campo dei componenti elettronici.

Il primo vantaggio che si incontra nell’impiegare un transistor al posto di un triodo a vuoto è costituito dall’assenza del riscaldatore del catodo, il che significa un risparmio di potenza di qualche Watt; per dare un’idea dell’entità di tale risparmio ricordiamo che tale è la potenza sonora erogata da una comune radio da rete.

Il secondo vantaggio consiste nel fatto che per mettere il transistor in condizioni di funzionare basta una tensione generalmente bassa, da qualche decina di Volt fino a qualche Volt; un triodo a vuoto richiede al contrario tensioni di qualche centinaio di Volt.

Il terzo vantaggio è quello del volume e del peso del transistor che possono essere meno di un centesimo di quelli di un triodo a vuoto. Inoltre il transistor è certamente molto più robusto di un triodo a vuoto costituito di vetro e di parti metalliche, piuttosto delicate, come la griglia.

Infine, mentre i triodi, come tutte le valvole a vuoto, si "esauriscono" in tempi non molto lunghi, a causa della perdita di capacità di emissione del catodo, il transistor ha, agli effetti pratici, vita illimitata: si parla per il transistor di decine d'anni, dove per i triodi si parlava di anni.

Tutti questi vantaggi combinati hanno portato al risultato di poter realizzare, semplicemente ed economicamente, apparecchiature elettroniche robuste, leggere, a lunga vita, a bassa tensione e a basso consumo, alimentabili quindi con batterie: il che, per essere sostanzialmente effetto dell'adozione di un solo nuovo componente, non è risultato da poco.

L'esempio forse più rappresentativo e più noto allo stesso tempo dei vantaggi della cosiddetta "*transistorizzazione*" si ha nelle odierne radio portatili a transistor.

I cinescopi

I cinescopi sono componenti elettronici in cui si esercita sugli elettroni un controllo più completo di quanto abbiamo finora visto: infatti, a differenza dei triodi, dove il controllo è limitato all'ampiezza della corrente di elettroni che esce dal catodo, qui si controlla anche la traiettoria del fascio di elettroni.

Il cinescopio è in sostanza una grande valvola a vuoto, nella quale uno o più fasci di elettroni, emessi dai rispettivi catodi e attratti dall'anodo, sono comandati in modo da portarli a colpire, con l'intensità di fascio desiderata, i successivi punti di un'ampia superficie di vetro, detta *schermo*.

I cinescopi che prenderemo in esame sono quelli impiegati nei ricevitori televisivi in bianco e nero e a colori.

Se esaminiamo dall'esterno un cinescopio distinguiamo anzitutto due parti di vetro: il collo, che contiene uno o più *cannoni elettronici*, e l'ampolla che porta lo schermo, su cui appare l'immagine, tra loro raccordati da un cono pure di vetro.

Il collo, del diametro di alcuni centimetri, e della lunghezza di 10/15 centimetri, contiene un cannone elettronico (caso dei cinescopi in bianco e nero) o tre cannoni (caso dei cinescopi a colori). Il cannone elettronico è un sistema piuttosto complesso: le sue parti essenziali sono un catodo, col relativo riscaldatore, per l'emissione degli elettroni, una griglia per il controllo dell'intensità del fascio elettronico, degli elettrodi di focalizzazione per rendere il fascio sufficientemente sottile e un primo anodo forato per attirare gli elettroni ma allo stesso tempo lasciarli passare in modo che escano dal cannone elettronico proprio come se fossero sparati dalla bocca di un cannone.

Visto come il fascio elettronico è stato generato, ci resta ora da vedere come è possibile controllarne il percorso, e cioè modificarne la traiettoria.

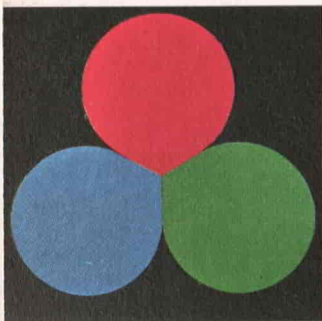
È noto ai fisici che sulle particelle che attraversano un campo ma-

gnetico si sviluppa una forza – detta di Lorenz – che ne modifica il percorso. Si può quindi modificare e cioè “deflettere” la traiettoria del fascio di elettroni che esce da un cannone elettronico, creando un campo magnetico detto di *deflessione*, di intensità e direzione opportuna, all'uscita del cannone stesso. Il *giogo di deflessione* è appunto quel componente che, sistemato sul collo del cinescopio in prossimità del cono, provvede il campo magnetico desiderato. Il giogo è costituito da due coppie di induttori; una di esse, percorsa da corrente, genera un campo magnetico che deflette il fascio elettronico su un piano orizzontale; l'altra lo deflette su un piano verticale. È intuitivo che possedere la facoltà di deflettere il fascio elettronico su un piano orizzontale e su un piano verticale, vuol dire poterlo muovere in modo tale da portarlo a colpire qualsiasi punto dello schermo. Fornendo quindi al giogo, e cioè ai due induttori che lo compongono, le correnti opportune, il fascio elettronico viene portato a esplorare lo schermo con una legge molto semplice: gli si fa cioè percorrere lo schermo per righe orizzontali successive dall'alto in basso. Questa esplorazione è detta *scansione* e verrà esaminata più in dettaglio nel capitolo dedicato alla televisione.

Lo schermo è ricoperto da una o più sostanze speciali dette *fosfori*, che, colpite da elettroni, emettono una luce d'intensità proporzionale all'intensità del fascio elettronico. Se durante la scansione del “pennello elettronico”, come viene chiamato a volte il fascio, viene variata opportunamente l'intensità del fascio stesso, si potrà ottenere sullo schermo un insieme di punti più o meno luminosi e quindi tale da poter rappresentare un'immagine.

Affrontiamo ora la struttura del cinescopio a colori. Secondo il principio su cui questo si basa è possibile mediante tre soli colori, opportunamente scelti, detti “primari”, riprodurre, mescolandoli in determinate proporzioni, la maggior parte dei colori necessari a riprodurre per l'occhio umano delle immagini a colori.

Questi colori fondamentali sono il verde, il rosso e il blu. Per esempio, sommando verde e rosso si può ottenere il giallo, sommando il rosso e il blu si ha il magenta e con il verde e il blu il ciano; la somma dei tre colori primari dà il bianco, la loro contemporanea assenza il nero. Combinando tutti e tre i colori, con le intensità op-



Le immagini a colori che si ottengono negli apparecchi televisivi risultano dalle diverse combinazioni dei tre colori rosso, blu e verde. La sequenza qui a destra mostra come sia possibile, partendo dai tre colori menzionati, realizzare con successive sovrapposizioni varie combinazioni cromatiche.



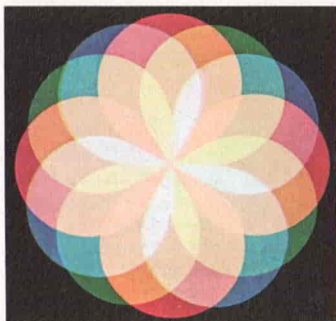
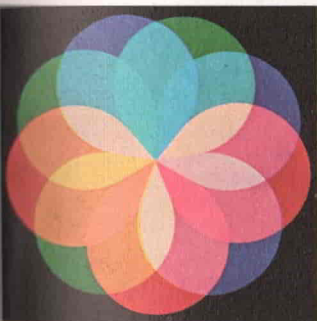
Un cinescopio per apparecchio televisivo a colori. È una grande valvola a vuoto, un'ampolla, contenente lo schermo, i cannoni elettronici e altri componenti ausiliari. Attorno al collo dell'ampolla è infilato il "giogo di deflessione", che provvede il campo magnetico necessario.



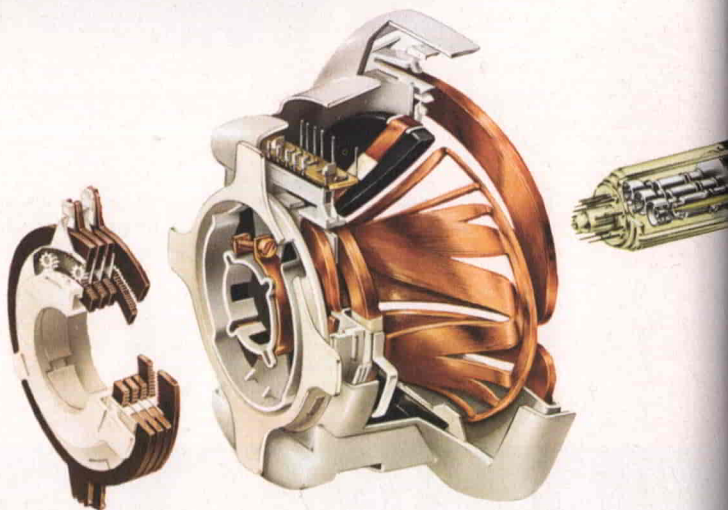
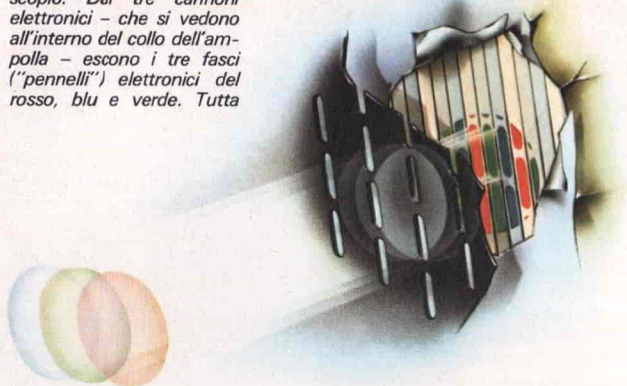
portune, si ottiene una gamma di colori sufficientemente ampia. Se si variano le intensità dei tre colori, mantenendo invariati i rapporti, si avrà lo stesso colore più o meno "carico" o come si dice più o meno "satturo".

Le modifiche di concetto da apportare a un cinescopio in bianco e nero per ottenerne uno a colori riguardano essenzialmente l'impiego di tre cannoni elettronici, in luogo di uno, l'uso di tre tipi di fosfori sullo schermo, e soprattutto l'inserimento della cosiddetta *maschera forata*, nella cui invenzione è consistito il passo fondamentale che ha reso possibile la realizzazione dei cinescopi a colori. Consideriamo anzitutto lo schermo: questo è ora ricoperto da strisce verticali di fosfori blu, verdi e rossi.

Ognuno dei tre cannoni, cui abbiamo prima accennato, deve colpire



Uno "spaccato" di un cinescopio. Dai tre cannoni elettronici - che si vedono all'interno del collo dell'ampolla - escono i tre fasci ("pennelli") elettronici del rosso, blu e verde. Tutta

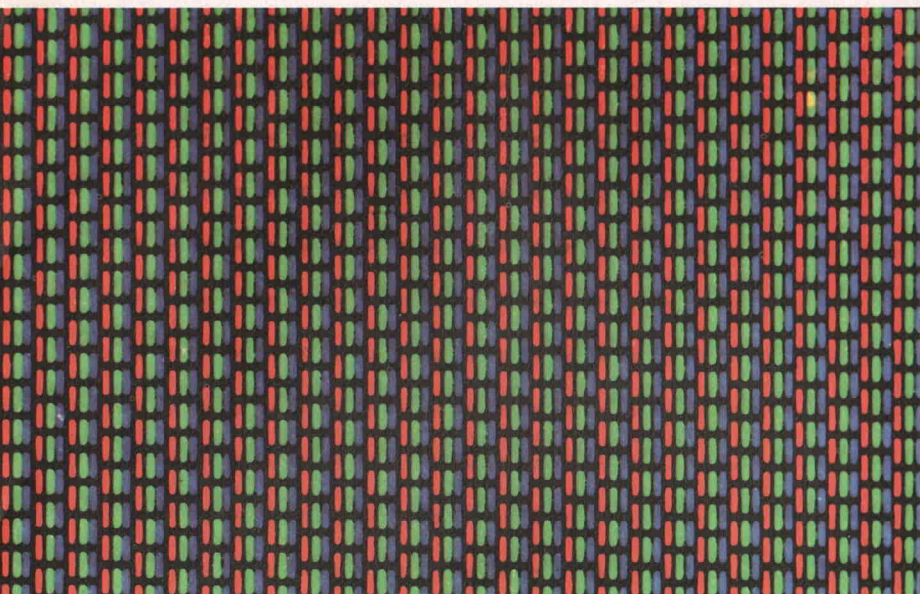


in qualsiasi posizione dello schermo sempre e soltanto lo stesso tipo di *fosforo*: si parla infatti di cannone rosso per indicare quello che colpirà solo i fosfori rossi, di cannone verde e di cannone blu. È chiaro, da ciò che si è detto prima, che si potranno ottenere sullo schermo delle immagini colorate costituite da un mosaico di punti luminosi solo se si riesce a garantire che ogni fascio elettronico colpisca sempre e soltanto i fosfori del colore assegnato.

Ciò è possibile apponendo in prossimità della parte interna dello schermo, dove cioè sono depositati i fosfori, una maschera forata

l'apparecchiatura ausiliaria, in particolare il "giogo di deflessione" assolvono il compito di collimare e dirigere i fasci colorati verso lo schermo. Perché ciascuno vada a colpire i fosfori dello schermo predisposti per ogni terna di colori, è necessaria la maschera forata davanti allo schermo stesso, come si vede nel particolare in alto a sinistra.





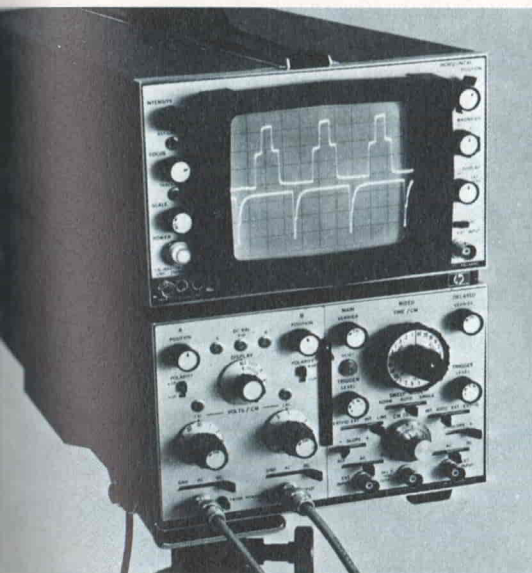
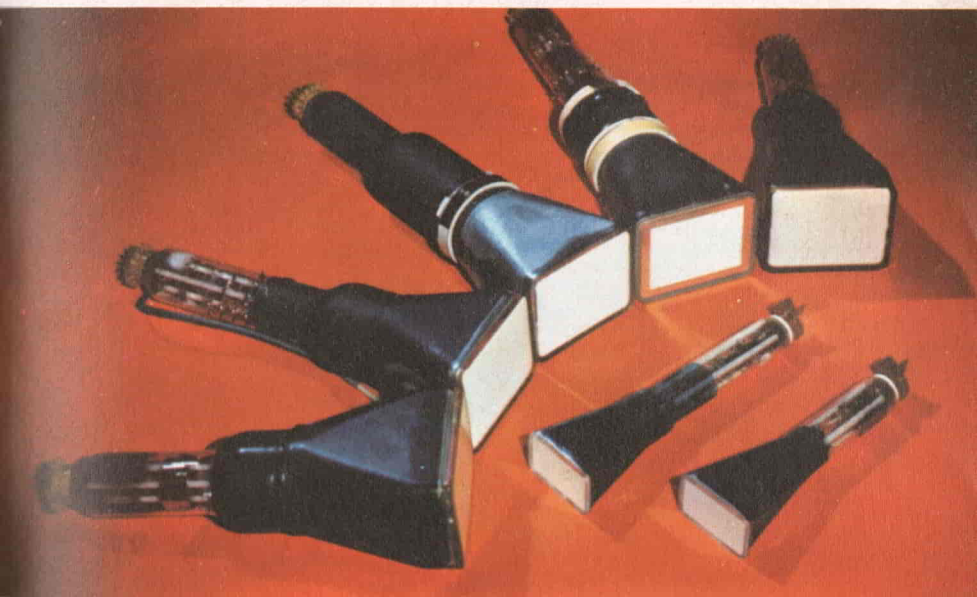
avente un foro in corrispondenza di ogni terna di fosfori dei tre colori diversi. Gli elettroni che escono da ognuno dei tre cannoni hanno un percorso rettilineo e per ragioni geometriche possono colpire, grazie al foro della maschera, solo il fosforo relativo.

Così, comunque i tre fasci elettronici siano deflessi, gli elettroni del cannone rosso potranno colpire solo i fosfori rossi, qualunque sia la regione dello schermo verso cui sono indirizzati; altrettanto varrà per il cannone verde e per quello blu.

In conclusione, grazie alla maschera forata, possiamo proiettare con l'intensità individuale desiderata tre fasci elettronici, ognuno sul rispettivo fosforo, in modo da realizzare sullo schermo un'immagine luminosa costituita da terne di punti colorati.

Un'ultima osservazione riguarda le dimensioni dello schermo: abbiamo tutti sentito parlare di schermi da 12" (pollici), di schermi da 26", etc. Questa dimensione si riferisce alla lunghezza della diagonale dello schermo: così uno schermo da 26" ha una diagonale lunga 26" (66 cm). Il rapporto tra il lato orizzontale, che è il più lungo, e quello verticale è generalmente di 4 a 3.

Ancora una grandezza d'interesse è il cosiddetto *angolo di deflessione*: un angolo di 90° significa che il fascio elettronico, per andare da un estremo a quello opposto della diagonale dello schermo, subisce una deflessione di 90°. In un cinescopio con angolo maggiore, per esempio di 110°, si può ridurre la distanza tra lo schermo e l'estremo libero del collo, appunto perché il fascio può essere maggiormente deflesso.



Nella pagina a fronte: immagine ingrandita di terne di fosfori di un cinescopio a colori. Ciascun fosforo ha una larghezza di circa 0,3 mm e l'intero schermo del televisore ne è ricoperto. Sopra: alcuni cinescopi per strumentazioni elettroniche. A fianco: un oscilloscopio. Questo strumento funziona in modo del tutto analogo all'apparecchio televisivo; consiste in pratica in un cinescopio il cui pennello elettronico viene deflesso da una tensione applicata all'ingresso. Se la tensione varia nel tempo (se è ad esempio alternata) sullo schermo appare la riproduzione fedele di questa variazione, viene cioè "visualizzata" la "forma d'onda" della tensione, che in questo caso sarà una sinusoide.



I circuiti integrati

I componenti finora visti sono realizzati ognuno con materiali specifici, generalmente molto diversi l'uno dall'altro.

Così i resistori sono realizzati con materiali di resistività controllata, come paste di carbone, pellicole di metallo e fili metallici. I condensatori consistono di due fogli metallici, detti armature, con interposto un materiale isolante.

Della struttura degli induttori e trasformatori si è già detto nei relativi paragrafi.

Transistor e diodi allo stato solido, come sappiamo, sono realizzati con materiale semiconduttore.

A un certo punto nella storia dell'evoluzione tecnologica dei componenti ci si è posta la seguente domanda: è possibile realizzare tutti i componenti con un unico tipo di materiale? Una risposta positiva, per tutti o parte dei componenti, avrebbe prodotto notevoli vantaggi economici.

La risposta è positiva: resistori, condensatori di piccola capacità ed evidentemente diodi e transistor, possono essere tutti realizzati con materiale semiconduttore. Il risultato è che un intero circuito, costituito di tali componenti, può essere realizzato su un unico elemento semiconduttore: il cosiddetto *circuito integrato monolitico*.

Vediamo ora come sono realizzati resistori e condensatori in un circuito integrato. Se ricordiamo che un semiconduttore puro è praticamente un isolante e che drogandolo si ottiene un conduttore, è facile comprendere come drogando adeguatamente una regione di un semiconduttore si possa realizzare un conduttore della resistenza desiderata e cioè un resistore. I condensatori sono invece

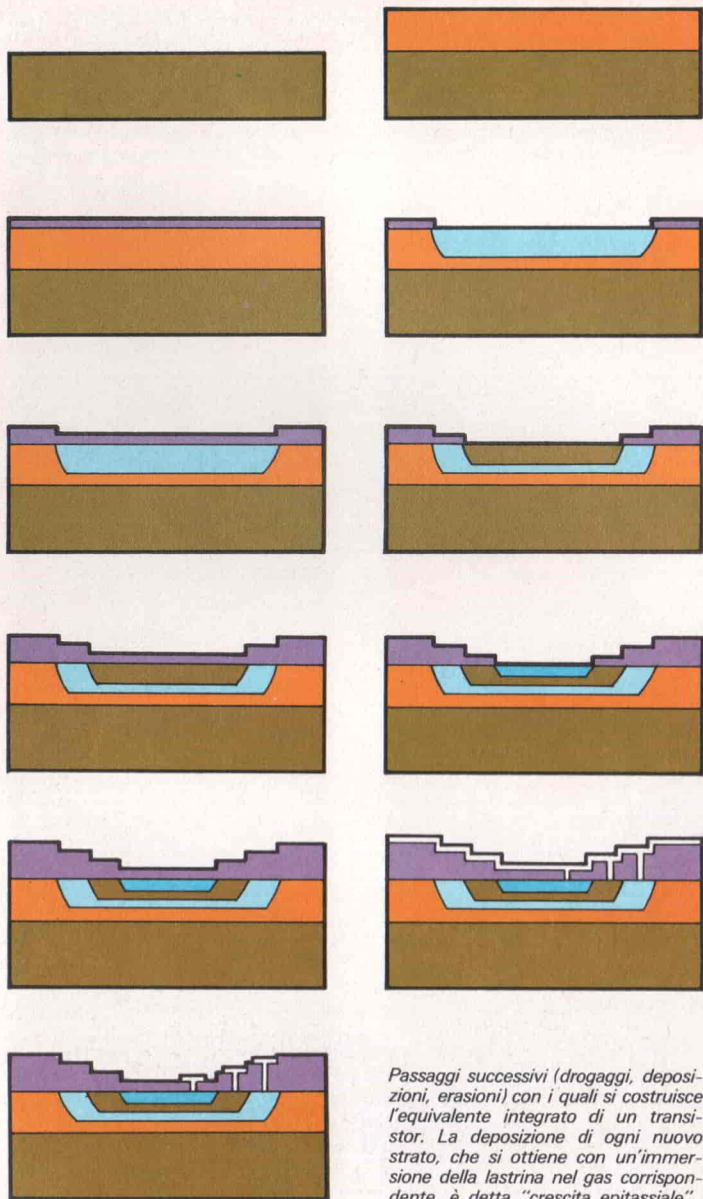
ottenuti sfruttando la capacità che le giunzioni p-n presentano nello stato di blocco, cioè quando sono disposte, rispetto alla tensione applicata, nel senso inverso.

Resistori e condensatori, come sopra descritti, insieme con giunzioni e transistor bipolari, sono usati per realizzare i *circuiti integrati bipolari*. Esiste una seconda categoria, ed è quella dei *circuiti integrati MOS*, realizzati mediante circuiti costituiti di soli transistor MOS-FET.

Da quanto si è detto è chiaro che il circuito integrato monolitico è costituito da varie regioni di semiconduttore, diversamente dro-

Prima fase della realizzazione di un circuito integrato: due disegnatori preparano le maschere che serviranno poi, estremamente rimpicciolite grazie a un processo fotografico, per il drogaggio dei "wafer" di silicio.





Passaggi successivi (drogaggi, deposizioni, erasioni) con i quali si costruisce l'equivalente integrato di un transistor. La deposizione di ogni nuovo strato, che si ottiene con un'immersione della lastrina nel gas corrispondente, è detta "crescita epitassiale".

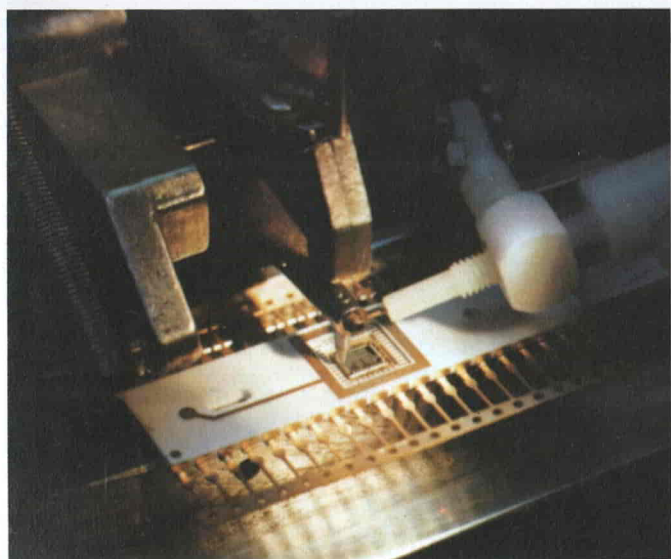
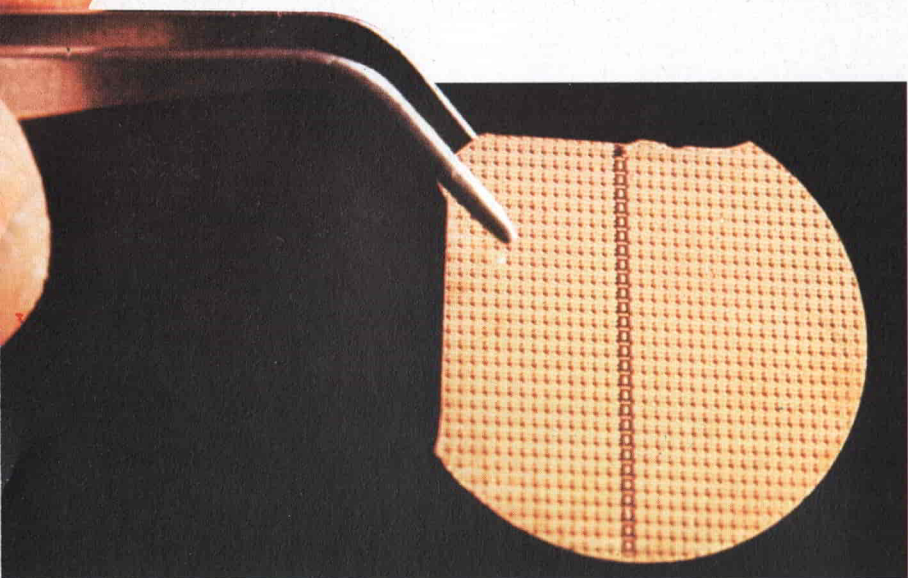


Interno di uno stabilimento in cui si producono circuiti integrati. Poiché un solo granello di polvere può rovinare un circuito, l'aria dei locali viene depurata fino a diventare cento volte meno polverosa di quella atmosferica.

gate e opportunamente disposte l'una rispetto all'altra, che costituiscono i diversi componenti; questi sono poi a loro volta collegati fra loro da conduttori metallici o da zone di semiconduttore fortemente drogato.

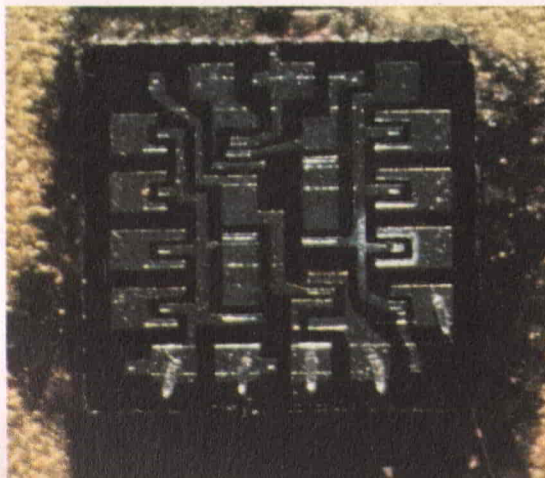
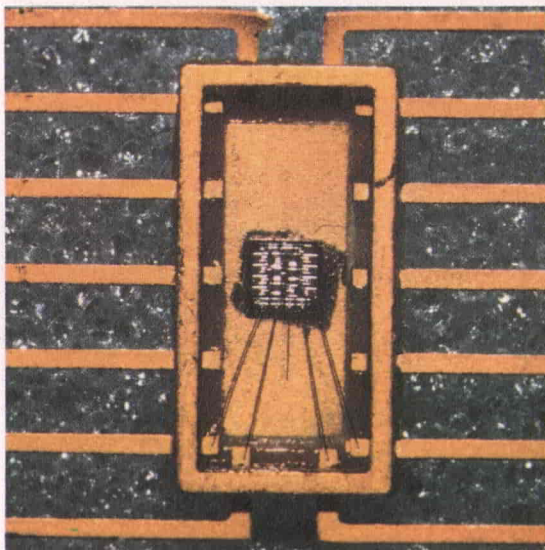
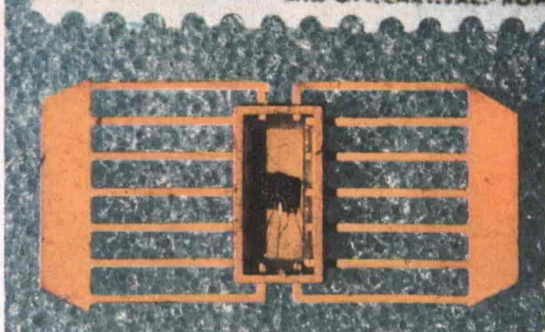
La fabbricazione di un circuito integrato consiste nel delimitare le regioni da diffondere, cioè da drogare, nell'effettuare le diffusioni necessarie e nel realizzare i collegamenti opportuni.

Le regioni da diffondere sono disegnate in un formato molto ingrandito; i relativi disegni vengono poi ridotti alle finali dimensioni reali in modo da realizzare delle fotomaschere. Queste sono quindi proiettate su uno strato fotosensibile riportato sulla piastrina di semiconduttore ricoperta da ossido di silicio protettivo. Successivamente sono asportate con acido le zone impressionate e si ottengono delle "finestre", tramite le quali si possono drogare le regioni



Nella pagina a fronte, in alto: una lastrina di silicio, della superficie di alcuni centimetri quadrati, nella quale sono contenuti centinaia di microcircuiti. In basso: particolare della macchina che stabilisce i microcollegamenti fra i terminali metallici e i "chip" di silicio. Qui sotto: così si presenta, ingrandito al microscopio, un circuito integrato montato e incapsulato.





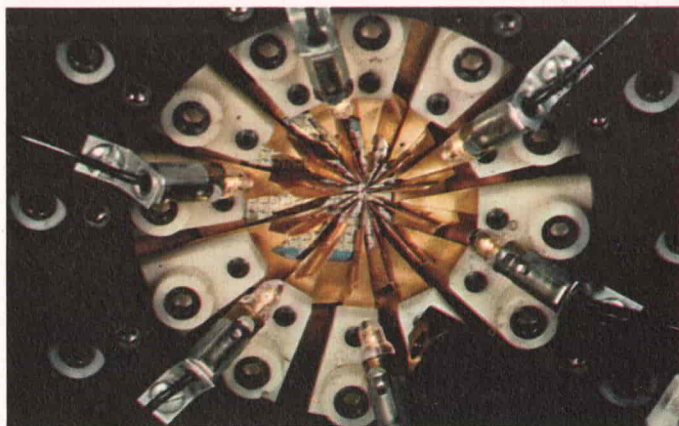
Dall'alto verso il basso: tre ingrandimenti successivi di un circuito integrato che ne mettono in risalto la miniaturizzazione estrema. Nella prima foto il circuito, non ancora incapsulato e con i terminali di metallo non ancora fra loro separati, viene confrontato con la dentellatura di un francobollo; nella illustrazione di mezzo sono riconoscibili i collegamenti fra il "chip" di silicio, che costituisce il circuito vero e proprio, e i terminali esterni. Nella foto in basso infine si può esaminare più in dettaglio il microcircuito, che costituisce il cuore del dispositivo a semiconduttore. La spaventosa riduzione dei singoli componenti degli integrati (diodi, transistor, resistenze, condensatori) è tale da consentire ormai la fabbricazione di un'intera unità di elaborazione (in sostanza un vero e proprio computer) su un quadratino di silicio di soli cinque millimetri di lato. Nella pagina a fronte, in alto: un computer predisposto per il controllo finale degli integrati prima dell'invio in commercio. In basso: una fase del controllo: i puntali che si vedono sono azionati meccanicamente e stanno eseguendo dei test elettrici su ogni circuito di una lastrina di silicio. Il controllo del funzionamento delle migliaia di integrati che vengono prodotti da una singola fabbrica sarebbe impresa impossibile senza l'automazione ottenibile con queste sofisticate apparecchiature elettroniche.



interessate con gas donatori e accettori, a temperature molto alte. Ripetendo questo processo più volte, quante necessarie, si ottengono tutti i componenti desiderati su un'unica piastrina di semiconduttore. Un reticolo metallico d'interconnessione provvede a tutti i collegamenti necessari.

Il circuito integrato monolitico viene quindi generalmente incapsulato, assumendo così l'aspetto finale.

La piastrina su cui si è ricavato il circuito può avere area molto variabile, a seconda della complessità del circuito stesso: da un



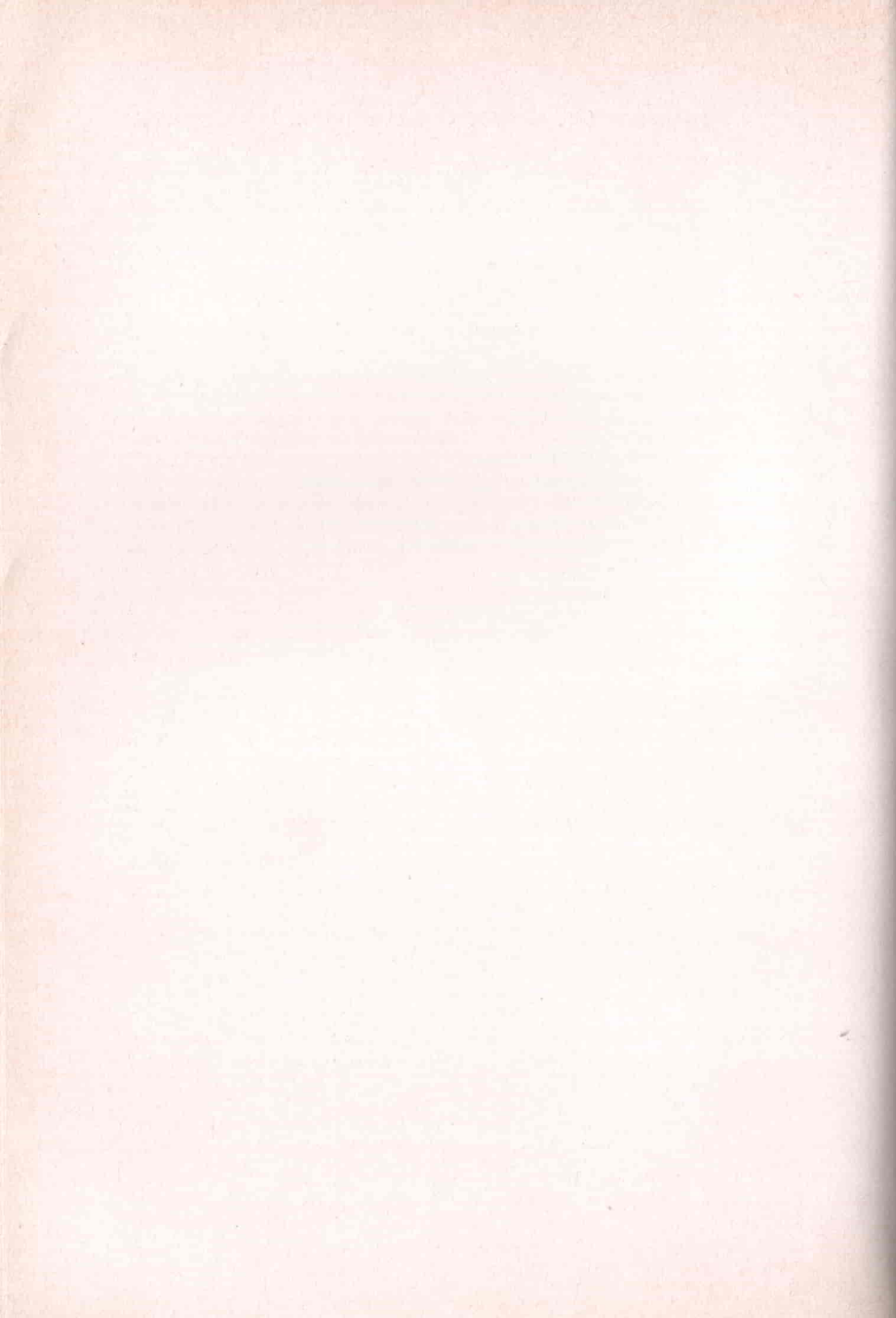
mm^2 ad alcune decine di mm^2 , nel caso di migliaia di componenti. Ci pare utile osservare, sulla base del fatto che il sistema di fabbricazione è sostanzialmente un processo fotografico, che mentre un solo transistor è in sostanza la fotografia di un componente, un circuito integrato monolitico non è che la fotografia di gruppo di molti componenti.

L'introduzione nella tecnica elettronica dei circuiti integrati ha apportato un'innovazione non inferiore a quella provocata precedentemente dai transistor. Un'intera radio portatile può essere realizzata con un unico circuito integrato di qualche mm^2 di superficie; in 20-25 mm^2 si realizzano tutti i circuiti centrali di un piccolo calcolatore.

I vantaggi essenziali dei circuiti integrati monolitici sono le piccolissime dimensioni, l'elevato grado di affidabilità dovuto all'eliminazione delle connessioni esterne tra i vari componenti, l'economia dovuta alla produzione su larga scala.

Non ultimo è il vantaggio di aver contenuto la progettazione a livello di sistema: il progettista, dove oggi può impiegare i circuiti integrati, non ha più bisogno di progettarsi i circuiti necessari, che trova generalmente sui cataloghi, e può quindi dedicarsi subito e completamente al progetto del sistema, cioè dell'apparecchiatura.

Il magnetismo nella registrazione dei dati



Il magnetismo nella registrazione dei dati

L'argomento "elettromagnetismo" ci pone qualche problema che potremmo chiamare "di definizione": vogliamo descrivere il fenomeno, o discutere le caratteristiche dei materiali interessati, o infine esaminare brevemente gli strumenti che sfruttano il fenomeno stesso, utilizzando i materiali opportuni? Scegliremo una soluzione in qualche modo intermedia, soffermandoci però particolarmente sulle applicazioni.

La proprietà della magnetite, un minerale costituito da un ossido di ferro magnetico capace di attirare pezzi di ferro o di altra magnetite, era nota parecchi secoli prima di Cristo. Molto presto si scoprì anche che il ferro poteva essere "magnetizzato" in modo da assumere le stesse proprietà conservandole in modo *permanente* (o almeno molto a lungo, a patto che il ferro non venisse sottoposto a particolari trattamenti come il riscaldamento) anche dopo che la magnetite capace di provocare tale effetto era stata rimossa.

Un'altra caratteristica rilevata molto presto – e che ognuno di noi ha "riscoperto" da bambino giocando con una calamita e una scatola di spilli – è che gli estremi opposti di un magnete permanente si comportano in modo diverso, se il magnete viene posto a contatto con un altro elemento analogo. Se in una determinata posizione i due magneti si respingono, ruotando di 180 gradi uno dei due magneti si avrà invece un'attrazione reciproca. Alla fine del '700 Coulomb stabilì con buona approssimazione le leggi di repulsione e di attrazione fra *poli* magnetici (repulsione fra poli dello stesso tipo, attrazione fra poli di tipo opposto) e di conseguenza venne associato al concetto di magnetizzazione anche il concetto di *polarità*.

Nel secolo scorso, Weber avanzò l'ipotesi che i fenomeni magnetici derivassero da proprietà a livello molecolare, traducibili con un "orientamento" delle molecole; nello stesso secolo, Oersted e Ampère dimostrarono che il passaggio di corrente elettrica in un circuito produceva gli stessi effetti di un magnete permanente; per

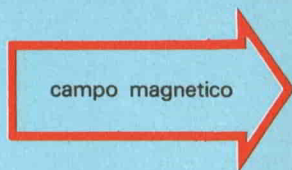
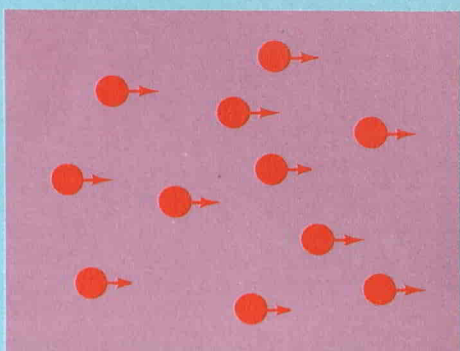
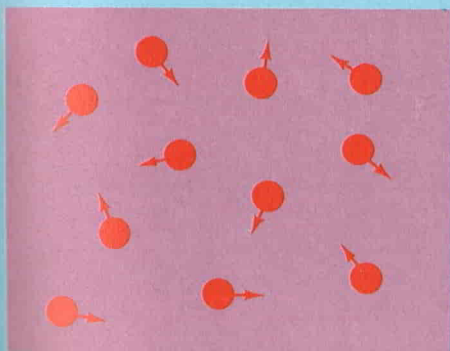
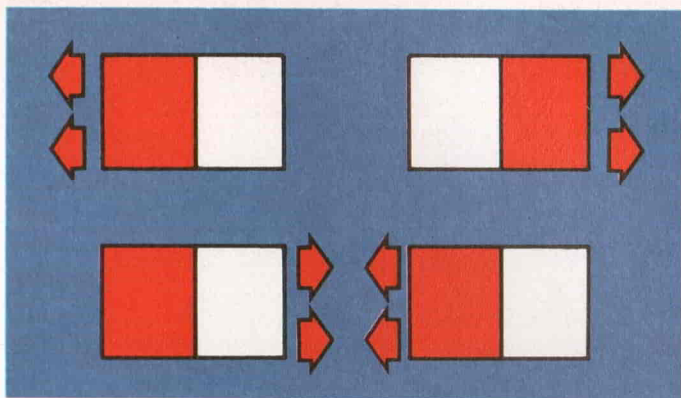
esempio, una corrente continua che passa in un circuito è capace di deviare un ago magnetico. La corrente esercita cioè una "forza" analoga a quella creata da un magnete permanente.

Toccò a Faraday e a Henry completare le scoperte dei fenomeni *elettromagnetici* con la scoperta dell' "*induzione elettromagnetica*". Un magnete crea nello spazio che lo circonda un "campo magnetico": se in questo campo introduciamo una spira (per esempio, di materiale conduttore), nell'istante dell'introduzione possiamo rilevare una tensione ai capi della spira. Il medesimo fenomeno si verifica se facciamo variare l'area della spira che già si trova immersa nel campo, o se facciamo variare il campo stesso – per esempio, creandolo non con un magnete permanente ma mediante una corrente elettrica variabile. Possiamo concludere che le *variazioni* del campo elettromagnetico (piuttosto che il campo stesso) *inducono* una tensione; è su questo fenomeno che sono basate tutte le macchine elettriche, dal trasformatore alla dinamo ai motori elettrici.

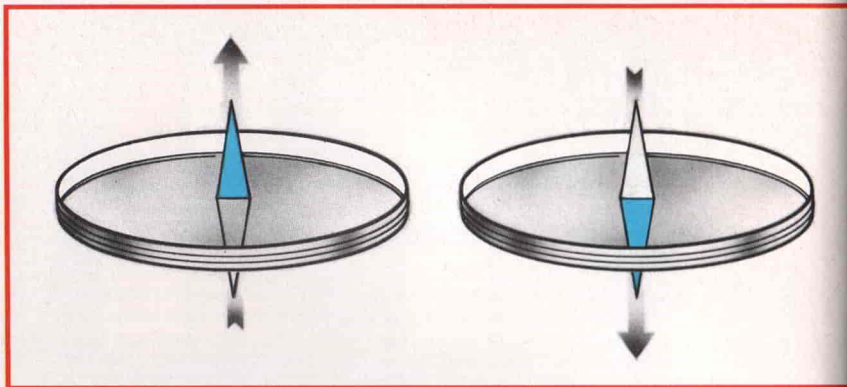
Torniamo ora agli effetti che il campo magnetico – sia esso creato da un magnete permanente o da un circuito percorso da corrente – crea sui materiali che vi sono immersi, e più precisamente sui materiali *ferromagnetici*. Questi vengono "magnetizzati" dal campo in cui sono immersi: se il campo ha un valore sufficientemente elevato, anche dopo la sua eliminazione i materiali ferromagnetici che vi erano immersi mostrano una *magnetizzazione residua* più o meno forte: abbiamo sperimentato il fenomeno, da bambini, scoprendo che uno spillo d'acciaio rimasto a contatto con una calamita era diventato a sua volta "calamitato". Una spiegazione di tali caratteristiche viene data considerando il materiale ferromagnetico come costituito da "magneti" elementari, piccolissimi, che quando il materiale non è magnetizzato, sono "orientati" in modo del tutto casuale: un insieme di microscopiche calamite accatastate alla rinfusa, in modo che tutto il complesso non manifesti una polarità. Quando il materiale viene immerso in un campo, i magneti elementari tendono ad allinearsi con il campo stesso; se questo ha un valore sufficientemente elevato, l'orientamento si mantiene anche quando il campo viene tolto.

Elettromagnetismo, induzione elettromagnetica e magnetizzazione residua costituiscono la base di un gran numero di apparecchiature e dispositivi elettronici; per la maggior parte, essi hanno la loro origine nel fatto che la magnetizzazione residua di un materiale ferromagnetico costituisce la "memoria" di un fenomeno precedente – cioè l'applicazione di un campo con un dato orientamento. Consideriamo un piano nel quale siano disposti ordinatamente tanti anellini di materiale ferromagnetico, identificati ognuno dalla "posizione" che occupano in una scacchiera ideale; se avviciniamo a uno di questi una calamita abbastanza potente, anche dopo averla allontanata l'anello resterà magnetizzato e il "senso" della magnetizzazione residua dipenderà dal fatto che si sia avvicinato il "polo nord" o il "polo sud" della calamita. Naturalmente, possiamo avvicinare poli diversi ai diversi anelli, secondo un ordine qualsiasi: sulla "scacchiera" resterà comunque *memoria* di questa azione.

La relazione fra corrente elettrica e magnetismo ci permette però anche di magnetizzare i vari anelli non più con una calamita – un



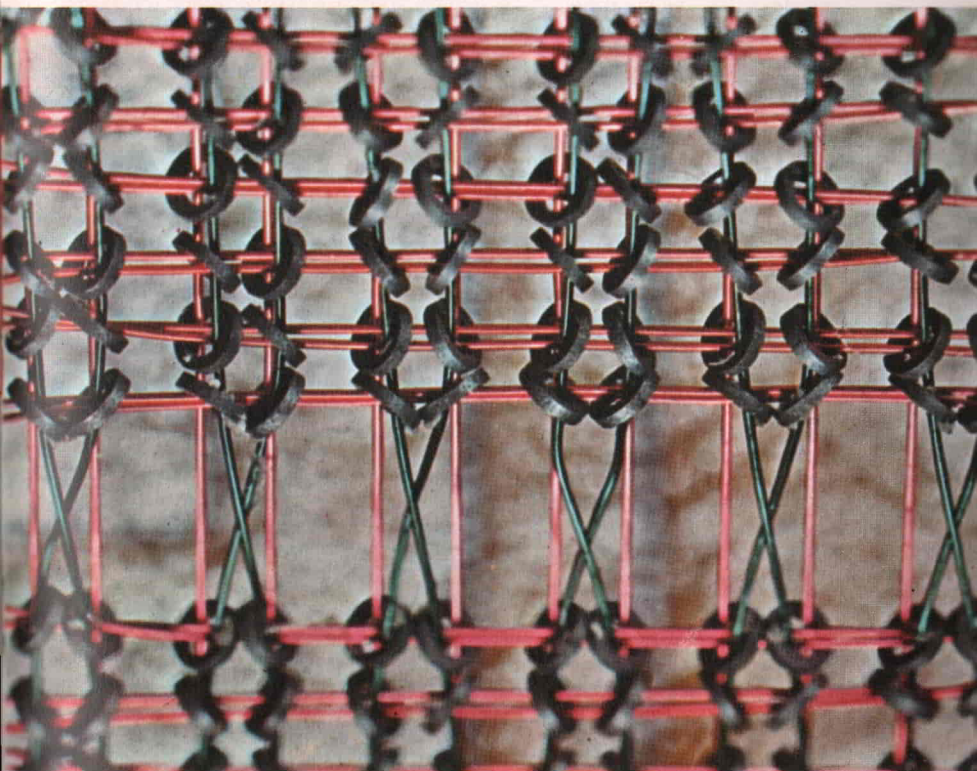
I poli uguali di due calamite si respingono, quelli opposti si attraggono (disegno in alto), a somiglianza delle cariche elettriche (non bisogna tuttavia confondere i due fenomeni). Nel disegno in basso è illustrato il modo in cui un materiale (per esempio il ferro) acquista proprietà magnetiche: quando i magnetini elementari costituiti dagli atomi sono orientati alla rinfusa il loro effetto globale è nullo, ma quando l'intervento di forze esterne, come un campo magnetico, riesce ad allinearli tutti in una stessa direzione, il loro effetto sommato crea la magnetizzazione osservabile macroscopicamente.



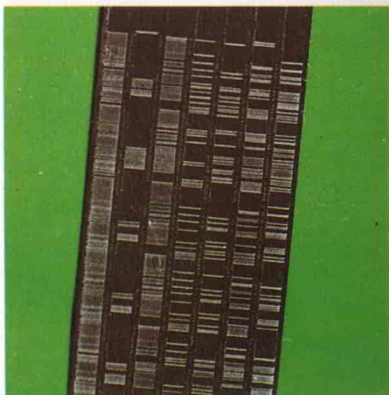
Il principio sfruttato nelle memorie a nuclei: un anello di ferrite attraversato nel suo centro da una piccola corrente temporanea viene da questa magnetizzato in due possibili modi, a seconda che la corrente vada "in su" o "in giù"; l'anello conserva memoria di questo evento e, a una successiva "lettura", può restituirlo sotto forma di una corrente indotta dalla sua magnetizzazione.

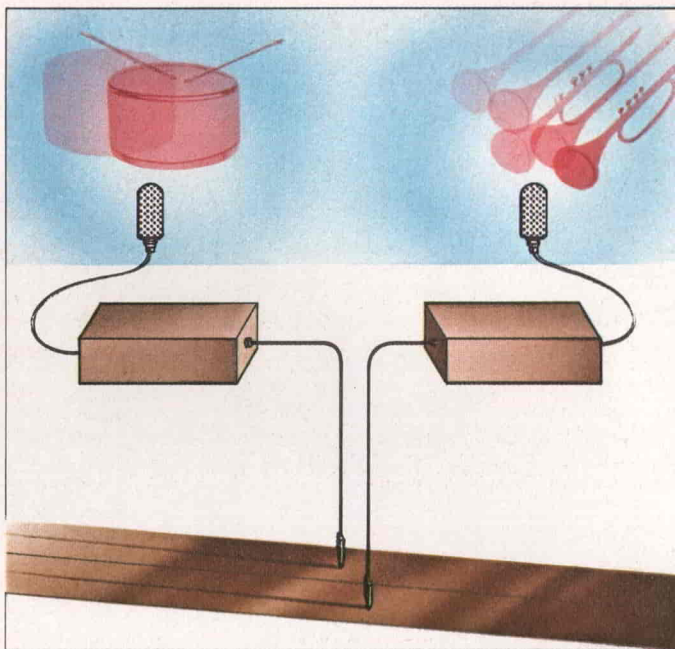
sistema evidentemente poco pratico – ma inserendo ogni anello in un circuito elettrico e inviando correnti opportune nei vari circuiti; dal senso della corrente dipenderà il senso di magnetizzazione degli anelli. Possiamo a questo punto immaginare un meccanismo che ci consenta di inviare automaticamente correnti di senso prescelto nei circuiti che interessano i diversi anelli, secondo uno schema che possiamo fissare arbitrariamente, e ancora una volta gli anelli conserveranno memoria di questo fenomeno.

In effetti, è esattamente su questi principi che sono costruite le *memorie magnetiche "a nuclei"* utilizzate per lungo tempo in grandissima parte dei calcolatori elettronici: "nucleo" è il termine tecnico per l'anello di materiale magnetico, di dimensioni anche molto piccole (il diametro può essere inferiore al millimetro) che costituisce il componente-base. Jay Forrester, lo studioso del Massachusetts Institute of Technology che ideò queste memorie al principio degli anni Cinquanta, accanto al modo di "scrivere" suggerì ovviamente anche il modo di "leggere" quello che si era scritto e che è basato essenzialmente sulla possibilità di rilevare (sempre mediante un circuito elettronico) il senso di magnetizzazione di ogni singolo nucleo. Parleremo più avanti del significato che segnali elettrici o grandezze magnetiche assumono, convenzionalmente, nei calcolatori elettronici; possiamo però osservare già fin d'ora che la nostra "scacchiera" di nuclei magnetizzati secondo una regola che noi stessi scegliamo non è affatto diversa, almeno sotto il profilo concettuale, da un foglio di carta quadrettata nei cui quadretti possiamo scrivere due soli simboli – per esempio, "X" e "O". Romanzi polizieschi e film di spionaggio ci hanno abituato a pensare che possiamo associare un "codice" a un qualsiasi insieme di simboli convenzionali (ricordate i



Maglie di una memoria a nuclei. Sono visibili gli anellini di ferrite che immagazzinano l'informazione. Essi sono attraversati da fili che con il passaggio della corrente in un senso o nell'altro magnetizzano i nuclei. Lo stesso principio si applica per "scrivere", anziché su anellini di ferrite, su nastri cosparsi di materiale ferromagnetico, sfruttando piccole correnti di induzione. A destra, un pezzetto di nastro magnetico che è stato immerso in una sostanza fotorivelatrice che rende visibili le zone di magnetizzazione.





Principio della registrazione "stereo" su nastro magnetico: due microfoni incidono su due "piste" del nastro, riportando suoni leggermente diversi che daranno poi l'illusione, una volta riprodotti, di assistere realmente all'esecuzione.

"pupazzi ballerini" di Sherlock Holmes?) e quindi scrivere un "messaggio" qualunque servendoci di questi simboli: la magnetizzazione dei nuclei in una memoria svolge esattamente la stessa funzione, e la conoscenza del codice da parte di colui che lo riceve lo mette in grado di decifrarlo.

Fino a ora, abbiamo visto un uso dei fenomeni elettromagnetici a livello "macroscopico", per piccoli che siano i nuclei della memoria. Esistono però altre applicazioni – anzi, sono proprio quelle che ognuno di noi utilizza nella vita quotidiana – in cui si sfruttano i fenomeni quasi al livello dei magneti elementari. Si tratta del vasto campo della registrazione magnetica, usata, sì, nell'elettronica "professionale", ma ancora di più nell'elettronica "civile".

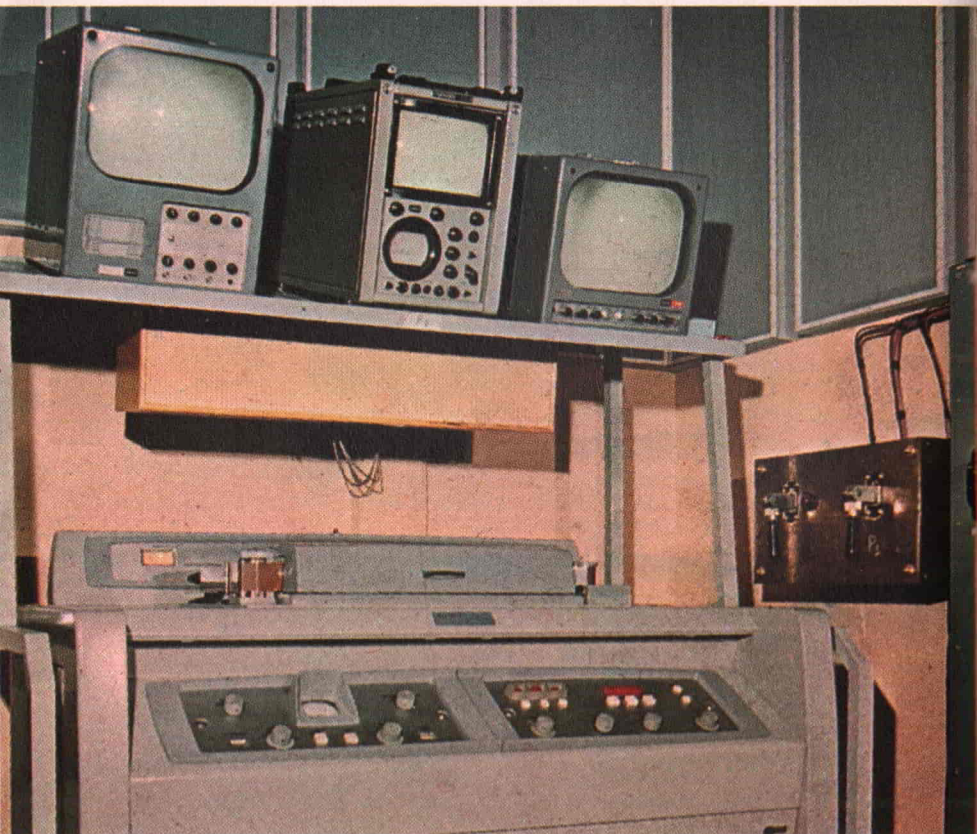
Per comprendere il meccanismo della registrazione magnetica, supponiamo dapprima di avere costruito un sistema capace di trasformare un segnale – per esempio, il suono – nel moto di un pennino, o per meglio dire nello spostamento del pennino da destra a sinistra e viceversa; immaginiamo poi che un meccanismo faccia scorrere di moto continuo, a velocità costante, un nastro di carta sotto

il pennino, in una direzione perpendicolare a quella degli spostamenti del pennino stesso. Sul nastro di carta rimarrà la registrazione scritta del suono, o per meglio dire della "traduzione" del suono in moto. L'ampiezza del tratto, cioè dello spostamento del pennino, potrà essere indicativa del volume del suono; la velocità del moto e quella con cui esso cambia direzione potranno dare un'indicazione della frequenza, del "timbro" del suono. Se ora disponessimo di uno strumento capace di "leggere" la traccia del pennino, interpretandone il significato e trasformandolo di nuovo in suono, potremmo ricostruire il suono che era stato registrato; evidentemente, per questo occorre che lo strumento conosca anche la velocità a cui scorreva il nastro durante la registrazione o, meglio ancora, che il nastro stesso venga nuovamente fatto scorrere alla medesima velocità. Dato che la registrazione è permanente, questo strumento ci permetterà di riascoltare il suono quante volte ci piacerà di farlo. Sostituiamo ora al nastro di carta un nastro — per esempio, di materia plastica — spalmato di un materiale ferromagnetico (si usano per questo degli ossidi di ferro o di cromo); un effetto magnetizzante, sia esso prodotto da un magnete permanente o da un circuito percorso da corrente elettrica, "devia" i magneti elementari orientandoli secondo la direzione del campo magnetico applicato. Supponiamo ancora che il nastro scorra, con moto continuo e a velocità costante; questa volta, però, esso passa non sotto un pennino ma sotto una "testina" capace di creare un campo magnetico e quindi di orientare — in modo permanente — i magneti elementari nel rivestimento del nastro.

Il numero di magneti elementari che si allineeranno con la direzione del campo dipenderà dall'intensità dell'effetto magnetizzante, e il verso secondo cui si orienteranno dipenderà dalla polarità della magnetizzazione: grazie alla magnetizzazione residua, la registrazione così ottenuta sarà permanente quanto quella realizzata dal pennino scrivente.

Lo strumento che ci occorre, per effettuare la registrazione del suono, deve questa volta trasformare il suono in un campo magnetico; intensità, variazione di velocità, velocità di variazione di tale campo dovranno essere correlati al volume, alla tonalità e al timbro del suono. Di fatto, un registratore magnetico, su bobina o su cassetta, funziona esattamente secondo questi principi.

Si tratta ora di passare alla "lettura" della registrazione, e in questa fase compare in modo determinante l'induzione elettromagnetica. Se durante l'operazione di lettura si fa scorrere il nastro registrato, il rivestimento di ossido di ferro magnetizzato creerà a sua volta un campo magnetico, e grazie allo scorrimento del nastro questo campo varierà in modo dipendente dalla registrazione "incisa" sul nastro stesso e dalla velocità del moto; più precisamente, se il moto è identico a quello nella fase di registrazione, l'andamento del campo magnetico duplicherà fedelmente quello che si aveva nella prima fase. Basterà "immergere" in questo campo una "testina di lettura" sulla quale sia predisposto un avvolgimento elettrico perché su questo circuito si "induca" una tensione; se disponiamo di uno strumento capace di convertire questa tensione in suono, la "lettura" sarà completata.



Un impianto di registrazione video-magnetica. Sono visibili due schermi televisivi nei quali si possono proiettare e controllare le registrazioni e, in mezzo a essi, un oscilloscopio.

Può essere interessante osservare che la registrazione magnetica e la lettura seguono gli stessi identici principi, sia che si tratti di un impianto ad alta fedeltà sia che il nastro magnetico sia usato da un calcolatore elettronico per depositarvi le proprie informazioni. I principi stessi sono fra l'altro relativamente semplici, come lo sono i meccanismi che li applicano; per esempio, possiamo notare che passare da un registratore "mono" a uno "stereo" richiederà semplicemente di realizzare un sistema con due testine (sia per la lettura, sia per la registrazione) che operano su due "tracce" distinte e parallele del nastro.

Circuiti elettronici fondamentali

Circuiti elettronici fondamentali

Circuiti attivi e passivi, circuiti lineari e digitali

Si è detto più volte nei capitoli precedenti che cosa è un circuito elettronico: possiamo qui riassumere dicendo che è un sistema di componenti e di conduttori che svolge una determinata funzione elettronica.

Elencare e definire tutte le funzioni oggi usate in elettronica è semplicemente impossibile: ci limiteremo dapprima a una loro semplice classificazione e quindi alla descrizione dei più importanti circuiti elettronici.

Una prima distinzione si fa tra *circuiti passivi*, e cioè tra circuiti costituiti da soli componenti passivi, e *circuiti attivi*, nei quali si trova almeno un componente attivo. I circuiti attivi, come vedremo poi, si dividono in *circuiti lineari* e *circuiti digitali*.

Una funzione elettronica è generalmente realizzata da un circuito elettronico e ha lo scopo di trasformare – o, come si dice, di “elaborare” – uno o più segnali elettrici che rappresentano un’informazione di interesse.

La musica incisa su un disco è un’informazione che si vuole ascoltare ed è rappresentata dal segnale elettrico generato dal “pick-up” del giradischi. Questo segnale può aver bisogno, in casi particolari, di una duplice elaborazione: essere prima filtrato, per eliminare eventuali fruscii come quelli provenienti da un vecchio disco, e quindi amplificato per poter azionare l’altoparlante. Abbiamo così individuato le due funzioni di filtraggio e di amplificazione, che saranno realizzate da due circuiti detti appunto *filtro* e *amplificatore*.

Il filtro è un tipico circuito passivo, che consiste generalmente di condensatori, resistori ed eventualmente di induttori.

L’amplificatore è invece un tipico *circuito attivo lineare*, che conterrà alcuni transistor. I *circuiti lineari* sono circuiti nei quali a una variazione del segnale d’ingresso corrisponde una proporzionale variazione del segnale d’uscita, entro determinati limiti propri del circuito particolare.

Così se al valore di 1mV del segnale d'ingresso corrisponde il valore 1V del segnale d'uscita, per un valore di 0.5mV d'ingresso si deve avere un segnale di 0.5V d'uscita. Su questa *proporzionalità o linearità* è basato il fatto di poter ascoltare la musica al volume corretto, e cioè piano o forte, così come è stata incisa.

Consideriamo ora un altro tipo di funzione: in un mangiacassette si vuole sapere quando il nastro è terminato per arrestare il motore di trascinamento dello stesso. La fine del nastro è contrassegnata da un ricoprimento con materiale particolare.



Il disegno illustra, in alto, il compito del filtro passa basso, che libera l'onda del segnale (proveniente per esempio dalla testina di un giradischi) dai disturbi di alta frequenza (fruscii); in basso vediamo che l'onda "pulita" entra in un amplificatore che la restituisce potenziata all'altoparlante.

La testina di lettura "sente" la presenza di questa zona ed emette allora un segnale elettrico particolare: questo segnale è caratterizzato dal fatto di possedere due soli valori: *alto*, quando è presente la zona di arresto, *basso* (al limite nullo) quando questa è assente. Ora, nel circuito di alimentazione del motore la tensione è *bassa* (cioè zero) quando il segnale ricevuto è alto ed è *alta* (e quindi il motore è in funzione) quando questo segnale è basso.

Anche il segnale d'uscita assumerà quindi, come il segnale d'ingresso, due soli valori. Il circuito che abbiamo così individuato, che risponde "basso" quando gli si dice "alto" e viceversa, è detto *invertitore logico*, ed appartiene alla classe dei *circuiti attivi digitali*. A tale classe appartengono i circuiti impiegati nei calcolatori numerici: "digitale" deriva dall'inglese *digit* che significa cifra.

Il passaggio di un circuito digitale dallo stato in cui il segnale d'uscita ha uno dei due valori possibili a quello in cui assume l'altro valore si dice *commutazione*.

L'amplificazione e la commutazione sono due funzioni fondamentali in elettronica e possono essere entrambe svolte dal transistor.

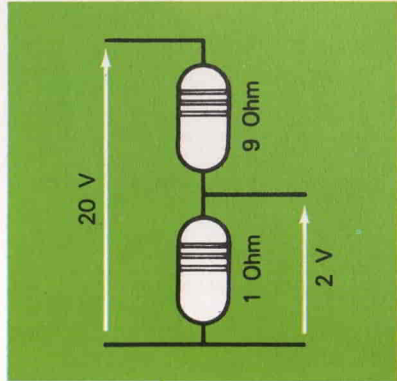
I circuiti passivi

I più importanti circuiti passivi sono gli *attenuatori* e i *filtri*.

L'*attenuatore*, come suggerisce la parola stessa, ha la funzione di diminuire il valore di un segnale elettrico; lo scopo di tale azione è di solito quello di adattare il segnale stesso al dispositivo che deve pilotare.

Il più semplice attenuatore è il *partitore resistivo*, che è costituito da due resistori collegati in *serie*, e cioè in modo da essere attraversati dalla stessa corrente. Supponiamo che un resistore abbia il valore

Due resistenze diverse fra loro assolvono il compito di restituire a un capo del circuito una tensione ridotta (2V) rispetto a quella di entrata (20V). È quanto accade per esempio in una cuffia affinché il segnale non rompa i timpani all'ascoltatore.



di 9 Ohm e l'altro di 1 Ohm. Se all'insieme dei due resistori è applicata la tensione di 20V, ai capi del minore si otterrà una tensione pari a 1/10 della tensione totale, quindi una tensione di 2V. Il rapporto di riduzione della tensione dipende solo dal *rapporto* fra i valori dei due resistori che costituiscono l'attenuatore e non dal *valore* dei resistori stessi, valore che è scelto in base alle caratteristiche del generatore della tensione e del dispositivo da pilotare.

Un esempio di applicazione del partitore resistivo si ha quando si vuole effettuare un ascolto in cuffia: se la tensione erogata dall'amplificatore è eccessiva, come può capitare nel caso di un amplificatore previsto per il pilotaggio di un altoparlante, l'uso di un partitore di tensione consente in questo caso la riduzione opportuna della tensione erogata dall'altoparlante per pilotare correttamente la cuffia, che generalmente richiede minor tensione.

Così come un filtro meccanico, in base alle dimensioni delle particelle che lo attraversano, ne trattiene una parte lasciandone passare altre, analogamente un filtro elettronico ha lo scopo di fare passare alcuni dei vari segnali d'ingresso, attenuando o sopprimendo altri segnali. Il criterio di discriminazione tra i vari segnali è la *frequenza* con la quale essi sono presenti.

Semplici esempi di funzioni di filtraggio sono l'eliminazione del *fruscio* nella riproduzione di vecchi dischi o l'eliminazione del *ronzio* di rete negli amplificatori.

In ogni caso occorre discriminare tra le frequenze che si desiderano far passare – quelle che corrispondono alla cosiddetta *banda passante* – e quelle che si vogliono “bloccare”.

Così, nel primo esempio citato del fruscio dei dischi, questi segnali da eliminare sono a frequenza più alta di quelli che si vogliono ascoltare: un filtro capace di eliminarli si dice appunto *passa basso*, perché lascia passare i segnali a frequenza inferiore a un determinato limite, attenuando (idealmente riducendo a zero) i segnali a frequenza superiore.

Nell'altro esempio del ronzio di rete, questo ha una frequenza di 50 o 100Hz, vale a dire frequenza inferiore a quella dei segnali musicali che si vogliono ascoltare: si impiega allora un filtro *passa alto*. Nel caso di un segnale telefonico che ha frequenze comprese tra 300 e 3400Hz, si impiegano filtri *passa banda* che attenuano o sopprimono tutti i segnali a frequenze inferiori a 300Hz e superiori a 3400Hz.

La struttura del circuito di un filtro, comunque complessa, deve essere evidentemente basata sull'impiego di componenti che “sentono” la frequenza. Questi, come abbiamo visto, sono i condensatori e gli induttori.

Nell'illustrazione qui a fronte sono riportate due semplici “celle” di filtro rispettivamente passa basso e passa alto.

Se si analizza il primo circuito si intuisce come la cella offre il minimo impedimento al passaggio di un segnale alla minima frequenza possibile, che è la corrente continua; se la frequenza aumenta l'induttore in serie offrirà una “resistenza” (detta con termine tecnico *reattanza*) sempre più alta, cosicché sarà sempre maggiore la caduta di tensione ai suoi capi (e ne resterà quindi sempre di meno ai capi della resistenza, cioè nel segnale che viene prelevato in uscita). Al limite, quando la frequenza sarà tanto alta da non riuscire a passare, la corrente nel circuito sarà nulla e, per la legge di Ohm, la tensione fra C e D sarà pure nulla ($V = RI = R \times 0 = 0$). Il tutto funziona dunque come un passa basso.

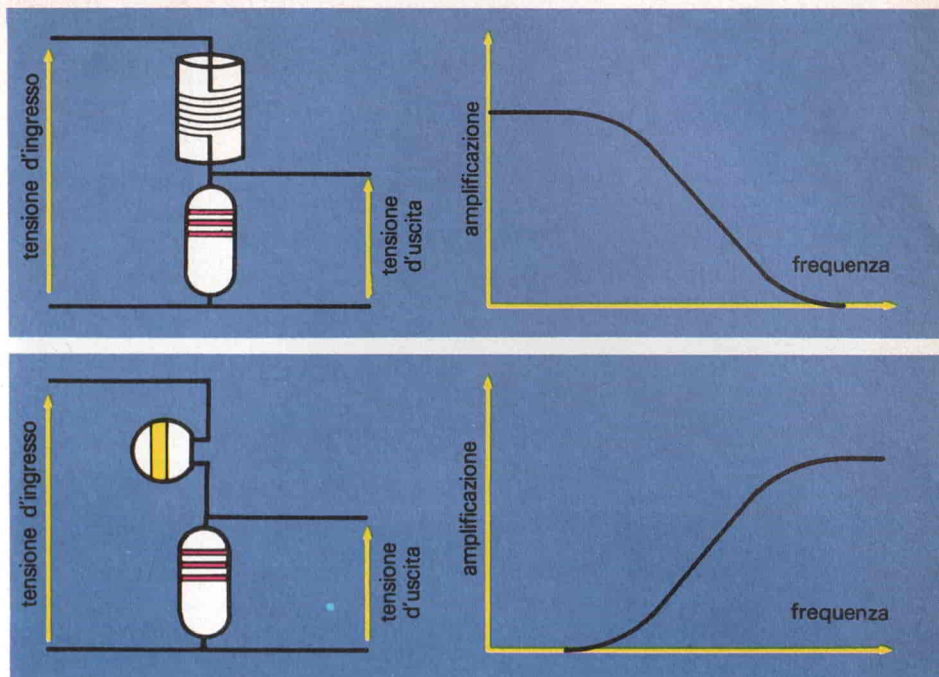
Il secondo circuito impedisce il passaggio di segnali alla minima frequenza, a causa del condensatore in serie, che consentirà invece un passaggio sempre meno attenuato delle frequenze più alte: si tratta ora di un passa alto.

Le strutture dei filtri moderni possono essere anche estremamente complesse, tanto da esigere l'impiego di calcolatori elettronici per la loro progettazione.

L'amplificatore

Come si è già accennato, l'*amplificatore* è un *circuito attivo lineare*, che realizza la funzione fondamentale dell'*amplificazione*. Tale funzione consiste nell'aumentare la potenza ricavabile da un segnale elettrico, il che si ottiene elevandone la tensione o la corrente o tutt'e due.

La necessità dell'amplificazione diventa intuitiva se si pensa che i segnali elettrici rappresentanti informazioni devono essere portati a un livello minimo di potenza – cioè devono essere amplificati – per poter poi essere utilmente trasformati in suono o luce e resi così intelligibili all'uomo.

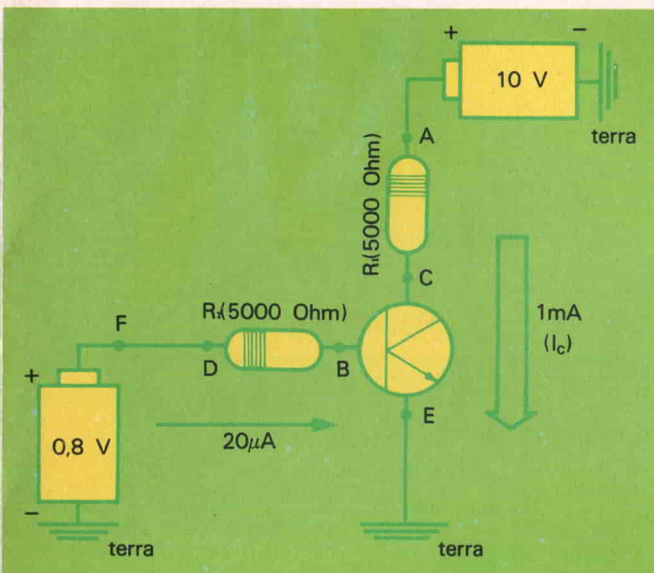


Filtro passa basso (schema superiore) e passa alto (schema inferiore) con le risposte alle diverse frequenze. Il loro funzionamento si spiega riconoscendo che si tratta in pratica di due partitori analoghi a quello illustrato nella pagina precedente, e ricordando che un'induttanza presenta resistenza nulla alle basse frequenze ma elevata alle alte, mentre per un condensatore è vero il contrario.

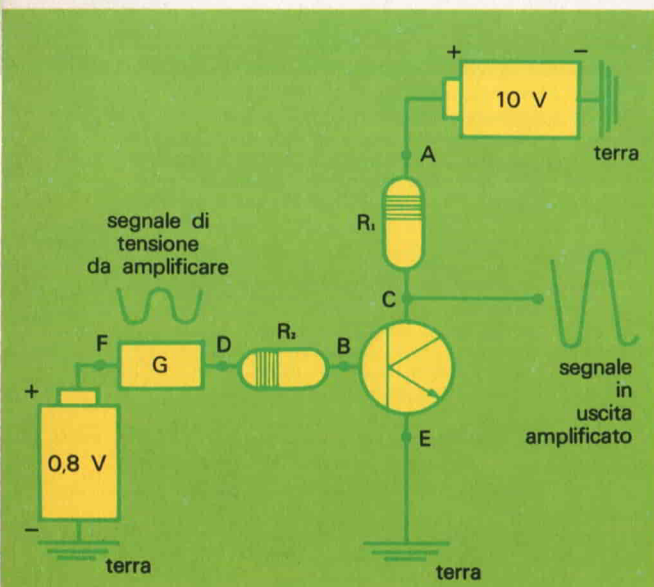
Esistono moltissimi tipi di amplificatori, diversi per impiego e per realizzazione. Può essere interessante osservare che molto spesso a un tipo di amplificatore ne corrisponde un altro con funzione complementare: così, all'amplificatore trasmettente in un trasmettitore radio corrisponde l'amplificatore ricevente nel ricevitore; all'amplificatore che segue il microfono corrisponde l'amplificatore che pilota l'altoparlante; all'amplificatore per la registrazione sul nastro corrisponde l'amplificatore di lettura o riproduzione, e così via. Le caratteristiche essenziali di un amplificatore sono il livello del segnale applicabile all'ingresso e quello del segnale ottenibile all'uscita, unitamente alle frequenze che tali segnali devono possedere per poter essere amplificati.

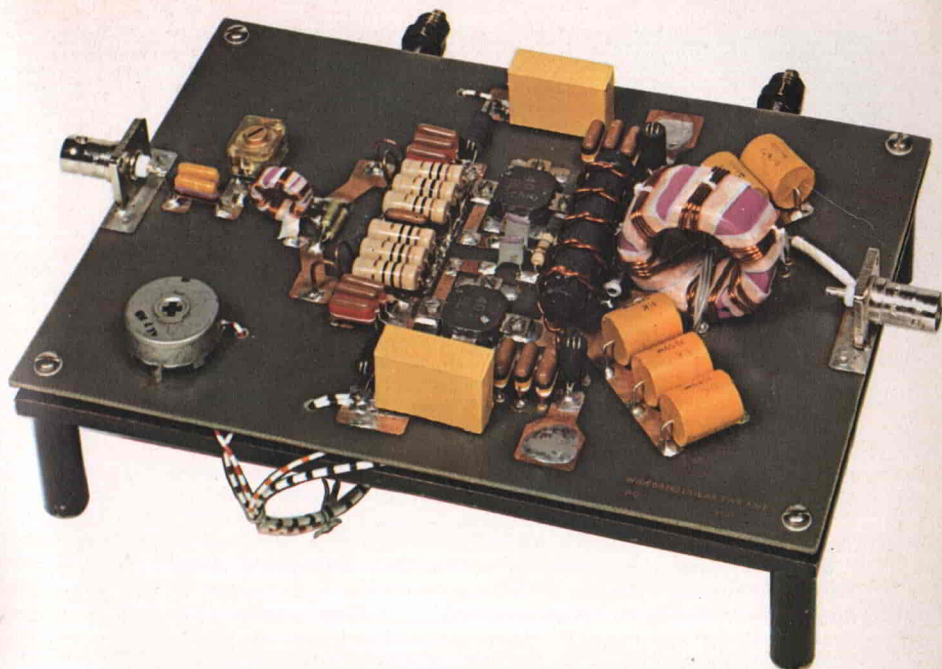
Un moderno amplificatore può consistere di moltissimi transistor, eventualmente *integrati* su un unico circuito integrato.

Qui di seguito illustreremo quella che è la cella fondamentale di un



Nel primo schema: il più semplice amplificatore a transistor, costituito da un solo transistor, due resistenze e due generatori di tensione, rappresentati nella figura da due pile. In questo circuito, che viene descritto in modo completo nel testo, si distinguono in pratica due rami percorsi da correnti diverse: nel ramo di base, pila e resistenza sono state dimensionate in modo da permettere una corrente molto bassa, di circa 20 micro-ampère, indicata dalla freccia sottile. Questa corrente, grazie alle particolari caratteristiche del transistor a semiconduttore (qui sta il punto focale del discorso) appare nel ramo verticale moltiplicata di un fattore 50 (la freccia larga). Questo vuol dire che sulla resistenza R_2 e fra collettore ed emettitore del transistor scorre circa un milliampère. Esaminiamo il secondo schema in basso: l'unica differenza rispetto al primo è l'introduzione, fra F e D, di un generatore di tensione G , la cui tensione erogata è rappresentata dalla curva soprastante. Grazie al fatto che la corrente viene amplificata come detto, anche la tensione subisce un analogo trattamento sicché, se esaminiamo il suo andamento nel punto C (collettore del transistor) ci accorgiamo che il segnale emesso da G appare amplificato secondo il fattore 50. Nella foto a destra: com'è nella realtà un amplificatore molto più complicato di quello descritto, ma fondato sugli stessi principi.





amplificatore e cioè uno *stadio d'amplificazione a un transistor*.

Consideriamo quindi un transistor bipolare al silicio, del tipo n-p-n, con un coefficiente di amplificazione di corrente $\beta = 50$.

Con riferimento all'illustrazione della pagina a fianco, osserviamo che una batteria di 10V, con polo negativo a massa, fornisce una tensione positiva al collettore tramite un resistore di 5000Ω .

Dobbiamo ora ricordare che si otterrà la circolazione di corrente tra collettore ed emettitore solo se si farà circolare una corrente tra base ed emettitore. Come ogni diodo al silicio, la giunzione base-emettitore assorbirà corrente se la tensione, positiva in questo caso, applicata alla base supererà una *tensione di soglia* di 0,7V circa. Supponiamo che in serie alla base vi sia un resistore di 5000Ω . Se ora a questo resistore applichiamo una tensione positiva di 0,8V, scorrerà dal generatore verso la base, attraverso il resistore, una corrente espressa dalla legge di Ohm:

$$\frac{V_F - V_B}{R_i} = \frac{0,8V - 0,7V}{5000\Omega} = 20 \mu A$$

Poiché si è supposto un coefficiente di amplificazione di corrente di 50, la corrente di collettore sarà:

$$50 \times 10 \mu A = 1000 \mu A = 1mA$$



Un amplificatore ad alta fedeltà (Hi-Fi). Questo tipo di amplificatore, la cui struttura costruttiva è molto più complicata di quella dei semplici apparecchi delle pagine precedenti, riesce ad aumentare il volume dei suoni senza distorcerli in alcuna misura, cosicché l'orecchio umano non è in grado di distinguere il suono riprodotto da quello reale.

La tensione di collettore sarà quindi:

$$V_A - R_{LC} = 10V - 5000\Omega \times 0,001A = 5V$$

Il transistor si trova ora pronto ad amplificare e si dice *polarizzato*. Se interrompiamo il circuito tra la batteria di base e il resistore di base otteniamo due terminali tra i quali può essere inserito il segnale da amplificare, che supponiamo esca dal generatore G, dell'illustrazione di pagina 98, e sia portato a questi due terminali tramite due conduttori.

Possiamo ora avere due casi:

- il segnale che proviene dal generatore è positivo e pari, per esempio, a 50mV: tale tensione si somma alla tensione preesistente e ora nella base scorreranno 30μA e nel collettore 1,5mA. La tensione di collettore scenderà a:

$$V_A - R_{LC} = 10V - 5000\Omega \times 0,0015A = 2,5V;$$

- il segnale, sempre di 50mV, è ora negativo e si sottrae alla tensione preesistente; nella base scorreranno ora 10μA, la corrente di collettore sarà di 0,5mA e la tensione di collettore sarà pari a 7,5V.

Ciò che abbiamo visto significa che un segnale di 50mV (positivo o negativo) provoca una variazione della tensione di collettore pari a 2,5V. Questa variazione non è che il segnale d'ingresso amplificato; l'amplificazione di tensione è pari a:

$$\frac{2,5V}{50mV} = \frac{2500mV}{50mV} = 50$$

Il fatto che questo valore coincida con il coefficiente d'amplificazione di corrente del transistor dipende dal fatto che si sono assunti due valori uguali per i resistori di base e di collettore.

L'oscillatore

L'oscillatore è un circuito di vastissima applicazione che, alimentato da una sorgente di corrente continua, fornisce una tensione periodica alternata o pulsante.

L'esempio migliore è costituito dall'orologio meccanico: l'energia accumulata nella molla di carica, tramite il motore, mantiene in oscillazione un pendolo o un bilanciere.

In un oscillatore elettronico troveremo in luogo della molla una batteria, o comunque una sorgente di corrente continua e almeno un transistor che mantiene in oscillazione un *circuito risonante*, equivalente del bilanciere e della sua molla, che determina la frequenza di oscillazione.

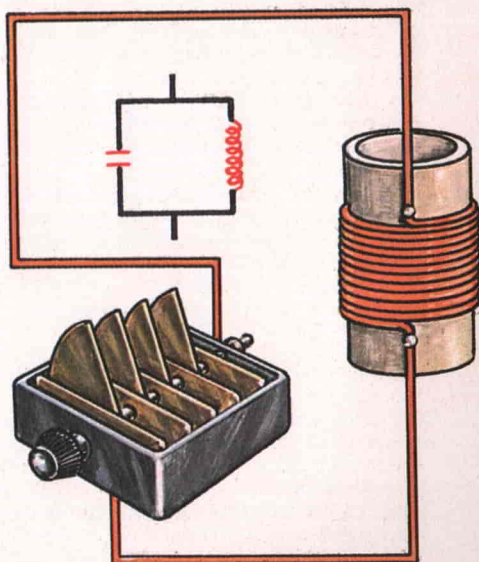
Il circuito risonante tipico è costituito da un induttore e da un condensatore che sono gli equivalenti del bilanciere e della sua molla. Così come l'energia meccanica viene accumulata alternativamente prima nel bilanciere in moto e poi nella sua molla, analogamente l'energia elettrica è accumulata nell'induttore e successivamente nel condensatore.

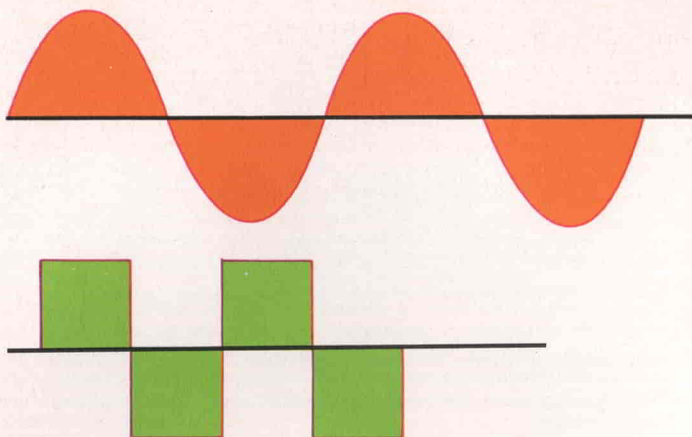
La frequenza dell'oscillazione meccanica è determinata dalle caratteristiche del bilanciere e della molla; la frequenza dell'oscillazione elettrica è in modo del tutto simile determinata dal valore dell'induttanza e della capacità usate.

La frequenza dell'oscillazione elettrica, in Hertz, ovvero in cicli al secondo, è espressa dalla semplice formula:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Disegno e schema di un oscillatore elettrico: un condensatore e un induttore collegati in parallelo fra loro. Nel caso teorico, e purtroppo utopistico, che nel circuito non vi siano resistenze parassite, l'energia elettrica verrebbe continuamente palleggiata, senza assorbimento alcuno, fra il condensatore, che si carica e si scarica, e l'induttore, la cui inerzia alle variazioni di corrente permette di superare i punti morti del ciclo (quando cioè il condensatore è scarico e tenderebbe a restar tale). Il disegno riproduce un condensatore variabile: girando la manopola, varia la capacità (inversamente proporzionale alla frequenza dell'oscillazione del circuito).





Due tipi di onde create dagli oscillatori, illustrati in questo capitolo: l'onda "sinusoidale", in alto, è quella della tensione nella rete domestica; l'altra è un'"onda quadra".

Nell'illustrazione della pagina che precede, è riportato il tipo di oscillatore forse più semplice, essendo numerosissimi i tipi esistenti.

Le caratteristiche principali di un oscillatore sono la sua frequenza d'oscillazione e la forma del segnale generato.

Si possono trovare oscillatori che lavorano a frequenze inferiori a un ciclo al sec. e oscillatori che lavorano a molti GHz, cioè a miliardi di cicli al secondo.

Un esempio ben noto di impiego degli oscillatori si trova nei trasmettitori radio e TV, dove hanno la funzione di determinare la lunghezza d'onda trasmessa. A ogni frequenza corrisponde una ben determinata lunghezza d'onda: per esempio la lunghezza d'onda di 300 m usata nelle trasmissioni radio in MA, e cioè a modulazione d'ampiezza, corrisponde a una frequenza di 1MHz (un milione di cicli al secondo); alla frequenza di 100MHz, usata nelle trasmissioni radio a modulazione di frequenza, corrisponde la lunghezza d'onda di 3 metri.

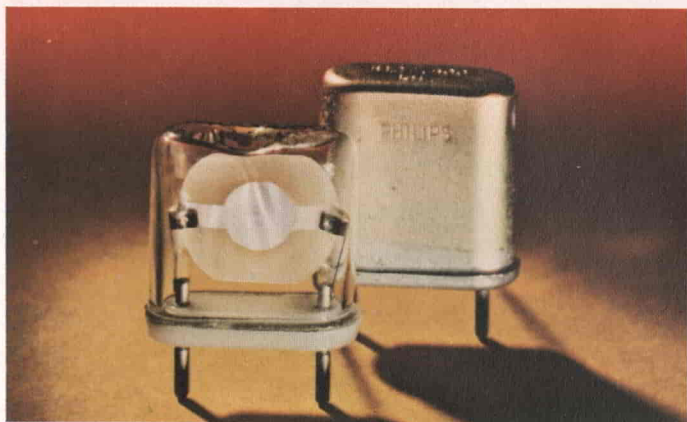
La formula da impiegare è semplice:

$$\text{lunghezza d'onda in metri} = \frac{300}{\text{frequenza in MHz}}$$

Riguardo poi alla forma del segnale prodotto si hanno oscillatori sinusoidali, a onda quadra, a onda triangolare, ecc.

Il modulatore

La voce umana e la musica, come è noto, sono costituite da un insieme di oscillazioni sonore e cioè oscillazioni meccaniche degli organi che le generano e dell'aria su cui si propagano. Le frequenze



Due oscillatori al quarzo. In essi l'oscillazione viene creata dalla compressione istantanea del cristallo piezoelettrico che assume una vibrazione di "periodo" rigorosamente costante.

di tali oscillazioni vanno da qualche decina di Hertz a poco più di 10 000 Hertz. Per poter essere trasmesse a distanza vengono anzitutto trasformate, mediante i microfoni, in oscillazioni "elettriche", vale a dire in segnali (di tensione o corrente) variabili secondo una legge analoga. Nel caso di distanze molto grandi la frequenza di tali oscillazioni è però troppo bassa per una trasmissione efficace ed economica.

Per poter effettuare la trasmissione, tali oscillazioni vengono *sovrapposte* a oscillazioni elettriche di frequenza molto più alta - KHz, MHz o GHz - mediante dei circuiti detti *modulatori*. È grazie a questi circuiti che è possibile ricevere con la radio, sulla frequenza ad esempio di un MHz, la voce e la musica.

Il modulatore è un circuito a due ingressi: uno per il segnale elettrico d'origine, generalmente di bassa frequenza, che si vuole convenientemente innalzare in frequenza, e l'altro ingresso per il segnale che fornisce l'alta frequenza alla quale si vuole portare il segnale d'origine.

Per chiare ragioni l'alta frequenza è detta *frequenza portante*, mentre il segnale d'origine è detto *modulante*. I due tipi principali di modulatori sono quello a *modulazione d'ampiezza* e quello a *modulazione di frequenza*.

Nel primo tipo il segnale modulante è "sovrapposto" alla frequenza portante facendo variare l'ampiezza di questa in proporzione all'ampiezza del segnale modulante. Nel secondo tipo il segnale modulante fa variare, entro certi limiti, la frequenza della portante.

È ovvio che i modulatori sono impiegati nei trasmettitori; nei ricevitori, altri circuiti detti *demodulatori* provvedono a recuperare i segnali originari di bassa frequenza. I termini che abbiamo usato di

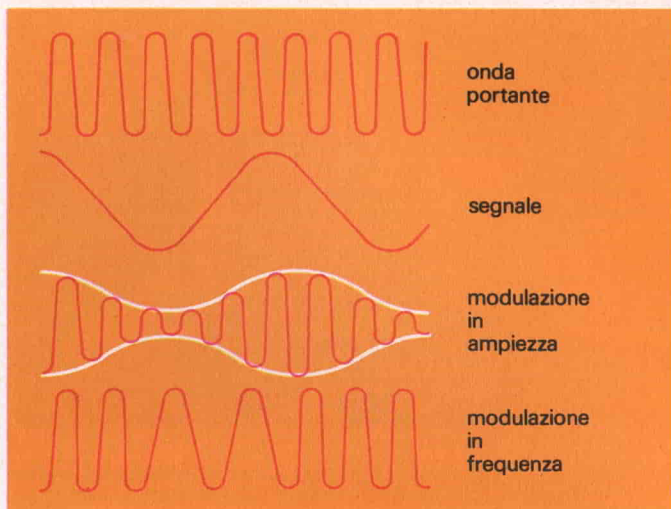


Illustrazione del principio che è alla base delle tecniche di trasmissione via etere. Poiché le onde radio e televisive possono viaggiare per lunghe distanze senza attenuarsi troppo solo se la loro frequenza è sufficientemente elevata, si rende necessaria un'onda portante di piccolissima lunghezza d'onda (che è inversamente proporzionale alla frequenza) sulla quale sovrapporre il segnale a bassa frequenza, tramite la modulazione. Vi sono due strade: dare al segnale il senso di un elemento modificatore dell'ampiezza dell'onda portante (modulazione d'ampiezza), oppure della frequenza dello stesso (modulazione di frequenza).

modulazione d'ampiezza e di modulazione di frequenza sono ben noti a causa della diffusione dei radioricevitori nella vita di tutti i giorni.

Oltre che per le trasmissioni radio, modulatori e demodulatori sono usati in televisione, nella telefonia a grande distanza su cavo e su ponte radio e in tutte le apparecchiature di trasmissione a distanza.

I circuiti digitali

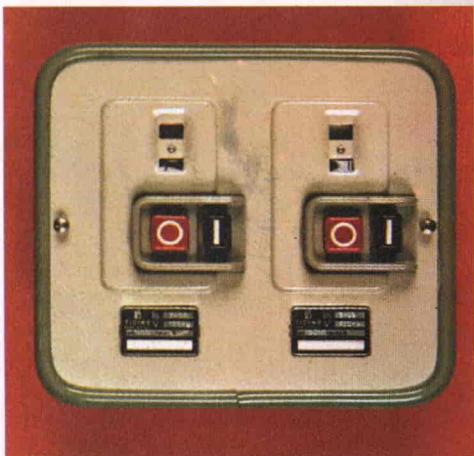
Pensiamo all'impianto di amplificazione utilizzato da un cantante pop: la funzione di questo sistema elettronico è di "riprodurre" il suono ricevuto in ingresso, aumentandone il volume, ma senza modificarne le altre caratteristiche, in modo da fornire un suono più forte ma di identico timbro, tonalità, ecc. Non si può certo dire che il "segnale", in questo caso il suono, sia più "significativo" in alcuni istanti o in altri, se non da un punto di vista artistico né tanto meno è pensabile che lo si percepisca solamente quando raggiunge determinati valori; al contrario, la fedeltà dell'amplificatore è tanto più alta — e quindi la sua qualità tanto migliore — quanto più costante è il trattamento che il segnale in ingresso riceve, indipendentemente dal suo valore o dalla sua frequenza.

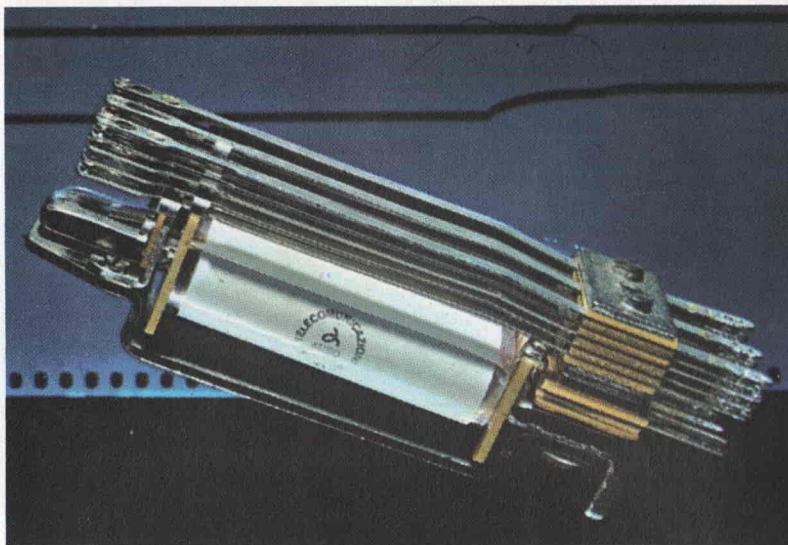


Un amplificatore appartiene, come già sappiamo, alla categoria dei circuiti elettronici analogici (o "lineari") che abbiamo considerato fino a ora; esiste però un'altra vastissima classe di circuiti, quelli detti "di commutazione" o "logici" o "digitali", il cui comportamento è del tutto diverso.

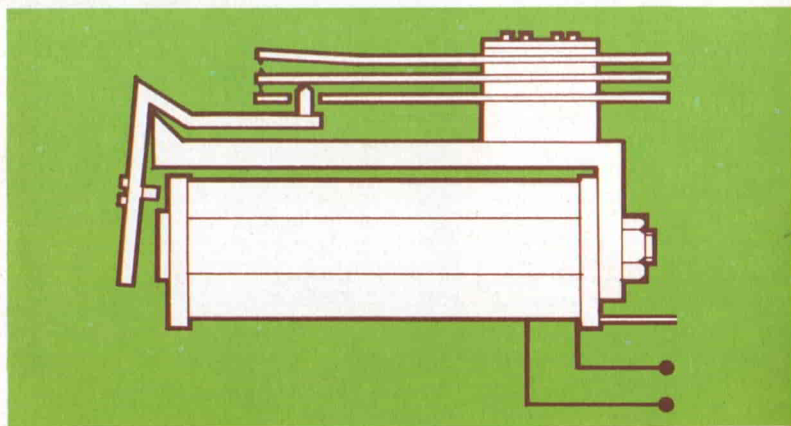
Per farci un'idea del modo di funzionamento di questi circuiti, pensiamo a un'analogia che ci è ben nota: un comune interruttore. Non

Sopra: nel corso di una seduta di incisione, questo strumentista si serve di un monumentale sintetizzatore Tcherepnin, dalle possibilità virtualmente illimitate. Il sistema deve rispondere in modo "analogico" alle sollecitazioni che riceve, deve cioè aumentare di un fattore costante la potenza sonora dello strumento. A destra: il più semplice circuito "digitale" è l'interruttore; esso ha due sole posizioni possibili: "acceso" e "spento".





Un relé (nella fotografia in alto). Nel disegno qui sotto: schema semplificato di esso. Quando nei due terminali in basso a destra viene fatta scorrere una corrente elettrica, essa passa nella bobina che costituisce il corpo principale del dispositivo elettromeccanico e la fa agire come un elettromagnete. La forza magnetica di questo attrae a sé l'ancoretta che si vede a sinistra, la quale spinge a sua volta nel suo movimento una lamella e la mette in contatto elettrico con la lamella superiore; se la corrente elettrica cessa, il contatto si interrompe. A fronte: commutatore telefonico completamente transistorizzato.

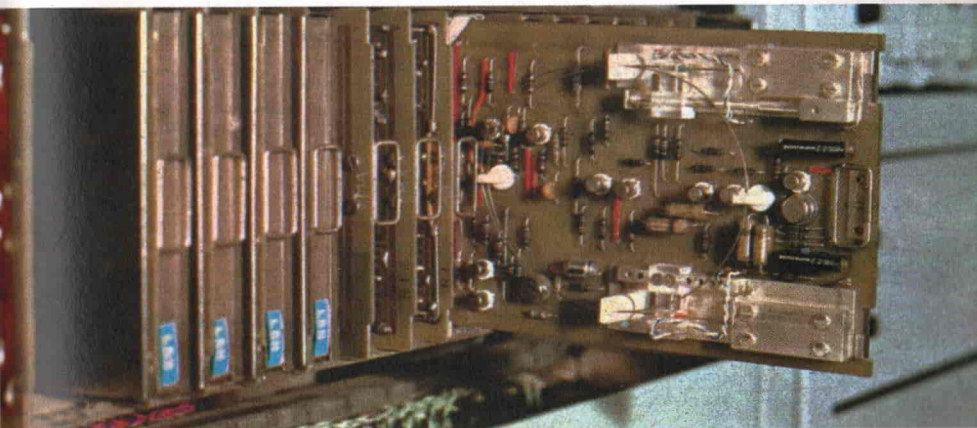


ci interessano certo le sue posizioni "intermedie", ottenute con una variazione continua della manopola, come potrebbe succedere per un rubinetto o per la chiave del gas: l'interruttore ha due sole posizioni, "aperto" e "chiuso", e il suo funzionamento è significativo solo in corrispondenza di tali posizioni. Di fatto, l'interruttore può essere visto come il più semplice "componente logico" esistente: i componenti elettronici centrali dei circuiti digitali si comportano esattamente come interruttori elettronici.

La definizione, che si usa spesso, di "circuiti di commutazione" risale a circuiti non elettronici e a un'applicazione molto particolare, anche se ampiamente diffusa: quella adoperata nelle centrali telefoniche. La definizione di "circuiti logici" si riferisce ai concetti che stanno alla base del *modo* di funzionare dei circuiti, e nasce addirittura da principi di logica matematica e di filosofia della scienza elaborati nel secolo scorso; infine, la denominazione "circuiti digitali" (cioè "numerici") è la più recente e si ricollega al fatto che questi circuiti sono gli elementi costruttivi dei calcolatori numerici.

Consideriamo brevemente le altre due denominazioni, e non solo per una curiosità storica o filologica ma perché sono collegate a cognizioni che rivestono un interesse reale e attuale relativo al funzionamento dei circuiti stessi.

La realizzazione dei "centralini automatici" per la telefonia dipese, a suo tempo, dalla soluzione di un problema non banale: era necessario infatti sostituire, al centralino gestito da un operatore (o, più tradizionalmente, un'operatrice) un sistema capace di identificare automaticamente l'utente chiamato, controllare se il collegamento era possibile e realizzarlo fisicamente "completando", se vogliamo dire così, una via telefonica mediante un insieme di "ponti". La soluzione di tale problema era, appunto, la *centrale di commutazione telefonica*, realizzata tradizionalmente con circuiti "di commutazione" basati su un componente elettromeccanico - il relé. I principi astratti di funzionamento di tali circuiti sono però del tutto indipendenti





dal tipo di componenti e dalla tecnologia adottati: non solo, ma qualsiasi sistema il cui funzionamento possa essere definito in modo corrispondente a tali principi (o, come si suol dire, mediante una "funzione di commutazione") potrà essere realizzato mediante circuiti di commutazione.

La "logica matematica" è una disciplina che supera gli scopi di questa esposizione; i suoi fondatori furono filosofi – a partire da Leibniz fino a Russell, prima che matematici: e fra questi ultimi non si dovrebbero dimenticare i contributi di un tal professor Dodgson che, con lo pseudonimo di Lewis Carroll, creò Alice in un paese delle meraviglie dove la logica matematica compariva spesso travestita in termini fiabeschi e irreali. Il funzionamento delle reti di commutazione può essere descritto in termini di questa logica, basata su variabili che possono assumere due soli valori distinti. Nell' "algebra" di commutazione, infatti, una variabile può essere solamente "vera" o "falsa" – se vogliamo rappresentare i suoi valori con dei simboli numerici, diremo che essa può valere solamente 1 oppure 0. Se consideriamo, per esempio, un insieme di oggetti, non importa come formato, ma identificato da qualche caratteristica comune a tutti gli oggetti, per un qualsiasi oggetto comunque scelto, alla domanda se esso fa o no parte dell'insieme potremo solo rispondere con un "vero" o "falso". Su queste variabili possiamo definire tre operazioni fondamentali:

- la "negazione" o "NOT": se una variabile è vera, la sua negazione non può che essere falsa e viceversa. Se un interruttore *non è aperto*, non può che essere *chiuso*.
- il "prodotto logico" o "AND", che per essere definito ha bisogno di due operandi; il risultato di un'operazione "a AND b" è vero solamente se ambedue gli operandi sono contemporaneamente veri, falso in tutti gli altri casi. Se definiamo un insieme A di tutte le persone che hanno meno di vent'anni e un insieme B di tutte le persone che hanno i capelli rossi, il signor X apparterrà ad ambedue gli insiemi solo se ha meno di vent'anni e i capelli rossi.
- la somma logica o "OR", che richiede anch'essa due operandi; il

risultato di un'operazione "a OR b" è vero se *almeno* uno dei due operandi è vero (il signor X può avere meno di vent'anni *oppure* i capelli rossi *oppure* anche avere ambedue le caratteristiche contemporaneamente).

Dato che queste tre operazioni si applicano a operandi con un numero finito (e molto piccolo) di valori distinti, possiamo anche descriverle concisamente mediante tabelle (le "tabelle della verità") nelle quali per ogni combinazione di valori degli operandi si riporta il valore del risultato: qualcosa di molto simile alla familiare tavola pitagorica.

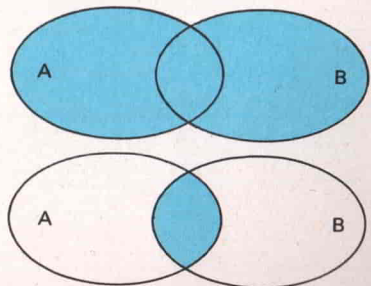
a	b	a AND b
falso	falso	falso
falso	vero	falso
vero	falso	falso
vero	vero	vero

a	b	a OR b
falso	falso	falso
falso	vero	vero
vero	falso	vero
vero	vero	vero

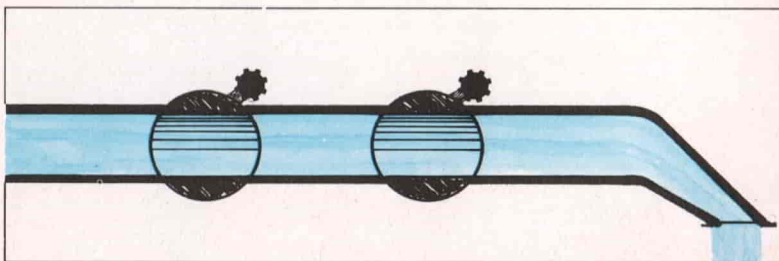
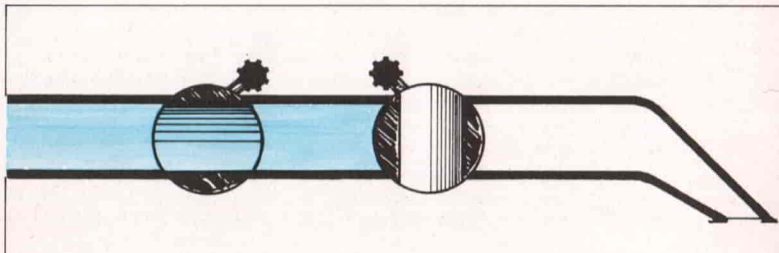
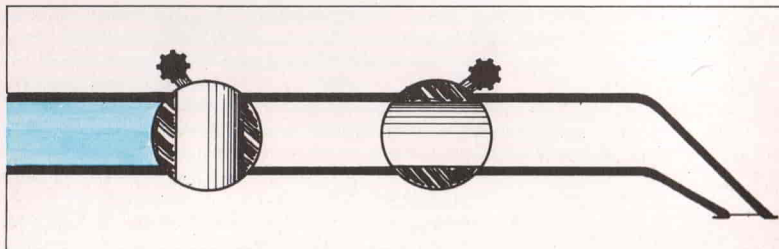
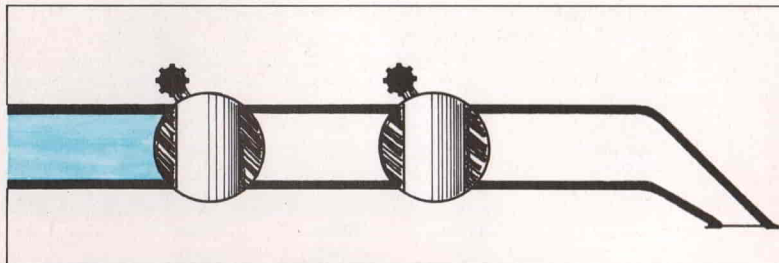
a	NOT a
falso	vero
vero	falso

Ora, qualunque *funzione* di commutazione, per complessa che sia, può essere realizzata utilizzando solo queste tre operazioni e rappresentata mediante un'opportuna "tabella della verità". Il passo successivo è quello di rappresentare una variabile di commutazione con un segnale elettrico cui imponiamo di assumere due soli valori – per esempio, una tensione che può assumere solo i valori estremi di 0 volt e 5 volt – e imponiamo convenzionalmente che questi due valori rappresentino l'uno il "falso" e l'altro il "vero": possiamo di conseguenza immaginare di progettare dei circuiti elettronici che ricevano questi segnali e realizzino le tre operazioni NOT, AND e OR

Pagina a fronte: il racconto di Lewis Carroll "Alice nel paese delle meraviglie" è, a detta di molti, un piccolo trattato di logica matematica camuffato da favola. A destra: sono raffigurate in colore l'unione (in alto) e l'intersezione di due insiemi A e B: unione e intersezione sono due operazioni analoghe rispettivamente all'OR e all'AND descritti nel testo.



Questo condotto ha due rubinetti posti in serie: entrambi quindi devono essere aperti per permettere il passaggio del fluido. Delle quattro configurazioni possibili solo una dunque dà luogo a una risposta positiva (il passaggio del fluido). Questo simula una porta AND, nella quale entrambi gli ingressi devono essere "veri" (i due rubinetti aperti) per avere uscita "vera".



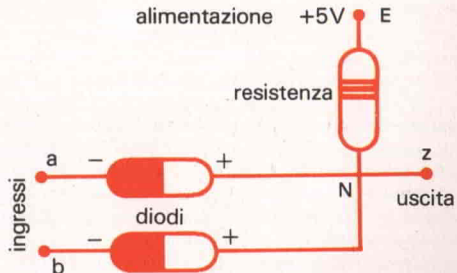
fornendo in uscita un segnale elettrico che rappresenti il risultato. In tutti i casi nei quali il funzionamento di un sistema da progettare può essere descritto mediante l'algebra di commutazione, quanto abbiamo detto prima ci consentirà di costruire il sistema semplicemente collegando fra loro, nel modo opportuno, i circuiti che realizzano le tre operazioni elementari.

Questo risultato è in effetti estremamente importante; il numero di sistemi che possono essere progettati come "sistemi digitali" è molto grande e si può dire che aumenti continuamente. Sarebbe più esatto dire, di fatto, che la disponibilità delle nuove tecnologie, in particolare appunto dei circuiti integrati, spinge a progettare un numero crescente di apparecchiature in termini di sistemi digitali. Il progettista si trova infatti di fronte alla possibilità di compiere il suo progetto non ricorrendo a componenti elementari quali transistor, diodi, resistenze ecc., ma utilizzando dei blocchi già più complessi – come minimo, quelli che corrispondono alle tre operazioni NOT, AND e OR, ma molto spesso anche blocchi corrispondenti a funzioni più avanzate. Fatto ancor più importante, l'uso di questi blocchi gli consente di non fare un progetto veramente "elettrico", valutando punto per punto i valori da assegnare ai vari componenti elementari perché tensioni e correnti assumano determinati livelli: è sufficiente che egli lavori in termini "logici", studiando le interconnessioni da realizzare fra i vari blocchi perché le uscite assumano valore logico "vero" o "falso" secondo le precisazioni imposte dai dati di progetto. Si intuisce che questo porta a una grande semplificazione del compito del progettista – o, se preferiamo, gli permette di realizzare con relativa facilità anche sistemi notevolmente complessi, che molto più difficilmente avrebbe risolto se avesse dovuto partire dai componenti elettronici elementari.

Non ci interessa qui vedere nei dettagli le varie tecnologie con cui vengono realizzati i circuiti corrispondenti ai tre operatori logici – circuiti che vengono spesso chiamati "porte logiche" vediamo solo, molto brevemente, come si utilizzano componenti elettronici quali diodi e transistor per realizzare i circuiti stessi.

In sostanza, ci interessa disporre di componenti capaci di comportarsi come interruttori: capaci di assumere cioè due posizioni, due "stati" ben distinti, e facilmente identificabili, ai quali si possano far corrispondere i due valori logici vero e falso, e capaci inoltre di passare dall'una all'altra posizione con la massima velocità possibile.

Schema elettrico della più semplice porta AND a due ingressi: essa è costituita da due diodi, una resistenza e un'alimentazione a 5V, e il suo funzionamento è descritto nel testo. L'uscita è a 5V solo se entrambi gli ingressi vengono portati a tale tensione.

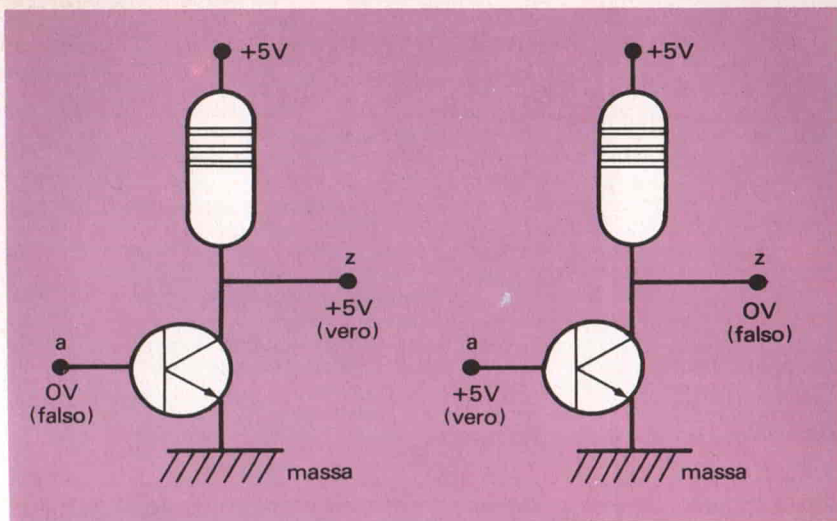


Pensiamo dapprima ai diodi; come si è detto parlando di componenti, se ai capi di un diodo si applica una tensione "inversa" rispetto alla giunzione, il diodo stesso risulta "bloccato", cioè non permette passaggio di corrente, mentre se la tensione è "diretta" la corrente può passare. Consideriamo ora il circuito di pagina 111: "a" e "b" sono gli "ingressi" del circuito, ai quali possiamo applicare dei valori di tensione che rappresentano i valori logici "vero" e "falso": per esempio, una tensione positiva – diciamo, 5 volt – per rappresentare il "vero", una tensione nulla per rappresentare il "falso". "E" indica a sua volta una tensione *positiva, fissa* in qualsiasi condizione di funzionamento, di 5 volt; infine, z è l'"uscita". I diodi sono disposti in modo da essere "bloccati" se la tensione applicata, rispettivamente, in a o in b è superiore a quella che si ha in N, mentre "conducono" nella situazione opposta. Immaginiamo ora di applicare ai due ingressi due variabili "false" – cioè due tensioni pari a zero: ambedue i diodi conducono (il punto N, nonostante la presenza della resistenza R, che provoca su di essa una caduta di tensione [legge di Ohm], ha inizialmente tensione maggiore di zero) e, poiché un diodo che conduce non provoca una sensibile "caduta di tensione", anche nel punto N si riporta una tensione pari a zero come quella in a e in b. All'uscita z troviamo quindi un valore "falso". Supponiamo ora che la variabile a sia "vera" (tensione 5 volt) e la variabile b "falsa" (0 volt); come prima, il diodo b conduce, e questo da solo implica che nel punto N si riporta la tensione di 0 volt: in definitiva, l'uscita z è ancora "falsa". Finalmente, quando ambedue gli ingressi sono "veri", i diodi saranno ambedue "bloccati" e, non passando corrente nella resistenza, i punti E e N saranno alla stessa tensione (5 volt, cioè z "vera").

L'uscita z in definitiva sarà vera se e solo se ambedue gli ingressi saranno contemporaneamente veri. Ricordiamo che questa descrizione corrisponde a quella dell'operatore AND: abbiamo cioè realizzato un circuito che – quando le variabili logiche siano rappresentate da segnali di tensione, secondo un'opportuna convenzione – realizza l'operatore AND.

In modo simile, utilizzando diodi e resistenze, possiamo realizzare un OR; quanto al terzo operatore, il NOT, esso può venir costruito mediante l'impiego di un transistor, come vediamo nella illustrazione della pagina accanto.

Abbiamo un transistor bipolare alla cui "base" presentiamo una tensione che costituisce il segnale d'ingresso a: il collettore z è il punto in cui rileviamo la tensione d'uscita. Parlando di circuiti analogici, particolarmente di amplificatori, il transistor era sempre stato visto come un componente "lineare", un componente cioè che riproduceva fedelmente alla propria uscita – amplificandolo – il segnale che gli veniva presentato in ingresso: la corrente di collettore poteva essere ricavata da quella di base semplicemente moltiplicando quest'ultima per una costante. Di fatto, però, anche il transistor può essere utilizzato come un interruttore, grazie al fatto che è essenzialmente costituito da due giunzioni. Se alla giunzione base-emettitore si applica una tensione inversa rispetto al senso della giunzione, quest'ultima impedisce il passaggio di corrente e il transistor è "bloccato" (e vien detto in *interdizione*); se, al contrario, alla giun-



Porta NOT costituita da un transistor npn: quando in "a" il segnale è alto (5V) il transistor è in saturazione e all'uscita "z" abbiamo in pratica un corto circuito verso massa (0V). Se l'ingresso è basso (0V), l'uscita è viceversa alta (5V) perché il transistor è spento e sulla resistenza non passa corrente.

zione stessa si applica una tensione diretta, il transistor "conduce" – c'è un passaggio di corrente – e se la corrente applicata alla base è sufficientemente alta il transistor si porta in un'altra condizione estrema, detta di *saturazione*, nella quale la tensione che si rileva fra collettore ed emettitore è trascurabile. In sostanza, il transistor diventa un vero e proprio "interruttore" che viene "aperto" o "chiuso" dalla tensione imposta fra base ed emettitore.

Tornando al nostro circuito, quanto abbiamo detto finora ci porta a concludere che, se in a applichiamo una tensione di zero volt, il transistor è bloccato e la tensione di 5 volt applicata in D si riporta praticamente senza caduta (data l'assenza di corrente) al terminale di uscita z. Al contrario, se in a si impone una tensione abbastanza alta, il transistor "satura" e, per quello che abbiamo detto, la tensione in z è praticamente uguale a quella in E, che è zero dato il collegamento "a massa". Se associamo ai valori della tensione i valori logici "vero" e "falso", come prima, abbiamo un'uscita "vera" ogni volta che l'ingresso è "falso" e viceversa – abbiamo cioè realizzato il circuito corrispondente all'operatore NOT.

Gli schemi di "porte logiche" presentati ora sono i più semplici e i più "antichi" fra quelli basati su componenti elettronici; di fatto, e tanto più con l'introduzione dei circuiti integrati, sono stati progettati numerosi altri schemi, in genere più complessi, comunque sempre caratterizzati dall'uso prevalente del transistor rispetto a qua-

lunque altro componente (o addirittura, nel caso delle tecnologie MOS, dall'uso di *solì* transistor MOS-FET). Possiamo chiederci i motivi di questa proliferazione, meglio ancora quali parametri caratterizzino un circuito digitale, poiché il suo comportamento è dettato dalle regole di un'algebra indipendente addirittura dalla tecnologia, dai materiali con cui il circuito è realizzato.

Ebbene, uno dei parametri fondamentali, se non addirittura il parametro più importante, è il *tempo*: una "porta logica", è caratterizzata dal cosiddetto *ritardo di propagazione*, cioè l'intervallo di tempo che trascorre fra l'istante in cui si applicano le variabili agli ingressi del circuito e l'istante in cui il circuito stesso presenta alle proprie uscite il risultato dell'operazione che esso svolge. Il progettista deve conoscere questo ritardo per evitare – per esempio – che un circuito richieda a un altro dei risultati che quest'ultimo non ha ancora prodotto, e anche per calcolare la velocità complessiva di funzionamento del sistema che egli si propone di realizzare. Oggi, ritardi di propagazione dell'ordine del microsecondo sono considerati già grandi (e un microsecondo è un milionesimo di secondo) mentre sono numerosissime porte logiche con ritardi di alcuni nanosecondi (un nanosecondo è un *miliardesimo* di secondo).

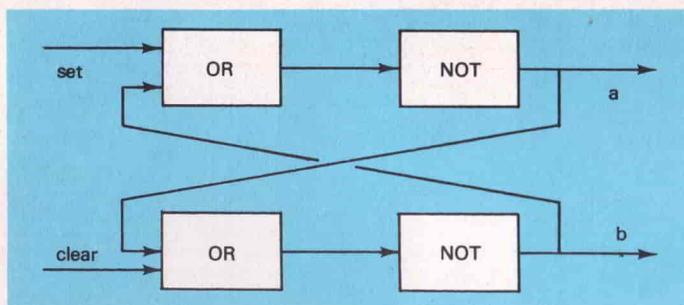
La velocità di un circuito digitale si "paga" in molti modi – e per questo motivo non sempre si sceglierà lo schema più veloce, né tutti gli sviluppi tecnologici tendono a migliorare solo questo particolare parametro. Una delle "monete di scambio" da pagare per la velocità del circuito è la potenza elettrica che esso richiede: esistono soluzioni, nella tecnologia MOS, che consentono consumi estremamente ridotti – praticamente nulli "a riposo", quando cioè al circuito non si richiedono operazioni – ma che allo stesso tempo comportano ritardi relativamente elevati, mentre le strutture più veloci (tutte in tecnologia bipolare) hanno anche consumi più alti. Sarà la particolare applicazione a indicare il "compromesso" più accettabile e quindi lo schema che conviene scegliere – per un orologio da polso non avremo grandi esigenze di velocità (confrontiamole con la velocità propria dei circuiti, anche di quelli più lenti!) mentre ci interessa molto che il consumo sia basso; al contrario, per il sistema di controllo di un impianto nucleare la velocità di risposta è essenziale e siamo disposti a pagarla con un consumo di potenza anche elevato.

I componenti di memoria e i contatori

Parlando di elettromagnetismo, abbiamo sottolineato la possibilità di realizzare con materiali magnetici dei componenti di "memoria", cioè componenti capaci di registrare in modo permanente un evento, un fenomeno. In quel caso, la funzione di memoria era dovuta alle proprietà intrinseche dei materiali; ora, è possibile progettare circuiti logici che posseggono anch'essi capacità di memoria, questa volta però non in conseguenza di caratteristiche fisiche dei materiali

Un tipo "classico" di memoria, l'archivio. Da qui si vede l'importanza della memorizzazione elettronica mediante la quale grandi quantità di informazioni vengono raccolte in piccolissimo spazio, non solo, ma se ne può disporre con velocità impensabili e persino a distanza, quando se ne presenta il bisogno.

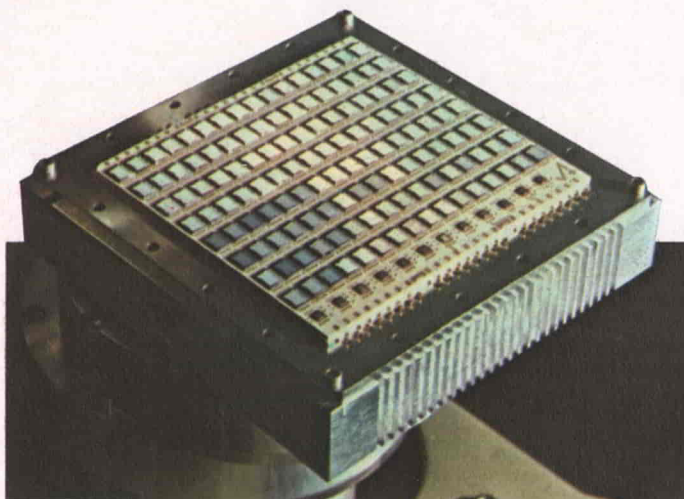




ma come conseguenza di una struttura *logica*.

Nel caso piú elementare, un circuito di memoria deve ritenere solamente un valore logico, "vero" o "falso": piú esattamente, deve consentire di *scrivere* un valore logico arbitrario e di *rileggerlo* poi in un istante qualsiasi. Il valore scritto rimane *memorizzato* per un tempo comunque lungo (almeno finché il circuito resta collegato alla batteria di alimentazione – contrariamente alle memorie magnetiche, quelle elettroniche richiedono per la maggior parte di essere collegate a una sorgente di energia elettrica per tutto il tempo per cui si desidera mantenere la registrazione).

In pratica, scrivere in un tale circuito significa portare il circuito stesso in una "condizione", uno "*stato*" nel quale il circuito stesso rimane, senza modifiche, fino alla successiva operazione di scrittura. Per questo motivo, il circuito elementare di memoria viene chiamato "bistabile", cioè "circuito che può essere portato e mantenuto

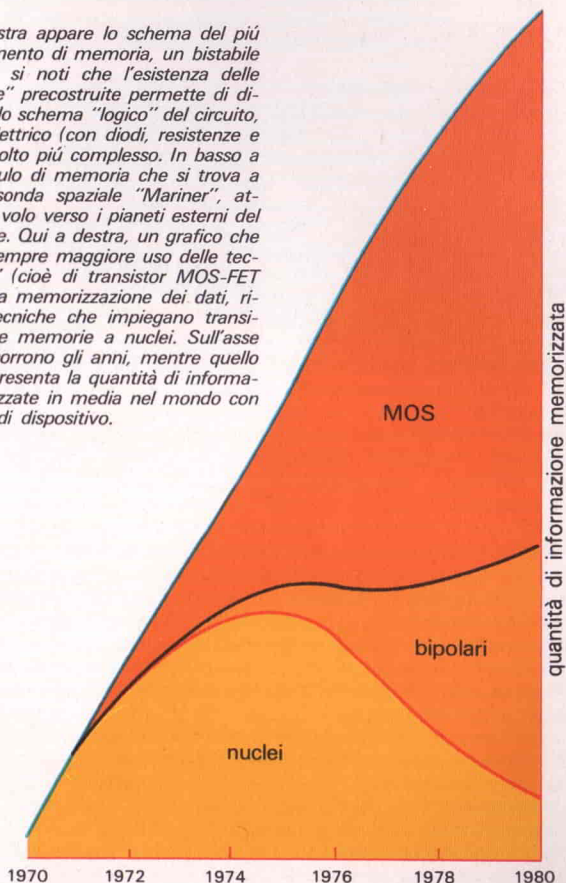


stabilmente in uno fra due diversi stati" (vero e falso, appunto) – o, alternativamente, col nome più pittoresco di "flip-flop".

Dimostreremo ora come veramente le "porte logiche" ci permettano di realizzare qualsiasi circuito digitale, e lo faremo proprio studiando un bistabile, quello illustrato dallo schema logico della pagina accanto; si noti bene che per far questo non sarà necessario esaminare nei dettagli lo schema elettrico (diodi, transistor, correnti, tensioni, ecc.), ma basterà conoscere il comportamento delle porte logiche di cui è composto; in altre parole sarà più necessario saper usare la logica matematica che non l'elettronica.

"Set" e "Clear" sono gli *ingressi* del circuito, mentre A e B ne sono le *uscite*; i collegamenti da A e B, rispettivamente, agli ingressi delle due porte OR consentono di riportare le tensioni (nel tipico circuito

In alto a sinistra appare lo schema del più semplice elemento di memoria, un bistabile o "flip-flop"; si noti che l'esistenza delle "porte logiche" precostruite permette di disegnare solo lo schema "logico" del circuito, non quello elettrico (con diodi, resistenze e transistor), molto più complesso. In basso a sinistra: modulo di memoria che si trova a bordo della sonda spaziale "Mariner", attualmente in volo verso i pianeti esterni del sistema solare. Qui a destra, un grafico che evidenzia il sempre maggiore uso delle tecniche "MOS" (cioè di transistor MOS-FET integrati) nella memorizzazione dei dati, rispetto alle tecniche che impiegano transistor bipolari e memorie a nuclei. Sull'asse orizzontale scorrono gli anni, mentre quello verticale rappresenta la quantità di informazioni memorizzate in media nel mondo con ciascun tipo di dispositivo.



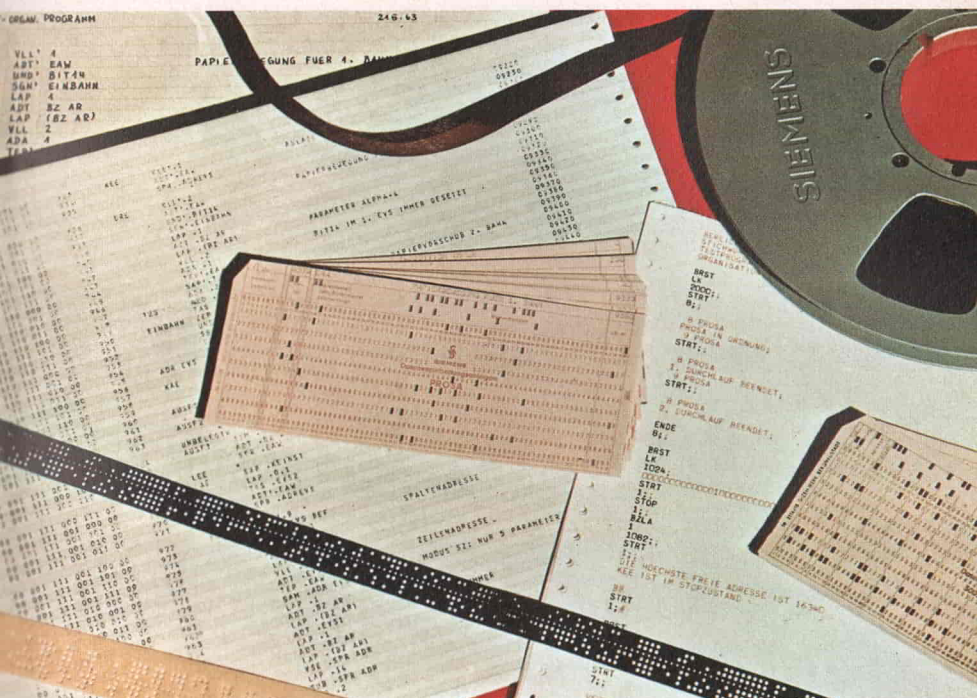
elettronico dove i segnali sono delle tensioni) rilevabili appunto in A e in B. Supponiamo che in un dato istante "Set" e "Clear" siano ambedue "Falsi", che B sia "falso" e A sia "vero", e consideriamo la seguente successione di passi:

- istante 1: a Set si applica un valore logico "vero". Il risultato in E è ora dato da "vero OR falso", e diventa quindi "vero" (precedentemente era "falso OR falso" cioè "falso").
- istante 2: dopo un tempo dovuto al ritardo di propagazione della porta NOT, il valore logico di A diventa "falso".
- istante 3: il valore D diventa "falso OR falso", cioè falso (precedentemente era "vero OR falso", cioè vero).
- istante 4: il valore logico in B diventa *vero*. D'ora in avanti, finché non si cambiano gli ingressi, le uscite rimarranno ai valori che hanno assunto: non solo, ma anche riportando l'ingresso Set al valore falso, le uscite rimarranno immutate.

Possiamo cioè pensare che il valore logico "vero", presentato all'ingresso Set, venga memorizzato e riportato all'uscita B (l'uscita A ne è la negazione); per scrivere "falso" all'uscita B, basta applicare un valore logico vero all'ingresso Clear (si può verificare questa asserzione seguendo passo per passo il comportamento del circuito, analogamente a quanto si è appena fatto).

Quanto all'operazione di lettura, poi, essa si ridurrà semplicemente a "rilevare" il valore del segnale presente all'uscita B (o, il che è indifferente e coinvolge una semplice convenzione, all'uscita A). Bistabili e porte logiche vengono utilizzati a loro volta per costruire circuiti più complessi; molti di questi sono di tipo particolare, collegati a una precisa applicazione fortemente caratterizzata, ma in molti altri casi si può ricorrere a schemi di tipo generale. Nello stesso modo, se pensiamo alla costruzione di un autoveicolo, accanto a modelli progettati "ex novo" in ogni loro parte abbiamo un numero (in verità molto più grande) di altri modelli che utilizzano parti prefabbricate anche relativamente complesse, come per esempio il carburatore, e altri modelli che utilizzano interi blocchi già costruiti — addirittura il blocco motore — completandoli con parti "specializzate" che a loro volta risultano altrettanto più semplici.

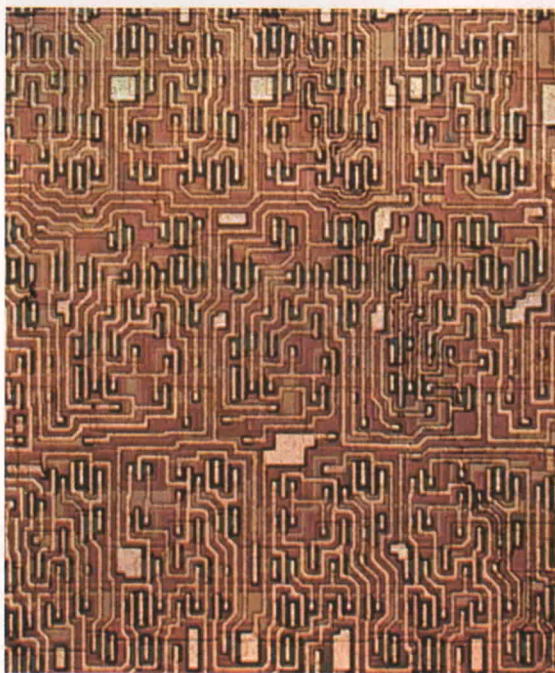
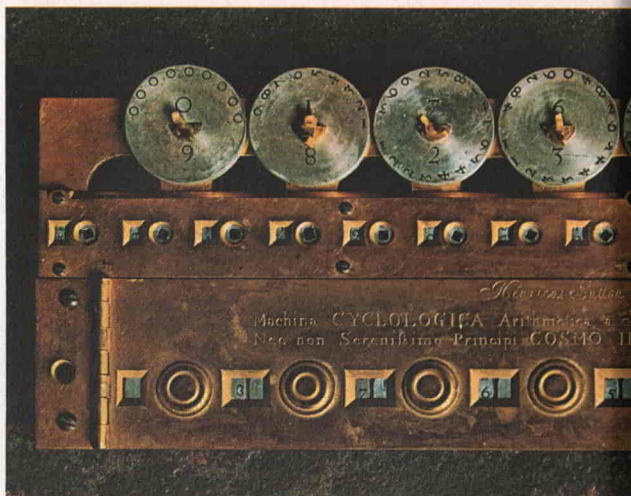
Così, accanto ai semplici bistabili i produttori di componenti elettronici forniscono (sotto forma di circuiti integrati) dei "registri", cioè dei gruppi di bistabili nei quali si può memorizzare non una sola variabile logica, ma un insieme di variabili. Circuiti altrettanto importanti e di grande diffusione sono poi i "contatori", realizzati anch'essi mediante bistabili e porte logiche interconnessi fra loro (con strutture, fra l'altro, molto semplici): si tratta di macchine il cui comportamento "esterno" è del tutto analogo a quello dei consueti contatori meccanici o elettromeccanici: sono, cioè, dei "meccanismi" (nome evidentemente inappropriato per una realizzazione elettronica) predisposti in modo da contare degli "eventi": tale azione presuppone che i dispositivi stessi siano in grado, fra un evento e l'altro, di "ricordare" il precedente valore del conteggio. In un contatore meccanico costruito con ruote che possono assumere ognuna dieci posizioni distinte, la memoria è fornita dalla posizione delle

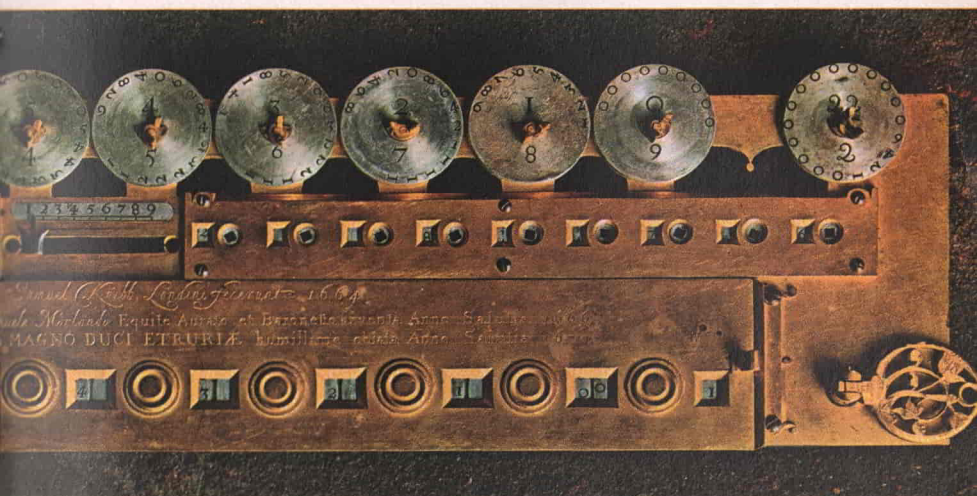


Un "collage" vagamente artistico di alcuni fra i vari mezzi di memorizzazione e registrazione dei dati che trovano impiego oggi: nastri magnetici, schede e nastri perforati, stampati emessi direttamente dall'unità di uscita di un elaboratore, contenenti informazioni richieste o processate dall'elaboratore stesso.

varie ruote; nel contatore elettronico, invece, la memoria sarà fornita dalla condizione in cui vengono portati i vari bistabili. Quanto abbiamo detto ora presuppone, in effetti, un'azione che abbiamo lasciato implicita: quella di associare la combinazione dei valori logici memorizzati nei vari bistabili al numero di eventi contati. Una tale associazione costituisce un "codice": in realtà, anche nel contatore meccanico è presente una forma di codice, che associa a ognuna delle posizioni della singola ruota una (e una sola) cifra decimale. Ma, per il nostro contatore fatto a bistabili con due condizioni distinte, per una cifra decimale dovremo piuttosto utilizzare numerosi bistabili. Possiamo anticipare che una cifra decimale richiede un minimo di quattro variabili logiche per la propria codifica, e che di conseguenza un contatore con N cifre decimali farà uso di almeno $4 \times N$ elementi-base di memoria. Nella tavola riportiamo uno dei codici più semplici e più comuni, chiamato solitamente

Si fa risalire la prima idea di una macchina "per contare" a un astronomo tedesco della fine del Cinquecento, Wilhelm Schickard, che ne parla in una lettera inviata al più illustre contemporaneo Keplero; tuttavia la prima realizzazione pratica di un congegno del genere vede la luce soltanto mezzo secolo dopo con Pascal, nel 1642. Non di molto posteriore è questa "macchina ciclogica aritmetica" concepita da Samuel Morland e costruita a Londra nel 1664 da H. Sutton e S. Knibb. Sono visibili i ruotismi che consentono di rappresentare i numeri secondo le potenze di dieci (unità, decine, centinaia, etc.). Come è evidente, queste prime realizzazioni erano a carattere meccanico, e invero lo furono anche le successive fino a tempi molto recenti, quando l'avvento delle tecniche elettroniche ne stimolò un progresso rapidissimo che dura tuttora. Sotto vediamo quello che si può considerare, nonostante tutte le apparenze, un lontano discendente del contatore di Morland: infatti questo circuito integrato, di cui si vede solo una parte molto ingrandita, esplica le funzioni di un contatore, anche se il suo linguaggio è binario, non decimale.



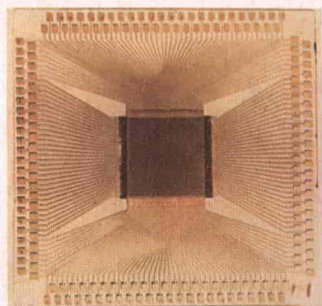


“BCD” (da *Binary Coded Decimal* = Decimale Codificato Binario): come si vede, riferendosi a quattro variabili logiche preassegnate, ogni cifra decimale è rappresentata da una distinta combinazione di valori di tali variabili.

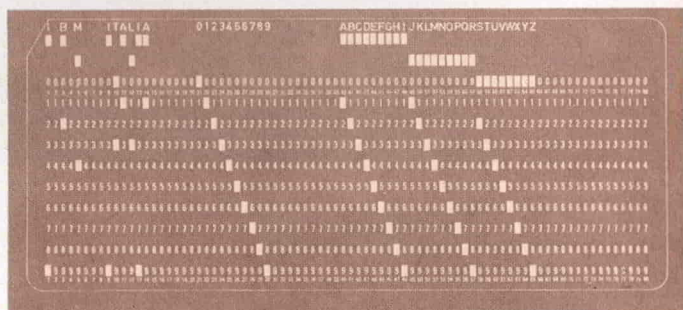
v_1	v_2	v_3	v_4	cifra decimale
F	F	F	F	0
F	F	F	V	1
F	F	V	F	2
F	F	V	V	3
F	V	F	F	4
F	V	F	V	5
F	V	V	F	6
F	V	V	V	7
V	F	F	F	8
V	F	F	V	9

Codifica e decodifica

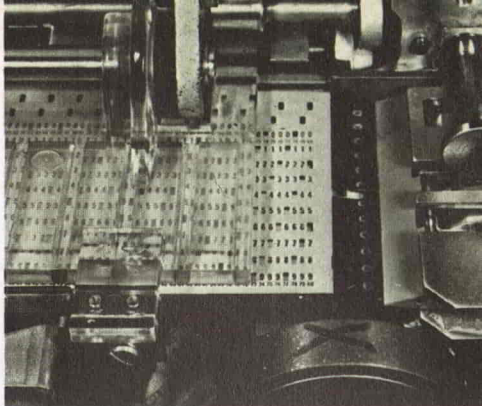
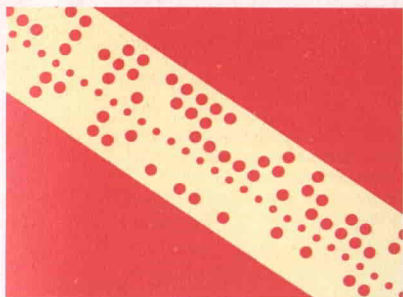
Abbiamo accennato poco sopra che una combinazione di valori logici può rappresentare un “codice” – per esempio un codice numerico, nel quale ogni combinazione di valori rappresenti una cifra decimale, oppure un codice alfabetico o ancora uno “alfanumerico”, corrispondente cioè all’insieme delle lettere dell’alfabeto e delle cifre decimali. Quest’ultimo caso corrisponde a una grandissima classe di applicazioni: tutte quelle nelle quali una macchina deve riconoscere, elaborare o trasmettere l’informazione fornita dalla tastiera di una telescrivente o di un semplice registratore di cassa, da un “lettore ottico” come gli esemplari che leggono automaticamente i codici



A sinistra: una memoria di sola lettura, costruita sotto forma di integrato. I dati in essa immagazzinati sono permanenti, cioè non si possono cancellare. Sotto, al centro: una scheda perforata. Dalla posizione delle perforazioni l'elaboratore comprende il messaggio codificato. In basso: un modulo scritto da un operatore umano in linguaggio "FORTRAN", uno dei codici più usati per parlare con i computer.



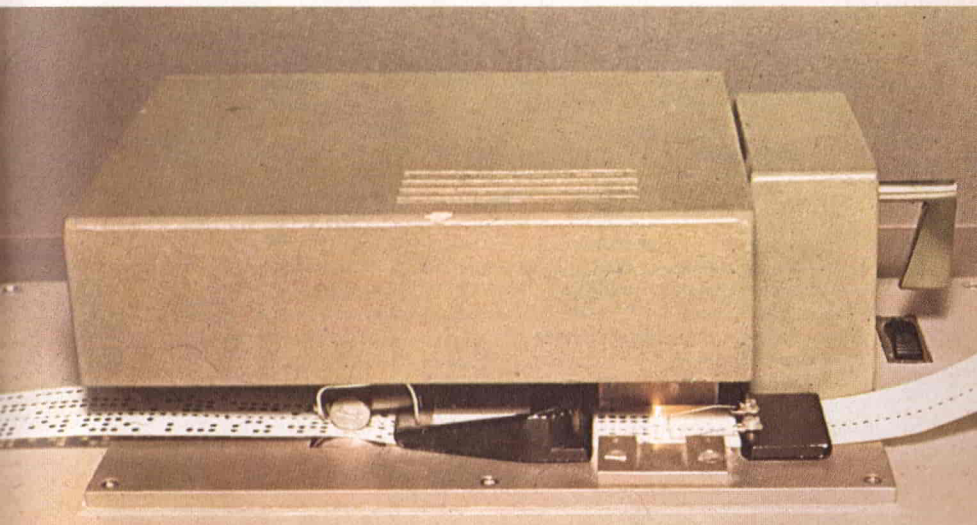
IBM		STATEMENT FORTRAN	
Programme No.	SELECT HIGHEST NUMBER	Iterations	Date 29/12/73
Programmer	A.M. OTHER	Page 1 of 1	
1	MASTER SELECT HIGHEST NUMBER		
2	TO PRINT THE LARGEST OF NINE POSITIVE NUMBERS READ IN ONE BY ONE		
3	PERIPHERAL (GUMMIBAND) (2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2)		
4	FORMAT (G, 6, 6)		
5	DO 100 J=1, 9		
6	READ (1, 100) X		
7	IF (X, 0) GO TO 102		
8	WRITE (2, 101) X		
9	CONTINUE		
10	FORMAT (G, 10, 10)		
11	WRITE (2, 102) X		
12	STOP		
13	END		
14	FINISH		



degli assegni. Si tratta sempre di casi nei quali l'uomo fornisce un'informazione che deve essere trasformata in opportuni segnali (solitamente elettrici, ma non inevitabilmente tali) che possano poi essere elaborati oppure trasmessi, anche a grande distanza, in forma *digitale*.

Quanto appena detto lascia immaginare il bisogno di circuiti "*codificatori*", circuiti cioè che hanno tanti ingressi quanti sono i diversi

Sopra a sinistra: un nastro perforato. Ogni linea verticale di perforazioni corrisponde a una quantità alfanumerica, cioè a una lettera dell'alfabeto, a un numero da zero a nove oppure a un segno di operazione o di punteggiatura. A destra: lettura di schede perforate: la testina di lettura vede scorrere sotto di sé le linee di perforazione e ne riconosce le diverse combinazioni, trasformandole in impulsi elettrici per l'elaboratore. Sotto: una perforatrice di nastri.



simboli che si vogliono rappresentare (ingressi collegati ad altrettanti interruttori) e tante uscite quante sono le variabili logiche necessarie per il nostro codice. Così, la tastiera del registratore di cassa non è altro che un insieme di interruttori che vengono chiusi manualmente, premendo i tasti: il suo codificatore "legge", per così dire, la posizione degli interruttori, riconoscendo dalla posizione di ogni interruttore chiuso il corrispondente simbolo, e presenta alle proprie uscite il codice logico associato al simbolo stesso.

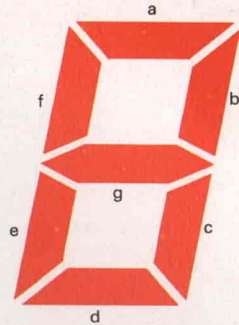
Inversamente, possiamo pensare a circuiti *decodificatori*: capaci cioè di interpretare un codice presentato ai propri ingressi e di tradurlo in un segnale intelleggibile per l'unità operativa che ne fa uso. Circuiti decodificatori sono usati in moltissime applicazioni, per la maggior parte "interne" ad apparati digitali ma anche in altre in un certo senso "visibili": basti pensare a un circuito che illumini i diversi indicatori di piano su un moderno ascensore (evidentemente, un solo indicatore può di volta in volta essere illuminato).

In pratica, "codificatori" e "decodificatori" non fanno altro che tradurre da un codice a un altro: possiamo pensarli inseriti nella più vasta classe dei "transcodificatori", cioè dei "traduttori di codice". Per renderci conto dell'importanza che i circuiti digitali assumono nella nostra vita quotidiana, possono costituire un ottimo esempio gli orologi elettronici digitali che hanno invaso il mercato mondiale. Nella sua versione più semplice, un orologio di questo tipo è costituito da:

- un "*oscillatore*" che genera una sequenza di segnali - solitamente impulsi di tensione - separati l'uno dall'altro da un intervallo di tempo costante ("periodo")
- un *contatore*, che conta gli impulsi generati dall'oscillatore e fornisce l'informazione relativa a secondi, minuti e ore: ogni cifra decimale è codificata - per esempio, nel codice BCD che abbiamo già illustrato
- un *transcodificatore* che trasforma l'insieme di segnali logici usati dal codice decimale in un altro insieme di segnali logici, richiesti - secondo un codice diverso - dalla:
- "*unità di uscita*", cioè dal dispositivo che ci presenta il risultato di tutte le operazioni precedenti - in definitiva, appunto l'ora presente. Ebbene, in tutti gli orologi digitali l'unità di uscita è costituita da dispositivi a semiconduttori - "diodi emettitori di luce" (LED) oppure "cristalli liquidi" (LCD) - che diventano luminosi o cambiano altre caratteristiche di visibilità quando vi si applichi un opportuno segnale elettrico. Tipicamente, tali dispositivi sono costruiti come sbarrette rettangolari, e disposti secondo uno schema di sette sbarrette o "segmenti" corrispondente alla cifra 8: inviando segnali elettrici a segmenti opportunamente scelti, si possono rendere visibili tutte le cifre decimali. La combinazione delle sbarrette visibili costituisce anch'essa un tipo di codice, il "codice di uscita" del nostro orologio.

I due codici - quello BCD di partenza e quello "a sette segmenti" cui si vuole arrivare mediante la transcodifica - possono essere rappresentati su una tabella della verità (applicare un segnale vero

Disegno dello schema di un generatore di cifre decimali a LED, internazionalmente adottato. Ognuna delle sette sbarrette, identificate con le prime sette lettere dell'alfabeto, è un diodo emettitore di luce sagomato. Un sistema di codificazione come quello suggerito dalla tabella viene impiegato in una piccola unità "intelligente" per tradurre gli impulsi elettrici in numeri immediatamente leggibili. Un esempio: se vien dato l'ordine di indicare la cifra 7 si illumineranno i LED "a", "b" e "c"; se la cifra è 1, saranno sufficienti i LED "b" e "c".

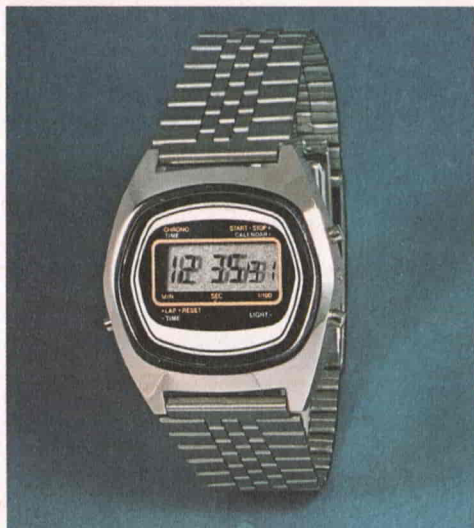


Codice BCD				Cifra decimale	Codice "LED"						
V_1	V_2	V_3	V_4		a	b	c	d	e	f	g
F	F	F	F	0	V	V	V	V	V	V	F
F	F	F	V	1	F	V	V	F	F	F	F
F	F	V	F	2	V	V	F	V	V	F	V
F	F	V	V	3	V	V	V	V	F	F	V
F	V	F	F	4	F	V	V	F	F	V	V
F	V	F	V	5	V	F	V	V	F	V	V
F	V	V	F	6	V	F	V	V	V	V	V
F	V	V	V	7	V	V	V	F	F	F	F
V	F	F	F	8	V	V	V	V	V	V	V
V	F	F	V	9	V	V	V	V	F	V	V

a un dispositivo di uscita significa rendere visibile il segmento corrispondente mentre un segnale falso non genera visibilità); e d'altra parte, questa tabella ci permetterà di formulare una relazione logica per ognuna delle sette uscite, come la seguente:

- il segmento *a* deve essere illuminato se la cifra da rappresentare è 0 oppure 2 o 3 o 5 o 6 o 7 o 8 o 9

da cui ricaviamo, sulla base del codice decimale in ingresso, che l'uscita *a* è vera se (e solo se) è presente la combinazione d'ingresso $v_1 = \text{falso}$ e $v_2 = \text{falso}$ e $v_3 = \text{falso}$ e $v_4 = \text{falso}$ (codice dello 0) oppure v_1 e $v_2 = \text{falso}$, $v_3 = \text{vero}$ e $v_4 = \text{falso}$ (codice del 2) e così via fino al codice del 9. Quest'ultima descrizione, finalmente, può essere tradotta con un semplice circuito costituito da porte logiche AND (per esprimere le condizioni "e" relative a ogni singola cifra), porte OR (per rappresentare il connettivo "oppure") e porte NOT (per fornire il valore "falso" delle variabili).



Sopra: il sistema di rappresentazione dei numeri con i LED ha assunto una diffusione sempre crescente grazie alla semplicità, alla generalità e all'immediatezza del metodo. La sigla "LED" è l'abbreviazione dell'inglese "Light Emitting Diode", che significa "diodo emettitore di luce". Questo sistema tuttavia, se usato per lunghi periodi, comporta un notevole spreco di energia, il che rende i LED poco pratici per gli impieghi quotidiani, come l'illuminazione del quadrante di un orologio elettronico. Per questi casi il problema è stato risolto con l'aiuto dei "diodi a cristalli liquidi" (LCD, cioè "Liquid Crystal Diode"), coi quali si possono formare le dieci cifre decimali nel solito modo, ma consumando pochissimo, quasi niente. A fianco, un orologio elettronico da polso a LCD.

I circuiti aritmetici

Finora, abbiamo considerato circuiti digitali solamente in applicazioni di tipo "logico": è spontaneo chiedersi a questo punto come si possano utilizzare questi stessi circuiti e i relativi criteri di progetto per realizzare quegli strumenti aritmetici che ne costituiscono l'applicazione più vistosa e più nota – dal registratore di cassa elettronico ai più potenti calcolatori. Certo, si può pensare di servirsi semplicemente della rappresentazione "in codice" delle cifre decimali per costruire sistemi capaci di identificare il risultato corrispondente a ogni combinazione di codici, per una data operazione: una specie di estensione della tavola pitagorica, insomma. Diciamo subito che una soluzione come questa non viene praticamente adottata: sarebbe infatti un modo complicato e costoso di adattare l'aritmetica nella forma che ci è abituale – l'aritmetica "in base dieci" – a macchine che poco vi si prestano.

L'aritmetica decimale, o "in base dieci", è tipica di un "ente" – diamo pure questa definizione dell'uomo – capace di distinguere facilmente dieci diversi "stati" e quindi di associarli ad altrettante diverse cifre: la necessità di utilizzare anche numeri superiori al dieci porta a usare anche le "potenze" di questa base dieci. Ricordiamo subito, fra l'altro, che l'uomo stesso non ha sempre fatto ricorso alla base dieci per la propria aritmetica: gli antichi babilonesi facevano riferimento a una "base" pari a sessanta (e noi ne conserviamo ancora un ricordo molto pratico nella suddivisione del minuto in sessanta secondi, dell'ora in sessanta minuti, del cerchio in trecentosessanta gradi); e se vogliamo avvicinarci ai nostri tempi, scopriamo che nell'Inghilterra medioevale le unità di misura dei liquidi si ottenevano l'una dall'altra moltiplicando o dividendo non per dieci, ma per *due*: il cliente di un'osteria shakespeariana poteva infatti chiedere:

un "gill", oppure
un "choppin", pari a due gill, oppure
una "pinta", pari a due choppin, oppure
un "quarto", pari a due pinte... e così via.

Per motivi sicuramente diversi da quelli che giustificavano questa scelta, anche i sistemi elettronici digitali fanno uso dell'aritmetica in questa stessa base due: in questo caso, l'interesse è legato alla presenza dei due soli valori logici, che induce a immaginare un'aritmetica con due sole cifre – appunto, un'aritmetica *binaria*. Naturalmente, la quantità di cifre diverse disponibili non influisce sull'estensione, la grandezza dei *numeri* che si vogliono rappresentare, ma solo sulla loro rappresentazione; e quanto a quest'ultima, la geniale proposta degli antichi matematici indiani e arabi che introdussero la "notazione posizionale" vale indipendentemente dalla base.

Quando noi scriviamo un numero servendoci della notazione "araba" (appunto, quella posizionale) adottiamo una convenzione che sottintende, in realtà, una serie di prodotti delle singole cifre per le successive potenze della base (del dieci, nell'aritmetica abituale). Consideriamo un numero intero, per esempio 451; se diamo il valore ("peso") 0 alla posizione più a destra, 1 a quella immediata-

mente piú a sinistra e cosí via, ordinatamente, la notazione "451" rappresenta il numero che si ottiene dalla somma

$$4 \times 10 \times 10 + 5 \times 10 + 1 \times 1$$

esprimibile anche come

$$4 \times 10^2 + 5 \times 10^1 + 1 \times 10^0$$

Questa regola è universale; se in un numero intero spostarsi verso *sinistra* di un posto significa *moltiplicare* un'altra volta per dieci (o aumentare di un'unità la potenza del dieci considerata), in un numero frazionario ogni spostamento di una posizione a *destra* della virgola significa *dividere* un'altra volta per dieci (o passare a una potenza negativa inferiore di un'unità). Non solo: la regola vale qualunque sia la base dell'aritmetica: se questa è la piú piccola possibile – due, esattamente – dovremo moltiplicare le varie cifre per le potenze (positive o negative) del due: e naturalmente, le cifre diverse non possono a loro volta essere altro che due. Chiamiamole "0" e "1": il numero binario "1001101" rappresenta la quantità

$$1 \times 2^6 + 0 \times 2^5 + 0 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 =$$

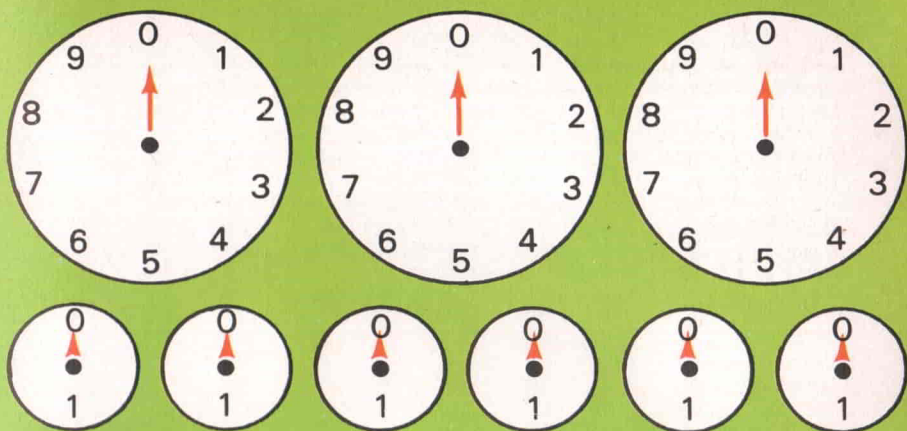
$$= 1 \times 64 + 1 \times 8 + 1 \times 4 + 1 \times 1 = 77$$

Possiamo già intuire come i circuiti digitali ci permettano di rappresentare o di memorizzare dei numeri binari – sarà sufficiente stabilire una corrispondenza fra i due valori logici e le due cifre binarie (di solito si sceglie "falso" per rappresentare lo zero e "vero" per rappresentare l'uno). Inoltre, dato che le regole dell'aritmetica sono universali e non dipendono certo dalla base (né dipende il modo di applicazione) ci sarà facile *esprimerle* nella forma richiesta dalla nuova base, particolarmente per quanto riguarda le operazioni fondamentali: per esempio, potremo fare la somma di due cifre binarie ricordando che:

	rappr. decimale	rappr. binaria
0 + 0 =	0	0
0 + 1 =	1	1
1 + 0 =	1	1
1 + 1 =	2	10

(Quando in una somma superiamo la massima cifra rappresentabile nella base scelta, si genera il *riporto* – se la base è due, già un risultato pari a due genera riporto).

D'altra parte, proprio il fatto che l'aritmetica sia esprimibile in modo rigoroso, senza lasciare nulla a fattori casuali ed esterni alle operazioni e agli operandi specificati, ci fa intuire che possiamo esprimere le sue regole e le sue operazioni servendoci degli operatori e dei formalismi della logica. Nella somma di due cifre binarie otterremo una cifra di riporto *r* che vale 1 se e solo se i due addendi *a* e *b* valgono ambedue 1, e una cifra di somma *s* che vale 1 se l'uno o l'altro dei due addendi ma *non* ambedue valgono 1: sappiamo già dedurre le due funzioni di commutazione



In un contatore decimale la lancetta delle unità deve compiere dieci scatti prima di riazzersarsi e far avanzare di un posto quella delle decine, e solo al ritorno a zero di questa scattano le centinaia; in un contatore binario il principio è lo stesso (ogni lancetta si muove solo quando si azzerla precedente), ma vi sono due sole posizioni possibili, 0 e 1. Nella tabella sottostante sono elencati i numeri binari corrispondenti ai numeri decimali da 0 a 20. Come si vede, la scrittura in codice binario richiede l'uso di un numero maggiore di cifre.

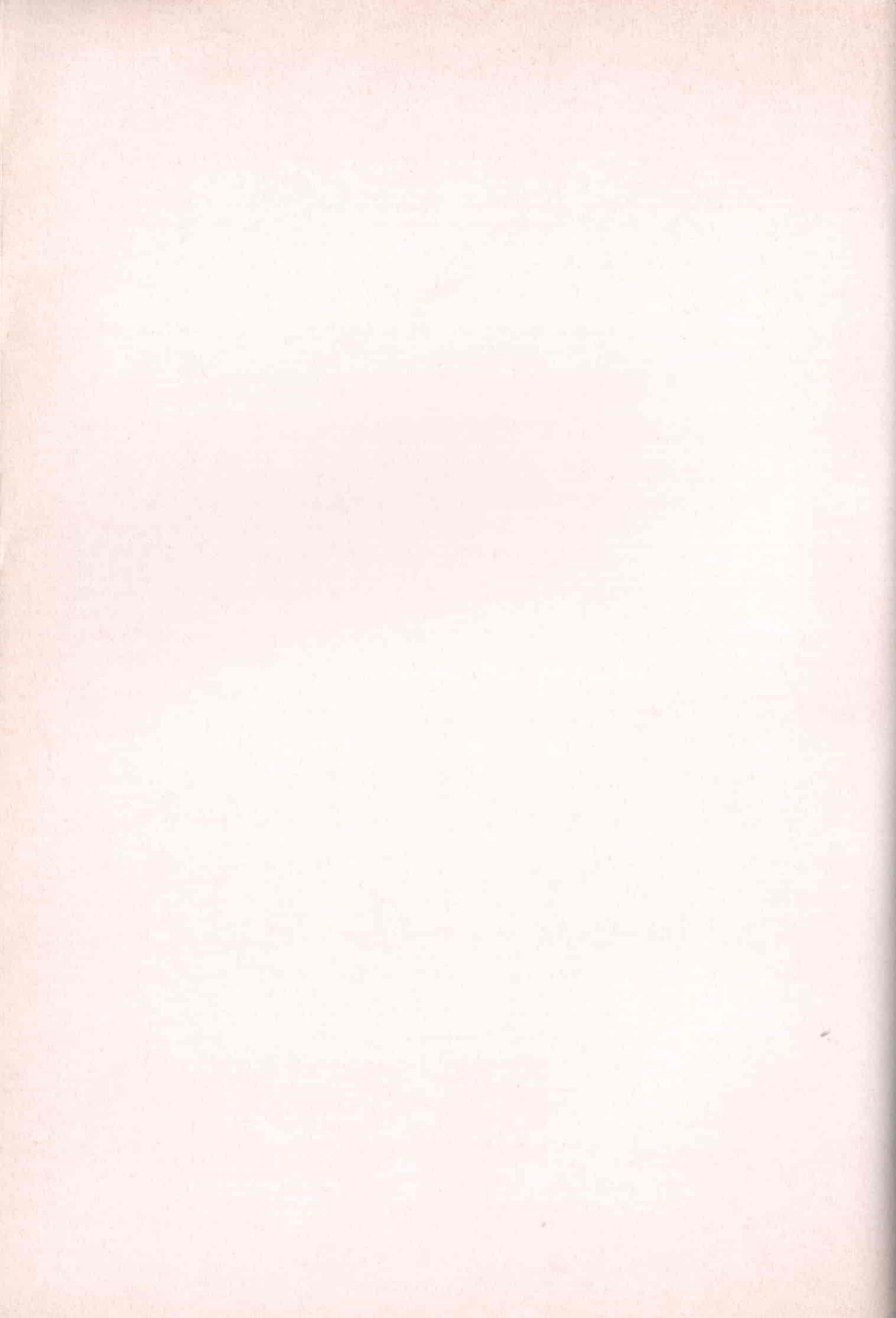
Decimale	Binario	Decimale	Binario	Decimale	Binario
0	0	7	111	14	1110
1	1	8	1000	15	1111
2	10	9	1001	16	10000
3	11	10	1010	17	10001
4	100	11	1011	18	10010
5	101	12	1100	19	10011
6	110	13	1101	20	10100

$$r = a \text{ AND } b$$

$$s = [(NOT \ a) \text{ AND } b] \text{ OR } [a \text{ AND } (NOT \ b)]$$

che realizzano la nostra somma aritmetica, con la convenzione già indicata per rappresentare le cifre binarie. In definitiva, siamo in grado di costruire un circuito sommatore per due addendi binari di una cifra: continuando con ragionamenti nella medesima linea – anche se, intuibilmente, più complessi – arriveremo a identificare i circuiti digitali capaci di realizzare l'addizione fra numeri binari con un qualsiasi numero di cifre, o la sottrazione, la moltiplicazione e così via. Siamo cioè capaci di costruire circuiti *aritmetici* comunque complessi. (A titolo indicativo, si può ricordare che circuiti aritmetici capaci di compire un'addizione in poche decine di nanosecondi sono ampiamente diffusi).

L'elettronica
e la trasmissione delle informazioni



L'elettronica e la trasmissione delle informazioni

Nei capitoli precedenti abbiamo presentato materiali, componenti, "strumenti" dell'elettronica e delle sue tecnologie; nei prossimi capitoli illustreremo alcuni dei più importanti campi di applicazione di queste tecnologie. L'argomento che consideriamo ora può sembrare totalmente "astratto" – un tema di discussione filosofica piuttosto che la base di importanti realizzazioni: di fatto, invece, la "teoria dell'informazione" è stata sviluppata proprio per consentire uno sfruttamento sempre più approfondito e un'evoluzione sempre più avanzata dei nuovi mezzi di comunicazione, di trasmissione e di elaborazione di questa "informazione".

"Informazione": è possibile darne una definizione rigorosa, astratta, ma il riferimento a un esempio ci sarà sicuramente molto più facile. Il giornale che leggiamo ogni mattina ci porta una certa informazione: lo diciamo abitualmente, anzi, la consideriamo proprio lo scopo di quel giornale. Proviamo ora a immaginare che, ogni mattina, il giornale ripeta le identiche notizie, nell'identica forma: peggio ancora, supponiamo di sapere già, prima perfino di sfogliarlo, che il nostro giornale di oggi sarà uguale a quello di ieri, della settimana scorsa, di tutta la vita. Spontaneamente, concluderemmo che il foglio è totalmente *privo di informazione*: e questo indipendentemente dal contenuto del giornale, dal significato degli articoli, ma solo perché il "messaggio" che ci viene portato non aggiunge nulla alla nostra conoscenza. Perché l'informazione che ricaviamo dalla lettura non sia nulla, occorre che ci sia una *variazione* non solo fra quello che già conosciamo e quello che leggiamo, ma anche da una notizia letta a un'altra; al limite, chiediamo al nostro giornale di essere "imprevedibile".

Se pensiamo alle frasi che compongono i vari articoli come ad altrettanti "messaggi", l'informazione è presente tanto più quanto più numerosi sono i messaggi fra i quali è stato scelto quello che ci viene di volta in volta presentato; è la variazione, dunque, se possibile imprevista del messaggio che ci fornisce l'informazione.



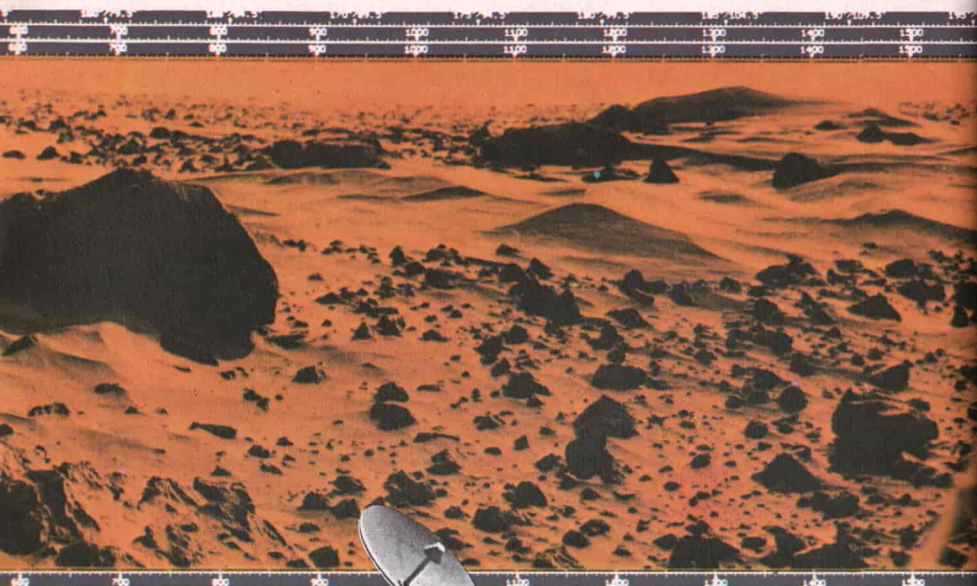
Anche in un sistema di trasmissione, o in un elaboratore elettronico, possiamo pensare di trovare dei "messaggi" che vengono trasmessi o sui quali si devono compiere le più svariate operazioni: messaggi che in questi casi non avranno più quel supporto fisico che era la stampa per il nostro giornale, ma che dovranno comunque essere rappresentati mediante un *segnale*. Da quanto abbiamo detto prima, perché il segnale porti informazione sarà necessario che esso *cambi nel tempo*.

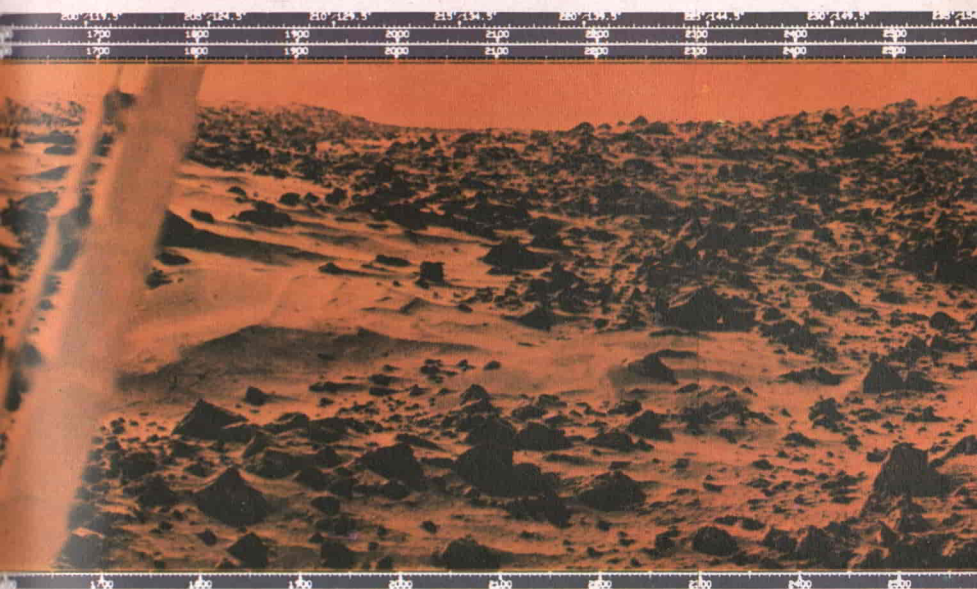
Siamo giunti così non solo a una definizione — sia pure molto intuitiva — dell'informazione, ma anche all'idea di "quantità" dell'informazione: all'idea che questa entità che pareva inizialmente astratta possa essere trasmessa, manipolata, misurata come una quantità fisica. Se consideriamo in particolare la trasmissione, dal fatto che per comunicare informazione è necessario un segnale variabile nel tempo verrebbe spontaneo di concludere che non c'è limite alla quantità d'informazione che possiamo trasmettere: basta che il segnale vari abbastanza rapidamente, che i valori da esso assunti siano in numero opportunamente grande, e che le variazioni si susseguano a velocità sufficientemente alta.

Uno dei banchi di prova su cui si è misurato nei secoli il progresso umano è costituito dalla capacità di trasmettere informazioni e notizie su lunghe distanze, nel più breve tempo possibile, al maggior numero di persone possibile. Ai tempi di Giulio Cesare venivano affissi agli angoli delle strade gli "Acta diurna", diciassette secoli dopo il sistema più rapido di comunicare nuove leggi o tasse alla popolazione era costituito dalle "grida" che banditori dalla voce stentorea andavano declamando quartiere per quartiere, contrada per contrada (a sinistra, in una stampa da una vecchia edizione dei "Promessi Sposi"). Ora le notizie ci raggiungono nel giro di poche ore, e in modo più completo, grazie ai giornali (a destra) e via etere.



A questo punto urtiamo però contro una nuova difficoltà. Prima di tutto, i componenti fisici "rispondono" con una inerzia propria tale da limitare la velocità di variazione dei segnali che coinvolgono quegli stessi componenti. Inoltre, ogni sistema fisico sovrappone al segnale portatore di informazione delle variazioni della medesima grandezza fisica costituente il segnale, variazioni del tutto indipendenti dall'informazione e che costituiscono del "rumore" sovrapposto: se le variazioni prodotte dal rumore sono comparabili a quelle relative all'informazione trasmessa, non saremo più in grado di identificare in modo unico quest'ultima. In definitiva, il sistema fisico imporrà un tempo minimo per il cambiamento del segnale e un'ampiezza minima per le variazioni del segnale stesso. Supponiamo che la "quantità di informazione" trasmessa in un certo intervallo di tempo – ad esempio, in un secondo – dipenda dalla velocità di variazione del segnale e dal numero di valori diversi dello stesso che siamo in grado di distinguere: concludiamo che il sistema fisico ha un *limite* alla propria *capacità* di trasmettere informazione. Se la quantità di informazione e la capacità di un sistema devono essere misurate, sarà necessario introdurre anche un'unità di misura,

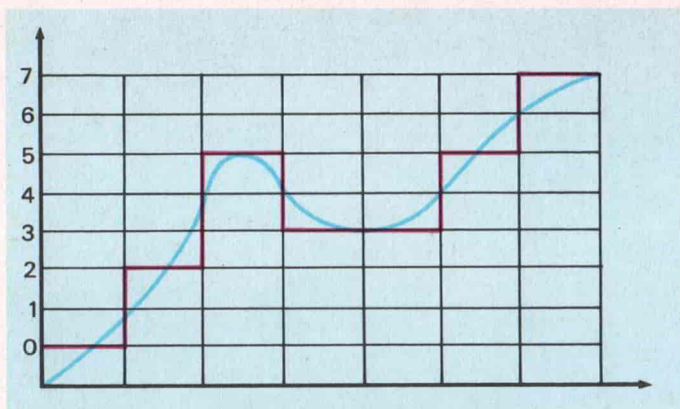




Fotografia a colori trasmessa dal pianeta Marte sulla Terra nello spazio di pochi minuti, grazie a sofisticate tecniche elettroniche di scansione dell'immagine e inoltre di essa punto per punto. Protagonista di questa prestazione tecnologica è stata la sonda spaziale "Viking", che ha effettuato un atterraggio morbido sul pianeta "rosso" nel 1976. Le dune e le rocce di Marte sono state riprese da pochi metri. A sinistra: un modello del "Viking" in grandezza naturale.

una "unità d'informazione": non ci interessa qui giungere alla sua definizione formale, ma piuttosto intuire il suo significato. Consideriamo un problema di trasmissione che ci ha forse incuriositi: la trasmissione di un'immagine. Ci siamo certo chiesti, per esempio, come avviene la trasmissione di fotografie da un satellite o addirittura da altri pianeti, e come è possibile che un calcolatore elettronico le "ripulisca", dopo averle ricevute, rendendo più nitida l'immagine, più precisi i profili degli oggetti, più netti i contrasti. In effetti, le operazioni che si compiono possono essere schematizzate con la seguente successione:

- Nella "stazione trasmittente" all'immagine viene sovrapposta una "griglia" che la suddivide in quadretti sufficientemente piccoli da poter essere considerati dei punti all'interno dei quali non sono possibili variazioni di tono o di intensità del colore. In questo modo, in realtà, facciamo una prima sostituzione da "continuo" a "discreto"; agli infiniti punti dell'immagine reale, con una continua variazione di colore e di intensità, abbiamo sostituito un numero finito di punti e brusche transizioni di colore e di intensità

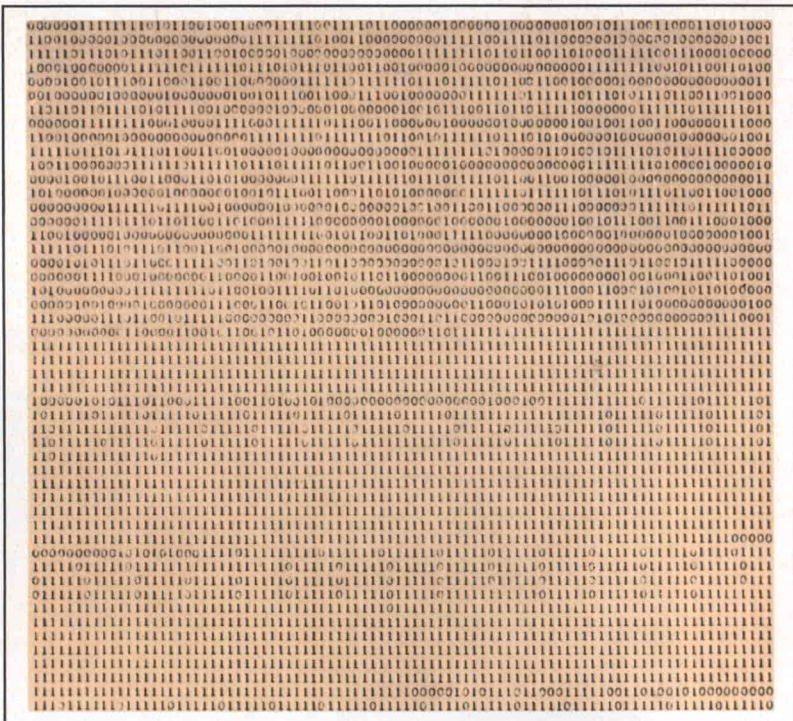


Un esempio di curva "discretizzata". Immaginiamo che il segnale continuo sia l'informazione da trasmettere, variabile nel tempo: la spezzata che la ricalca da vicino è la sua versione in otto "livelli discreti" numerabili da 0 a 7, e quindi trasmissibili tramite tre soli "bit". Nelle illustrazioni a destra: inoltra e ricezione di un giornale giapponese trasmesso via etere direttamente in casa dell'utente, grazie alla radio-stampante visibile nella foto.

- da un punto a quello vicino. Riferiamoci per semplicità a un'immagine in bianco e nero – in realtà, un'immagine su tanti "toni di grigio": a ognuno dei punti "discreti" in cui abbiamo suddiviso l'immagine dovremo assegnare un unico tono di grigio, che può essere quello predominante nell'area rappresentata dal punto, oppure il valore medio sulla stessa area, o un altro valore scelto in base a considerazioni specifiche di progetto. Evidentemente, l'immagine così ricavata sarà tanto più "fedele" all'immagine di partenza quanto maggiore è il numero dei punti in cui l'abbiamo suddivisa: in altre parole, la "quantità d'informazione" che forniamo sarà tanto più elevata quanto più numerosi sono i punti.
- Per ora, abbiamo immaginato di "discretizzare" l'immagine ma non le tonalità di grigio o, come si suol dire nel gergo specialistico, i "livelli di grigio": nella pratica, ancora una volta, non potremo trasmettere per ogni punto dell'immagine un valore di colore scelto fra infiniti altri valori – un "messaggio" scelto fra infiniti altri messaggi. Dovremo in definitiva *ridurre* il numero dei diversi valori possibili a una varietà, sia pur grande, ma sicuramente limitata: diminuiranno dunque ancora la quantità d'informazione rispetto a quella contenuta nell'immagine primitiva. Supponiamo ad esempio di limitare a otto i livelli di grigio utilizzati: per ogni punto dell'immagine discretizzata, daremo il valore che più si approssima a quello reale, trasformando in tal modo il segnale continuo del colore in un segnale fatto "a scalini" o, più propriamente, "quantizzato".
 - abbiamo completato ora le operazioni che consentono di tradur-



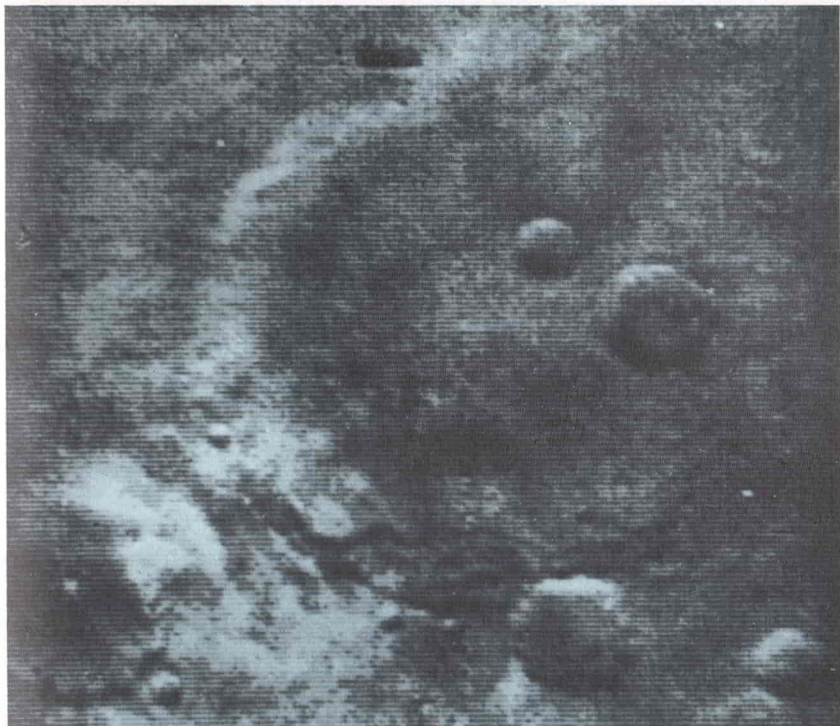
re un'immagine continua in un insieme di dati numerici; basterà che la stazione trasmittente comunichi il livello di grigio di ogni punto, secondo un ordine noto (ad esempio, prima i punti della riga più alta, da sinistra verso destra, poi i punti della riga successiva, nello stesso ordine, e così via: se l'ordine di scansione è fissato a priori non occorre fornire più alcuna informazione che lo riguardi). Potremmo trovare un modo per trasmettere l'informazione relativa mediante una cifra fra le otto diverse corrispondenti ai valori ammessi: se "0" rappresenta il nero e "7" rappresenta il bianco, potremmo abbinare a ogni punto dell'immagine una cifra da 0 a 7. In pratica, però, noi dovremo trasmettere un *segnale con tanti valori diversi e distinguibili quante sono le cifre*: tanto maggiore è il numero di valori diversi di questo segnale, tanto minore sarà la variazione da una cifra all'altra e tanto più facile un errore dovuto alla sovrapposizione di rumore. Se però cerchiamo il modo più semplice per fornire una determinata in-



formazione – un modo che richieda il minor numero di “cifre” diverse – giungiamo a una successione di scelte del tipo “sì o no”, “vero o falso”: a una successione cioè di “scelte binarie”. Prendiamo in considerazione, per esempio, un punto dell’immagine cui sia associato il livello di grigio “5”: possiamo identificarlo con le seguenti scelte binarie:

- Il valore è compreso o no nella prima metà (fra 0 e 3)? La risposta, in questo caso, è “no”: si passa ora alla scelta successiva.
- Nel gruppo prima identificato, il valore fa parte della metà inferiore (da 4 a 5) oppure no? (La risposta è “sì”: passiamo all’ultima decisione).
- Nel gruppo di due valori appena identificato, il valore fa parte della metà inferiore (il valore 4) oppure no? La risposta è di nuovo “no” e il livello di grigio è completamente identificato con la sequenza di risposte “no-sì-no”.

Se ora rappresentiamo il “sì” con la cifra 0 e il “no” con la cifra 1, potremo rappresentare il numero 5 con la configurazione



In queste illustrazioni si può fare un confronto fra l'immagine cifrata di una veduta del pianeta Marte trasmessa dallo spazio (in pratica, una successione di 0 e 1) e la stessa immagine decifrata tramite il computer.

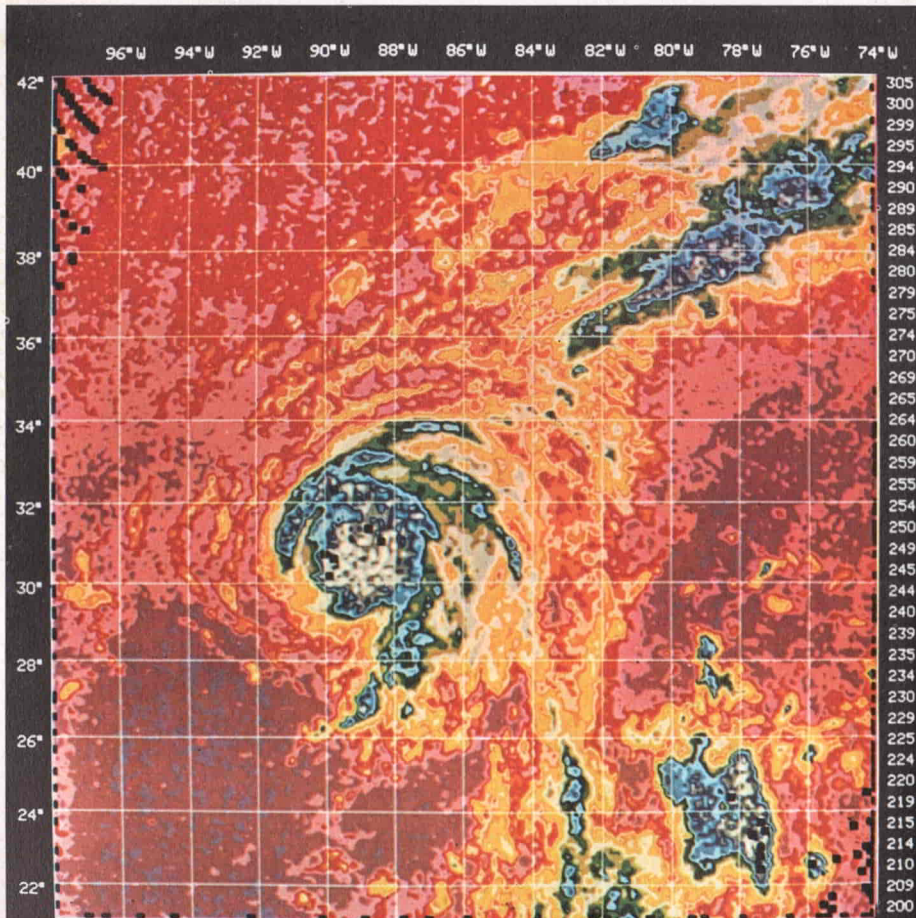
"101". Potremo quindi utilizzare due soli valori estremi del segnale, trasmettendo però non un'unica cifra ma un insieme di tre cifre binarie.

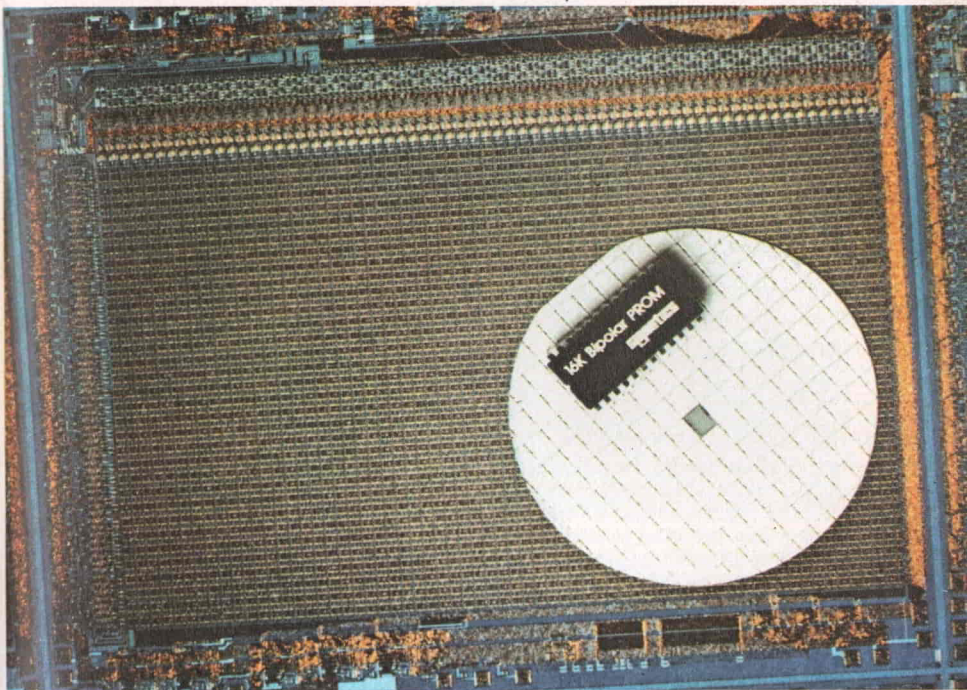
In sostanza, quella che si è fatta or ora è una serie di scelte fra tutti i messaggi possibili (nell'ipotesi che tutti avessero la medesima probabilità di comparire) e la successione di risposte che identifica completamente il messaggio ne costituisce la "codifica binaria". La *cifra binaria*, o "*bit*" (un'abbreviazione di *binary digit*, o "cifra binaria", appunto) viene assunta come *unità d'informazione*, e il numero di bit necessari per trasmettere l'informazione relativa a un segnale ne costituisce, appunto, il contenuto di informazione.

Nello stesso modo, possiamo anche definire la capacità di un sistema di trasmissione come la massima quantità di informazione — espressa in bit — che esso può trasmettere in un secondo.

Quantificare il contenuto d'informazione di un messaggio non è sempre facile come nel caso che abbiamo considerato, e d'altra parte può avere un'importanza essenziale per il progetto di un sistema capace di trasmettere, o di memorizzare, o di elaborare il messaggio stesso.

Noi abbiamo fatto l'ipotesi che per ogni punto dell'immagine ogni livello di grigio avesse identica probabilità di essere presente – abbiamo cioè supposto che tutti i messaggi fossero *equiprobabili* e





A sinistra: un altro esempio di immagine trasmessa punto per punto dallo spazio e ricostruita dal calcolatore. Qui i colori non hanno un significato reale, ma sono un messaggio cifrato: a ogni colore corrisponde una temperatura. La foto è stata scattata dal satellite meteorologico "Nimbus" in orbita attorno alla Terra, e ritrae il vortice dell'uragano "Camilla", che appare scuro perché molto più freddo delle zone circostanti. In alto: un circuito integrato che svolge le funzioni di una memoria posato su una lastrina di silicio che contiene più di un centinaio di "chip" nudi e non ancora separati. Sullo sfondo si vede l'ingrandimento di uno di questi chip. A destra: un piccolo computer di 135 chilogrammi per aerei.



Addio, monti sorgenti dall'acque, ed elevati al
cielo; cime inuguali, note a chi è cresciuto
tra voi, e impresse nella sua mente non meno
che lo sia l'aspetto de' suoi più familiari;

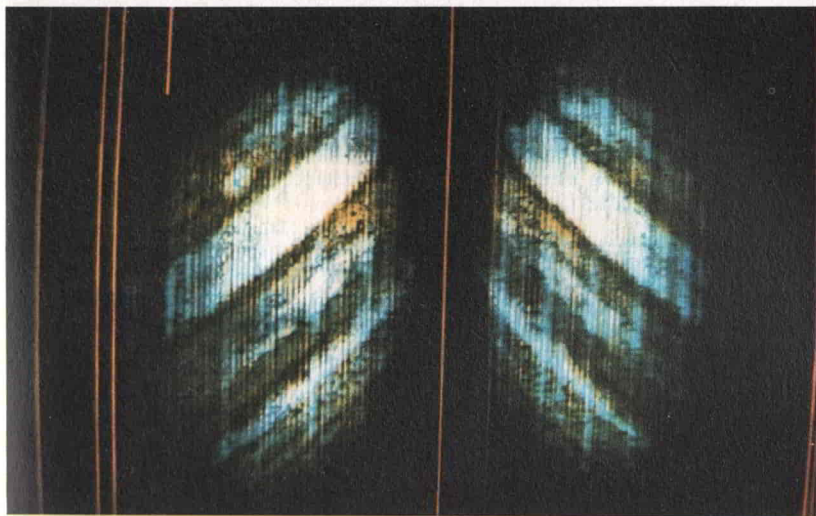
Addio oi sogent dall'acque, ed eevati al
ciel; cime inuguai, nte a chi è cesciuto
ta voi, e mprese nelasua mente; nonmeno
che lsa l'aspetto de suoi piùfmiliari;

Add montsorgnial'cue ed eevati al
ielo; ciuuai no a chi è cresciuto
tr o eipseella suamene nomen
chelo ialasetto de' oi piamiliai;

Ai, mti sonll'ace d elval
celo;ienual, ta ciesito
tr voi, ipess nelaa mntenmeo
ce s apetod soi pamiari

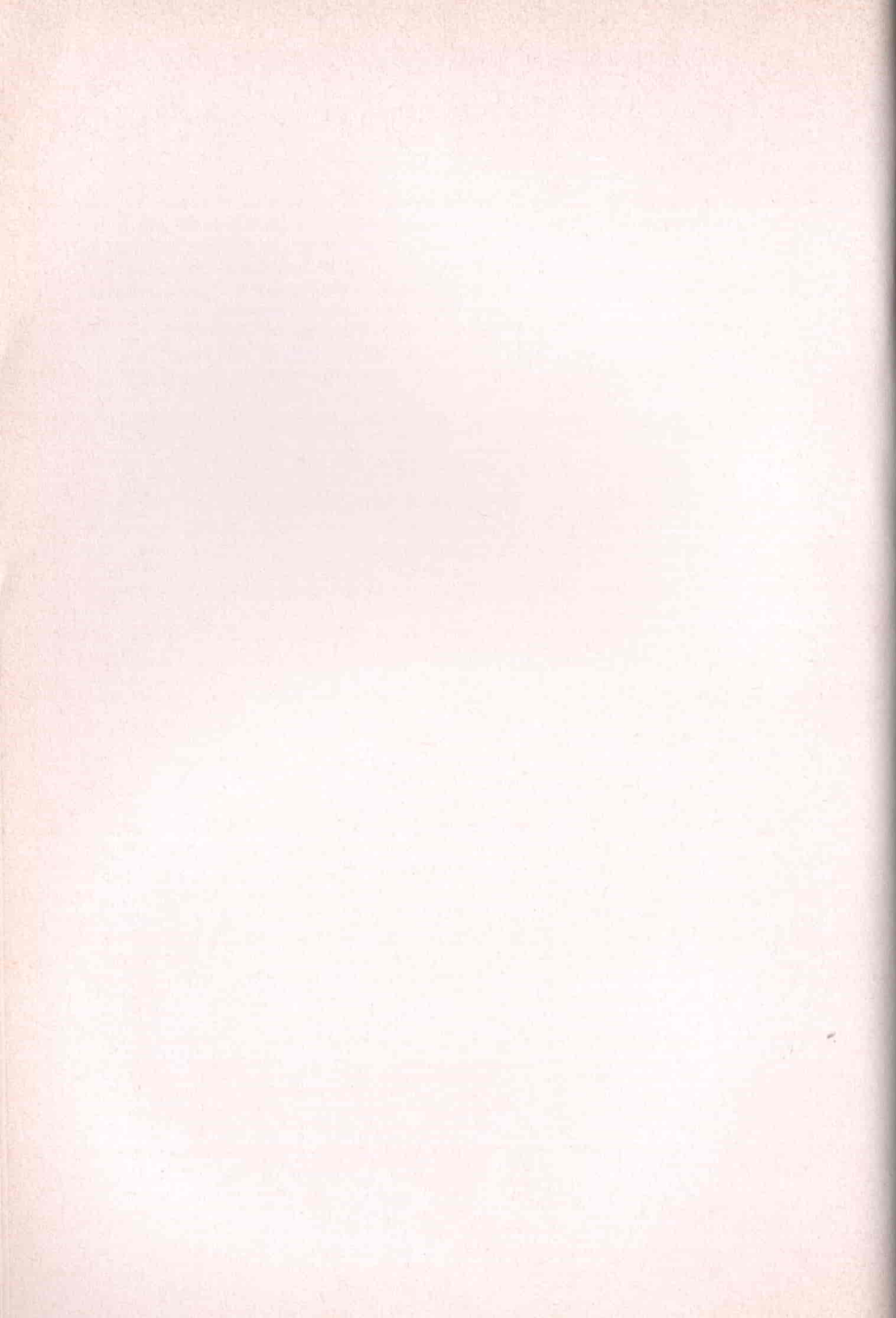
che ogni messaggio fosse *indipendente* da quelli trasmessi precedentemente. In questo caso, il contenuto di informazione è direttamente legato al numero di scelte successive. Se alcuni messaggi sono meno probabili di altri, però, nel calcolo del contenuto di informazione compare anche la probabilità che ne *riduce* il valore; calcoli di questo genere sono stati fatti molto prima che C.E. Shannon ponesse le fondamenta della teoria dell'informazione, nel 1948, e sono dovuti agli esperti di crittografia. Per costoro, infatti, è importante calcolare il "contenuto d'informazione" di una determinata lingua, considerando per esempio la frequenza con cui compaiono lettere o gruppi di lettere, la probabilità che una lettera o un gruppo di lettere sia seguita da determinate altre, e così via: quanto minore è il contenuto d'informazione, tanto più facile sarà decifrare un messaggio nel quale a ogni lettera si associ un solo codice. In effetti, si scopre che un messaggio "in chiaro", diciamo così, in una qualsiasi lingua è ridondante rispetto al proprio autentico contenuto di informazione: eppure questa ridondanza ci è utile – almeno, quando la ridondanza non aumenta troppo per colpa di chi scrive o pronuncia il messaggio! Ci consente infatti molto spesso di correggere degli errori automaticamente, quasi senza accorgercene – ci è utile, di fatto. In altre parole, utilizziamo a questo scopo quella parte di "codice" che supera la minima quantità di informazione associata al messaggio; possiamo ricorrere allo stesso criterio anche

In alto: un brano del Manzoni è stato successivamente impoverito del suo "contenuto di informazione" sottraendogli a caso prima il 20% delle battute, poi il 40% e il 60%; come si vede, la ridondanza della lingua italiana permette di capire il messaggio degradato almeno nel primo caso. A destra, in alto: due fotografie del pianeta Giove riprese dallo spazio dalla sonda spaziale "Pioneer 10", e, sotto, una delle fotografie "ripulite" usando la tecnica delle ridondanze, cioè rielaborando la foto originale tramite un calcolatore elettronico che riconosce ed evidenzia tutta l'informazione nascosta nei disturbi dell'immagine ricevuta.



per i messaggi "costruiti" artificialmente, ai quali può essersi eventualmente sovrapposto del rumore e che possono essere resi ridondanti in modo da permettere di identificare e correggere gli errori provocati dal rumore. Così alla stazione ricevente del nostro sistema per la trasmissione di immagini da un pianeta, un elaboratore potrà servirsi della ridondanza inserita nei codici binari - appositamente studiati a questo scopo - per calcolare il valore effettivamente trasmesso ed effettuare una prima "pulitura" dell'immagine. Le successive elaborazioni - quelle, appunto, che permettono di ottenere contorni più nitidi, di rafforzare il contrasto, etc. - sono sempre basate su considerazioni di tipo statistico, sulla probabilità di comparsa dei diversi messaggi, sulla effettiva dipendenza di un messaggio rispetto a un altro, e così via.

Una tecnica per moltissime applicazioni

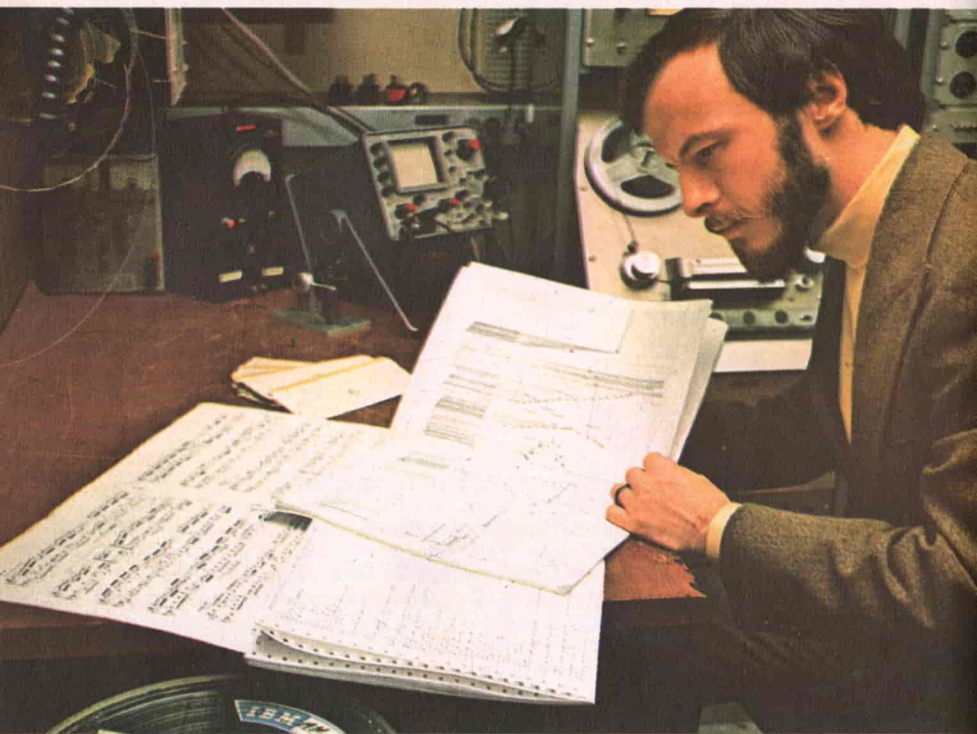


Una tecnica per moltissime applicazioni

È abituale, in ogni campo della tecnica, distinguere i "componenti" dalle "macchine", più complesse, che con tali componenti vengono realizzate e che sono a loro volta utilizzate per la costruzione degli "impianti" o "sistemi". Una "graduatoria" di questo tipo corrisponde in un certo senso all'indice del nostro libro: abbiamo parlato di componenti, ma già a quel livello abbiamo incontrato dispositivi che pur essendo monolitici costituivano di fatto dei circuiti, anche complessi – e circuiti che in realtà sono veri e propri sistemi. Le distinzioni tradizionali risultano sfumate: non è per nulla facile dare una definizione di un'apparecchiatura o di un sistema elettronico, se la loro complessità può non distinguerli da un circuito integrato.

Forse, il modo migliore per distinguere un'apparecchiatura o un sistema fa riferimento non tanto alla *complessità* del dispositivo o delle operazioni che questo compie, quanto alla *completezza* della funzione che esso svolge: un'apparecchiatura può essere vista come un dispositivo che riceve informazione da un ente esterno, non necessariamente da un dispositivo elettronico e anche addirittura *non* da una macchina (può trattarsi di un fenomeno naturale, o di un utente umano), compie operazioni ben definite su questa informazione e nuovamente fornisce il risultato a un ente esterno. Questa schematizzazione si applica altrettanto bene a una radio come all'impianto di calcolo del Centro Spaziale di Houston: dobbiamo ora distinguere le classi di apparecchiature in base al tipo e alla complessità delle funzioni che esse svolgono.

Consideriamo innanzitutto *cosa* l'uomo può richiedere ad un'apparecchiatura elettronica: fondamentalmente, richiederà che il dispositivo *controlli* altre apparecchiature o impianti, o che effettui *misure* e ne presenti il risultato, che *elabori* informazione – sia l'elaborazione di tipo numerico o no – o che *trasmetta* informazione a distanza: solo recentemente si è pensato di ricorrere a tecniche elettroniche per funzioni diverse, quali in particolare la conversione e il trasferimento dell'energia (per esempio, ricorrendo a satelliti per la con-



Un compositore di musica "elettronica" nel suo studio, corredato persino di un oscilloscopio. A destra: boa per lo studio delle correnti oceaniche che trasmette ogni cento minuti la sua posizione a un satellite. È alimentata da batterie solari (il pannello con cellule fotovoltaiche visibile nella parte alta).

versione diretta dell'energia solare in energia elettrica e trasmettendo poi tale energia a terra mediante fasci di microonde). Seguendo questa falsariga, anche noi considereremo brevemente i campi dei *controlli automatici* e degli *automatismi*, degli *elaboratori digitali*, delle *telecomunicazioni*. Vorremmo però, prima di iniziare questa presentazione, rilevare che nessuno di questi campi è *in sé* proprio dell'elettronica: di fatto, per molto tempo le apparecchiature di controllo sono state realizzate con sistemi oleopneumatici, i più semplici strumenti di calcolo sono stati elettromeccanici se non addirittura meccanici, e si può pensare a telecomunicazioni realizzate con segnali luminosi (dagli antichi specchi sulle vette montane fino ai nuovi sistemi basati su fibre ottiche). Le tecnologie elettroniche si limitano a consentire delle *realizzazioni* – semplici, affidabili, economiche – nei campi sopra elencati.



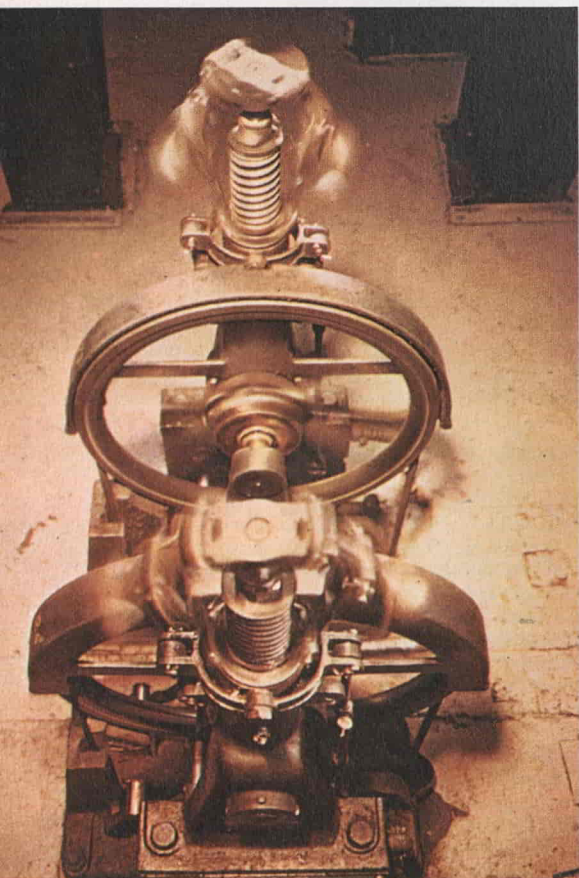
Automatismi e apparecchiature di controllo.

Mano a mano che l'uomo si è trovato a disposizione maggiori quantità di potenza, ha anche incontrato la necessità di controllare tale potenza, di regolarla, e ben presto il semplice intervento di un operatore umano si è rivelato insufficiente; si è affermato che senza il "regolatore" ideato da Watt la macchina a vapore non avrebbe avuto tanto successo, e la rivoluzione industriale avrebbe trovato, in definitiva, difficoltà molto più gravi lungo la propria strada.

Per identificare le fondamentali funzioni che i dispositivi di controllo devono compiere, possiamo considerare che cosa significhi "controllo" — in modo astratto, non solo con riferimento alle macchine ma anche per quanto riguarda lo stesso comportamento umano: controllare significa confrontare il comportamento del sistema reale sotto controllo con dei parametri ideali, degli "standard", e intervenire sul sistema reale ogni volta che le prestazioni si allontanino dagli standard più di un certo limite prestabilito. Per esempio, si vuole controllare che la velocità di un motore sia contenuta entro certi limiti, o che la tensione fornita dagli alternatori di una centrale elettrica abbia il valore voluto.

La strumentazione oggi disponibile ci consente di rilevare, con precisione anche molto grande, le grandezze che ci interessano: i controlli automatici permettono non solo di sostituire una macchina all'operatore umano che – nel caso di "controllo manuale" – dovrebbe continuamente leggere i valori forniti dagli strumenti di misura, confrontarli con i valori richiesti e quindi intervenire in modo opportuno, ma anche di garantire in molti casi un intervento più immediato, più puntuale di quello che l'uomo potrebbe offrire. Inoltre, un dispositivo di controllo automatico può essere posto anche in ambienti che risulterebbero "ostili" a un operatore umano (pensiamo alle camere di reazione degli impianti chimici oppure agli impianti nucleari).

Controllare una grandezza fisica vuol dire anzitutto rilevarne il va-

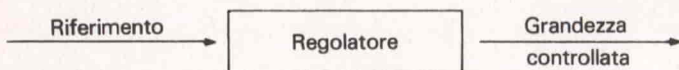


Sotto, a sinistra: il regolatore di Watt, di cui vediamo due esemplari in opera in un motore di ascensore, è in grado di arrestare un motore quando la sua velocità supera un certo valore, e di rimetterlo in moto quando questa ritorna entro i limiti prefissati. Qui a fianco: il quadro di comando di una petroliera, nella quale gran parte delle operazioni può essere svolta semplicemente premendo dei pulsanti. Sotto: grazie all'automazione tre soli uomini, seduti davanti ai pannelli, controllano un'intera raffineria.



lore reale (*misura*), poi paragonarlo con il valore desiderato (*confronto*) e quindi agire con i mezzi opportuni (*regolazione*) per mantenere il valore reale abbastanza prossimo al valore desiderato detto "riferimento".

I sistemi di controllo possono assumere strutture molto differenti sia per la realizzazione tecnologica (che dipende anche dalle caratteristiche del sistema che si vuole controllare) sia per quella che possiamo definire la "filosofia" del controllo. Si distinguono il "controllo ad anello aperto" e il "controllo ad anello chiuso" o "contro-reazionato" (il termine inglese, molto più diffuso, per quest'ultimo caso è "feedback"). Consideriamo il primo caso: esiste il "riferimento", cioè la grandezza il cui valore possiamo fissare dall'esterno (per esempio, la velocità di un motore, la quantità di un determinato prodotto di reazione chimica) ed esiste la "variabile controllata", cioè quella grandezza interna al sistema controllato su cui si deve agire per ottenere la regolazione (e che potrà essere la "corrente di eccitazione" per un motore elettrico, o la pressione nella camera di reazione, etc). Dobbiamo costruire una macchina regolatrice che, in corrispondenza di un qualsiasi valore del parametro di riferimento, generi il valore opportuno della grandezza controllata; non esiste in questo caso il confronto con un valore reale dello stesso parametro, e occorre ammettere una perfetta conoscenza del sistema da controllare e del comportamento del regolatore – o, alternativamente, occorre accettare scostamenti anche sensibili fra il comportamento reale del sistema controllato e quello ideale. D'altra parte, non abbiamo bisogno di strumentazione per la misura e il confronto: addirittura, esistono casi in cui misura e confronto non sarebbero possibili e questa soluzione è l'unica praticamente realizzabile: pensiamo al controllo di un missile privo di strumentazione di bordo capace di fornire informazione sulla traiettoria, l'assetto, il funzionamento dei motori.



Consideriamo invece una struttura di controllo che rispecchi la descrizione che abbiamo dato al principio: uno strumento di misura ci permette di rilevare la grandezza controllata: un elemento "confrontatore" ci permette di identificare lo scostamento fra valore misurato e valore richiesto, cioè l'"errore", e in base a quest'ultimo il regolatore agisce sulla grandezza controllata.



Questa seconda struttura, quando può essere applicata, risulta più soddisfacente della prima.

Come succede spesso per i ritrovati della tecnica, anche i sistemi di controllo reazionati trovarono la prima, forte spinta alla loro evoluzione in applicazioni di tipo militare – per il controllo di rotta delle navi da guerra, per esempio – ma la loro diffusione a campi “civili”, dopo il 1945, è stata molto rapida, aiutata dal parallelo sviluppo di altre tecniche elettroniche (basta pensare che le misure devono spesso essere *comunicate*, anche a distanze notevoli, col minimo errore possibile, e che confronto e regolazione richiedono *elaborazioni* sovente complesse).

Gli schemi precedenti non propongono possibili realizzazioni dei vari blocchi; d'altra parte, richiedono una completa conoscenza del comportamento dei blocchi stessi, tale da fornirne una vera e propria descrizione in termini matematici. Lo studio dei sistemi di controllo ha in effetti sviluppato ambedue gli aspetti. Da un lato, si è spinta verso una sempre maggiore raffinatezza la “matematica” dei sistemi di controllo, in modo da valutarne con la massima precisione possibile non solo l'errore generato dal sistema, ma anche le caratteristiche di comportamento del sistema stesso, prima fra tutte la “stabilità”: si deve evitare, ovviamente, che uno scostamento della grandezza controllata dal riferimento subisca quella che potremmo chiamare una “falsa correzione”, tale cioè da generare un errore addirittura crescente. Questa stessa matematica ha permesso di descrivere i sistemi sotto controllo con dei “modelli” che possono essere studiati “a tavolino” in modo da prevedere il comportamento che il sistema reale avrebbe in tutte le possibili condizioni di funzionamento; e nel momento in cui matematica e modelli sono stati applicati anche a organismi viventi – o per meglio dire, a parti di organismi, – la tecnica dei controlli automatici ha trovato uno sbocco anche nella realizzazione di protesi (si pensi a vari tipi di “braccio artificiale”) o di strumenti medici.

D'altra parte, ci si è preoccupati della realizzazione dei vari blocchi; nei controlli di tipo elettronico (che hanno trovato diffusione sempre crescente) sono ampiamente applicati componenti delle classi che abbiamo già esaminato, dai tubi a vuoto fino ai componenti allo stato solido: si sono anzi sviluppati componenti particolarmente adeguati a questo tipo di applicazioni (tiristori o raddrizzatori controllati al silicio, triac). Soprattutto nel periodo iniziale, il controllo è stato prevalentemente di tipo *analogico*: la variabile controllata viene misurata e tale misura trasferita al confrontatore, appunto, in modo analogico, mediante un segnale continuo, e nella stessa forma viene presentato il riferimento; anche i circuiti di confronto, elaborazione e finalmente di regolazione sono tutti di tipo analogico, e si può dire che la regolazione avvenga in modo continuo.

Molto presto si è pensato all'alternativa proposta dai sistemi digitali; in questo secondo caso, la misura della variabile controllata non viene compiuta in modo continuo ma in istanti discreti, mediante quello che si definisce un “campionamento” (si prelevano, in sostanza, dei “campioni” su cui si effettua la misura). Anche il valore rilevato viene trasferito in modo numerico, e di questo stesso tipo sono tutte le successive elaborazioni. In realtà, i problemi di con-

versione della misura in forma numerica e quelli di calcolo hanno per molto tempo intralciato la pratica applicazione di questo metodo: da un lato, richiedevano spesso sistemi digitali più costosi e complessi di quelli analogici adatti allo stesso compito, e d'altra parte — in casi che avrebbero giustificato il relativo costo — il tempo richiesto da tali operazioni risultava eccessivamente alto e quindi inaccettabile. Oggi, la concomitanza della diminuzione di costo e dell'aumento di velocità e di potenza dei sistemi digitali hanno condotto a superare questi problemi, almeno in grandissima percentuale, e si assiste quindi a un aumento dei sistemi di tipo digitale rispetto a quelli di tipo analogico; vedremo nei prossimi capitoli, parlando dell'elaborazione dell'informazione e dei calcolatori elettronici, quali funzioni questi possono svolgere.

L'elaborazione dell'informazione.

I dispositivi per i controlli automatici di cui abbiamo delineato le funzioni nel capitolo precedente costituiscono anch'essi delle apparecchiature che elaborano informazione; si tratta, è vero, di informazione molto particolare, — relativa al funzionamento di una macchina o di un impianto solamente — e che è soggetta ad un'elaborazione fissa. Abituamente, parlando di "elaborazione", ci si riferisce oggi ad apparecchiature che trattano informazione presentata in forma digitale, di natura qualunque, e che su tale informazione possono compiere un insieme di operazioni molto vasto, se non addirittura arbitrario.

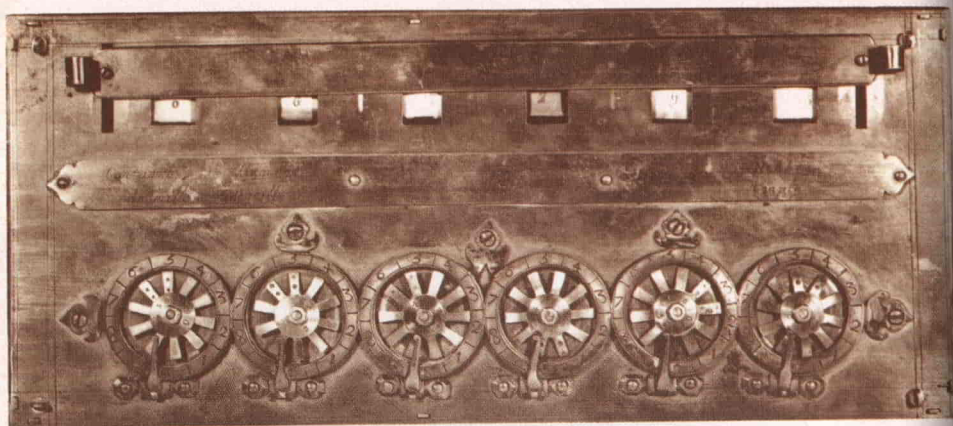
Fin dai primi tentativi, le macchine per l'elaborazione dell'informazione vennero studiate per due classi diverse di compiti: da un lato, le operazioni di tipo numerico, i "calcoli" veri e propri, dall'altro le elaborazioni di tipo non numerico. In un primo momento, le elaborazioni numeriche furono le sole "serie" — basta ricordare la calcolatrice meccanica che Pascal creò per aiutare il padre, funzionario doganale, nelle sue mansioni — mentre le altre erano considerate più che altro dei giochi: gli "automi" settecenteschi, capaci di scrivere in calligrafia ornata frasi galanti o di suonare musiche tintinnanti, erano piccoli capolavori di meccanica ma ben pochi spettatori delle loro esibizioni li consideravano nulla più che dei sofisticati oggetti di divertimento.

Le macchine per il calcolo vennero continuamente perfezionate, sempre sotto forma meccanica; nella prima metà dell'ottocento, l'inglese Charles Babbage ideò una macchina, il "meccanismo analitico", capace di compiere operazioni aritmetiche e logiche comunque complicate — almeno, in teoria: in pratica, la tecnologia dell'epoca non era in grado di costruire una struttura costituita da un grandissimo numero di ingranaggi con la precisione necessaria perché l'insieme funzionasse. La regina Vittoria e altri mecenati fornirono a più riprese fondi all'irascibile inventore, eternamente in lite con gli scienziati di mezza Europa, ma la macchina non venne mai completata; ciò non toglie che i principi secondo cui essa era progettata fossero pienamente validi, e del tutto accettabili ancor oggi. Come spesso accade, Babbage — nonostante fosse tutt'altro che modesto — non intuì totalmente le potenzialità della sua invenzione: ne vantava l'uso per risolvere equazioni e calcoli complicati, ma

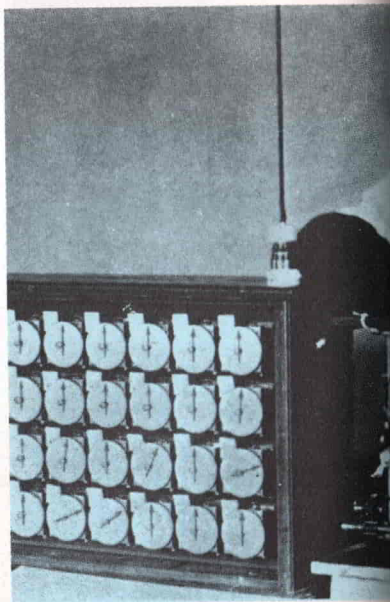


Una protesi elettronica in grado di svolgere quasi tutte le funzioni di una mano: essa può afferrare oggetti in base a un comando del cervello e può trasmettere a questo delle sensazioni tattili e termiche tramite alcuni sensori incorporati nelle dita artificiali.

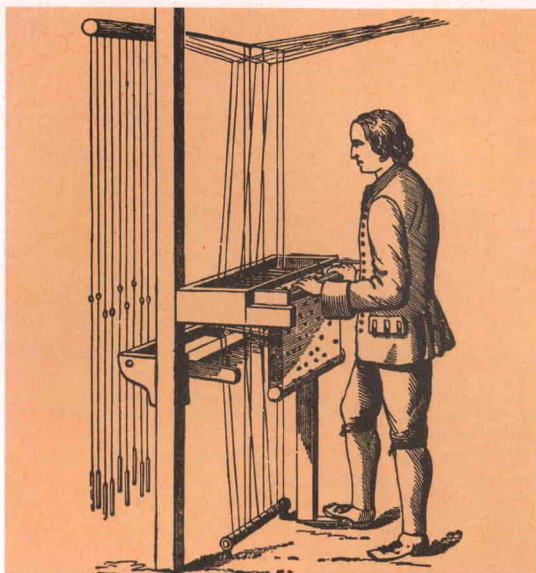
non si rese conto che la vera potenza stava nella possibilità di definire degli *algoritmi* – cioè delle sequenze perfettamente determinate di operazioni – capaci di risolvere determinati problemi, e nel farli poi eseguire dalla macchina ripetutamente, cambiando gli operandi come e quando fosse necessario. Fu una giovane donna che comprese per prima questa possibilità, in definitiva, la possibilità di *programmare* la macchina analitica: lady Lovelace, figlia di Lord Byron, la cui intelligenza matematica era stata assecondata da una successione di governanti e precettori e solleticata dalle affettuose lettere del padre che, anche mentre inseguiva per tutta l'Europa amori e avventure, continuava a scrivere alla sua "piccola principessa di tutte le geometrie". A quell'epoca, una giovane gentildonna non poteva certo sfruttare le sue capacità in senso professionale: non le restava che sposarsi nel suo stesso ambiente e interessarsi alle invenzioni di qualche inventore sufficientemente originale e curioso. La figlia di Byron seguì le regole, ma sposò un nobile irlandese stravagante e giocatore quanto lei, si appassionò alle idee di Babbage, immaginò che la macchina analitica potesse essere programmata per calcolare le probabilità di vittoria dei cavalli – e finì

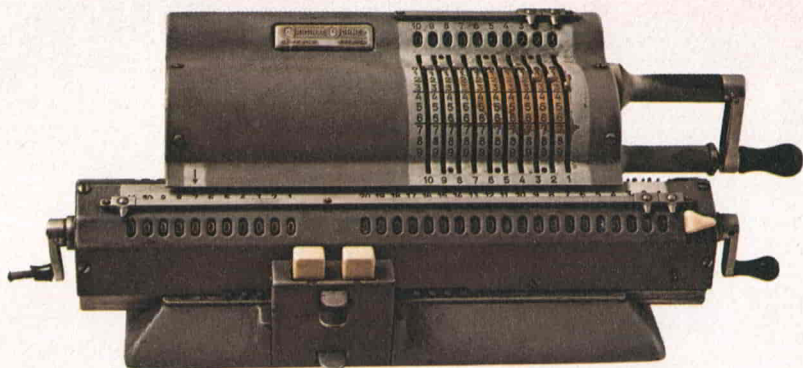


La prima macchina calcolatrice della storia, o almeno la prima di cui ci è pervenuta notizia. Fu costruita dal matematico francese Pascal nel 1642 e la sua versione originale è conservata a Parigi. La calcolatrice eseguiva automaticamente il riporto nella somma quando un contatore avanzava dalla posizione 9 a 0. Dopo questo sommatore meccanico seguirono altre macchine analoghe; ma ciò che rese questi strumenti più simili a quelli moderni fu la realizzazione della "programmabilità", ovvero la possibilità di far loro eseguire operazioni su dei dati in base a un



programma predeterminato. Applicazioni di questo principio sono i telai meccanici Jacquard nell'Ottocento (a destra) e il pianoforte automatico di Gally del 1879 (sotto, a destra), funzionanti in base a istruzioni su cartoni perforati. La prima calcolatrice programmabile fu concepita dall'inglese Charles Babbage ai primi dell'Ottocento, ma non fu realizzata (in basso a sinistra un'altra macchina di Babbage, un differenziatore). Alla fine del secolo comparvero i primi centri meccanografici per i censimenti (al centro, sotto, il tabulatore di Hollerith, usato in un censimento del 1890 negli USA). Macchine calcolatrici e meccanografiche si sono fuse, ora, nel computer.





in miseria, senza aver la soddisfazione di vedere funzionare la macchina analitica.

Nel frattempo, senza rumore, si sviluppavano altre applicazioni e altre tecniche; l'automazione avanzava, soprattutto in campo tessile, e per i suoi telai Jacquard ideò dei controlli meccanici che potevano essere "programmati" per diversi disegni, grazie all'uso di cartoni perforati; questi venivano "letti" da un dispositivo meccanico, mediante piccoli pioli, in modo da comandare opportunamente le varie spole e il funzionamento dell'intero telaio.

I cartoni perforati, in dimensioni più maneggevoli, ricomparvero alla fine dell'ottocento in occasione di un censimento negli Stati Uniti. Si poneva il problema di compiere un notevole numero di statistiche su un'enorme quantità di dati, spesso non numerici — il sesso delle persone, la loro occupazione, il loro stato di famiglia... Un certo Hollerith ebbe l'idea di rappresentare tutte queste informazioni con dei codici costituiti da insiemi di fori su schede di cartone, e di costruire macchine capaci di "leggere" questi fori e di fare semplici elaborazioni, anche non numeriche (per esempio, raggruppare le schede a seconda dei particolari codici). Era nato il primo centro meccanografico, e le schede perforate erano entrate sulla scena per rimanervi fino ai nostri giorni.

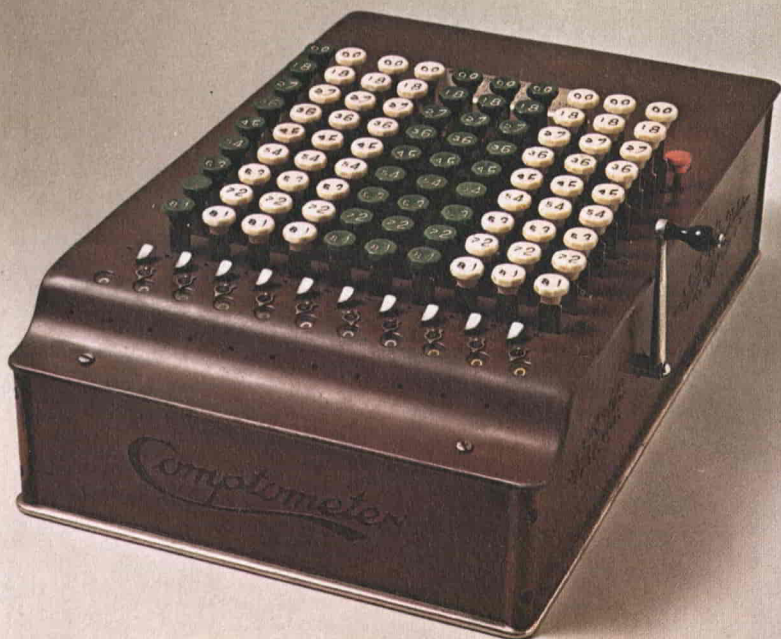
Fino all'inizio della seconda guerra mondiale, il dualismo "calcolatrice — centro meccanografico" venne mantenuto; sia la calcolatrice, sia l'impianto meccanografico dovevano essere "programmati" passo per passo ogni volta che venivano utilizzati, in quanto erano capaci solamente di ricevere un ordine, interpretarlo ed eseguirlo ma *non* di "ricordare" una serie di ordini ed eseguirli automaticamente. Proprio per questo, conveniva costruire macchine specializzate sull'uno o l'altro compito, e dotarle di comandi complessi e adatti alla particolare applicazione.

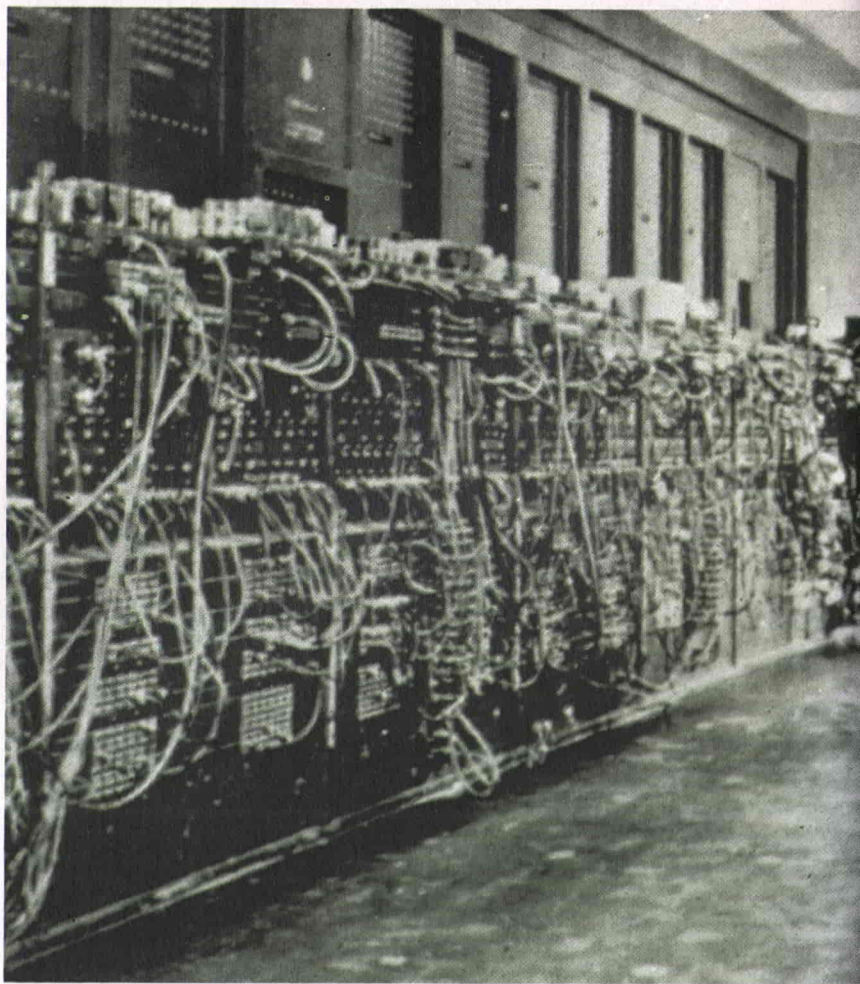
Ancora una volta, le esigenze militari diedero una spinta decisiva all'evoluzione della tecnica; in questo caso, lo stimolo fu fornito dalla necessità di realizzare vere e proprie "centrali di puntamento" per le postazioni antiaeree, capaci di calcolare rotte di aerei e traiettorie di proiettili con sufficiente velocità e approssimazione da fornire, se

non la garanzia, almeno una ragionevole probabilità che il proiettile colpisse il velivolo. Per questo tipo di realizzazione, le macchine di tipo meccanico o elettromeccanico (vale a dire basate su relé) non erano più sufficienti: soprattutto, risultava del tutto insoddisfacente la loro velocità.

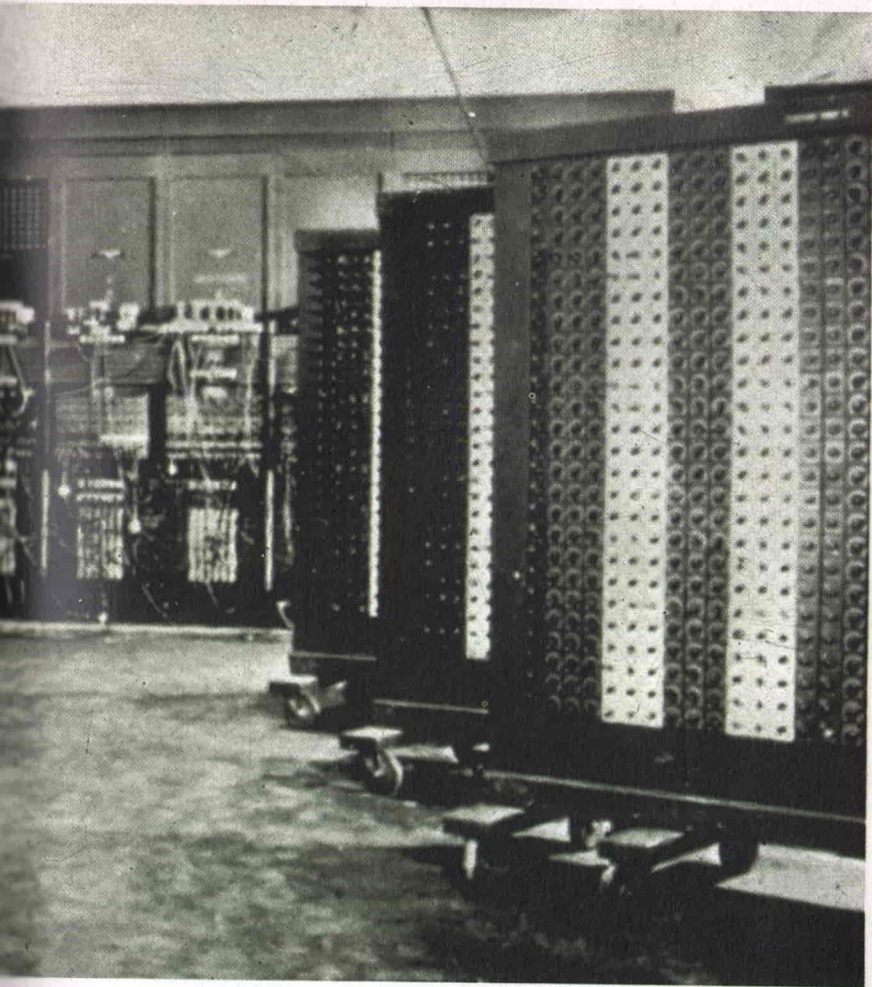
Un gruppo di giovani scienziati della Moore School di Filadelfia accettò quella che sembrava al momento una scommessa molto rischiosa: iniziò a progettare e costruire un calcolatore interamente costituito da dispositivi elettronici, cioè (negli anni quaranta) da valvole termoioniche, *supponendo* che la macchina sarebbe riuscita a funzionare abbastanza a lungo, fra un guasto e l'altro, da consentire agli scienziati di utilizzarla per calcoli complessi. Val la pena di ricordare che a quell'epoca la "vita media" di una valvola termoionica

In questo secolo sono state costruite diverse macchine calcolatrici non elettroniche, come questa "Original Odhner" (a sinistra), che fu prodotta in gran serie. I lettori meno giovani ricorderanno con un po' di nostalgia la diffusione di calcolatori come questa "Comptometer" negli anni precedenti la nascita dei calcolatori elettronici.





La data di nascita del moderno elaboratore elettronico si può far risalire all'ideazione e alla costruzione di questo complicato e ingombrante intrico di fili e circuiti. Si tratta dell'ENIAC, il prodotto degli sforzi di un gruppo di giovani scienziati della Moore School di Filadelfia (USA), negli anni immediatamente successivi alla seconda guerra mondiale. L'intera realizzazione, lunga 30 metri, fa uso di 18 000 delicatissimi tubi elettronici (il transistor non era ancora stato inventato) che sviluppano una potenza complessiva di ben 100 kilowatt: uno spreco enorme di energia e di spazio rapportato ai computer moderni. Le stesse funzioni svolte dall'ENIAC vengono eseguite oggi da un calcolatore portatile, mille volte meno soggetto a guasti.



(cioè la durata del suo funzionamento dall'istante in cui la si installava a quello in cui si guastava) era notevolmente breve: gli avversari del gruppo di Filadelfia calcolarono che una macchina contenente migliaia di valvole avrebbe potuto lavorare solo per pochi minuti fra un guasto e l'altro. I giovani scienziati (Mauchly e Eckert in testa) ebbero il coraggio di ignorare i consigli degli esperti, e la realtà diede loro ragione: la loro apparecchiatura, chiamata "ENIAC", non solo funzionò molto a lungo, ma aprì la strada a tutte le successive generazioni di calcolatori elettronici.

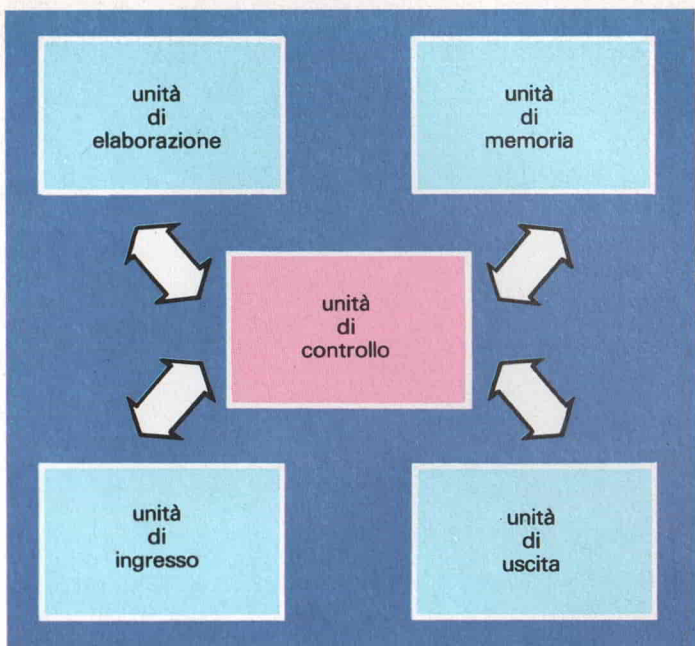
Cerchiamo di vedere che cosa distingueva fondamentalmente l'ENIAC dalle calcolatrici e dai centri meccanografici che lo avevano preceduto, a parte la tecnologia; la nuova macchina era capace di "ricordare" la successione di ordini che doveva eseguire o – per usare un'espressione tecnica – era in grado di "*memorizzare un programma*". In altre parole, una volta che si fosse studiato un algoritmo per la soluzione di un dato problema e si fosse trovata la sequenza di operazioni che la macchina era capace di eseguire e che realizzavano l'algoritmo stesso, si poteva registrare questa sequenza di operazioni in una memoria interna al calcolatore e poi limitarsi a dare a quest'ultimo il comando di eseguire il programma su dati opportuni.

L'ENIAC era una macchina completamente digitale, realizzata con circuiti logici, aritmetici e di memoria che compivano, rispettivamente, le funzioni descritte nei corrispondenti capitoli di questo volume; probabilmente, però, non avrebbe influenzato tanto la successiva evoluzione tecnologica se non fossero comparsi contemporaneamente studi teorici sulla organizzazione di base che un calcolatore digitale poteva assumere e sulle funzioni che esso sarebbe stato capace di svolgere. Il "padre" di questi studi fu John von Neumann, che nel 1948 definì lo schema essenziale del calcolatore in base alle azioni che esso deve compiere, piuttosto che in base alle tecnologie con cui sono realizzate le varie parti.

Una macchina capace di elaborare informazione – indifferentemente numerica o non numerica – secondo i comandi contenuti in un "programma", deve infatti essere capace di:

- *leggere* l'informazione che le viene fornita dall'esterno sia che si tratti di operandi, sia degli ordini di un nuovo programma
- *registrare* operandi e ordini in una propria memoria: notiamo che, all'interno di un calcolatore elettronico digitale, qualunque informazione sarà rappresentata mediante combinazioni di segnali a due soli valori
- *interpretare* i comandi – o, per usare il vocabolo tecnico più corrente, le *istruzioni* – in modo da identificare quali operazioni devono essere compiute, su quali operandi, ecc.
- *eseguire* le operazioni stesse – per esempio, operazioni aritmetiche, oppure confronti, o ancora operazioni di lettura dall'esterno, ecc.
- *comunicare* all'esterno i risultati delle elaborazioni compiute.

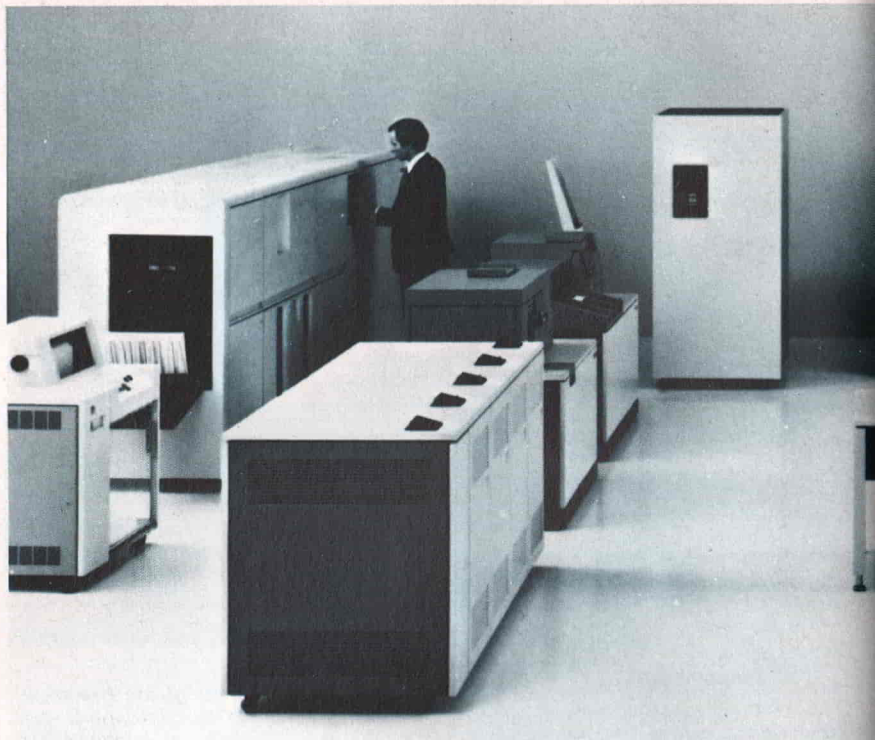
Di conseguenza, il calcolatore dovrà avere una "*unità di ingresso*" capace di leggere l'informazione in una forma comprensibile anche all'uomo – per esempio, mediante le schede perforate – e di "*tradurla*" in segnali elettrici; una "*unità di memoria*"; una "*unità di elaborazione*", capace di compiere le varie operazioni aritmetiche, logiche, di confronto; una "*unità di uscita*" capace di utilizzare i segnali elettrici in modo da presentare l'informazione in una forma leggibile dall'uomo (per esempio, attivando i martelletti di una stampante). A tutto questo insieme di elettronica e di meccanica manca però ancora la parte più importante, quella che veramente distingue il calcolatore da una vecchia calcolatrice da tavola: manca, se voglia-



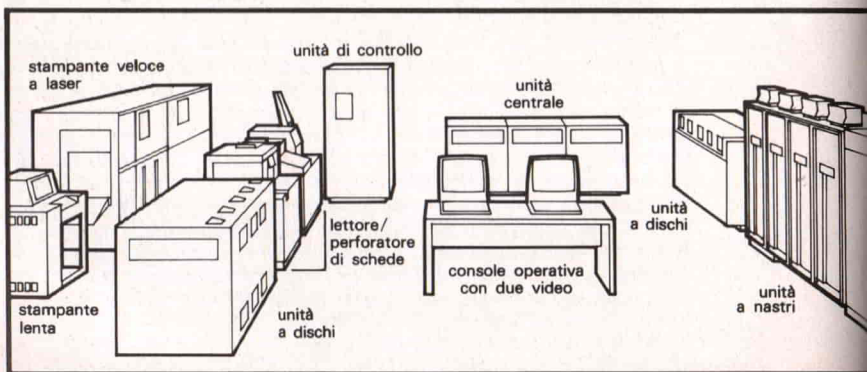
mo definirla così, l' "intelligenza". Occorre infatti un altro elemento capace di trovare nella memoria gli ordini, di interpretarne il significato, di comandarne l'esecuzione da parte delle altre unità: questo blocco costituisce l'*unità di controllo*. In pratica, l'unità di controllo agisce come un "quartier generale" che "instrada" l'informazione lungo l'uno o l'altro percorso all'interno del calcolatore, ordina l'intervento delle varie sezioni operative, comanda il deposito o il recupero di informazioni negli archivi.

Possiamo chiederci, a questo punto, *come* il quartier generale riesca a specificare la particolare informazione che richiede dall'archivio, o come ordini la "classificazione" di questa stessa informazione. In un archivio per così dire "tradizionale" esistono numerosi modi per classificare le varie pratiche: un metodo molto semplice consiste nell'assegnare un "posto" a ogni pratica - posto che sarà la casella di un casellario, o la cartella di un classificatore -, nel numerare ordinatamente tutti i posti e nel trasmettere poi come "identificazione" di una pratica il numero del suo posto. Ebbene, per la maggior parte dei calcolatori elettronici la memoria è organizzata proprio secondo questa regola: ogni posizione è contraddistinta da un proprio numero, ed è grazie a questo numero che il calcolatore identifica l'informazione che vi è contenuta.

Il paragone "unità di controllo-quartier generale" non è del tutto corretto, se immaginiamo che nel quartier generale si "creino" in



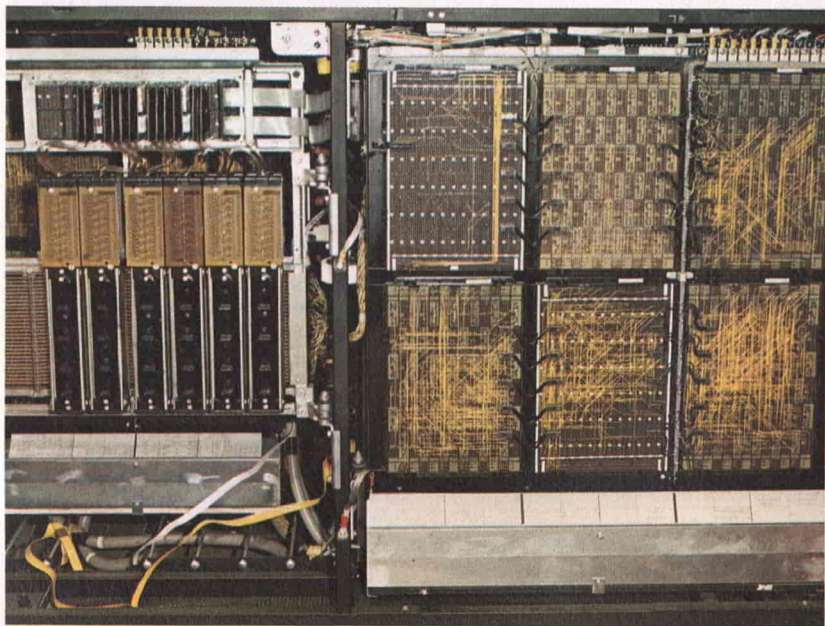
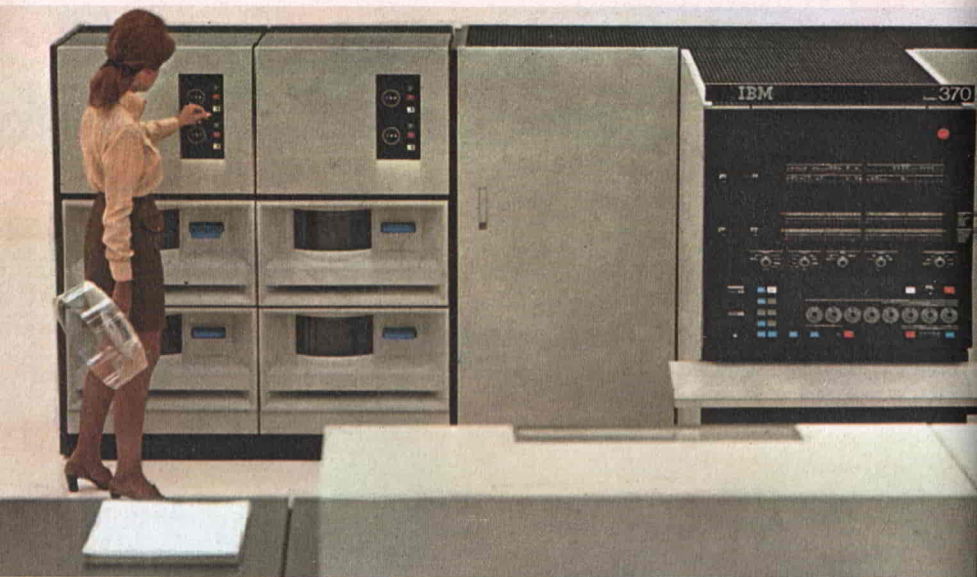
"Fotografia di gruppo" e disegno didascalico delle unità che compongono un moderno elaboratore elettronico, l'IBM 4341. Dischi e nastri magnetici ne costituiscono la possente "memo-

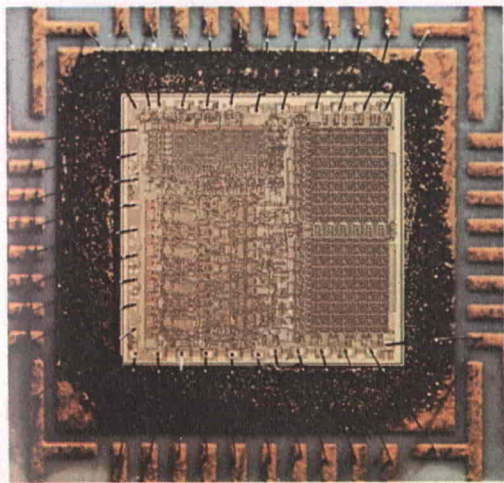




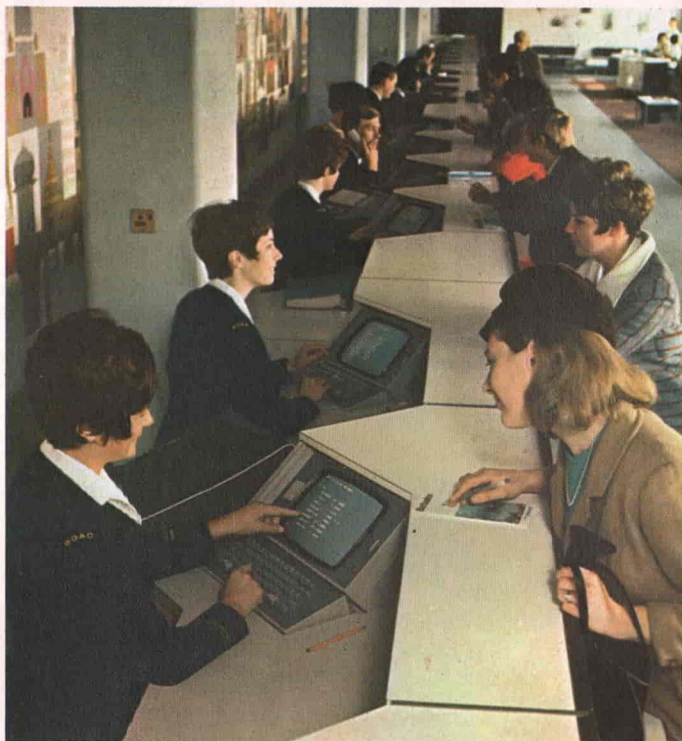
ria", mentre i terminali video, le stampanti e il lettore e perforatore di schede sono gli organi che permettono alla macchina di comunicare con gli operatori umani.

modo autonomo le decisioni; in realtà, al calcolatore che deve essere programmato corrisponde un quartier generale che si limita a comandare l'esecuzione di ordini che gli sono stati forniti in precedenza. Questi ordini, a loro volta, non differiscono formalmente da una qualsiasi "pratica" e come tali possono essere depositati nell'archivio: allo stesso modo, le istruzioni di un calcolatore si presentano come particolari codici binari, che vengono registrati normalmente nella memoria e che toccherà all'unità di controllo di interpretare. Non solo: se si stabilisce a priori che le varie istruzioni siano registrate secondo un ordine ben preciso – in pratica, che le istruzioni che devono essere eseguite una successivamente all'altra siano depositate in posizioni con numeri d'ordine consecutivi – l'unità di controllo sarà in grado di reperirle *automaticamente*, senza che all'operatore sia necessario precisarne di volta in volta l'"indirizzo". Abbiamo così raggiunto quella che è la più importante caratteristica del calcolatore, e cioè la sua capacità di eseguire automaticamente





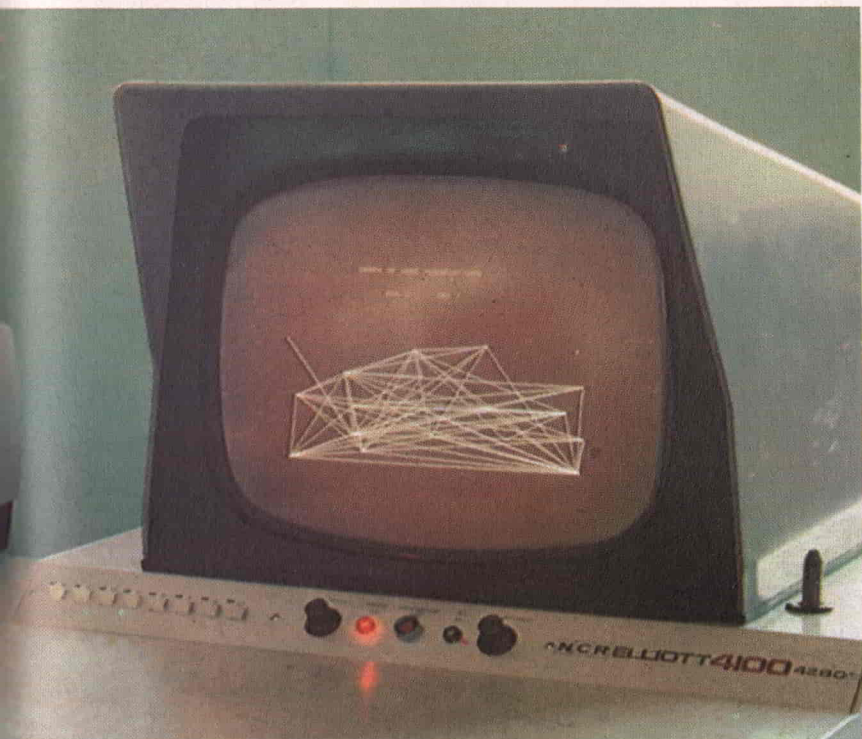
Nella pagina a fronte, in alto, un moderno elaboratore elettronico. Si tratta del modello IBM 370, un computer che ha avuto un notevole successo in tutti i campi di applicazione, dalla ricerca all'industria. Sotto, si vede l'interno di una di queste macchine prodigiose alle quali si può ben dire sia affidato il progresso dell'uomo. Accanto ai mastodontici calcolatori che aiutano ogni giorno scienziati e industrie, le tecniche di una sempre maggiore miniaturizzazione dei componenti elettronici hanno portato allo sviluppo su larga scala di piccoli sistemi di elaborazione "tascabili", il cui prezzo ridotto li ha messi alla portata del grande pubblico: studenti, commercianti, massaie. Il mini-computer (sopra) si avvia a diventare un prodotto irrinunciabile della civiltà dei consumi, come lo sono da tempo la radio e la televisione. A sinistra: un circuito integrato che, nello spazio di pochi millimetri quadrati, racchiude i componenti essenziali di una unità di calcolo per microelaboratori.



successioni di ordini comunque lunghe e complesse che siano state registrate nella sua memoria; è chiaro, in realtà, che senza questa sua caratteristica a nulla servirebbe la straordinaria velocità di calcolo – non sarebbe certo possibile effettuare in un tempo brevissimo i lunghi e complicati calcoli per il comando di una navicella spaziale, se l'ordine di eseguire ogni operazione dovesse essere dato manualmente, di volta in volta!

Da quanto si è detto finora, sembrerebbe che il calcolatore fosse in grado di eseguire solo istruzioni strettamente "sequenziali", che si succedono l'una all'altra senza possibilità di scelta. Se questa fosse la verità, gli elaboratori avrebbero un'utilità molto ridotta; in realtà, essi sono in grado di prendere delle "decisioni motivate" e in base a esse possono scegliere una linea di operazione piuttosto che un'altra, non solo, possono ripetere operazioni già fatte in precedenza cambiando gli operandi.

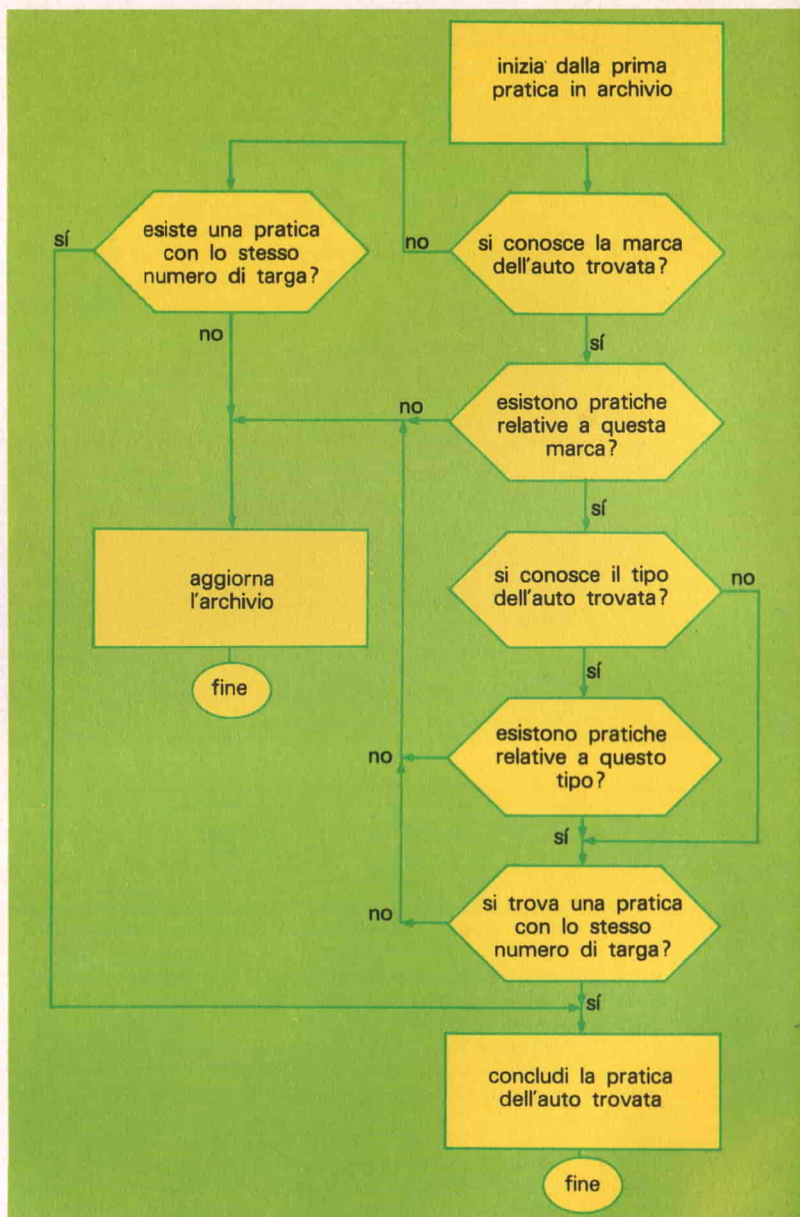
Pensiamo a un archivio di polizia – in un primo momento, un archivio *non* realizzato mediante un calcolatore: consideriamo un caso semplice, quello delle automobili rubate. Supponiamo che nell'archivio le informazioni siano registrate nel modo seguente:



A sinistra: le addette al servizio prenotazioni in un moderno aeroporto dispongono di terminali video collegati a un elaboratore elettronico centrale, grazie al quale, in seguito a una richiesta inoltrata con poche battute su una tastiera, possono conoscere in ogni momento e immediatamente la situazione delle prenotazioni. Sopra: i calcolatori elettronici, opportunamente programmati, risolvono all'istante calcoli anche i più complessi. In questo terminale video appaiono complicate figure geometriche, addirittura tridimensionali: è la soluzione di un problema che avrebbe richiesto altrimenti una lunga serie di calcoli a tavolino.

- prima di tutto, le pratiche sono raggruppate secondo la *marca* delle automobili rubate (il gruppo delle Alfa Romeo, poi quello delle Austin, delle Bentley...)
- in ogni gruppo, si distinguono i *tipi* di automobile della marca in causa (Alfetta, Giulia, Giulietta, Montréal...)
- in ogni sottogruppo "marca-tipo di automobile" si elencano in ordine le targhe.

Ora, la ricerca manuale in questo archivio, in conseguenza del ritrovamento di un'auto rubata, può essere schematizzata con la successione di operazioni dell'illustrazione della pagina seguente: sono



solo operazioni di confronto e decisione, e il passaggio da un'operazione a un'altra è stato indicato con una freccia. Al termine della ricerca, saremo in grado di identificare il proprietario dell'auto ritrovata, oppure di aggiornare l'archivio se il furto non era stato ancora denunciato. Le stesse identiche verifiche, gli stessi passaggi possono essere eseguiti anche dal calcolatore — chiaramente, a velocità molto superiore a quella che può raggiungere un operatore umano: lo schema in figura può essere lo "schema di flusso" o, come si dice, il "diagramma a blocchi" di un programma. Come un archivio di uso "manuale" può poi essere costituito da un insieme di schedari di consultazione immediata, i quali guidano in qualche modo la ricerca su scaffali più ingombranti ma che contengono le pratiche più complete, ecc., così anche il calcolatore può servirsi, oltre che della propria memoria, di registrazioni fatte su altre "memorie" più lente ma molto più capaci, quali nastri magnetici, dischi magnetici, e così via.

Dal 1946 — anno in cui l'ENIAC entrò in funzione — i calcolatori elettronici si sono succeduti in "generazioni" che hanno visto le valvole termoioniche sostituite dai transistor, i transistor dai circuiti integrati, e in corrispondenza la "velocità" (cioè l'inverso del tempo necessario per eseguire un'istruzione) è aumentata continuamente; oggi, si parla di "Megaistruzioni al secondo" ("MIPS") cioè di milioni di istruzioni al secondo. D'altra parte, la miniaturizzazione dei circuiti integrati permette oramai di ospitare un'intera "unità centrale" (unità di elaborazione e di controllo) e una certa quantità di memoria su un unico componente, a costi sempre più bassi (poche migliaia di lire): in effetti, siamo arrivati ad avere su una piastrina di silicio di pochi mm² un intero calcolatore, a parte le unità di ingresso e di uscita — infinitamente più ingombranti. Questo significa, inevitabilmente, che gli elaboratori trovano sempre nuove applicazioni; significa però anche che gli scienziati ora esaminano — e considerano praticamente risolvibili — problemi che sarebbero stati giudicati fino a pochi anni fa di soluzione impossibile, per problemi di tecnologia o di costo.

Nascono così elaboratori sempre più complessi — costituiti in realtà da "gruppi" di calcolatori che collaborano nella soluzione dei problemi: anche nel campo delle macchine elettroniche per l'elaborazione si passa da un lavoro "individuale" al lavoro "d'équipe". La tecnica delle telecomunicazioni viene accoppiata a quella dell'elaborazione per effettuare collegamenti fra calcolatori anche molto lontani, realizzando complesse "reti di calcolatori" — l'esempio più importante è fornito dalla rete ARPA, costruita per l'esercito americano, che collega calcolatori situati nei punti più disparati degli Stati Uniti, dalla costa occidentale fino all'Atlantico.

Infine, si diffondono applicazioni "speciali": il calcolatore non viene più usato solo per svolgere compiti generali di elaborazione e di calcolo, ma viene inserito in una particolare apparecchiatura e si occupa esclusivamente del controllo di essa: è questo il caso delle "centrali telefoniche elettroniche" come lo è di complessi apparecchi radiografici o ancora delle macchine oggi utilizzate per comporre una pagina a stampa. A questi dispositivi digitali, che gli esperti chiamano "dedicati", accenneremo nel prossimo capitolo.



La rete europea di calcolatori elettronici "Euronet". Per mettere a disposizione delle persone interessate quante più informazioni possibili, si è pensato di collegare tra loro elaboratori elettronici importanti sparsi qua e là in Europa. In questo modo ciascun utente può usufruire di tutte le informazioni immagazzinate negli elaboratori collegati chiedendole attraverso i terminali di uno di essi.

Dagli automatismi digitali ai robots

Almeno da un punto di vista teorico qualsiasi apparecchiatura digitale può essere vista come un "caso speciale" di elaboratore: un caso particolarmente semplice, a volte, particolarmente complesso altre volte, e comunque sempre "dedicato" a un particolare lavoro. Se vogliamo considerare la realtà più da vicino, però, questa definizione astratta non ci soddisfa più del tutto; nell'apparecchiatura non compaiono solamente delle funzioni di elaborazione digitale -

spesso, anzi, queste non sono le funzioni più importanti, non tanto da essere "caratterizzanti" per l'apparecchiatura stessa.

Consideriamo la categoria più importante e anche più eterogenea, quella degli *automatismi digitali*. Un automatismo digitale, in parole molto semplici, può essere descritto come una macchina che ne controlla altre ricorrendo, al fine di realizzare tale suo compito, a forme di elaborazione digitale: per questo scopo, deve essere dotata della capacità di prelevare informazione sulle condizioni di funzionamento della macchina comandata, tradurla mediante segnali elettrici, trasformare questi segnali in forma digitale, effettuare i calcoli opportuni e finalmente "azionare" di conseguenza la macchina comandata. Il controllo degli ascensori di un grattacielo è un automatismo digitale - e non molto semplice, fra l'altro. I robots atterrati sulla Luna e su Marte, capaci di prelevare campioni di terreno, analizzarli, scattare fotografie e via dicendo, potevano essere visti nel loro complesso come sofisticatissimi automatismi digitali. Il problema di "tradurre" l'informazione scambiata fra meccanismo non-elettronico e dispositivo elettronico in forme rispettivamente comprensibili è uno dei più gravi, se non il più grave, che si incontra in questo campo. D'altra parte, è grazie all'informazione in entrata che il dispositivo elettronico può decidere sulle operazioni, le "strategie" migliori da imporre alla macchina che esso controlla, e dalla precisione e puntualità dei comandi dipende il buon funzionamento della macchina controllata. Occorre quindi disporre, in ingresso all'automatismo, di "sensori" che rilevino il valore delle grandezze che si vogliono misurare e lo traducano in segnali elettrici, e in uscita di "attuatori" che "realizzino" i comandi.

In molti casi, proprio la difficoltà di ideare e costruire sensori e attuatori ha impedito, o ritardato, l'introduzione degli automatismi digitali: consideriamo un esempio che solo oggi è diventato un caso pratico e non un'anticipazione fantascientifica, cioè quello del controllo elettronico della combustione e dei gas di scarico del motore di un'automobile.

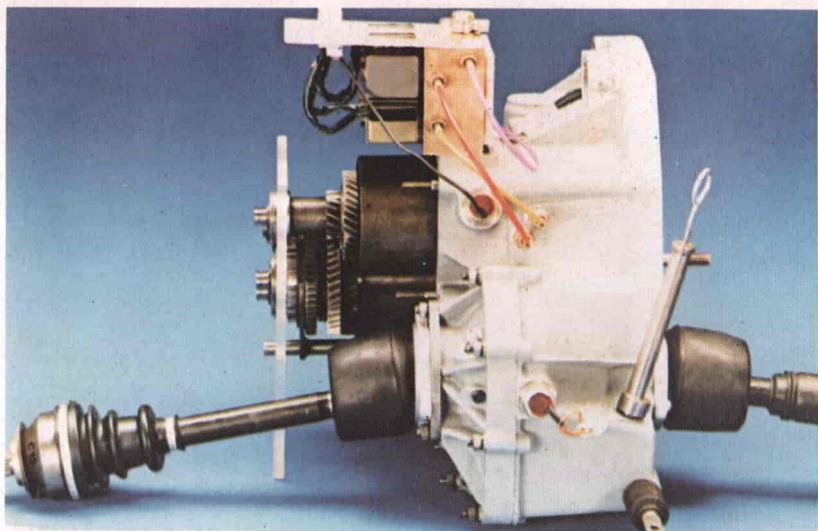
La necessità di una tale regolazione è stata sottolineata drammaticamente sia da considerazioni di tipo ecologico, sia dalla necessità di contenere i consumi di carburante; d'altra parte, l'elettronica digitale offre, al momento, gli unici strumenti praticamente utilizzabili, grazie ai circuiti integrati a grandissima densità (cioè ad alto grado di miniaturizzazione). Si tratta di regolare la carburazione in modo che non vi sia uno spreco di carburante, in rapporto al regime del motore, e che i gas di scarico non contengano elementi tossici in quantità superiore a una "soglia" scelta in modo da limitare l'inquinamento atmosferico. Ora, rilevare non solo la temperatura, ma anche la composizione di un gas così da tradurre automaticamente tale informazione in segnali elettrici non è impossibile - anzi, tale pratica possibilità è nota da anni: nel primo caso si può ricorrere abbastanza semplicemente a dispositivi le cui caratteristiche elettriche variano con la temperatura, nel secondo caso si possono fare rilevamenti anche molto precisi ricorrendo a vere e proprie analisi chimiche.

Metodi di questo genere, però, sono accettabili nel caso dell'automobile solo se il *costo* dei sensori è decisamente basso - meta rag-

giunta da tempo quando si tratta di misurare la temperatura (tutti i materiali hanno resistività che varia con la temperatura, e si tratta solo di sceglierne uno più adatto degli altri per realizzare un "termometro"), mentre solo in questi ultimi tempi si è riusciti a identificare dispositivi con analoghe caratteristiche per misurare la composizione dei gas.

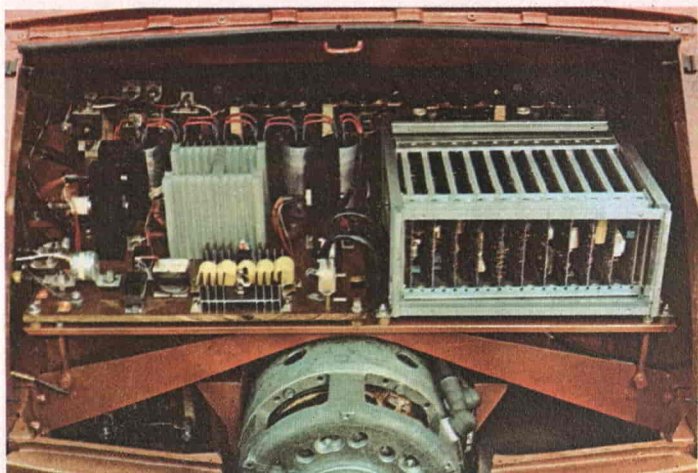
Una volta che si è superato lo "scoglio" dei sensori, le leggi della meccanica e della termodinamica ci forniscono le regole per calcolare, istante per istante, la composizione "ottima" della miscela aria-carburante: si tratta di "programmare" l'algoritmo derivato da tali regole e di realizzare un elaboratore abbastanza piccolo e – ancora una volta – poco costoso, ma pur capace di eseguire tale algoritmo con la velocità richiesta per il controllo del motore. A questo punto, si presenta il problema dell'attuatore: nel nostro caso, un dispositivo capace di tradurre i comandi dell'elaboratore in una composizione aria-benzina. Naturalmente, i progettisti avrebbero potuto accettare come un dato di fatto ineluttabile la struttura di carburatori e iniettori (cioè degli "attuatori" esistenti), e tentare di realizzare per questi un controllo elettronico: in pratica, si trattava di una soluzio-





Il traffico stradale viene controllato elettronicamente ora per ora tramite un'unica centrale operativa, come in questa centrale del traffico di Londra ovest (a sinistra). A destra: una cabina stradale dotata di sensori che avvertono il passaggio dei veicoli e comunicano queste informazioni alla centrale. Sopra: un cambio d'automobile elettronico. L'avvento delle tecniche elettroniche in un campo di produzione tradizionalmente meccanico come quello delle automobili, è destinato a innescare anche qui una rivoluzione tecnologica. Sono già in circolazione auto dotate di controllo elettronico dell'alimentazione, grazie al quale si riducono i consumi e l'inquinamento e si consegue un rendimento ottimale del motore.



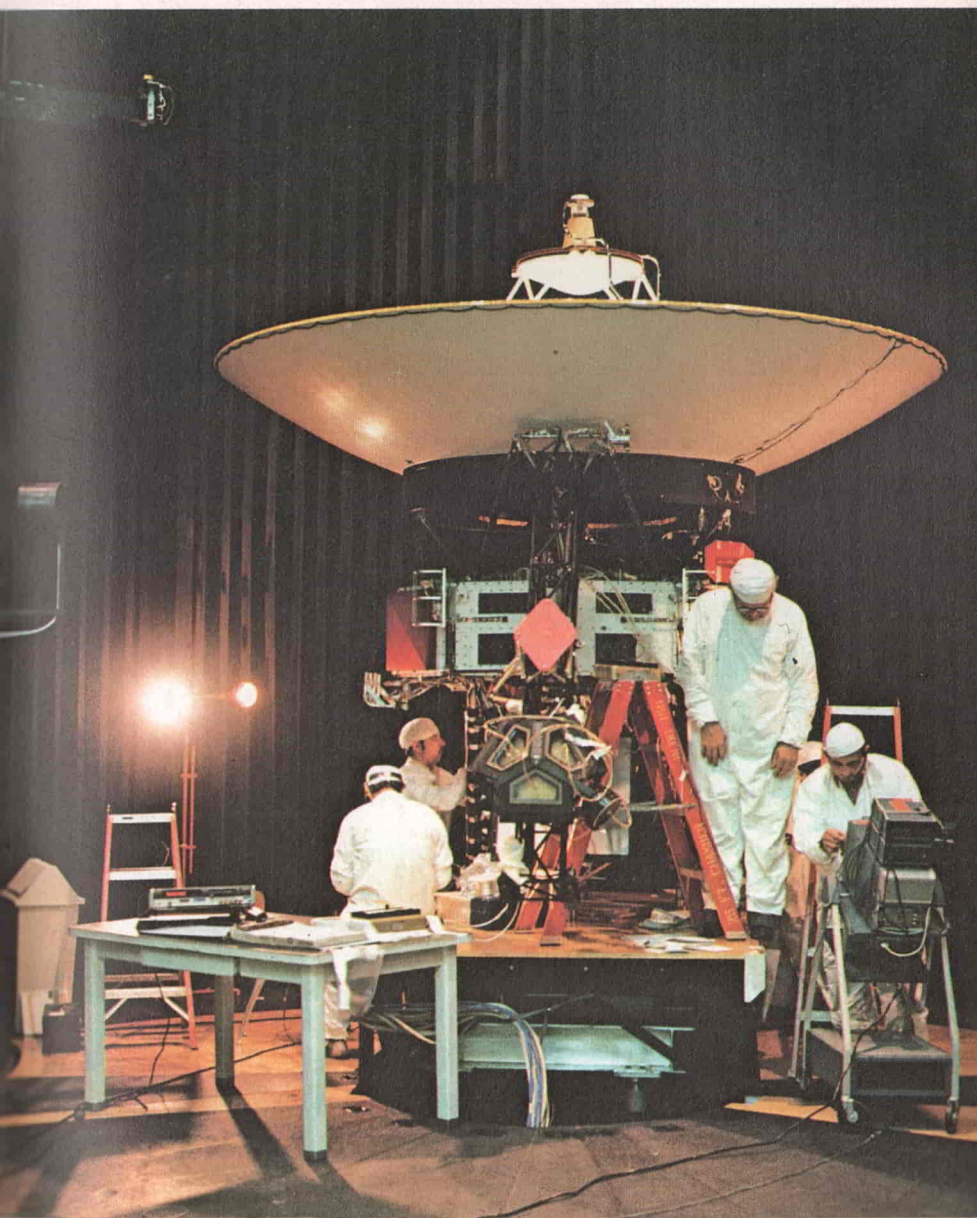


ne inaccettabile sotto ogni punto di vista e si è preferito realizzare la carburazione con sistemi del tutto nuovi (e comunque molto più affini agli iniettori che non ai carburatori tradizionali).

L'esempio appena fatto è, diciamo pure, molto "vistoso", e sicuramente è destinato ad avere una diffusione enorme, più vasta forse di ogni altro tipo di automatismo: basta pensare che, entro i primissimi anni '80, esemplari di tale automatismo verranno installati su tutte le automobili prodotte negli Stati Uniti. Gli automatismi, però, e in particolare quelli digitali, influenzano da un tempo ben più lungo l'intera società umana. Abbiamo già citato i telai Jacquard — un esempio certamente non elettronico ma che ha avuto un'influenza importante e duratura sull'evoluzione dell'elettronica.

In un'epoca molto più recente, in pratica dalla fine della seconda guerra mondiale, l'ambiente che ha offerto lo sbocco più rilevante per gli automatismi digitali è stato quello della meccanica, particolarmente della meccanica pesante. In questo settore, la realizzazione delle macchine "a controllo numerico", prime fra tutte le macchine utensili, si è resa necessaria in conseguenza dello sviluppo industriale e della grande produzione in serie, e l'ha a sua volta condizionato. Pensiamo infatti alla produzione di parti meccaniche dal disegno complicato, che devono essere ricavate da un unico blocco metallico con operazioni quali fresature, torniture, etc., e di cui si devono costruire numerosissimi esemplari tutti il più possibile uguali l'uno

Un'immagine avveniristica in parte già realtà: sollevato il cofano di quest'auto, al primo colpo d'occhio non si vedono spinterogeno, candele, ecc., ma generatori, condensatori, transistor e moduli di circuiti stampati. A destra: l'ingegneria elettronica ha dato un aiuto sostanziale allo sviluppo delle tecnologie spaziali, che costituiscono uno degli aspetti di maggiore risonanza nel mondo attuale. Senza la miniaturizzazione estrema di ogni apparecchiatura non sarebbe possibile assistere a scene come questa: una navicella spaziale sottoposta agli ultimi ritocchi prima di essere lanciata verso i confini del sistema solare.



all'altro. Ciò si rende necessario per poterli sostituire l'uno all'altro indifferentemente quando si guastano: per esempio, pensiamo alle parti di un motore d'automobile. Un meccanico, per quanto abile, difficilmente riuscirà a comandare una macchina utensile in modo da riprodurre molte volte lo stesso profilo con sufficiente precisione; ricordiamo che non dovrà comandare solo la traiettoria dell'utensile, ma anche la sua velocità, la posizione del pezzo che sta lavorando, ricordiamo che dovrà tener conto dell'usura degli utensili e delle altre parti della macchina... o almeno, che dovrebbe continuamente controllare questi fattori.

In pratica, un risultato del genere non potrebbe essere ottenuto, e sicuramente non con la velocità ed entro i limiti di costo imposti dalla grande produzione. Può invece essere raggiunto se la macchina utensile ha un'unità di controllo in grado di far seguire all'utensile un profilo voluto, calcolando punto per punto traiettoria e velocità e anche le variazioni imposte da usure e assestamenti; un tipico automatismo, a conti fatti, impegnato da calcoli che possono essere notevolmente complessi e per i quali si richiede a volte una velocità rilevante. Per ottenere l'informazione d'ingresso, l'automatismo può ricorrere agli strumenti più diversi che gli forniscono dati su spostamenti e velocità – dai dispositivi ottici a quelli meccanici; per potere poi comandare in modo preciso il moto, sono stati realizzati particolari motori elettrici quali ad esempio i "motori a passo", di cui si controllano i movimenti in modo veramente digitale, un passo per volta.

In una macchina a controllo numerico il "pezzo" da lavorare deve essere messo in posizione da un operatore; anche se il trasferimento da una macchina a un'altra è a sua volta automatizzato, con nastri trasportatori o catene o altri dispositivi controllati da macchine coordinate l'una con l'altra, è sempre necessario un operatore che intervenga se uno dei pezzi ha delle malformazioni che ne impongono l'eliminazione, o se si è disposto in modo tale da non poter poi essere correttamente lavorato dalla macchina successiva nella catena, o se intervengono dei guasti. A maggior ragione, poi, i pezzi devono essere presi e montati in sistemi più complessi sotto la supervisione, se non per azione diretta, di un operatore: ecco la "catena di montaggio", dove le varie macchine – per automatizzate che siano – non sono che strumenti più potenti in mano a un operaio, al quale resta però pur sempre un lavoro faticoso, ripetitivo, a volte rischioso, e che richiede poco o nulla di creativo.

Era una conseguenza abbastanza ovvia dell'automazione che si pensasse di introdurre macchine capaci anche di effettuare delle "manipolazioni": dotate cioè di organi mobili, in grado di afferrare dei pezzi, di comporli in modo opportuno, disponendoli secondo l'orientamento previsto, di scartare i pezzi che per qualunque motivo non si adattano a tali operazioni.

Macchine con queste caratteristiche sono chiamate oggi "robots industriali": molto meno pittoresche dei robot da fantascienza – spesso si presentano essenzialmente come robuste strutture portanti metalliche con "braccia" flessibili che si muovono lungo complessi di rotaie – ma già oggi ampiamente impiegate per una quantità di lavori che vanno dal caricamento di carrelli e macchine tra-

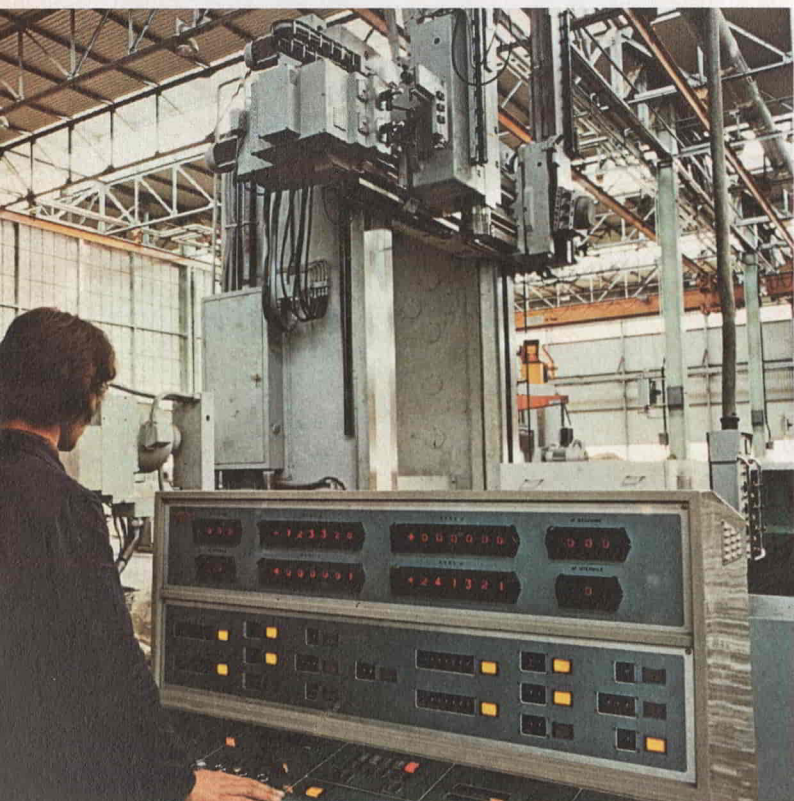
Un'apparecchiatura bionica (sotto) costruita nello Stanford Research Institute, capace di muoversi evitando gli ostacoli che si trovano sul suo cammino. Essa è meno pittoresca ma forse più funzionale del robot umanoide (nel riquadro in alto), che parla e si muove mediante ordini impartiti a distanza tramite un microfono.



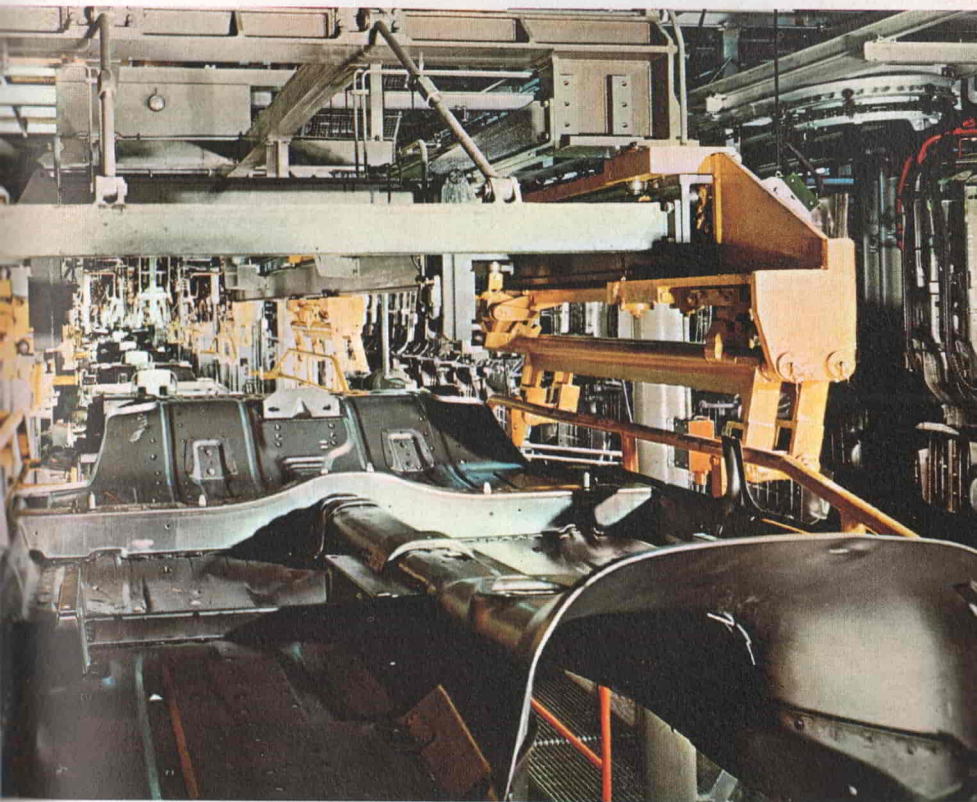
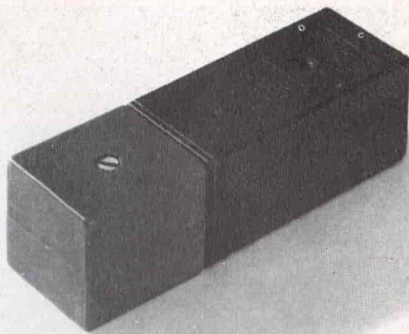
sportatrici alla saldatura delle parti di una carrozzeria d'automobile, dalla lavorazione delle materie plastiche alla verniciatura delle lamiere, dall'assemblaggio di circuiti elettronici alla forgiatura di parti metalliche. Si è giunti addirittura, nel giro di pochissimi anni, a distinguere "generazioni" di robot, distinguendo i più evoluti, più "intelligenti", dai loro antenati primitivi che erano dotati di poche capacità elementari.

Alle prime macchine dotate solamente di un rudimentale "senso del tatto", in modo da controllare la presenza e le dimensioni di un oggetto afferrato dalle "mani", se ne affiancano ora altre fornite di "udito" (il calcolatore che controlla il robot riconosce un numero limitato di comandi impartiti da voce umana) e soprattutto di una "vista", grazie all'occhio di una telecamera e a un calcolatore programmato in modo da riconoscere le immagini presentate.

A questo punto compare l'eterno problema del tecnico-apprendista stregone: qual è il confine fra un intervento "benefico" dell'automa-



L' "oggetto misterioso" a destra è un sensore in grado di riconoscere la presenza di un oggetto di metallo nelle vicinanze grazie all'assorbimento di campo magnetico causato da questo nelle spire di una sua bobina interna. Tale assorbimento di energia è rilevabile dall'intensità della corrente che esce dalla bobina. Sensori come questo costituiscono il "tatto" dei "robot industriali", che manipolano, saldano e verniciano, secondo un programma prestabilito, lamiere e metalli. Qui sotto si vede una di queste macchine - una saldatrice automatica - mentre provvede all'assemblaggio del pavimento di una carrozzeria d'automobile. A sinistra: un sistema elettronico a controllo numerico applicato a un tornio verticale.





Uno dei vantaggi più importanti delle tecniche di automazione oggi consentite dall'elettronica è la possibilità di togliere l'uomo dagli ambienti ostili o pericolosi, per la presenza di gas tossici, elevate temperature o altro (come si vede nella foto), consentendo all'operatore di controllare a distanza, e anche in modo più proficuo, il processo produttivo.

zione e un danno sociale di vastissime proporzioni? È chiaramente "benefico" che un robot sostituisca un uomo per la verniciatura a spruzzo delle lamiere – uno dei lavori più pericolosi, per la presenza di gas altamente tossici – ma è anche necessario trovare un altro posto di lavoro per l'operaio "spodestato"; d'altra parte, le tecniche che conducono a una (almeno locale) riduzione dei posti di lavoro sono le stesse che permettono di evitare all'uomo funzioni rischiose in ambienti ostili. Non è possibile, in questo campo, distinguere una tecnica "buona" da una "pericolosa" o "cattiva": una volta di più, toccherà all'uomo decidere come e quando servirsi degli strumenti che gli vengono posti in mano.

Controllo delle onde elettromagnetiche

Controllo delle onde elettromagnetiche

Le onde sul lago

Spesso, per superare una difficoltà di "comunicazione", gli uomini hanno fatto ricorso ad apologhi: ci sembra giusto aprire, a nostra volta, questa parte del libro con un breve apologo.

Due ragazzi vivevano sulle sponde opposte di un piccolo lago, non più largo di un chilometro; le loro vite, in due cassette nascoste fra gli alberi, erano in apparenza molto simili, semplici e ricche di scoperte ed esperienze diverse. I due ragazzi amavano raccontarsi queste esperienze ed emozioni, e giudicavano i loro unici incontri – per la messa domenicale – troppo brevi e rari, in una parola insufficienti a soddisfare la loro sete di comunicare.

Concepirono così un sistema per comunicare quando e quanto volessero, senza attendere la domenica e senza coinvolgere gli adulti. Un sasso gettato da uno dei ragazzi nelle acque del lago di fronte alla propria casa provocava un'onda che dopo un certo tempo giungeva, attenuata ma riconoscibile, sull'altra riva. Questo era il segnale di chiamata che, se necessario, veniva ripetuto.

Alla risposta seguiva una breve ed essenziale conversazione, secondo un codice convenuto, i cui elementi essenziali erano il numero e l'intervallo con cui i sassi erano gettati in acqua e di conseguenza il numero e la distanza delle onde generate.

Le comunicazioni non erano tuttavia così facili e sicure come può sembrare: la naturale increspatura della superficie del lago talvolta distruggeva e talvolta simulava un segnale, la tempesta impediva qualsiasi comunicazione, barche e zattere provocavano onde riflesse che gettavano nella confusione i due corrispondenti.

Un giorno arrivarono anche a quelle cassette sistemi di comunicazione quali la radio, il telefono e la televisione.

Ora i due ragazzi ascoltavano la stessa voce, guardavano le stesse immagini e tutto ciò se lo ripetevano al telefono: le loro vite erano sì più vicine, ma erano anche diventate identiche.

La prima volta che s'incontrarono, scoprirono di non aver più nulla

da dirsi. Le uniche onde sul lago restarono quelle che il vento continuava a generare, ma che nessuno più sapeva o voleva leggere.

La radio

I primi esperimenti che Marconi fece, alla fine del secolo scorso, non erano in sostanza dissimili come scopo da quelli dei due ragazzi che volevano comunicare tra loro generando delle onde sulla superficie del lago e sfruttandone la propagazione sulla superficie di esso.

Ne differivano però **totalmente** per quanto riguardava il mezzo di propagazione, la natura delle onde e il modo di generarle, in ciò consisteva la novità.

Già da tempo si conosceva l'esistenza di onde elettromagnetiche, della stessa natura della luce, ma non così facilmente generabili né direttamente percepibili dall'uomo.

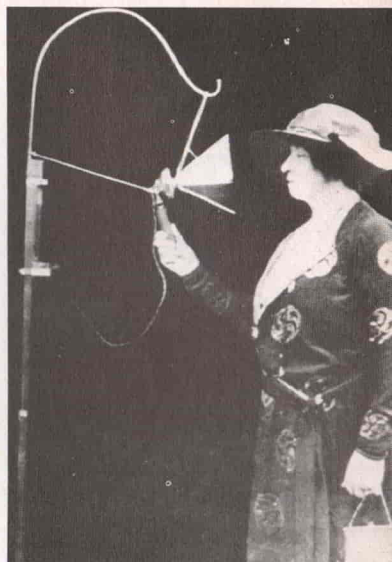
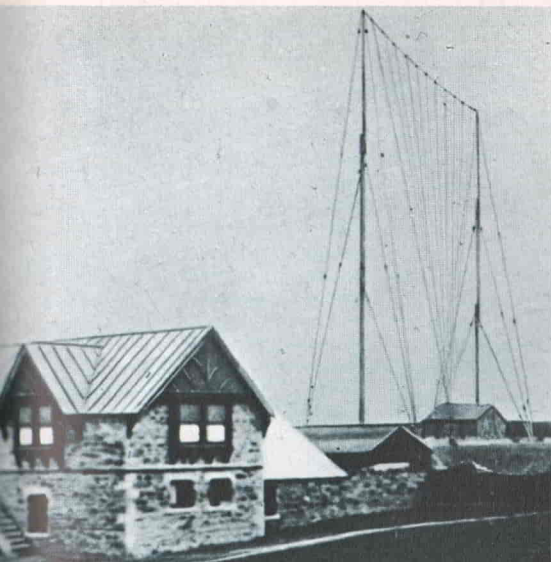
Un modo di generare queste onde è la scintilla elettrica: se nel circuito attraversato dalla corrente che la genera si inserisce una *antenna* si ottiene un'onda elettromagnetica che si propaga nello spazio circostante. Questa propagazione trova un ottimo mezzo nello spazio vuoto (pensiamo alle comunicazioni odierne con gli astronauti e con i satelliti) e avviene con la stessa velocità della luce: 300 000 Km, sec.

L'onda generata da una scintilla è simile a quella provocata dal sasso nell'acqua: è un'onda smorzata, che col tempo si attenua e svanisce nel luogo dove è stata generata. Nel luogo dove viene ricevuta avrà una forma e un andamento simili a quelli con cui è stata generata; la sua ampiezza sarà tanto minore quanto più grande è la distanza dal luogo di origine. Mediante un'opportuna sequenza di scintille e un codice adeguato si può comunicare: questa è stata la prima forma di trasmissione radio, la *radiotelegrafia*.

Il ricevitore deve essere anch'esso munito di un'antenna, che ha lo scopo di raccogliere le onde dallo spazio e di trasformarle in corrente e tensione elettrica che possono per esempio essere "ascoltate", sotto forma di impulsi sonori, in una cuffia.

La radiotelegrafia fece rapidamente progressi enormi: i due passi fondamentali furono l'effettuazione di comunicazioni senza filo superando l'Atlantico (1901) e l'installazione a bordo di imbarcazioni e aerei, che rompeva così per sempre l'isolamento dei navigatori. Il successivo passo naturale era quello della *radiofonia*: ci si chiese cioè se era possibile pensare di trasmettere con la radio la voce umana. Il primo punto da considerare era che la voce umana, come la musica, è costituita da onde sonore continue di intensità variabile, con alcune pause. In ciò consiste la differenza sostanziale rispetto alla telegrafia in cui è sufficiente trasmettere segnali *impulsivi*, vale a dire discontinui, che possono essere anche tutti uguali in intensità, dal momento che la loro distanza nel tempo è il solo criterio per distinguerli.

La trasformazione della voce in un segnale elettrico, poteva considerarsi già risolta dal momento che poteva essere effettuata con lo stesso microfono in uso nel telefono. Il segnale elettrico così ottenuto non si prestava però alla trasmissione nello spazio sotto forma di onde elettromagnetiche.



A sinistra: l'antenna con cui Marconi trasmise un segnale radio per la prima volta attraverso l'Atlantico. A destra: il soprano Nellie Melba canta per il pubblico della neonata radio inglese nel 1920.

Infatti le onde elettromagnetiche hanno diverse caratteristiche di propagazione a seconda della loro frequenza o "lunghezza d'onda": è nota l'esistenza di onde corte, medie e lunghe.

Un'onda di 30 m, che corrisponde a una frequenza di 10MHz, è un'onda corta; un'onda di 300 m (1MHz) è un'onda media; infine un'onda di 3000 m (100KHz) è un'onda lunga.

La frequenza della voce è variabile, come ovviamente lo è quella della musica: per quest'ultima si va da alcune decine di Hz fino a 15 000 Hz circa.

Le lunghezze d'onda corrispondenti andrebbero da decine di migliaia di chilometri a decine di chilometri.

Per ragioni di propagazione e soprattutto a causa delle dimensioni dell'antenna trasmittente, la cui lunghezza è proporzionale alla lunghezza d'onda, non è proprio pensabile trasmettere direttamente i segnali che sono generati dal microfono sotto forma di onde elettromagnetiche.

Le condizioni da soddisfare per rendere possibile la trasmissione a distanza della voce e della musica sono:

- poter generare un'oscillazione continua con una frequenza corrispondente a una lunghezza d'onda elettromagnetica facilmente propagabile;

- poter “sovrapporre” in qualche modo a quest’onda il segnale fonico o musicale.

La prima condizione fu soddisfatta grazie all’invenzione del triodo, usato come oscillatore alla frequenza desiderata, che all’inizio corrispondeva a quella delle onde lunghe; le oscillazioni elettriche così generate venivano convogliate all’antenna trasmittente e da questa, sotto forma di onde elettromagnetiche, trasmesse nello spazio.

Quest’onda, per ragioni intuitive, fu detta *onda portante*.

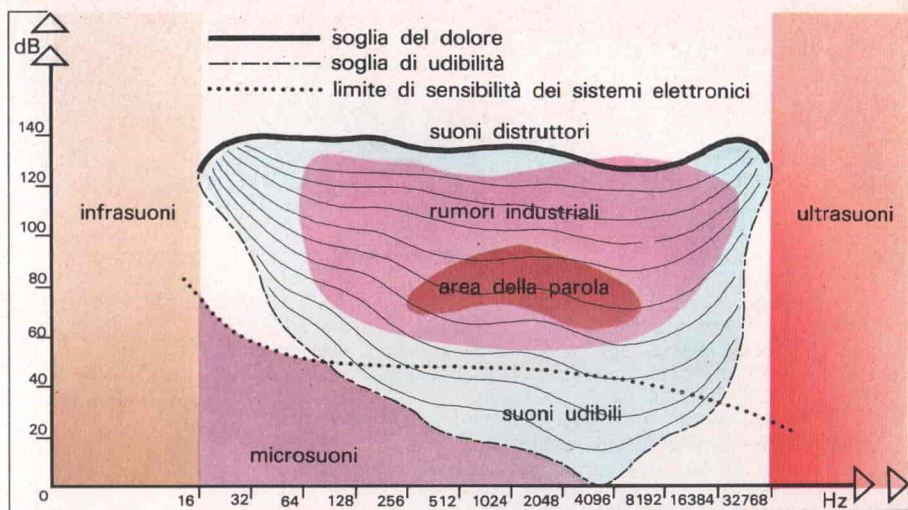
Il secondo problema fu risolto mediante l’impiego del *modulatore di ampiezza*, cui abbiamo già accennato. Questo consente in sostanza di far variare l’ampiezza dell’onda portante esattamente come varia il segnale *modulante* che si vuol trasmettere. In caso di silenzio, e cioè di assenza di segnale modulante, l’antenna trasmette un’onda continua d’ampiezza costante; al comparire del segnale fonico o musicale l’ampiezza della portante aumenta o diminuisce con il segnale stesso, come s’è detto.

Successivamente, sono stati scoperti altri modi di associare un segnale modulante a un’onda portante: nella radiofonia, il metodo più importante dopo la *modulazione d’ampiezza* è la *modulazione di frequenza*, secondo la quale il segnale modulante fa variare di una piccola percentuale la frequenza dell’onda portante.

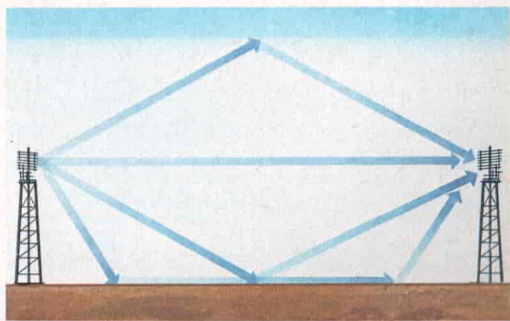
Mentre la modulazione d’ampiezza (MA) è applicata alle onde corte, medie e lunghe, la modulazione di frequenza (MF) è applicata a onde *ultracorte*, la cui lunghezza si aggira sui 3 m (100MHz).

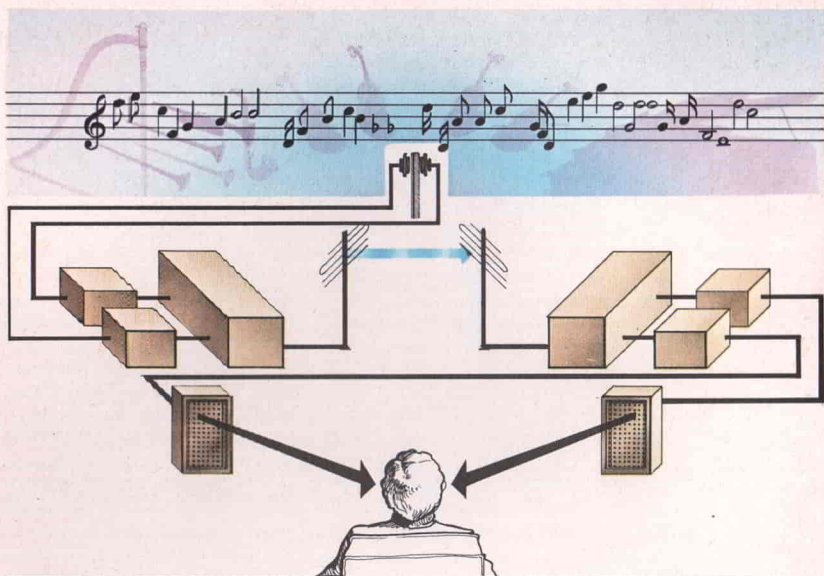
La radiodiffusione a modulazione di frequenza consente la trasmis-





Le diverse zone dello "spettro" sonoro: lungo l'asse orizzontale scorre la frequenza - che si misura in Hertz (Hz) - lungo quello verticale l'intensità - espressa in decibel (dB). Qui a fianco e in basso: diversi modi di propagazione delle onde radio (alcuni sfruttano la riflettività della ionosfera terrestre). Pagina a fianco: un'apparecchiatura radiofonica dei primi anni del secolo.





sione della musica ad "alta fedeltà" e anche la "stereofonia", cioè la trasmissione contemporanea di due segnali sonori, uno per l'altoparlante sinistro e uno per quello destro.

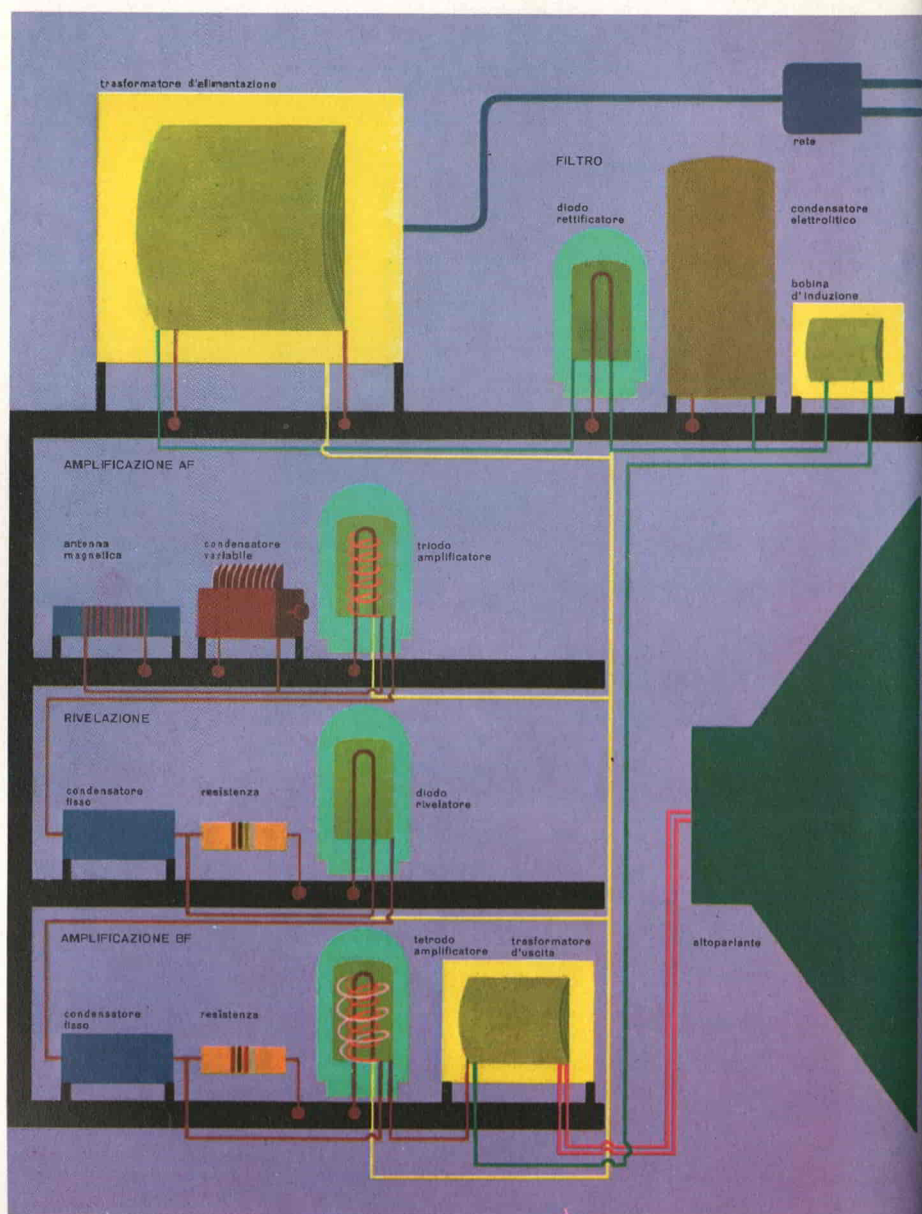
A differenza delle onde usate nella modulazione d'ampiezza, che possono propagarsi utilmente per migliaia di chilometri, le onde ultracorte modulate in frequenza sono ben ricevibili solo se si è in "visione diretta" del trasmettitore e quindi, sulla superficie terrestre, a una distanza massima di qualche decina di chilometri.

I radioricevitori più diffusi sono quelli posseduti e usati dai privati cittadini per l'ascolto dei programmi radio trasmessi dalle società radiofoniche pubbliche e private. Un moderno ricevitore di tale tipo consente la ricezione in MA e in MF, è realizzato con circuiti integrati e transistor e può essere alimentato da batterie o da rete. Esaminiamo ora la struttura di questo radioricevitore.

Come abbiamo detto, esso può ricevere sia onde modulate in ampiezza che in frequenza: poiché la natura di queste onde è molto diversa, come diversa è la loro lunghezza, occorrono due antenne separate e diverse per riceverle. L'antenna MA, che era una volta costituita da un filo conduttore più o meno lungo che usciva dal retro dell'apparecchio, è oggi incorporata nel radioricevitore e consiste in una bobina avvolta su una bacchetta di *ferrite*, che è un materiale magnetico ceramico. Le onde di frequenza non molto elevata, come per esempio le onde medie, nel passare in vicinanza di questa antenna sono "catturate" dal materiale magnetico e inducono nella bobina una tensione avente la loro stessa frequenza.

Nella pagina a fronte: ricezione di un programma radio "stereofonico". Due microfoni leggermente separati inviano segnali complementari al "mixer", quindi si ha la trasmissione via etere. L'apparecchiatura dell'utente restituisce i due segnali originali e li trasmette da due diversi altoparlanti, creando l'effetto stereo. Qui a fianco: una radio miniaturizzata, a cuffia. In basso: un radioregistratore portatile.





L'antenna MF è invece costituita da una bacchetta metallica estraibile a telescopio dalla parte superiore dell'apparecchio: su di essa, onde di 3 m inducono segnali elettrici sufficienti – in condizioni normali – a garantire una buona ricezione.

Prima di procedere oltre occorre considerare che nello spazio che ci circonda sulla superficie terrestre sono oggi presenti allo stesso tempo onde elettromagnetiche generate da innumerevoli stazioni trasmettenti.

La possibilità di ricevere una particolare stazione è dovuta a quella che è forse la più importante proprietà di un ricevitore; si tratta della *selettività*, cioè della capacità di discriminare le varie onde in base alla loro lunghezza o frequenza.

Grazie a questa proprietà si possono avere più trasmettitori fisicamente vicini e funzionanti contemporaneamente purché su lunghezze d'onda diverse. Quanto alla selezione di una particolare onda, essa si realizza mediante la *sintonia* o accordo del ricevitore sulla frequenza desiderata.

Ancora una volta, il fenomeno non è esclusivamente elettrico ed era ben noto ancora prima che nascesse l'elettronica.

Si sa che una corda di uno strumento musicale "entra in risonanza", se tra i suoni che l'investono ve n'è uno che ha la stessa *altezza*, cioè frequenza, del suono che la corda, sollecitata direttamente, emetterebbe.

Si può pensare che la manopola di sintonia di un radioricevitore sia l'equivalente della chiave con cui si tende la corda di uno strumento musicale: con questa manopola si porta la sezione propriamente ricevente dell'apparecchio a "risonare" con l'onda desiderata. In un primo tempo, il procedimento di sintonia consisteva proprio nella ricerca di un accordo, che si otteneva sostituendo e variando condensatori e induttori che costituivano in sostanza un filtro passa banda, il cui scopo era di consentire il passaggio della sola frequenza desiderata.

Oggi, la parte ricevente di una radio è detta *sintonizzatore*, ed è piuttosto complessa: in essa tra l'altro la frequenza dell'onda ricevuta – qualunque essa sia – viene convertita *sempre* a un valore fisso, detto *media frequenza*, più basso del valore originale ma molto più alto di quello del segnale modulante.

L'alta selettività dei moderni radioricevitori è dovuta appunto alla presenza di un circuito di media frequenza, dove l'onda ricevuta viene accuratamente filtrata in modo da eliminare le onde provenienti da stazioni "adiacenti" a quella desiderata.

A questo punto occorre recuperare dall'onda portante il segnale modulante: per *portanti modulate in ampiezza* questa operazione è molto semplice ed è detta *rivelazione*. Infatti, per esempio, un sem-

Lo schema semplificato di un ricevitore radio tradizionale. La parte superiore serve per trasformare la tensione alternata da rete (220Volt) in tensione continua per l'alimentazione dei circuiti; l'amplificatore in alta frequenza (AF) raccoglie e rafforza i segnali di tensione indotti dalle onde radio sull'antenna; il successivo rivelatore blocca l'onda portante e trasmette solo il segnale audio, che è a frequenza molto più bassa, allo stadio finale di amplificazione BF (bassa frequenza), che infine invia i segnali all'altoparlante.

plice diodo consente di sopprimere la metà negativa del segnale d'onda portante; quindi, un piccolo condensatore "elimina" l'alta frequenza lasciando sussistere le variazioni relativamente lente del segnale modulante.

Questo deve ora essere soltanto amplificato e successivamente applicato all'altoparlante.

Un'altra importante categoria è quella dei ricetrasmittitori radio, costituiti come dice il nome stesso da un ricevitore e da un trasmettitore radio in un unico apparecchio, che oggi può assumere dimensioni e peso minimi. Applicazioni tipiche ne sono il radiotelefono installato su automobili e il *walkie-talkie*.

Immagini attraverso l'etere

Immagini attraverso l'etere

La televisione

La televisione può essere definita come la tecnica con cui si realizza la trasmissione a distanza di immagini in movimento, generalmente accompagnate da un'informazione sonora.

Per la soluzione dei suoi problemi la televisione è tributaria ad almeno tre tecniche: la *cinematografia*, il *facsimile* e la *radio*.

Alla *cinematografia* si deve il principio che si può far percepire all'occhio umano un'immagine in movimento se gli si presenta, in rapida successione nel tempo, una serie di immagini fisse, nelle quali l'oggetto nell'immagine che deve risultare in moto viene leggermente spostato da un'immagine all'altra. Il concetto è abbastanza noto perché si entri in maggiori dettagli.

Secondo tale principio, in televisione occorre trasmettere un numero sufficientemente elevato d'immagini al secondo tra loro leggermente diverse, perché l'occhio le percepisca come un'unica immagine in movimento.

Se si ricorda poi che la *radio* consente la trasmissione a distanza senza filo di un segnale elettrico, il problema della televisione è ricondotto alla conversione in segnali elettrici di immagini fisse.

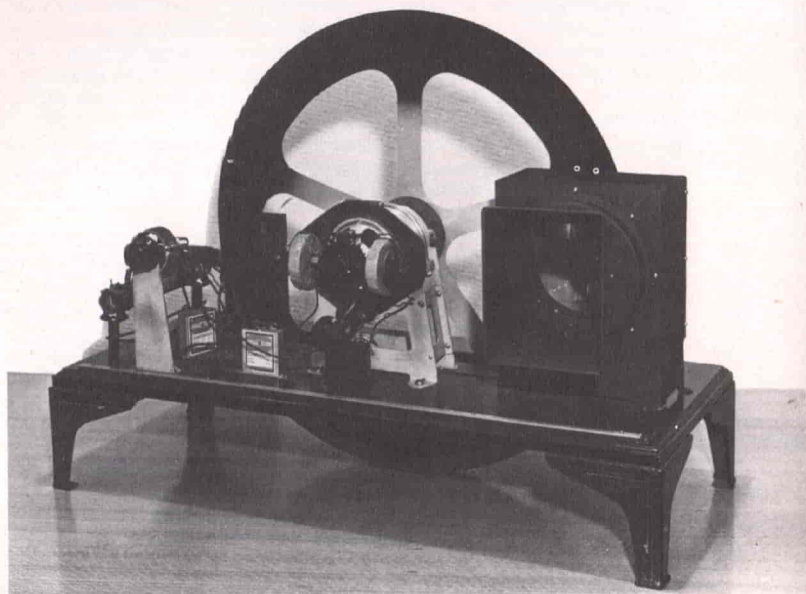
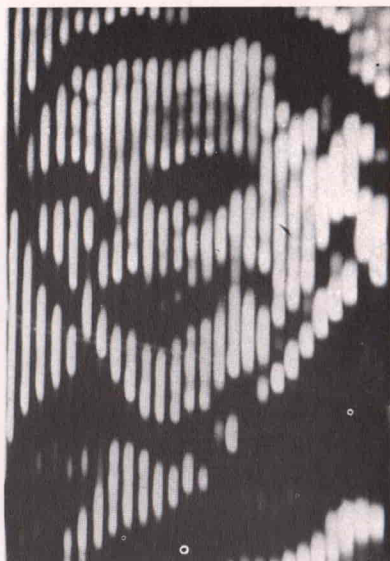
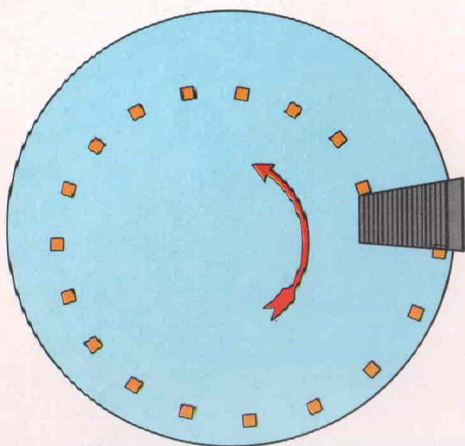
Ed è appunto per la soluzione di questo problema che la televisione ha fatto infine ricorso alla tecnica del *facsimile*.

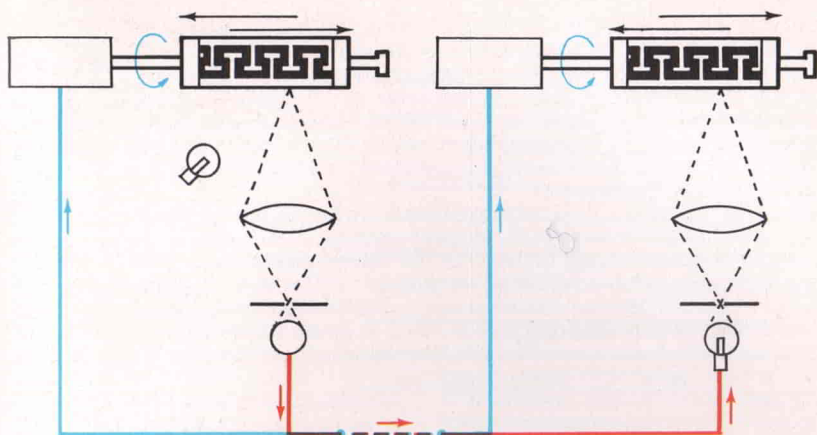
Il *facsimile* nacque per poter trasmettere a distanza immagini, come fotografie, disegni, documenti originali, fondamentalmente a uso dei giornali. Questi, che ricevevano in origine solo testi di notizie per telegrafo e per telefono, desiderarono presto poter ricevere anche immagini da stampare insieme con le notizie.

Sorse così il problema di convertire in segnali elettrici queste immagini, allo scopo di poterle trasmettere a distanza.

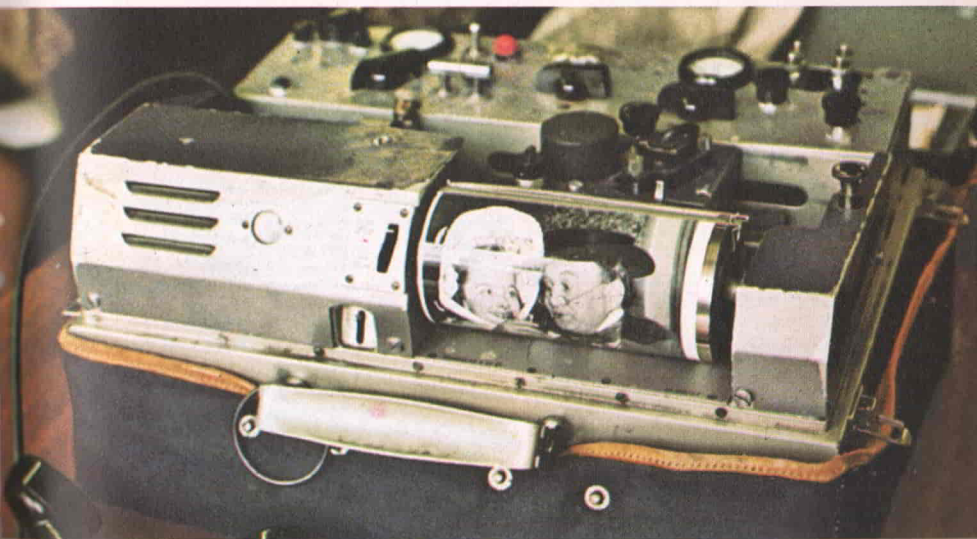
Se si esamina con l'eventuale aiuto di una lente, una fotografia stampata su un quotidiano, si scopre che essa è costituita da un insieme di punti più o meno scuri.

Esistono componenti - detti *fotorivelatori* - che emettono una ten-





Nella pagina a fianco: il disco di Nipkow (in alto, a sinistra), progenitore della televisione, della quale anticipa il principio. Esso crea l'illusione del movimento tramite una scansione rapida delle righe verticali dell'immagine, data dalla rotazione della ruota forata; in alto, a destra, un'immagine trasmessa dal disco di Nipkow; in basso, lo strumento completo. Brevettato nel 1884, questo sistema televisivo era ancora adottato dalla televisione inglese BBC nel 1936. Qui sopra: il principio del "facsimile". Sotto: un trasmettitore di immagini portatile usato dai giornalisti.



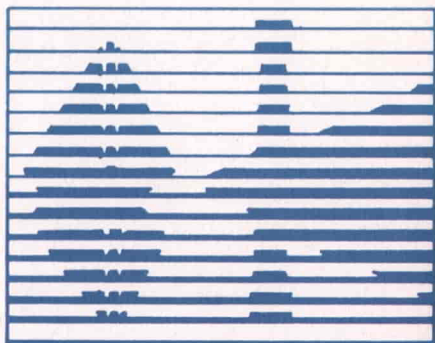
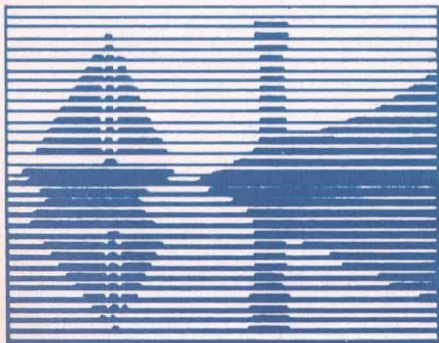
sione, o una corrente, proporzionali entro certi limiti all'intensità della luce che li colpisce. Il problema è quindi — lo si intuisce — quello di esplorare in modo ordinato l'immagine "punto per punto", cosicché la "luminosità" di ciascun punto incida su un fotorigistratore in rapida successione. Si può esplorare automaticamente una figura avvolgendola su un cilindro e disponendo di una sorgente che emetta un sottile fascio luminoso posta sullo stesso supporto insieme con un fotorigistratore.

Sorgente luminosa e fotorigistratore devono essere disposti in modo tale che il fascio emesso dalla sorgente colpisca in un punto la figura e da questa venga riflesso così da cadere esattamente sulla parte sensibile del fotorigistratore. Il supporto comune della sorgente e del rivelatore deve potersi muovere in direzione parallela all'asse del cilindro: si può esplorare così la figura in senso verticale. Se si farà ruotare sull'asse il cilindro su cui è avvolta la figura, questa può poi essere esplorata in senso orizzontale.

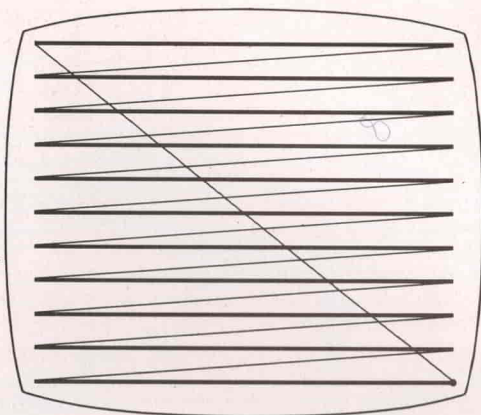
Se ora, con le velocità opportune, si farà allo stesso tempo ruotare il cilindro e muovere dall'alto al basso della figura il complesso sorgente-rivelatore, si esplora la figura intera per righe orizzontali che si succedono ordinatamente dall'alto al basso, mentre ogni riga viene esplorata, per esempio da sinistra a destra, in ogni suo punto. Il segnale elettrico emesso allora dal fotorigistratore rappresenta elettricamente la successione ordinata dei punti costituenti tutta la figura. Tale segnale può essere trasmesso a distanza così come si fa con il segnale elettrico uscente da un microfono.

In ricezione, questo segnale, opportunamente amplificato, può far variare l'intensità del fascio emesso da una sorgente luminosa, e questo può a sua volta impressionare una carta fotosensibile avvolta attorno a un cilindro ruotante in sincronismo con il cilindro di trasmissione.

Abbiamo così individuato i due criteri fondamentali per la trasmissione a distanza delle immagini: l'esplorazione ordinata dell'immagine, detta in televisione *scansione*, e il *sincronismo* che si deve realizzare tra il funzionamento del ricevitore e quello del trasmettitore per ricostruire correttamente l'immagine trasmessa.



Pagina a fronte: differenza di definizione che si ha fra una scansione a molte righe (a sinistra) e una a poche righe (a destra). Qui a fianco: percorso reale del pennello elettronico sullo schermo del televisore.



Vediamo ora come è realizzata la "ripresa" in televisione. Sappiamo tutti molto bene che l'apparecchiatura usata negli studi di ripresa per rilevare le immagini e trasformarle in segnali elettrici è detta *telecamera*. La parte ottica di questa ricorda le grandi macchine fotografiche da studio - usate per esempio per fotografie da tessera. In queste l'immagine è proiettata dall'obiettivo su un vetro smerigliato sul quale viene messa a punto per ciò che riguarda l'inquadratura e il fuoco.

In una telecamera l'immagine è proiettata su un "mosaico" di moltissimi elementi di materiale speciale: a seconda dell'intensità luminosa di ogni punto dell'immagine, il corrispondente elemento libera un numero di elettroni più o meno grande, restando così caricato positivamente.

Possiamo dire che l'immagine luminosa viene così "memorizzata" sul mosaico mediante cariche elettriche. Ora il mosaico viene esplorato ordinatamente da un sottile fascio elettronico che cede a ogni punto gli elettroni che aveva perso a causa dell'illuminazione, ripristinando in tal modo lo stato elettrico neutro in ogni elemento del mosaico. Un elettrodo rileva la quantità di elettroni ceduti dal fascio, generando di conseguenza un segnale elettrico detto *segnale video*: questo rappresenta per ogni punto dell'immagine l'intensità luminosa e quindi consente di ricostruire l'immagine stessa. Il sistema ora descritto è quello usato dai primi tubi di ripresa: oggi, questo sistema è stato modificato per migliorarlo, o meglio per adattarlo a diversi tipi di ripresa, così che esistono vari e diversi modelli di tubi per telecamere.

Per tornare all'esplorazione del mosaico, questa viene fatta, nel sistema televisivo usato in Italia, su 625 righe orizzontali: più precisamente, si esplorano una volta le 312,5 righe dispari e una volta le 312,5 righe pari.

L'insieme di 312,5 righe è detto *campo*; in un secondo si esplora 25 volte il campo dispari e altrettante volte il campo pari, alternativamente. In ricezione, sullo schermo del cinescopio l'occhio per-

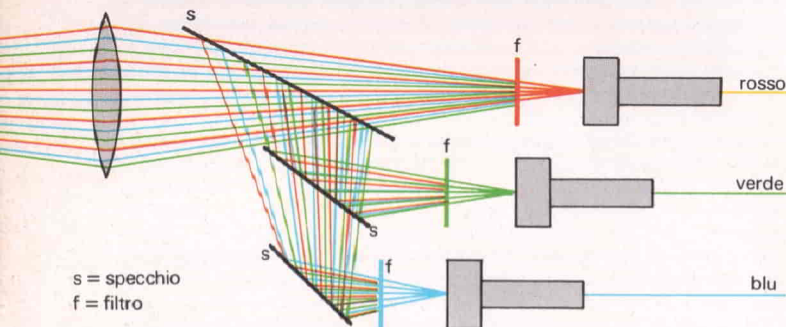
cepisce 50 immagini al secondo (25 campi pari e 25 dispari) e non rileva alcuno sfarfallio, perché la sequenza di immagini è abbastanza rapida. È intuitivo che una tale rapida esplorazione genera un segnale elettrico variabile con una frequenza molto alta: questa è, sempre nel nostro sistema, pari a 5MHz.

Al completamento del segnale televisivo da trasmettere mancano ancora due informazioni: il *sincronismo* e il *suono*.

I segnali di *sincronismo* sono costituiti da impulsi rettangolari che contraddistinguono l'inizio di ogni riga e di ogni campo e che, come sappiamo dal facsimile, saranno usati dal ricevitore per ricostruire ordinatamente l'immagine.

Il *suono*, lo si è già detto parlando della radio, ha una frequenza massima di circa 15KHz e come tale molto più bassa di quella del segnale video (5MHz).

Come avviene la separazione dei colori di un'immagine in una telecamera: vi è dapprima un sistema di lenti che la focalizza, quindi essa incontra uno specchio semitrasparente che lascia passare alle sue spalle un po' della luce; di questo fascio un filtro permette il passaggio solo alle radiazioni rosse. Analogamente vengono separate le componenti verde e blu dell'immagine. A destra: uno studio televisivo mentre l'annunciatore legge le notizie del "telegiornale".

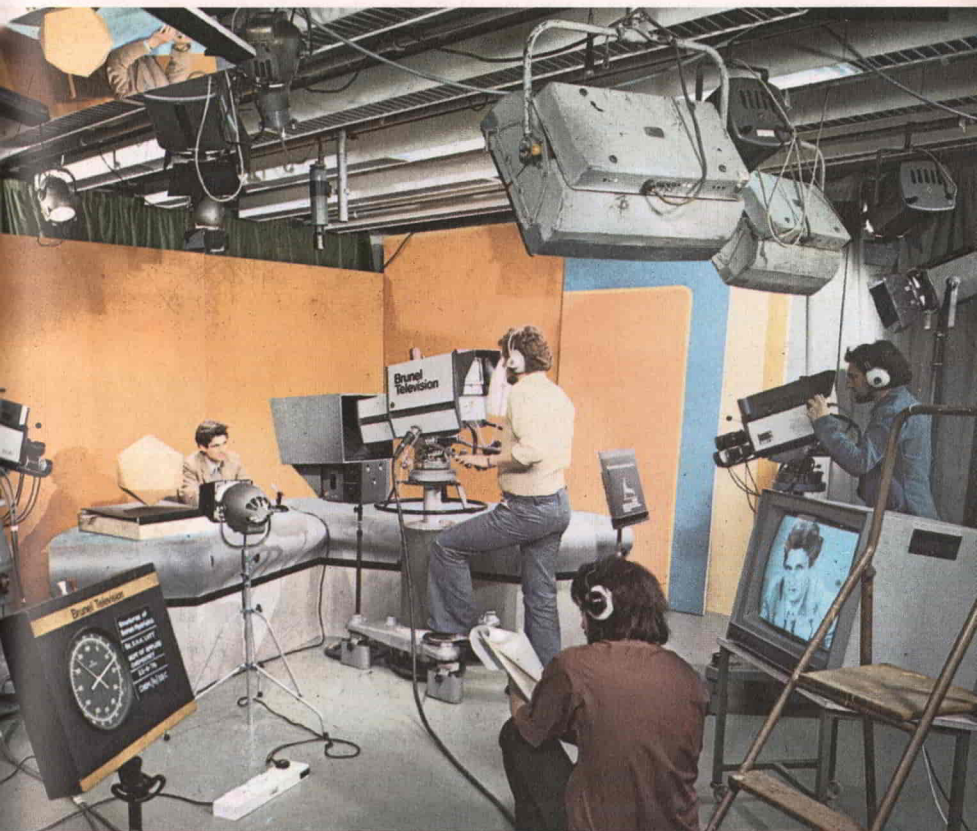


Allo scopo di poterlo "trattare" agevolmente insieme al segnale video, il segnale che rappresenta il suono è "premodulato" in frequenza su una portante ausiliaria avente la frequenza di 5.5MHz e quindi affiancata superiormente al segnale video.

Un altro segnale elettrico ancora va trasmesso nel caso di televisione a colori. È chiaro infatti che con il sistema descritto si rileva, e quindi si trasmette, solo l'intensità della luminosità dei vari punti di un'immagine e non il colore degli stessi. Si è già spiegato, illustrando il cinescopio a colori, che combinando in opportune proporzioni i tre colori primari si può ottenere una gamma abbastanza vasta dei colori visibili all'occhio umano. Si ricorderà anche che il bianco è ottenuto sommando, sempre nella "proporzione" opportuna, i tre colori fondamentali.

Nel sistema di ripresa si segue il metodo inverso di quello usato in ricezione. L'immagine da riprendere va anzitutto scomposta in tre





immagini, una per colore fondamentale. Ciò si ottiene con una telecamera tripla: tre obiettivi, filtrati in modo da far passare uno il colore blu, uno il verde e uno il rosso, sono usati per proiettare tre immagini, ognuna delle quali risulta composta da punti la cui luminosità corrisponde ora a quella del contenuto di un determinato colore nel punto originario. Si ottengono così, col solito sistema, tre segnali elettrici detti R (red = rosso), G (green = verde) e B (blue = blu).

Se si sommano questi tre segnali si ottiene lo stesso segnale generato da una telecamera per televisione in bianco e nero, vale a dire un segnale che rappresenta la luminosità dei punti dell'immagine e non il loro colore, e quindi il segnale video che avevamo visto prima. È questo il segnale che va trasmesso perché i televisori in bianco e nero possano ricevere anche le trasmissioni a colori. Basta ora trasmettere due colori, dato che il terzo si può ottenere per

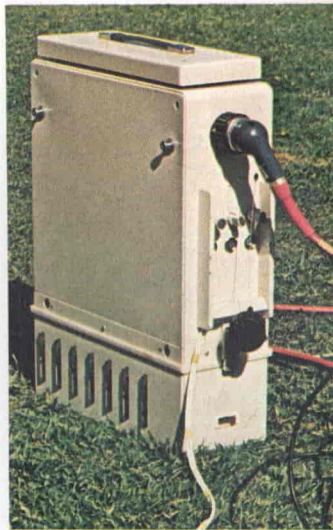
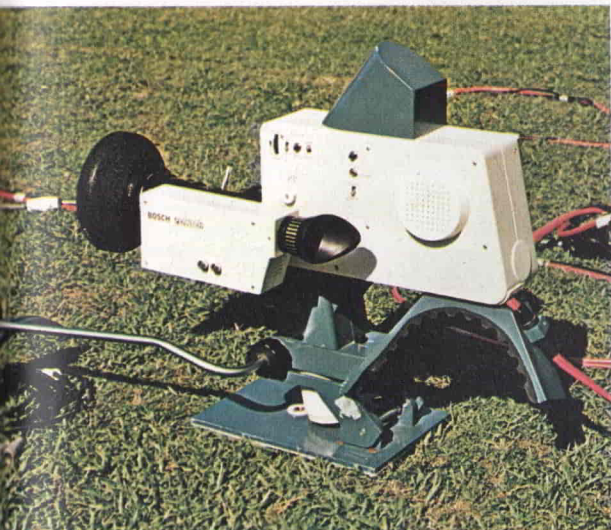


sottrazione dal segnale video somma dei tre. I due colori trasmessi sono premodulati in ampiezza e in un modo particolare su un'unica portante ausiliaria detta *sottoportante di colore*. La frequenza di questa è pari a 4,43 MHz, un valore scelto perché non disturbi il segnale principale somma dei tre segnali fondamentali. Riassumendo dunque, il segnale completo televisivo è composto da vari segnali:

- un segnale video di frequenza massima di 5 MHz che rappresenta la luminosità dell'immagine e che è detto *segnale di luminanza*
- un segnale video su portante ausiliaria di 4,43 MHz, detto *segnale di cromaticanza*, cioè di colore
- *segnali di sincronismo*
- un segnale che porta l'informazione sonora, detto *segnale audio*.

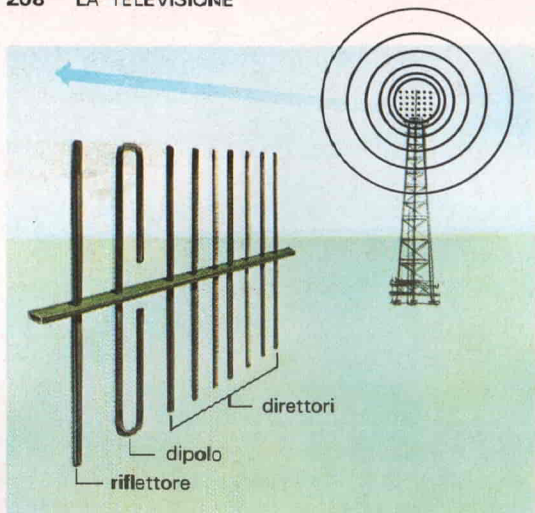
Il segnale globale è ora modulato in ampiezza su portanti di frequenza molto alta, che sono raggruppate in quattro bande. La I e la III banda giacciono al disotto e al disopra della banda usata per la radio a modulazione di frequenza; le due bande sono dette VHF (very high frequency = frequenza molto alta) e le relative frequenze vanno da 40 a 200 MHz circa, con lunghezze d'onda quindi da 7 a 1,5 m circa. Le bande IV e V sono dette UHF (ultra high frequency = frequenza ultra alta); le relative frequenze vanno

Telecamera portatile per seguire da vicino gli avvenimenti (come si vede, è progettata per essere accomodata sulla spalla). A destra: apparecchiatura ausiliaria della telecamera. Nella pagina a fronte: telecamera per riprese subacquee.



da 500 a 1000 MHz, con lunghezze d'onda da 60 a 30 cm circa. Passiamo ora a considerare il sistema di ricezione.

Il primo elemento che qui si incontra è l'antenna ricevente, il cui aspetto ci è familiare. Occorre osservare che l'occhio umano è più critico dell'orecchio nel rilevare imperfezioni e disturbi: sostanzialmente per questa ragione il segnale televisivo irradiato va "trattato" con più cura. Per una buona ricezione dell'immagine occorre sempre un'antenna accuratamente orientata in direzione dell'antenna trasmittente che deve essere in visibilità. Altrimenti è estremamente probabile notare "effetto neve" e "seconde immagini" sullo schermo; l'effetto neve è indice di basso segnale in ricezione, mentre una seconda immagine è dovuta alla ricezione di un'onda riflessa che giunge al ricevitore un po' ritardata rispetto a quella diretta. Le antenne per televisione sono antenne *direttive* e *selettive*. Un'antenna di tale tipo ha una sensibilità pronunciata in una determinata direzione e per una particolare lunghezza d'onda. Ciò significa che la sua dimensione va scelta a seconda del canale, vale a dire della frequenza del trasmettitore che si vuol ricevere, e che inoltre l'antenna va puntata accuratamente in direzione dello stesso. Il cuore di una tale antenna è il *dipolo*; con questo nome si indica l'elemento metallico al cui centro è collegato il cavo che raccoglie il segnale elettrico indotto dalle onde elettromagnetiche per convogliarlo al ricevitore. Allo scopo di ottenere un elevato segnale, la lunghezza to-



L'antenna dell'apparecchio televisivo domestico, per assicurare una buona ricezione, va puntata accuratamente in direzione della stazione trasmittente o del ripetitore, che dev'essere in vista dell'antenna stessa. Il campo elettromagnetico variabile creato dalla stazione viene raccolto dal dipolo ripiegato, ai cui capi si crea una debole ma rilevabile differenza di potenziale, che assume l'andamento del segnale. Per ricevere meglio le trasmissioni, davanti e dietro al dipolo si sistemano altre sbarre di metallo che hanno lo scopo di rinforzare il campo che agisce sul dipolo.

tale di tale elemento, da un estremo all'altro, dev'essere pari a metà della lunghezza d'onda che si desidera ricevere. Si nota che parallelamente al dipolo sono disposti, anteriormente e posteriormente altri elementi. Più precisamente, verso il trasmettitore sono disposti numerosi elementi detti *direttori*, al lato opposto un solo elemento detto *riflettore*. Tutti questi elementi aggiunti hanno lo scopo di aumentare la sensibilità dell'antenna rendendola più direttiva. È evidente che, per quanto si è detto, le antenne con elementi più lunghi sono antenne per bande VHF, quelle con elementi più corti per bande UHF.

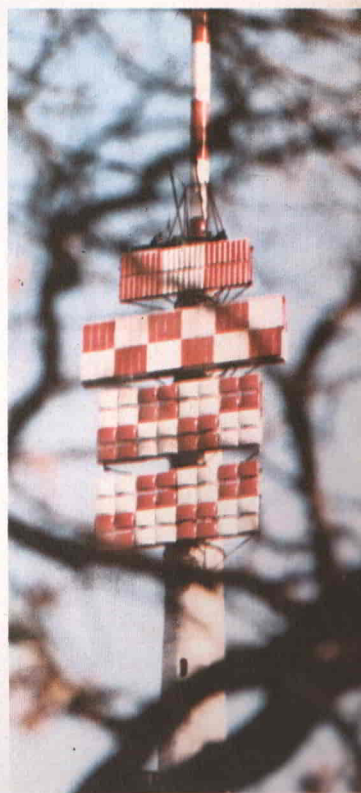
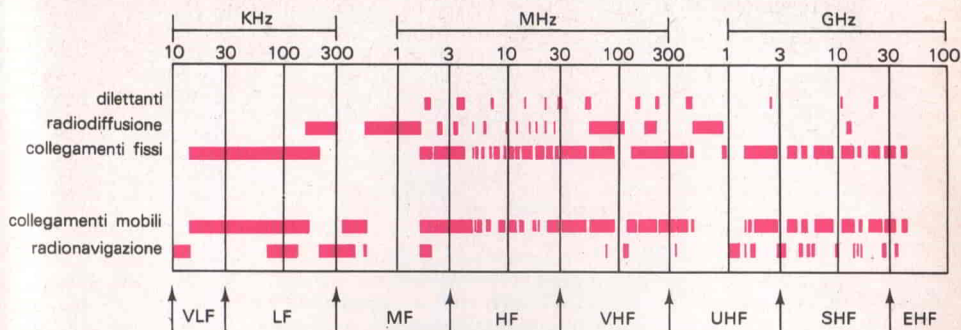
Come s'è visto, il cavo d'antenna porta il segnale elettrico, indotto dalle onde elettromagnetiche, al ricevitore. Il primo circuito che incontra è il *sintonizzatore*: come nella radio, mediante questo circuito ci si sintonizza sulla frequenza del canale desiderato.

Vi è però una notevole differenza d'uso tra il sintonizzatore della radio e quello del televisore: infatti nella grandissima maggioranza dei casi il televisore è impiegato sempre nello stesso luogo e per ricevere sempre le stesse stazioni.

Allo scopo di evitare la ricerca delle stazioni tutte le volte che si intende cambiare programma, i moderni televisori possiedono più organi di controllo della sintonia: sono questi i ben noti potenziometri di sintonia che, regolati una volta, vengono inseriti alternativamente dai pulsanti impiegati per cambiare il programma.

Ogni potenziometro "impone" al sintonizzatore la ricezione di un particolare canale in dipendenza della posizione in cui esso è stato regolato.

Nel sintonizzatore per televisione ha luogo, come in quello per radio, anche la conversione in media frequenza del segnale sintonizzato, che viene quindi demodulato: dopo quest'operazione disponiamo nel ricevitore dello stesso segnale globale che era stato



Antenna paraboloida che serve una stazione ripetitrice della televisione. Tali stazioni si rendono necessarie in quanto la curvatura della Terra e gli ostacoli naturali non permettono ai segnali elettromagnetici televisivi, che viaggiano in linea retta, di giungere direttamente dall'emittente agli utilizzatori. A destra: antenne per onde corte e cortissime. Quella cilindrica in alto diffonde i programmi televisivi. In alto: tabella delle bande di frequenza usate per le trasmissioni. Tali bande sono identificate da sigle, attribuite in base ad accordi internazionali.

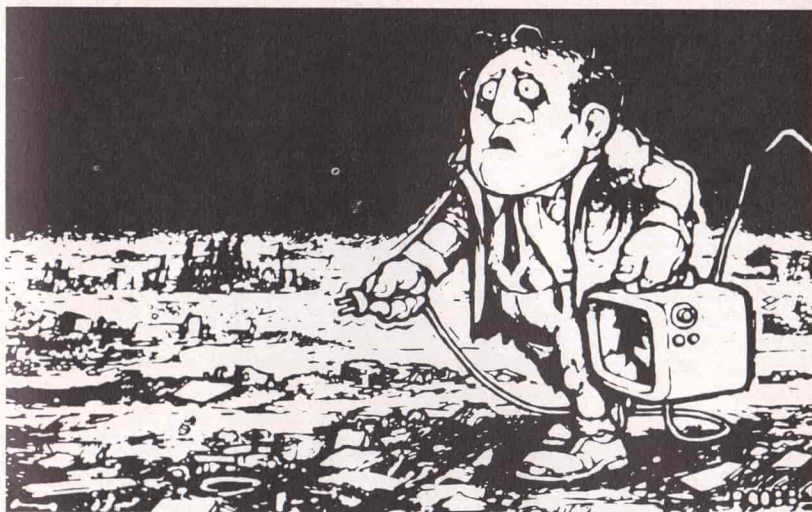
realizzato in trasmissione prima della modulazione.

A questo punto, mediante dei filtri, il segnale viene scomposto nelle sue componenti che, come abbiamo visto, sono:

- il segnale audio, su portante ausiliaria 5.5MHz
- il segnale di cromaticità, su portante ausiliaria 4.43MHz
- il segnale di luminanza, di frequenza massima 5MHz
- segnali di sincronismo.

Come sappiamo, la ricomposizione dell'immagine trasmessa nel ricevitore si ottiene sullo schermo del cinescopio, ricorrendo a un fascio elettronico modulato in intensità e deflesso in modo tale da esplorare lo schermo stesso per successive righe orizzontali, dall'alto in basso. Sappiamo anche che la deflessione è ottenuta mediante i campi magnetici generati dal giogo di deflessione, che consiste in sostanza di due induttori - uno per la deflessione verticale e uno per l'orizzontale - attraversati da opportune correnti. Queste correnti hanno un particolare andamento nel tempo detto "a dente di sega", e cioè si ripetono periodicamente partendo da zero e raggiungendo secondo una retta il loro valore massimo: a questo andamento delle correnti corrisponde un proporzionale spostamento del punto luminoso sullo schermo.





Fra tutti i mass-media la televisione è forse quello che più degli altri ci condiziona, entrando nelle nostre case e proponendoci mille mondi diversi ai quali si corre il rischio di credere come a una rivelazione. Nella vignetta, la psicosi della televisione come "bene irrinunciabile". Sotto: apparecchio radiofonico e televisivo da tavolo realizzato in Giappone, con antenna telescopica incorporata e schermo di soli 125 millimetri. A sinistra: un televisore a colori portatile.



La corrente di deflessione orizzontale, che provoca lo spostamento lungo ogni riga, si ripete identicamente ogni $64\mu s$ (microsecondi): gli impulsi di sincronismo orizzontale fanno sì che tale movimento avvenga in perfetto sincronismo con quello che avviene nella telecamera.

Analogamente, la corrente di deflessione verticale provoca lo spostamento del punto luminoso dall'alto in basso e genera quindi la successione verticale delle righe orizzontali: questo si ripete, come sappiamo, cinquanta volte al minuto secondo e, grazie agli impulsi di sincronismo verticale, anche questo movimento avviene in rigoroso sincronismo con l'equivalente movimento che ha luogo nella telecamera.

Gli impulsi di sincronismo orizzontale e verticale dopo essere stati ricevuti vengono separati tra loro e portati ai rispettivi circuiti di deflessione orizzontale e verticale, cioè a quei circuiti che generano le correnti per il giogo di deflessione.

Nei ricevitori in bianco e nero il segnale di cromaticità cioè di colore, non può ovviamente essere utilizzato; si sfrutta pertanto solo il segnale di luminanza che va a comandare l'*amplificatore finale video*, che è il circuito che provvede, mediante l'unico catodo del cinescopio, a modulare in intensità il fascio elettronico.

Come abbiamo visto a suo tempo, il cinescopio a colori possiede invece tre catodi che dovranno essere pilotati per modulare in intensità i fasci elettronici dei tre colori primari. Il *decodificatore di colore* è quel circuito — certamente il più complesso del televisore — che provvede a generare, a partire dai segnali di luminanza e di cromaticità, i tre segnali di colore R, G e B trasmessi. Questi segnali saranno applicati a tre amplificatori finali video, ognuno dei quali piloterà uno dei tre catodi del cinescopio. La contemporanea ma diversa modulazione in intensità dei tre fasci elettronici, insieme con la deflessione comune, risulta nella ricostruzione sullo schermo dell'immagine colorata trasmessa.

Il segnale audio a 5,5MHz viene demodulato e quindi amplificato, per essere applicato all'altoparlante, in modo del tutto analogo a quanto vien fatto in un ricevitore radio a modulazione di frequenza. Una delle più recenti applicazioni della trasmissione televisiva, ancora poco conosciuta in Italia, ma già in uso in altri paesi, è il cosiddetto *Teletext*, un sistema di diffusione via televisione di informazioni scritte, che costituiscono un vero e proprio giornale da leggere sullo schermo dell'apparecchio televisivo.

Nel centro di trasmissione delle stazioni TV che fanno servizio di Teletext esiste un elaboratore nel quale è stato scritto e memorizzato questo particolare giornale le cui numerose pagine, di dimensione tale da essere contenute su uno schermo televisivo, vengono continuamente trasmesse tramite un segnale digitale, aggiunto opportunamente al normale segnale televisivo della stazione. Qualora il televisore sia fornito del "decodificatore Teletext", si può con un

Fra le applicazioni della televisione che tendono a sfruttare sempre più il "terminale video domestico" è da annoverare il sistema "Teletext", una specie di canale ausiliario che trasmette, su richiesta dell'utente, informazioni sullo stato del tempo, i prezzi correnti dei generi di prima necessità, i risultati sportivi e così via. Questo sistema di trasmissione è già diffuso in Inghilterra.

CEEPFAX P159 Tue 7 Sep 15 27/10



ORACLE P100Tue07Sep ITV 15 31/40

ORACLE

ITV MAIN INDEX	200	OPPLETS INDEX	199
Headlines	201	Other News	199
Business	199	WEATHER	105
Sport	254	TRAVEL DELAYS	400
NE-SPLASH	280	ENTERTAINMENTS	300
ABOUT ORACLE	110	FAMILY MAGAZINE	500
EDUCATION	435	LOCAL AFFAIRS	700
ENGINEERING	450	POLICE 5	710
ORACLE 805	750	YOUR STARS	555
BROADCASTING			
ITV LONDON	600	ITV REGIONS	150
BBC TV	601	LOCAL RADIO	605

The weather may be cooler, but we still must be hot on saving WATER

CEEPFAX P115 Tue 7 Sep 14 38/54

Weather

for today

CLOUDY,
SOME
RAIN

ORACLE P508Tue07Sep ITV 15 44/83

ORACLE Family MAGAZINE 500

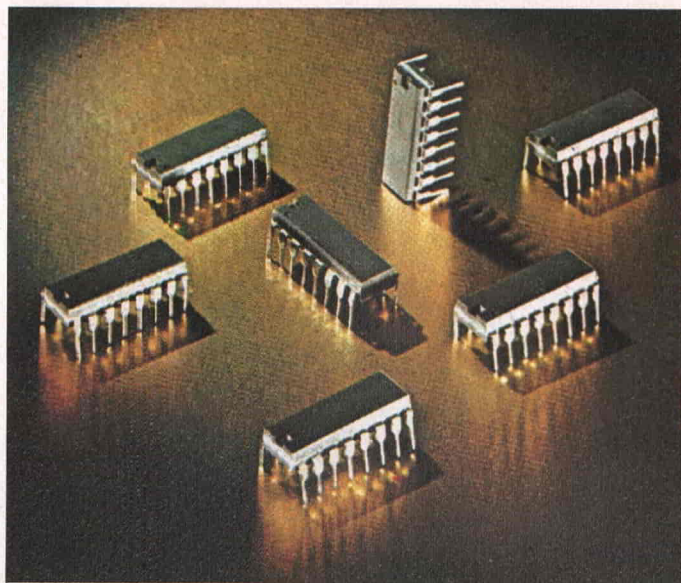
Special Offers (Key Markets)	502
Recipe	503
Fresh Food Prices	501
Going Metric	506
Home Health	507
Electrical News	320
Gardening	508
Amateur Radio	509
Stamps	510
Astronomy	511
Books	512
Horoscope	555
ORACLE 805	513

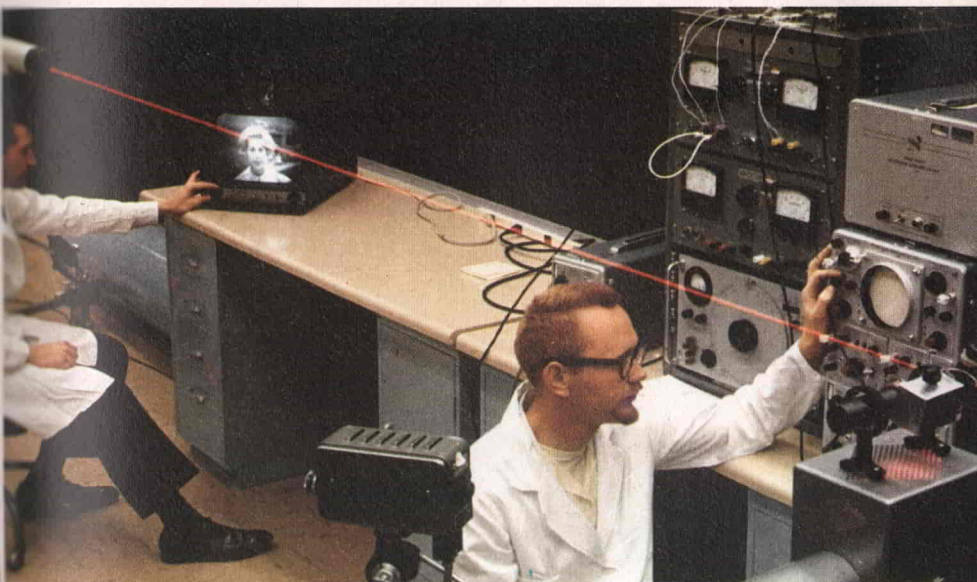


ORACLE P707Tue07Sep ITV 15 46/21

RUPERT







I televisori oggi impiegano largamente i circuiti integrati (foto in alto a sinistra), che permettono un notevole risparmio di spazio: solo pochi anni or sono sarebbe stato utopistico pensare, per esempio, a un televisore a colori portatile. Tuttavia, a fianco di questi apparecchi sono ancora funzionanti vecchi televisori a valvole, che hanno bisogno per i loro ricambi di diodi e triodi a vuoto, tuttora costruiti da molte ditte proprio per questo scopo (a sinistra in basso). Il progresso però non si ferma e già si compiono esperimenti di trasmissione via laser (sopra).

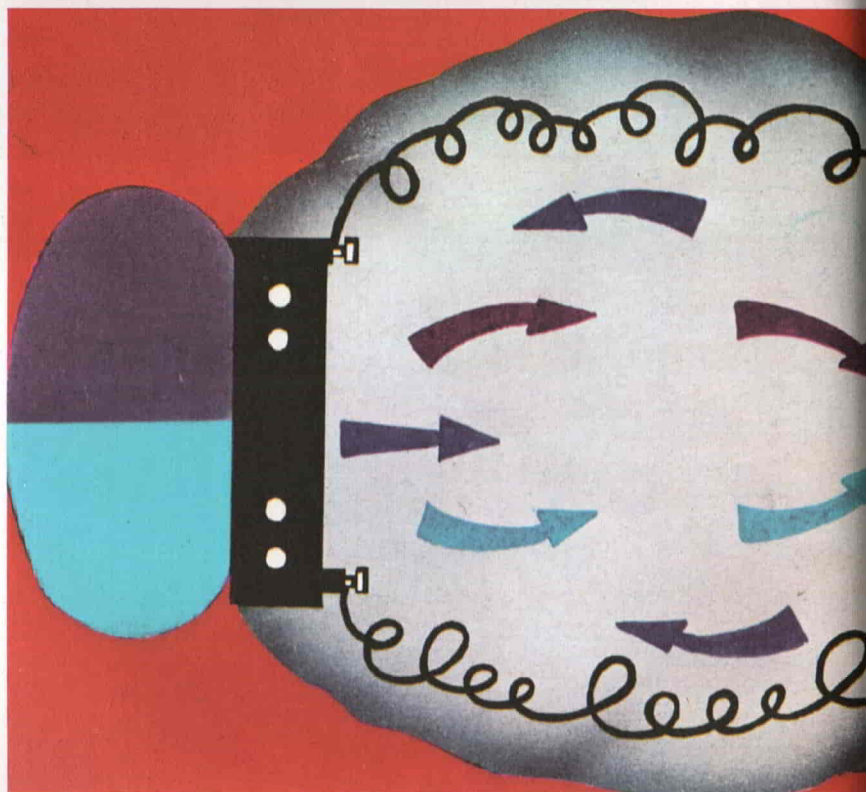
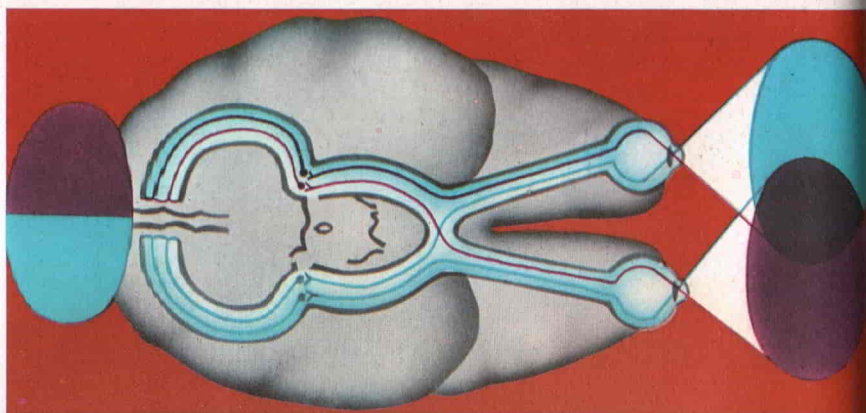
opportuno comando vedere scritta sullo schermo una delle pagine del giornale Teletext, anziché il normale programma televisivo. La prima pagina che normalmente si richiede è l'indice: da esso si ottiene il numero della pagina desiderata, che impostato su una tastiera numerica fa apparire sullo schermo la pagina selezionata tra tutte quelle trasmesse.

Oltre al Teletext, che è già da anni un servizio pubblico in Inghilterra dove è stato inventato, esiste il sistema *Viewdata*, anche questo d'origine inglese. Secondo questo sistema il televisore è collegato via telefono a un elaboratore al quale l'utente dal proprio domicilio può richiedere particolari informazioni scritte oltre a quelle contenute nel "giornale".

Teletext e Viewdata sono sistemi di trasmissione realizzati con circuiti digitali, così come lo sono i telecomandi ed i video-giochi, più noti al pubblico.

Ci meraviglieremmo a questo punto se il lettore non si chiedesse che cosa sta diventando il televisore.

Per tentare di rispondere a questa domanda, dobbiamo osservare

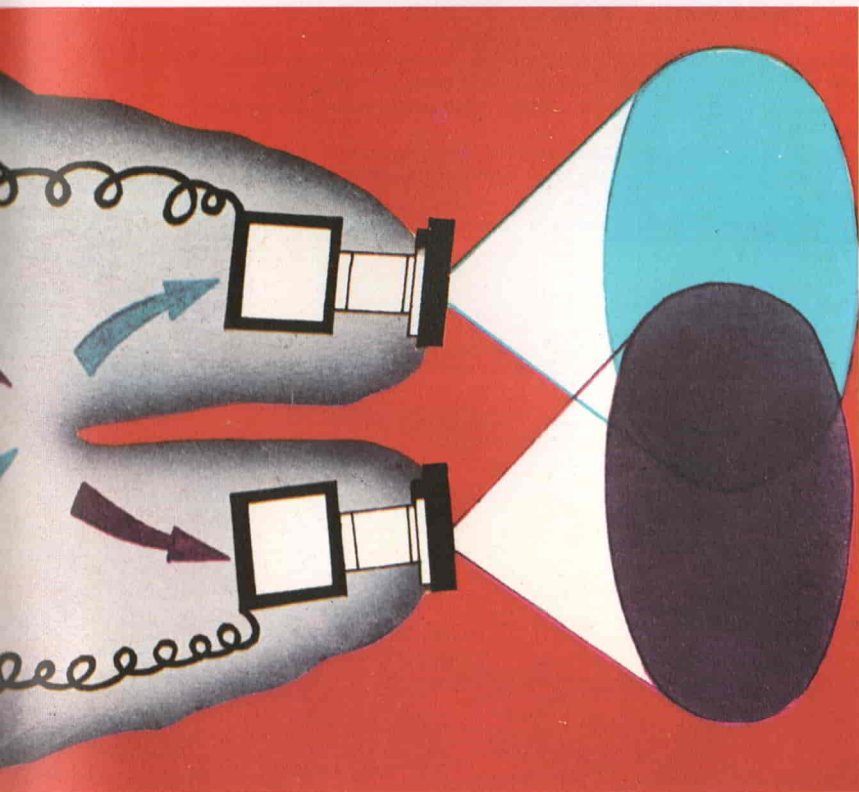


Fra le applicazioni della tecnologia televisiva ve ne sono alcune che servono solo al nostro diletto, come gli ormai diffusissimi "videogiocchi"; ma in certi casi la televisione riesce ad aiutare l'uomo a migliorare le proprie condizioni di vita. Qui si vede un esempio fra i più clamorosi: la vista artificiale per i ciechi. I nostri occhi funzionano come due teletrasmettenti che inviano i loro segnali al cervello (disegno in alto). Sono ora in via di realizzazione delle minuscole telecamere che potranno sopperire entro certi limiti alla mancanza delle nostre "telecamere" naturali (sotto).

che si manifestano oggi due tendenze chiaramente interdipendenti: l'estensione delle funzioni che può svolgere il ricevitore televisivo e la progressiva "digitalizzazione" dello stesso.

Conseguentemente si parla già di un futuro "terminale video domestico"; il televisore conterrà molti più circuiti digitali di quanti non ne contenga oggi; tra essi il circuito fondamentale sarà un microcalcolatore, che provvederà a controllare o come oggi si dice, a "gestire" tutte le funzioni che il televisore del futuro sarà in grado di svolgere.

Il microcalcolatore sarà usato per realizzare il telecomando, inteso



anzitutto come mezzo per selezionare la funzione desiderata e quindi per controllarla.

Dopo l'accensione dell'apparecchio, si dovrà cioè scegliere se si desidera ricevere programmi televisivi o per esempio se si vuole utilizzare l'apparecchio per fare dei "video giochi"; in quest'ultimo caso, si selezionerà il gioco desiderato e quindi, sempre con il telecomando, si passerà a eseguirlo.

Le funzioni principali che oggi siamo in grado di prevedere sono:

- la ricezione di programmi televisivi irradiati o convogliati su cavo
- la ricezione di informazioni scritte irradiate (Teletext) o convogliate su cavo (Viewdata)
- il "dialogo" su cavo con elaboratori centrali sistemati a distanza
- l'esecuzione di giochi più o meno "intelligenti" e di calcoli con il televisore
- la registrazione e la riproduzione di programmi televisivi
- la riproduzione da "video dischi"
- la visione su schermo di film e diapositive
- la stampa di notizie, di risultati, di calcoli e di grafici.

Alcune di queste funzioni saranno completamente svolte all'interno del televisore futuro, altre da apparecchiature già esistenti o di nuova concezione, che saranno collegate all'apparecchio esternamente su desiderio dell'utente.

Un ultimo dubbio potrebbe sorgere nella mente del lettore: come troverà l'uomo il tempo per utilizzare completamente il suo "terminale domestico". Ma questa domanda esula fortunatamente dal campo dell'elettronica e pertanto questo libro va giustificato se non vi risponde.

Automatismi elettronici nella telefonia

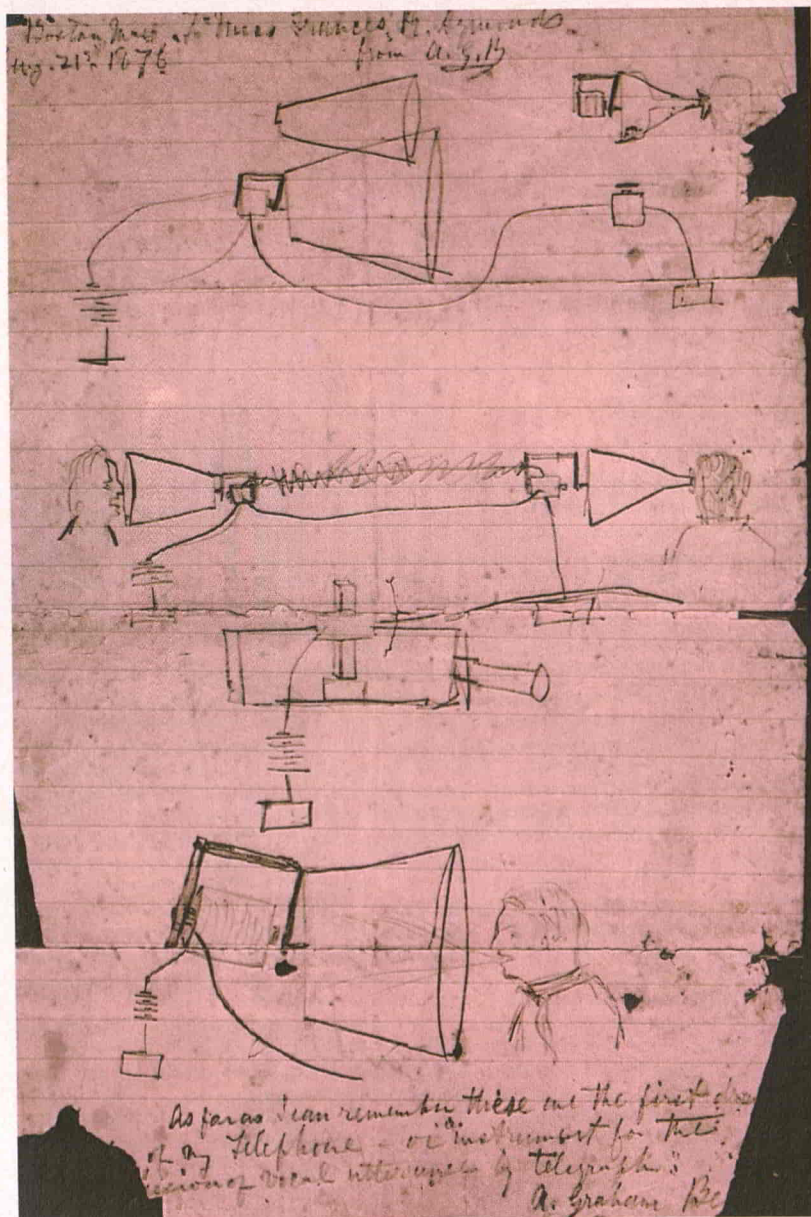
Automatismi elettronici nella telefonia

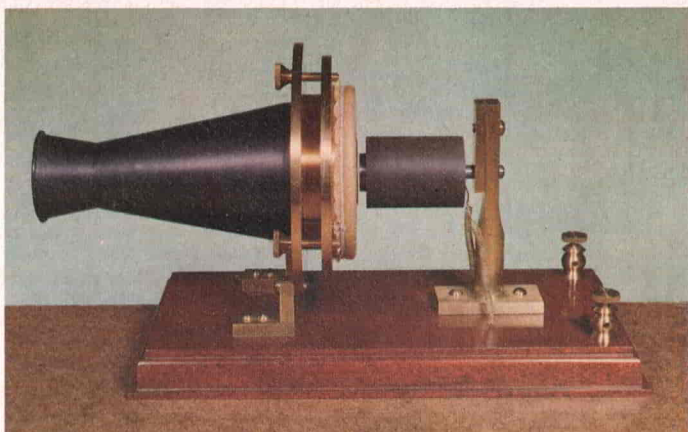
La tecnica telefonica si divide in due grandi rami, la commutazione e la trasmissione, che corrispondono alle due operazioni che si compiono nell'uso del telefono: la selezione del numero d'apparecchio desiderato e la trasmissione della voce. Nel comune apparecchio telefonico domestico troviamo i dispositivi relativi ad ambedue le funzioni: il microfono e il ricevitore, che servono per la trasmissione della voce nei due sensi, il disco combinatore e la suoneria, che servono per la selezione.

Le due tecniche della trasmissione e della commutazione hanno sempre seguito lo stesso schema di sviluppo; infatti, ogni volta che la trasmissione aumenta la portata delle comunicazioni telefoniche, più utenti sono raggiungibili e quindi si ripresenta per la commutazione il problema della selezione. Questo è stato risolto, in un primo stadio, mediante centrali a commutazione manuale, cioè con operatori e operatrici ai quali va chiesto il numero desiderato; in un secondo tempo è subentrata la centrale di commutazione automatica con selezione diretta da parte dell'abbonato. Tale processo si è ripetuto per le grandi città, poi per il traffico interurbano ed è oggi in corso per quello internazionale, dove ancora pochi paesi sono raggiungibili in selezione diretta. L'elettronica ha fatto la sua comparsa in telefonia realizzando anzitutto la trasmissione a media e grande distanza e sta oggi penetrando nel campo della commutazione automatica.

I principi su cui si basa la commutazione sono gli stessi dell'elettronica digitale: l'informazione usata per la selezione è rappresentata da sequenze d'impulsi, quali sono quelli emessi dal disco combinatore. Questi impulsi sono utilizzati nelle centrali di commutazione automatica per posizionare dei particolari componenti elettromeccanici chiamati "selettori", in modo da realizzare il collegamento desiderato.

Se si considera che, oltre a quello della selezione, vi è anche il problema della tariffazione, si intuisce facilmente l'orientamento verso





A sinistra: un documento prezioso e curioso. Si tratta di un foglio di quaderno contenente schizzi buttati giù alla svelta da A. Graham Bell, uno degli inventori del telefono (pare che egli debba dividere la priorità della scoperta di questo diffusissimo mezzo di comunicazione con l'italiano Meucci). In queste note autografe (a destra in basso, un po' rovinata, la firma di Bell) si può scorgere forse il balenare nel cervello dell'inventore della prima idea del microfono e del ricevitore telefonico. Sopra: un prototipo di ricevitore telefonico presentato da Bell all'esposizione di Filadelfia nel 1876: nonostante sia passato più di un secolo, il principio fondamentale di funzionamento del telefono è rimasto lo stesso.

la gestione di tutta la centrale telefonica automatica mediante un calcolatore elettronico.

Per tornare alla trasmissione, l'obiettivo fondamentale di questa tecnica è quello di realizzare buoni collegamenti telefonici, anche a grande distanza, utilizzando il minimo numero di collegamenti fisici, come cavi, etc.

Vediamo anzitutto come avviene la conversione del suono in segnale elettrico e viceversa. Esistono vari tipi di *microfoni*, cioè di dispositivi che convertono le variazioni di pressione dell'aria, dovute a onde sonore, in tensione o corrente elettrica. Il tipo ancora oggi universalmente usato, a distanza di ben cento anni dalla sua invenzione, è il *microfono a carbone* che è essenzialmente costituito da una capsula contenente granuli di carbone e da una membrana metallica.

Quest'ultima, mossa dalla pressione dell'onda sonora, comprime di più o di meno i granuli della capsula, facendo variare la resistenza elettrica che la capsula offre a una tensione continua cui è soggetta: il risultato è una corrente variabile che rappresenta abbastanza fedelmente il suono che ha investito la membrana.

Il microfono a carbone possiede una proprietà interessante, che spiega la sua elevata sensibilità, cioè la sua capacità di "raccogliere" utilmente suoni di volume anche molto basso: esso è in sostanza un dispositivo amplificatore. Infatti la potenza sonora applicata alla

membrana non viene convertita direttamente in potenza elettrica: questa risulterebbe, a causa della bassa potenza del suono e delle inevitabili perdite nella trasmissione, troppo bassa per essere utilizzata, senza amplificarla, anche nelle semplici reti urbane. La potenza sonora, in questo tipo di microfono, è usata, come abbiamo detto, per far variare la resistenza della capsula e quindi tramite questa la corrente che attraversa la capsula. Ciò non è sostanzialmente diverso dal funzionamento del triodo, in cui una modesta potenza applicata all'elettrodo di controllo può provocare una variazione di potenza molto grande nel circuito anodo-catodo.

La corrente variabile prodotta dal microfono percorre la linea telefonica e giunge al *ricevitore*, cioè a quel dispositivo che riconverte il segnale elettrico in suono. Questo ricevitore è costituito da un induttore avvolto su un nucleo di magnete permanente. La corrente variabile, che rappresenta il suono, percorrendo l'avvolgimento produce in questo sistema un campo magnetico: una membrana metallica assoggettata a questo campo si muove, producendo a sua volta un suono che è molto simile a quello originario rilevato dal microfono.

La "portata" utile del segnale elettrico, generato dal microfono a carbone e destinato a un ricevitore come quello descritto, è di molti chilometri: ciò significa che aree di grandi città possono essere coperte da collegamenti telefonici come quelli descritti.

Il problema della telefonia a grande distanza presenta due aspetti: uno prevalentemente tecnico e uno economico. Quello tecnico, che consiste nel superamento delle grandi distanze, è risolvibile con l'impiego di amplificatori: il segnale telefonico, che s'attenua progressivamente all'aumentare della lunghezza del cavo percorso, viene periodicamente riportato a un livello sufficientemente alto mediante amplificatori inseriti a regolari distanze lungo il cavo telefonico. L'altro aspetto del problema è costituito dal fatto che oggi più che mai sarebbe inconcepibile la posa di un cavo e di numerosi amplificatori per realizzare un solo collegamento telefonico tra due città: questa sarebbe una soluzione inutilmente costosa, di fronte all'effettivo "sfruttamento" del cavo.

Il problema economico è stato risolto grazie alla tecnica del "multiplex", che consente la trasmissione su un unico cavo (o su un unico collegamento radio) di più comunicazioni telefoniche.

Il multiplex, e cioè la spartizione di un medesimo mezzo di collegamento da parte di più utenti, può essere realizzata in due modi: con il *multiplex a divisione di frequenza* o con il *multiplex a divisione di tempo*.

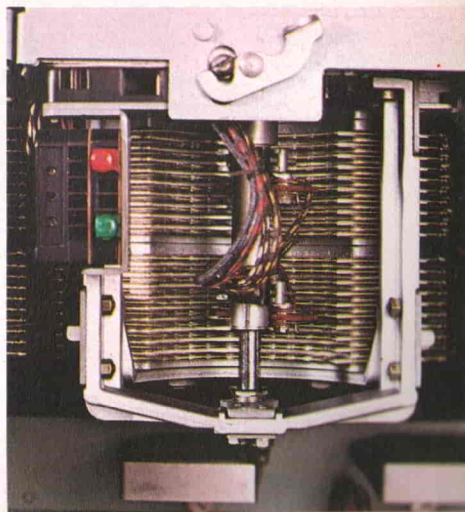
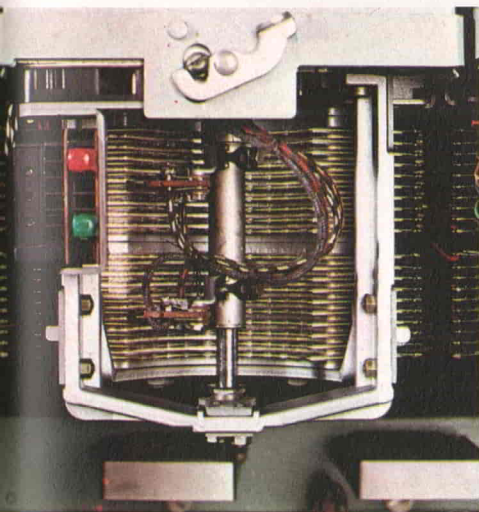
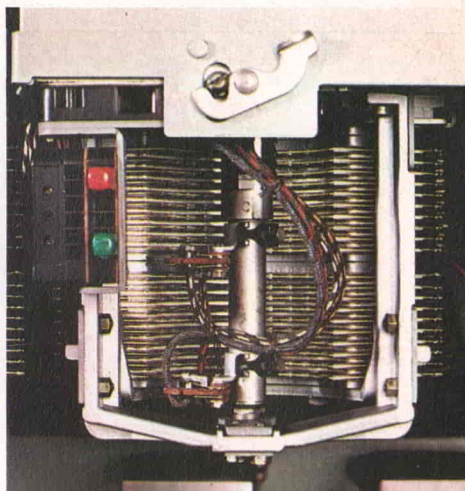
Il concetto della divisione di frequenza l'abbiamo già incontrato quando si è spiegata la possibilità di avere più stazioni radio anche vicine, che trasmettono contemporaneamente purché con frequenze diverse. In tal modo infatti hanno luogo su uno stesso mezzo — lo spazio di propagazione — più comunicazioni tra i diversi trasmettitori e i vari ricevitori radio. Si dice in tal caso che il mezzo è utilizzato a divisione di frequenza.

Il medesimo concetto è applicabile anche alla telefonia: si possono cioè avere più comunicazioni telefoniche contemporanee sullo stesso filo o cavo, a patto che siano "allocate" su frequenze diverse.

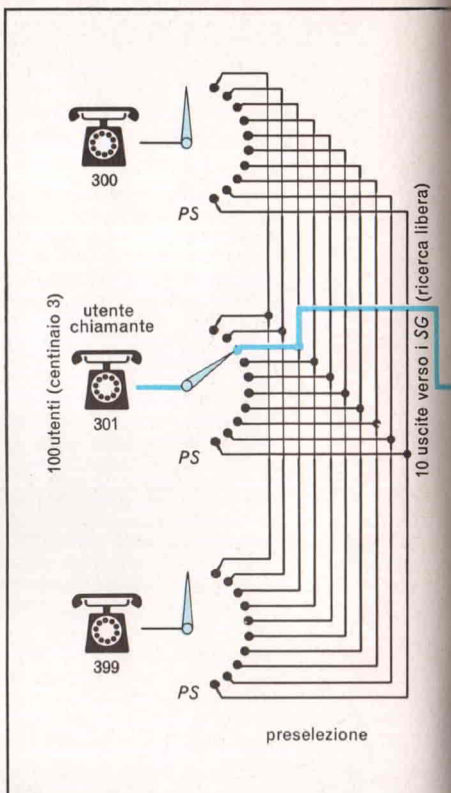
Ciò si ottiene modulando in ampiezza su portanti di diversa frequenza i segnali telefonici da trasmettere.

Prima della modulazione, ogni segnale viene filtrato inferiormente e superiormente in modo da limitare la "banda di frequenza" che esso occuperà. Il segnale telefonico viene così contenuto tra 300 e 3400 Hz: ciò significa che il suono effettivamente trasmesso è

Nei selettori telefonici la commutazione delle varie linee avviene in modo del tutto automatico, grazie a impulsi elettrici che vengono trasmessi quando l'utente che chiama fa girare il disco combinatore. Nelle tre foto si vede come viene modificato il contatto elettrico del selettore: qui accanto esso si trova nel punto inferiore della sua corsa sul selettore; nell'immagine successiva (sotto, a sinistra) esso si è alzato sulla verticale di alcune posizioni, e infine uno spostamento orizzontale, attorno al perno cilindrico di metallo, porta il contatto nella posizione finale (in basso a destra).

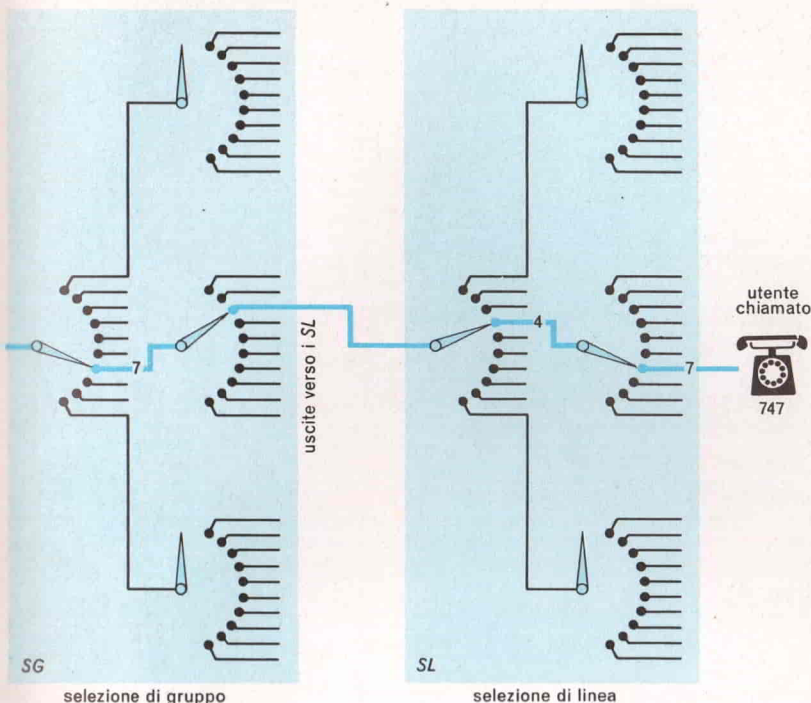


Schema di funzionamento di una centrale automatica a comando diretto con preselettori (PS), selettori di gruppo (SG) e selettori di linea (SL). Ogni abbonato dispone in centrale di un PS che, allo sgancio del microtelefono (prima dell'inizio della formulazione del numero di chiamata) cerca il primo collegamento libero con un SG; quando lo trova viene inviato all'utente il segnale acustico di centrale. L'utente con il disco combinatore invia allora in centrale gli impulsi corrispondenti al numero dell'abbonato richiesto; il primo impulso giunge all'SG che solleva il braccio portacon-tatti fino al livello corrispondente alla prima cifra (7 in questo caso); il braccio ruota poi su tale livello fino a trovare un collegamento libero fra tutti gli SL corrispondenti a quel livello; trovato, si arresta e gli impulsi del disco combinatore relativi alle cifre successive proseguono fino al SL. Stabilito il collegamento l'abbonato cercato, se libero, riceve il segnale di chiamata; se impegnato in altra comunicazione, la centrale invia all'utente il segnale di occupato.



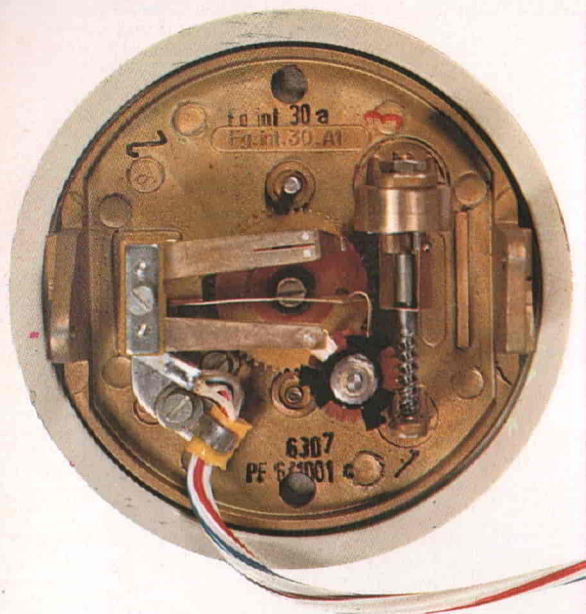
privo di toni molto bassi come di toni molto alti e quindi la "fedeltà" sarà piuttosto scarsa, certamente insufficiente a trasmettere della musica, ma sufficiente a garantire l'intelligibilità delle parole e comunque commisurata alla fedeltà del microfono e del ricevitore usati. Ogni comunicazione così limitata – o, come si dice, ogni *canale telefonico* – potrà essere contenuto in una *banda lorda* di 4KHz. I vari canali potranno di conseguenza essere modulati su portanti distanti fra loro 4KHz. Poiché il risultato di una modulazione è però generalmente ricco di frequenze indesiderate o comunque di disturbi inutili al ripristino in ricezione del segnale originario, un ulteriore filtro garantisce, dopo ogni modulazione, che la banda ottenuta sia effettivamente contenuta in 4KHz.

Esistono dei raggruppamenti convenzionali di canali telefonici: per esempio il "gruppo base" di 12 canali, che occupa la banda da 60 a 108KHz, larga esattamente 48KHz e quindi adatta a ospitare 12 canali di 4KHz l'uno. In essa, un canale sarà allocato da 60 a

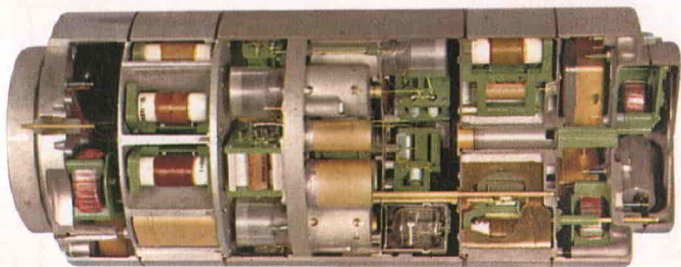
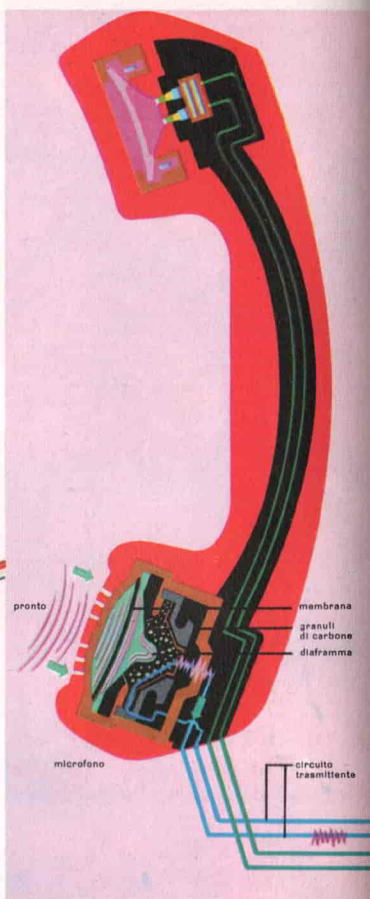


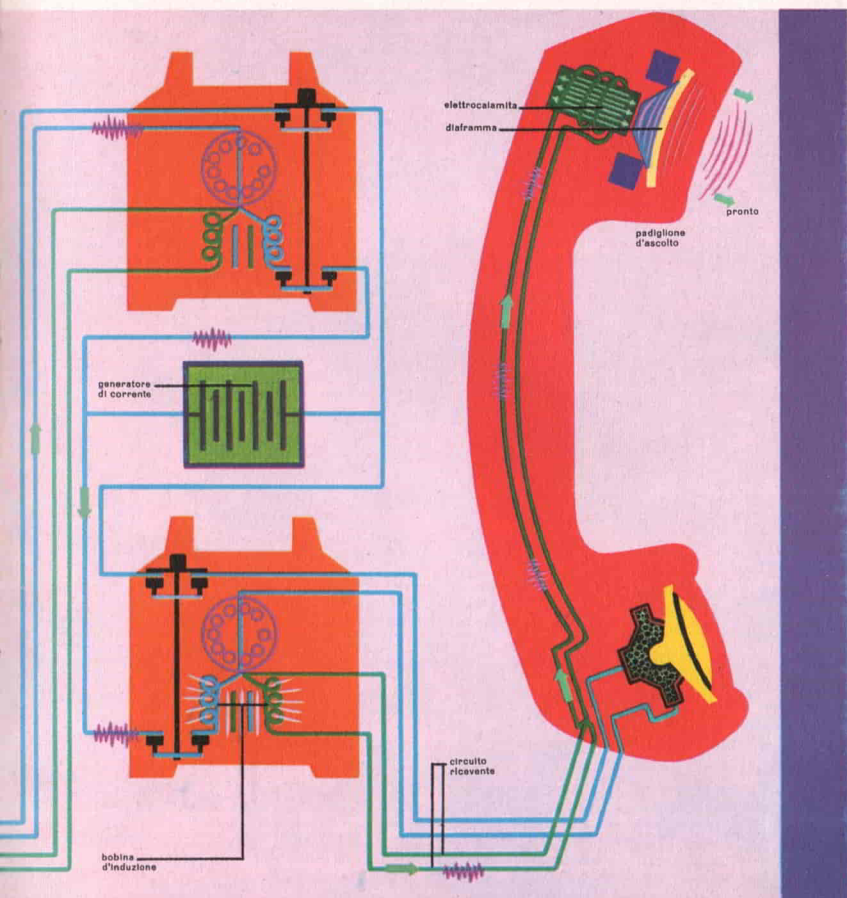
64KHz e così via fino all'ultimo da 104 a 108KHz. Si ha poi un insieme di cinque gruppi detto "supergruppo" che viene allocato nella banda da 312 a 552KHz, di larghezza pari a $5 \times 48\text{KHz}$, pari a 60 canali di 4KHz ciascuno. Così su un unico filo o cavo si possono avere 12, 60 o più comunicazioni telefoniche contemporanee. Esistono sistemi, con multiplex a divisione di frequenza, di varie capacità. Abbiamo sistemi con frequenza massima di 1.3MHz per 300 canali telefonici, sistemi a 4.3MHz per 960 canali, a 6MHz per 1200 canali e a 12MHz per 2700 canali. Sistemi a 60MHz per 10.800 canali sono già in esercizio.

I sistemi ad alta capacità, cioè capaci di trasmettere molti canali, sono poi "convogliati" su *cavi coassiali* o su *ponti radio*. La *coppia coassiale* è costituita da due conduttori cilindrici concentrici o, meglio, "coassiali", il cui conduttore esterno costituisce la "massa" del circuito. Questa struttura consente il passaggio di frequenze molto alte con elevata protezione contro i disturbi esterni. Un cavo coas-



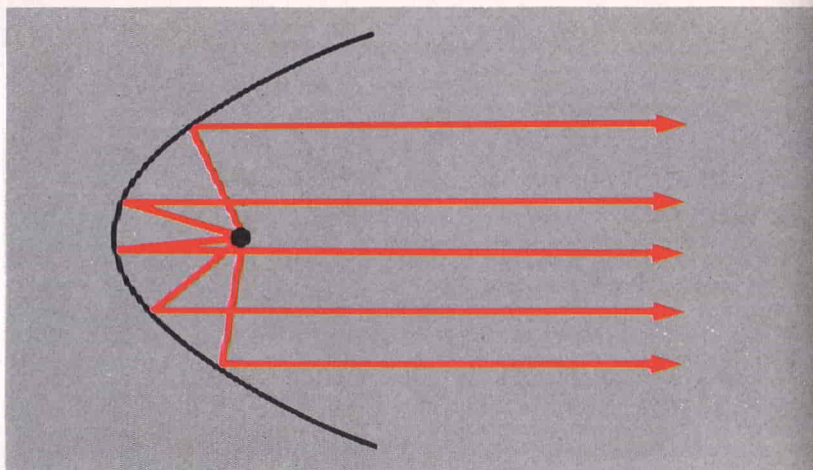
La parte inferiore del disco combinatore di un apparecchio telefonico: si tratta del dispositivo che invia impulsi alla centrale. Sotto: amplificatori elettronici come questo sono distribuiti lungo ogni cavo telefonico per rinforzare il segnale che, dovendo percorrere anche migliaia di chilometri, periodicamente si indebolisce e deve essere riportato alla originale potenza. A fianco: come si svolge una comunicazione telefonica; è stato eliminato lo stadio della commutazione, dal momento in cui il selettore della centrale ha messo in contatto gli utenti. Vi sono due circuiti uguali e distinti che collegano il ricevitore di un apparecchio col microfono dell'altro.





siale può contenere più coppie coassiali. Ogni pochi chilometri, il cavo va interrotto per inserire gli amplificatori – detti *ripetitori* – che compensano le perdite del cavo.

Il cavo è *simmetrico* e porta quindi le comunicazioni nei due sensi; l'amplificatore è un circuito unidirezionale, per cui generalmente ogni ripetitore ne contiene due, uno per ogni senso di trasmissione. Il ponte radio – l'alternativa al cavo coassiale per collegamenti ad alta capacità – è un collegamento radio da punto a punto ad altissima frequenza, da 0.5 a 12GHz (cioè da 500 a 12.000 MHz) con lunghezza d'onda rispettivamente da 60 a 2.5 cm. Onde di questo tipo sono altamente direttive, cioè hanno una propagazione rettilinea. Il ponte radio non trasmette *circularmente* in tutte le di-



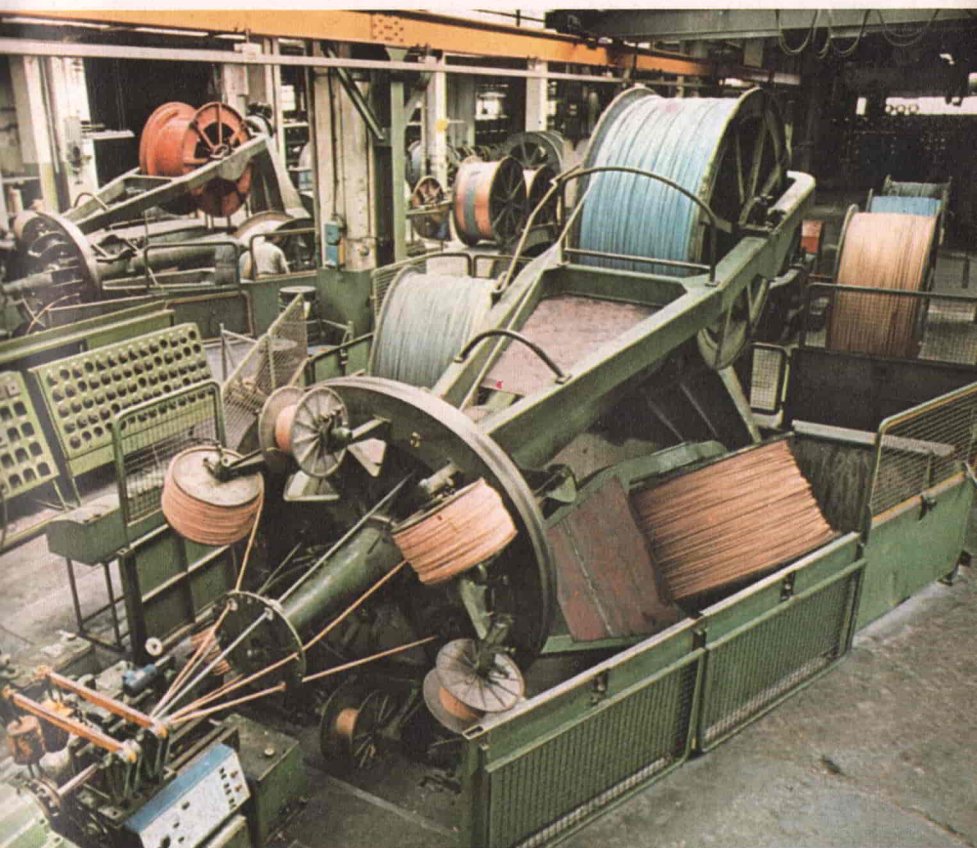
reazioni: le sue onde sono concentrate mediante particolari antenne, in *fasci* cilindrici.

Il principio di funzionamento delle antenne dei ponti radio è lo stesso dei fari delle automobili: una sorgente luminosa (o di onde elettromagnetiche) è posta nel fuoco di uno specchio a forma di paraboloide. Il risultato è la proiezione di un fascio luminoso (o, rispettivamente, di onde elettriche) pressappoco cilindrico, di elevata intensità rispetto alla potenza della sorgente. L'antenna ricevente, di uguale forma, dev'essere orientata accuratamente in modo da captare il fascio trasmesso e concentrarlo nel suo fuoco, dove esiste un opportuno elemento ricevente.

Cavi coassiali e ponti radio, analogamente alle autostrade e alle ferrovie, costituiscono la spina dorsale delle comunicazioni di ogni paese moderno. Su di essi sono trasmesse oltre ai canali telefonici, le trasmissioni telegrafiche, le trasmissioni di dati e anche i programmi radiofonici e televisivi, in modo da collegare tra loro gli studi ed i trasmettitori dell'ente nazionale di radiodiffusione, consentendo così la diffusione radio e televisiva ad alta qualità degli stessi programmi su tutto il territorio nazionale. È evidente che essendo la banda richiesta da un segnale TV pari a 5MHz, come abbiamo visto parlando della televisione, la trasmissione di questo prenderà il posto di ben 1250 canali telefonici: infatti

$$\frac{5000\text{KHz (banda TV)}}{4\text{KHz (banda telefonica)}} = 1250$$

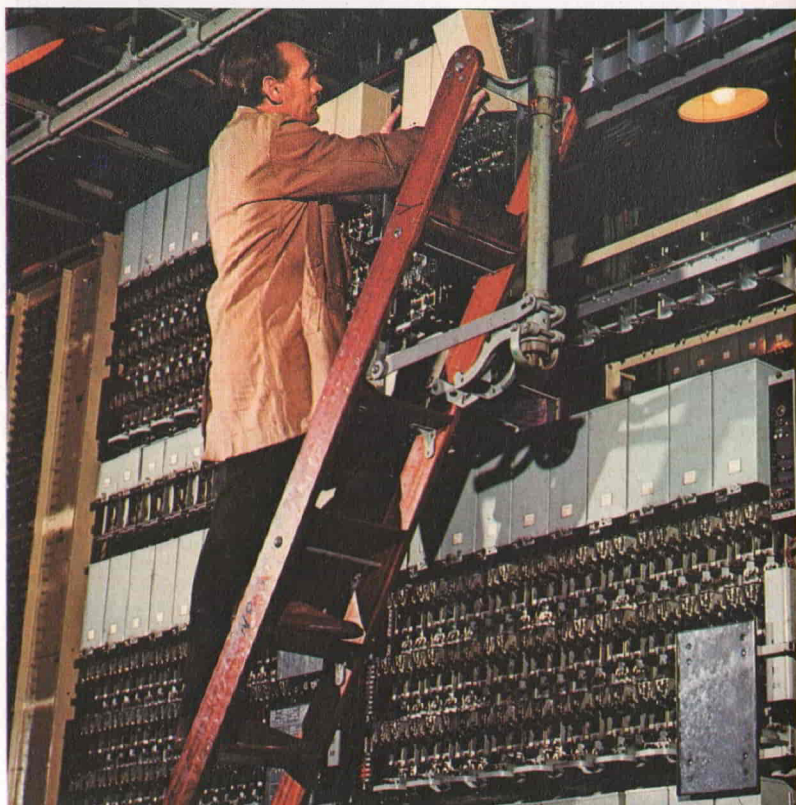
L'incanalamento di tutte queste informazioni sui cavi e sui ponti richiede apparecchiature elettroniche molto complesse, che vengono sistemate alle "testate" del collegamento tra le due città da collegare. Il prefisso interurbano necessario per telefonare in altre città ha l'effetto di portare la nostra chiamata telefonica attraverso la "testata" della nostra città sul collegamento a distanza e quindi, tra-

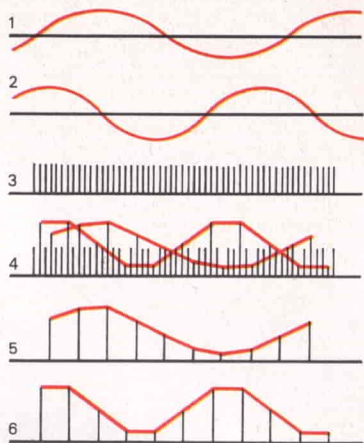
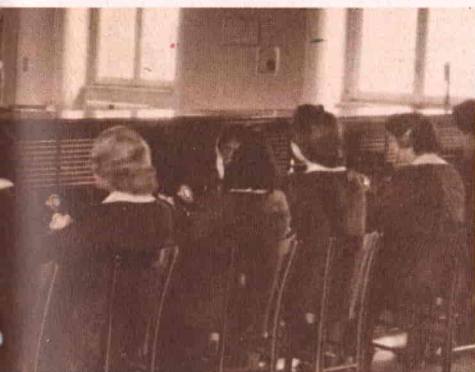


Pagina a fronte: il principio di funzionamento delle antenne paraboloidi dei ponti radio è lo stesso di quello dei fari delle automobili: una sorgente luminosa posta nel "fuoco" del paraboloide crea, con la riflessione, un fascio di raggi paralleli e concentrati. Sopra: apparecchiature per la preparazione dei cavi telefonici. Ogni cavo è costituito da molti conduttori separati dalle rispettive guaine isolanti, cosicchè si può far viaggiare su uno stesso cavo una quantità maggiore di conversazioni telefoniche. Ogni conduttore a sua volta può essere il tramite di più conversazioni contemporanee mediante il sistema "multiplex".

mite la "testata" della città chiamata, alla centrale di commutazione di questa e quindi al numero desiderato.

Ci resta ora da vedere come è possibile realizzare il multiplex a divisione di tempo. Per far ciò ricordiamo, come abbiamo visto, che una successione di rapide immagini può dare all'occhio l'impressione di un movimento continuo, anche se in effetti l'oggetto in esse





Sopra: una foto del 1928, che ritrae centraliniste al lavoro; oggi questa attività è automatizzata. In basso a sinistra: un tecnico ispeziona una centrale telefonica. Sopra a destra: la tecnica del "multiplexing". I segnali 1 e 2 vengono campionati durante gli intervalli 3, prima l'uno e poi l'altro in rapida successione, e possono così essere trasmessi sulla stessa linea (4), prima di venir separati (5 e 6). Sotto: centrale telefonica semielettronica.





contenuto si muove necessariamente "a scatti". Analogamente, anche l'orecchio umano può percepire un suono come se fosse continuo, anche se esso gli viene in realtà fornito "a scatti". Si è pensato, una volta scoperto questo effetto, di interrompere periodicamente il collegamento telefonico fra due utenti per effettuare sullo stesso filo brevi collegamenti tra altre coppie di utenti. In altre parole, il collegamento viene ripartito o diviso nel tempo (multiplex a divisione di tempo) tra vari utenti.

Un esempio ben noto di sistema a divisione di tempo è costituito dal "duplex" telefonico: due diversi abbonati possono alternativamente usare l'unico cavo che li collega alla centrale telefonica. In questo caso, decisamente primitivo, la ripartizione fra i diversi utenti è anche troppo rilevabile. In un sistema elettronico a divisione di tempo, invece, il collegamento è commutato rapidissimamente dall'uno all'altro abbonato in modo tale che entrambi possono usar-

Il cervello elettronico in questo apparecchio telefonico ha mandato in pensione il "gettone". L'utente infatti anziché adoperare il gettone adopera una scheda olografica, grande quanto una carta di credito. Una volta introdotta nell'apparecchio, verrà "consumata" da un occhio elettronico in proporzione agli scatti. A destra: un satellite artificiale per le telecomunicazioni del tipo Intelsat, in grado di stabilire migliaia di collegamenti telefonici contemporanei fra i continenti.



lo contemporaneamente senza accorgersi della discontinuità del collegamento.

C'è una condizione, dettata da ragioni tecniche, che va rispettata per poter realizzare più collegamenti sullo stesso cavo a divisione di tempo: occorre che la cadenza con cui deve essere ripristinato periodicamente ogni collegamento sia pari ad almeno due volte la massima frequenza trasmessa sul collegamento stesso.

Così il collegamento di un canale telefonico con 4KHz di frequenza massima deve essere ripristinato con la cadenza di 8KHz, cioè 8000 volte al secondo, ovvero ogni $125\mu\text{sec}$. Solo se tale condizione è soddisfatta è possibile restituire al ricevitore lo stesso suono trasmesso all'origine, nei limiti della qualità definita dalla banda trasmessa.

A proposito di tali sistemi va anche detto che la trasmissione è effettuata in forma digitale: ogni segnale telefonico viene convertito in un segnale digitale, rappresentato da sequenze d'impulsi: la commutazione da un canale all'altro e l'amplificazione del segnale lungo il collegamento vengono in tal modo semplificati. È anche evidente che così possono essere trasmessi sia segnali rappresentanti collegamenti telefonici sia segnali rappresentanti "dati", cioè segnali già in origine di tipo digitale.

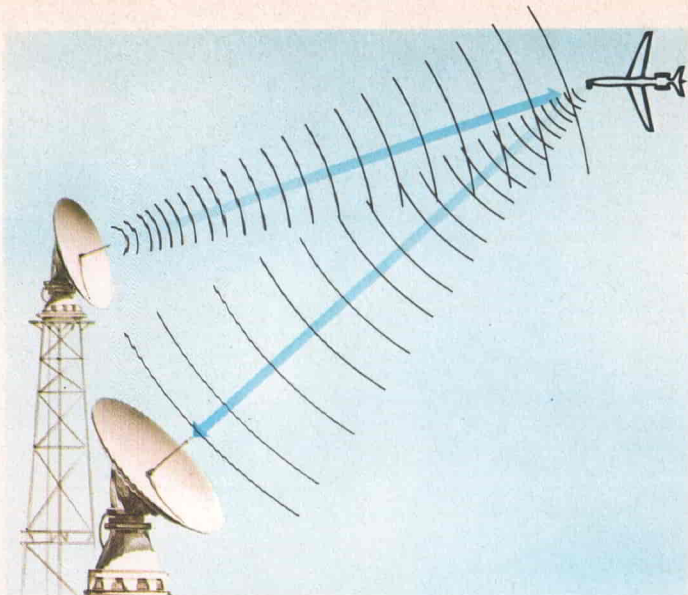
Il radar e gli aiuti alla navigazione

Il radar e gli aiuti alla navigazione

I ragazzi che, nel nostro apologo, gettavano sassi nel lago per "trasmettere" i loro messaggi con l'aiuto delle onde, rischiavano di veder compromesso il loro gioco se le onde incontravano un ostacolo – una barca, un tronco galleggiante, qualunque oggetto abbastanza ingombrante da impedire la propagazione. Non solo il messaggio non raggiungeva correttamente il destinatario, ma il "mittente" vedeva anche "tornare" le onde che si erano infrante contro l'ostacolo, in una specie d'eco: se il ragazzo avesse voluto scoprire la presenza di un oggetto sul lago, in un giorno di nebbia, avrebbe potuto benissimo farlo proprio creando delle onde e osservando poi se questa "eco" si presentava.

In effetti, gli antichi navigatori polinesiani compivano con le loro canoe lunghissimi viaggi nell'oceano, da isola a isola, aiutandosi proprio con l'osservazione delle lunghe onde del Pacifico e delle deformazioni che esse subivano in prossimità di un'isola. Tutti abbiamo letto di numerosi animali, dai pipistrelli ai delfini, che si muovono agevolmente nel buio o nelle acque torbide emettendo dei segnali – sonori o ultrasonici – e captandone l'eco.

Nel 1922, Guglielmo Marconi suggerì che sarebbe stato possibile servirsi delle onde radio – e dell'eco che si sarebbe prodotta quando queste onde avessero incontrato un ostacolo, per esempio un grande oggetto metallico – per scoprire la presenza di oggetti anche a grande distanza, e in condizioni di scarsa visibilità. La tragedia del *Titanic* e la prima guerra mondiale erano ancora abbastanza vicine da dare una grande risonanza a questa dichiarazione, ma ciononostante per diversi anni non vi furono sviluppi pratici – o, almeno, non vi furono sviluppi resi di pubblico dominio. Di fatto, numerosi governi erano molto interessati alle possibilità che Marconi aveva fatto balenare, per quanto riguardava le applicazioni militari: soprattutto nella guerra aerea sarebbe stato di fondamentale importanza identificare l'avvicinarsi di aerei nemici, molto prima che questi fossero nel raggio di visibilità. Nel periodo dal 1930 alla se-



Il principio di funzionamento del radar: da una sorgente vengono emesse onde ad altissima frequenza che, riflesse dal bersaglio, vengono captate da una seconda antenna e analizzate.

con la guerra mondiale, studi su dispositivi elettronici con le capacità prima accennate vennero approfonditi negli Stati Uniti, in Francia, in Germania e in Gran Bretagna – nazione dove furono anzi raggiunti i primi risultati nettamente significativi.

Il dispositivo fondamentale di cui parleremo ricevette il proprio nome – **RADAR** – in modo del tutto ufficioso: non era il nome in codice di un progetto segreto, come il celebre “progetto Manhattan” che condusse alla prima bomba atomica, ma semplicemente la sigla delle funzioni che il dispositivo stesso esplicava, e venne suggerito da un ufficiale di marina: **RADAR** sta per “*Radio Detecting and Ranging*” – identificazione e inseguimento di un oggetto mediante onde radio. Un gruppo di studiosi del “Massachusetts Institute of Technology” definì ancor più precisamente tali funzioni come “L’arte di identificare, mediante eco radio, la presenza di oggetti, determinandone la direzione e la distanza, riconoscendone il carattere e usando i dati ottenuti per compiere operazioni militari, navali, etc.”. Si intuisce che operazioni del genere sono tutt’altro che semplici e coinvolgono non solo apparecchiature sofisticate, ma anche studi teorici molto complessi.

Fondamentalmente, il concetto del radar è questo: se delle onde radio emesse da un’opportuna sorgente incontrano sul loro percorso un ostacolo si genera una forma di “eco” per cui le onde riflesse possono essere rilevate da un osservatore dotato di un’apparecchiatura di ricezione abbastanza sensibile. Se l’osservatore stesso ha prima comandato l’emissione – se quindi stazione trasmittente

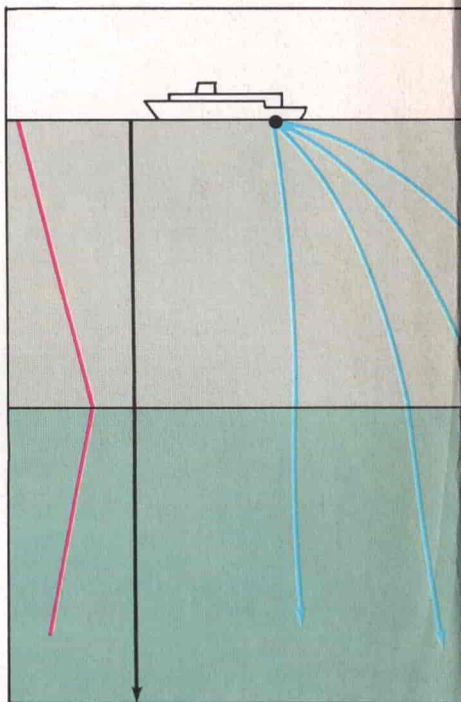
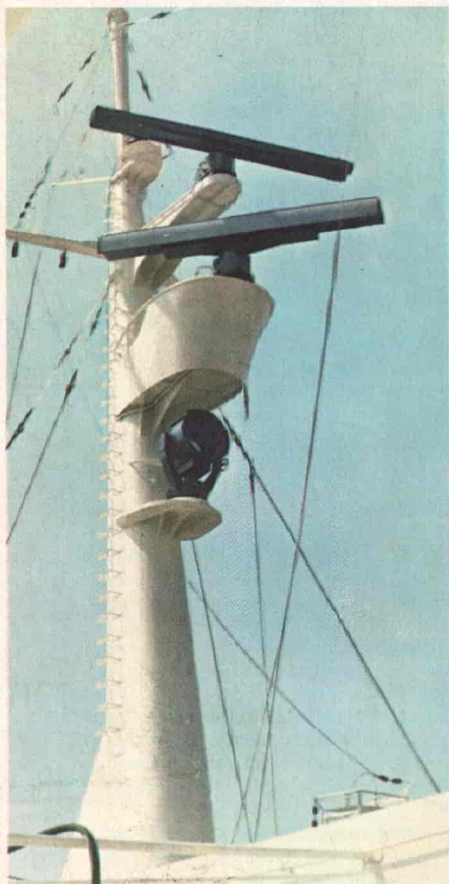
e stazione ricevente sono nello stesso luogo – si può in questo modo partecipare attivamente alla scoperta di oggetti anche molto remoti. Questa funzione è però resa più difficile dal fatto che l'eco ricevuta è costituita da segnali molto deboli, a cui per di più se ne sovrappongono altri "spuri" generati da altre sorgenti: fin dall'inizio, un problema fondamentale fu proprio quello di distinguere le onde radio dell'eco da tutte le altre presenti – prime fra tutte, quelle di cui l'osservatore aveva comandato l'emissione.

La prima soluzione a questo problema fu costituita dal cosiddetto "radar a impulsi". Pensiamo ancora una volta ai ragazzi e al lago: se uno dei ragazzi si limita a gettare un sasso nell'acqua, dopo un breve tempo le onde "dirette" generate dalla sua azione saranno finite, e la superficie dell'acqua sarà increspata solo dalle onde-eco. Il radar a impulsi funziona nello stesso modo. Il trasmettitore emette un breve impulso di energia molto intensa, sotto forma di onde radio, mentre il ricevitore è disattivato; al termine di questo impulso, è il trasmettitore che viene disattivato mentre si attiva il ricevitore, che comincia a raccogliere le diverse eco successive (ricordiamo che le onde possono incontrare numerosi ostacoli, e che nessuno di questi normalmente le "bloccherà" del tutto).

Le onde radio viaggiano alla stessa velocità della luce; il tempo che passa dall'istante della trasmissione a quello della ricezione dell'eco è direttamente proporzionale alla distanza percorsa complessivamente (andata e ritorno) dall'onda, e ci dà quindi un'indicazione non solo sulla presenza di un ostacolo, ma anche sulla sua distanza. Se supponiamo che ci interessino solo gli oggetti fino a una certa distanza massima, lasceremo spento il trasmettitore e acceso il ricevitore per un tempo sufficiente a ricevere l'eco dovuto a oggetti più lontani, poi bloccheremo il ricevitore e trasmetteremo un altro impulso identico al precedente, e così via.

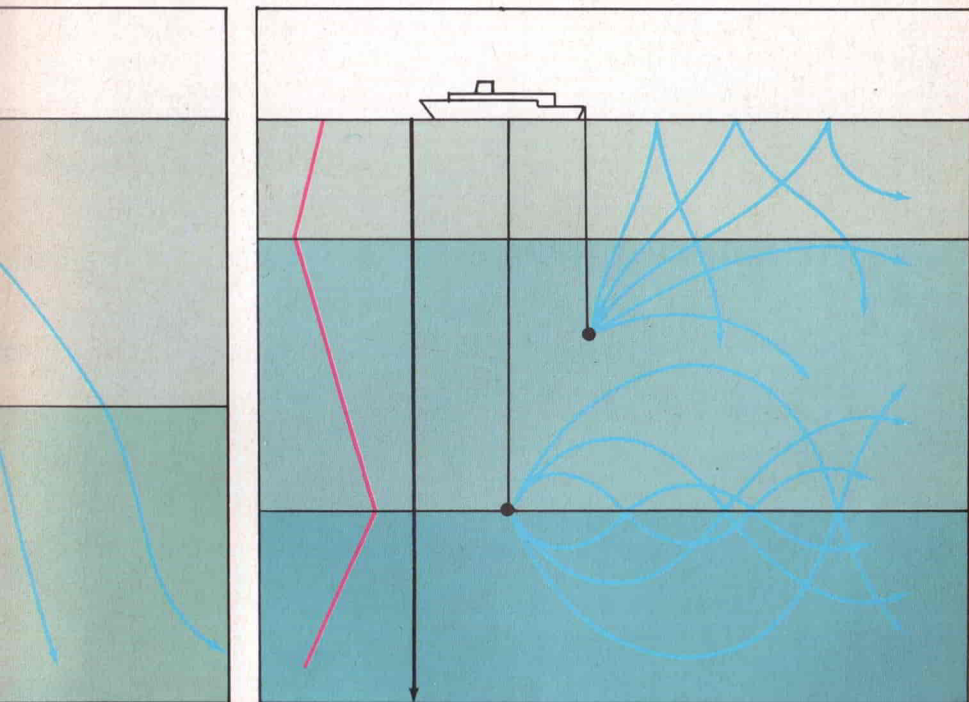
La misura della distanza si è dunque tradotta nella misura di un *tempo* – cioè della grandezza che può essere misurata con maggiore accuratezza di qualunque altra. In realtà, la relazione "distanza-tempo" non è semplice come l'abbiamo descritta, almeno quando le onde viaggiano nell'atmosfera, a causa di una quantità di fattori che vanno dalle perturbazioni atmosferiche alla presenza di disturbi radio, alle caratteristiche geografiche che generano echi "non utili", ma è pur sempre possibile apportare ai calcoli le correzioni opportune.

Evidentemente, sapere che esiste un ostacolo e conoscerne la distanza ma non la direzione non ci sarebbe molto utile: supponiamo però che l'antenna del trasmettitore ci permetta di inviare le onde radio in un "fascio" o "raggio" molto ristretto e "puntato" in una direzione ben precisa. L'eco che si raccoglie indicherà la presenza di un ostacolo in quella particolare direzione: se poi facciamo ruotare l'antenna con continuità in modo che il fascio di onde radio "spazzoli" l'intero orizzonte, riusciremo a scoprire per ogni punto dell'orizzonte la presenza di ostacoli e la loro posizione. Se poi per ogni ostacolo identificato ripetiamo l'osservazione a brevi intervalli di tempo, saremo in grado di verificare se esso si è spostato: potremo così identificare i "bersagli mobili" dagli ostacoli naturali o comunque fissi.



A questo punto, viene presentata all'operatore l'informazione così raccolta. Film di guerra e di fantascienza ci hanno abituati a vedere lo "schermo" del radar: si tratta in realtà dello schermo di un tubo a raggi catodici, affine a quello di un ricevitore televisivo, nel quale il "pennello" di elettroni emessi dal catodo viene *deviato* dal *segnale* applicato agli appositi circuiti di deflessione, in modo che sia la *posizione* di un punto luminoso sullo schermo a darci l'informazione voluta. Se l'eco raccolta dall'antenna del ricevitore, opportunamente demodulata e ridotta in frequenza (infatti le onde radar hanno frequenze altissime), viene utilizzata come segnale di comando per il pennello elettronico, la posizione del punto luminoso sullo schermo ci può indicare distanza e direzione dell'oggetto identificato. Al radar a impulsi è seguito il cosiddetto "radar a onda continua";

A sinistra: antenna radar su una nave. Nei disegni, a sinistra, il sonar: si tratta in pratica di un apparecchio radar che scandaglia le profondità sottomarine. Le frecce mostrano il comportamento delle onde radar che attraversano uno strato di "inversione termica" (il punto in cui si verifica un brusco cambiamento della temperatura). A destra: linee di propagazione di segnali emessi da sonar immersi in profondità, uno proprio a cavallo di un punto di inversione termica. In questo caso le onde tendono a non abbandonare questa quota. Anche la superficie marina riflette le onde radar.

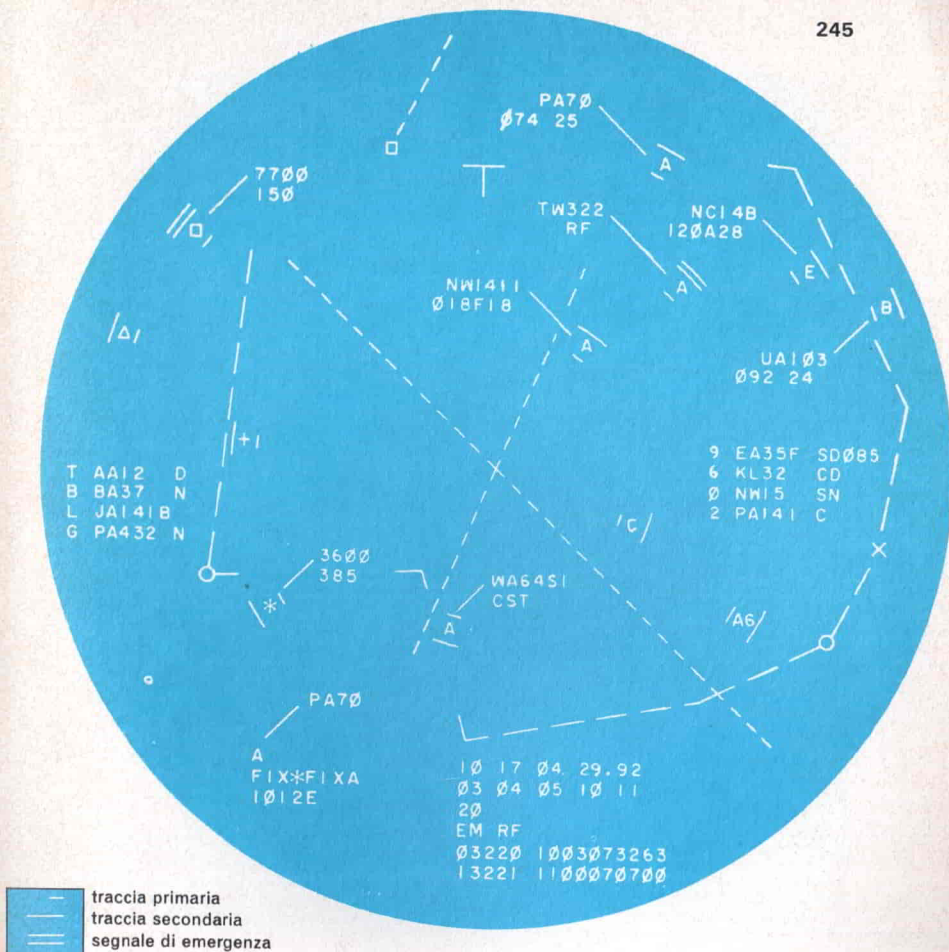


in questo caso si osserva sempre l'eco radio, ma non si può misurare il tempo trascorso dall'emissione delle onde radio alla ricezione dell'eco, dato che la trasmissione avviene con continuità. Piuttosto, si sfrutta il cosiddetto "effetto Doppler": se l'onda trasmessa incontra un oggetto in *movimento* (e solo questi oggetti interessano in molte applicazioni, da quelle militari alla ricerca dei trasgressori al limite di velocità sulle strade) l'eco ha frequenza diversa da quella dell'onda trasmessa; di conseguenza, il ricevitore riesce a distinguere l'onda trasmessa. Non solo: la differenza fra le due frequenze è legata alla *velocità* del bersaglio. Se poi l'onda trasmessa non ha ampiezza e frequenza costanti, ma è modulata (rispettivamente, in ampiezza o in frequenza) altri fenomeni rilevabili sull'eco potranno indicarci anche la distanza del bersaglio.



Finora, abbiamo implicitamente pensato solo alla ricerca di un bersaglio nemico: un bersaglio che non si cura certo di rispondere ai segnali radar, collaborando in qualche modo alla ricerca, ma che anzi spesso cercherà di confonderli – per esempio, trasmettendo a sua volta dei segnali che si sovrappongano all'eco e la rendano ir-riconoscibile.

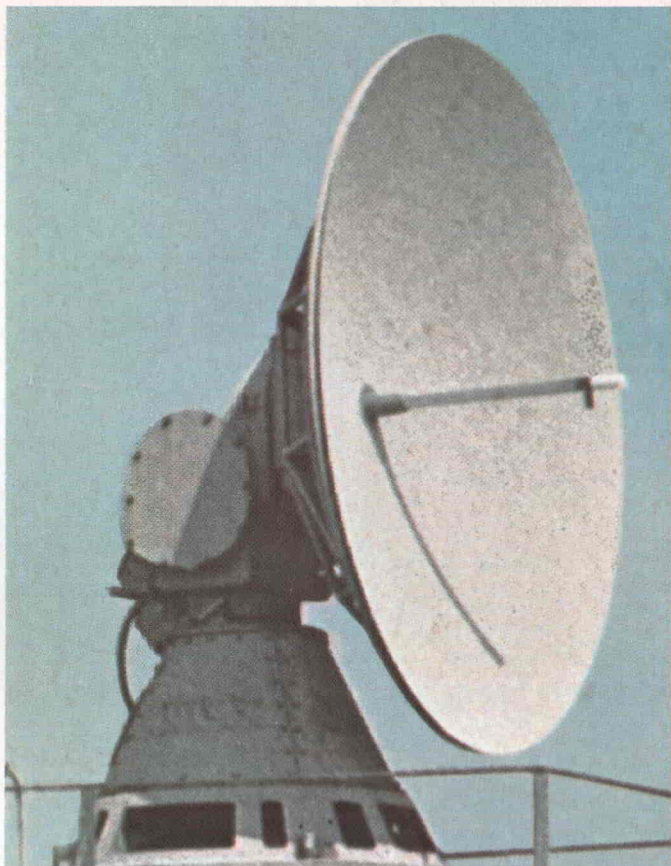
In realtà, il radar è anche – o piuttosto innanzitutto – un potente aiuto alla navigazione: non è immaginabile, oggi, un aeroporto o un aereo o una nave che non sia dotato di questo dispositivo, ed è grazie al radar che sono possibili il volume e le condizioni del traffico aereo e navale dei nostri giorni. Ora, un "bersaglio" – chiamiamolo ancora così – non più nemico ma amico ha tutto l'interesse, quando viene raggiunto da un segnale radar, a "rispondere" in



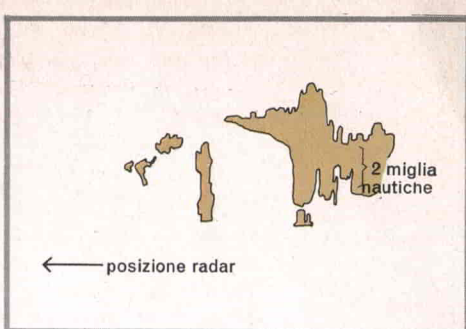
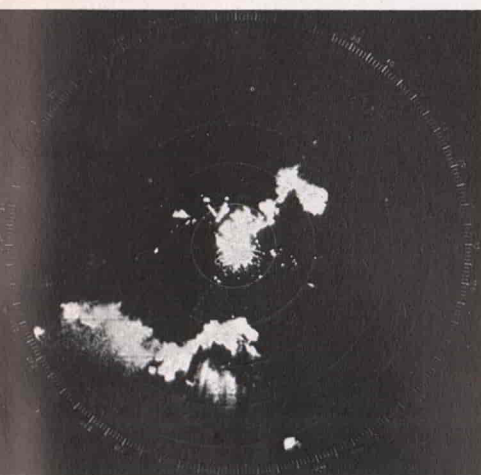
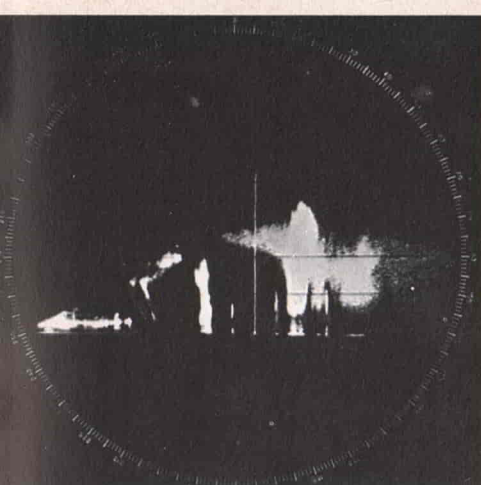
Pagina a fronte: operatori agli schermi radar di un aeroporto. Sopra: come si presenta uno di questi schermi: ogni traccia corrisponde a un aereo che si trova nella zona di cielo esplorata dal radar.

modo da rinforzare l'eco e da completarne l'informazione. Uno strumento che realizza tale funzione è il "radiofaro": un dispositivo che non può essere considerato a rigore un radar, ma che opera sempre congiuntamente ai radar.

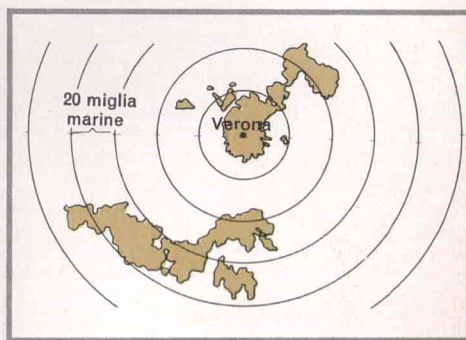
Il radiofaro è dotato di un'antenna e di un ricevitore che raccolgono i segnali trasmessi da un radar e se ne servono per comandare l'entrata in funzione di un trasmettitore: questo "risponde" al radar con impulsi radio le cui caratteristiche (durata, frequenza, etc) possono essere scelti in modo pressoché arbitrario al fine da costituire il



“contrassegno”, il codice particolare del radiofaro stesso. Se la frequenza della risposta è diversa da quella dell'eco, il ricevitore della stazione radar potrà distinguere la risposta e identificare quindi il velivolo (se il radiofaro è uno strumento di bordo) o il punto del terreno (se il radiofaro è a terra) con cui si è stabilito un colloquio. Su questo stesso principio di un colloquio fra “bersaglio” e stazione trasmittente sono basati gli altri aiuti radio per la navigazione; per esempio, uno dei più diffusi – il LORAN – si basa su una catena di stazioni trasmettenti a terra, disposte in “coppie”. I due trasmettitori di ogni coppia sono a distanza nota, e trasmettono su frequenze e in intervalli di tempo prestabiliti: non solo, ma le due stazioni trasmettono l'una dopo l'altra, in una relazione di tempo fissata. Il sistema ricevente, a bordo della nave o dell'aereo, riceve i



Le nubi, i temporali e le precipitazioni possono essere intercettate tramite il radar. Nella pagina a fianco: l'antenna radar dell'osservatorio di Verona; e qui due profili radar, a sezione verticale (in alto) e orizzontale (sotto), con le relative cartine. Vi si vedono alcune nubi temporalesche di una perturbazione che sta passando sulla città. Nella prima fotografia sono evidenti le intense colonne di precipitazione. La seconda abbraccia un campo totale non inferiore a duecento chilometri.



segnali dei due trasmettitori con un intervallo di tempo fra l'uno e l'altro diverso da quello di trasmissione, dato che la diversa distanza del ricevitore dai trasmettitori influisce direttamente su di esso: di conseguenza, è possibile calcolare istante per istante la posizione relativa del velivolo o della nave rispetto alle due stazioni di terra - e quindi identificare la posizione assoluta.

Le tecniche messe a punto per gli aiuti alla navigazione, e particolarmente quelle sviluppate per il radar, sono state utilizzate poi per una vastissima gamma di altre applicazioni. Val la pena di ricordare qui, fra tutti gli esempi possibili, che il radar stesso viene usato per identificare le perturbazioni atmosferiche e "seguirle" lungo il loro cammino, proprio grazie all'effetto che le stesse perturbazioni hanno sulla riflessione delle onde radio ad altissima frequenza.

Alta fedeltà Caratteristica di un sistema di riproduzione che riduce al minimo le distorsioni dei suoni.

Altoparlante Dispositivo che tramuta le oscillazioni elettriche di un circuito in suoni udibili dall'orecchio umano.

Amplificatore Qualunque dispositivo in grado di modificare l'intensità di una corrente o di una tensione applicata al suo ingresso, in modo da fornire in uscita la stessa grandezza moltiplicata per un fattore determinato.

Anodo Elettrodo di una valvola dal quale vengono generate delle cariche positive.

Antenna Parte di un sistema radio, televisivo o radar tramite il quale vengono trasmesse o ricevute dallo spazio le onde elettromagnetiche.

Atomo La più piccola parte di un elemento chimico che ne conserva tutte le proprietà; si compone a sua volta di protoni, neutroni ed elettroni.

Bit La più piccola quantità di informazione nella logica digitale. Viene usata come unità di misura dell'informazione stessa. Un bit corrisponde alla scelta di uno tra due stati possibili.

Campo elettromagnetico Porzione di spazio in cui

una particella carica viene sottoposta all'azione di una forza di origine elettrica o magnetica.

Cannone elettronico Dispositivo che produce un fascio di elettroni di elevata velocità e abbastanza stretto da poter essere considerato di sezione trascurabile.

Carica elettrica Proprietà intrinseca di una particella (per esempio un elettrone) per la quale essa viene respinta da un potenziale del suo stesso segno e attratta da una di segno opposto.

Cavo coassiale Una o più linee di trasmissione in ciascuna delle quali i due conduttori sono avvolti l'uno nell'altro e hanno lo stesso asse.

Cellula fotoelettrica Dispositivo dotato di una componente a semiconduttore sensibile alla luce, che trasforma segnali ottici in impulsi di corrente.

Cinescopio Dispositivo provvisto di un "cannone elettronico" il cui fascio di elettroni, deflesso opportunamente da un campo elettrico o magnetico, genera segnali luminosi colpendo uno schermo di materiale fluorescente.

Circuito elettrico Una rete di componenti elettrici attivi e passivi nella quale può scorrere una corrente elettrica.

Circuito integrato Circuito ultraminiaturizzato costruito drogando in modo ineguale una lastrina di silicio, capace di eseguire le funzioni di apparecchiature che, se costruite con componenti tradizionali, sarebbero estremamente ingombranti e meno affidabili.

Commutazione In un dispositivo logico dotato di due soli stati possibili, è il passaggio dall'uno all'altro stato in seguito a una "istruzione".

Componenti attivi Componenti elettronici (diodi, triodi), che sono in grado di modificare un segnale elettrico passante attraverso di essi, per esempio amplificandolo.

Condensatore Coppia di conduttori, separati da un materiale isolante, caratterizzati da una "capacità", cioè da un rapporto costante fra la carica elettrica accumulata e la differenza di potenziale che si crea fra di essi. L'unità di misura della capacità è il "farad" (1 coulomb di carica su 1 volt di potenziale), ma vengono usualmente impiegati i suoi sottomultipli.

Conduttore Materiale attraverso il quale può fluire una corrente elettrica, quando sia applicata ai suoi estremi una differenza di potenziale.

Contatore Dispositivo in grado di contare degli impulsi elet-

trici fornendo un'uscita di carattere digitale, cioè numerico.

Corrente alternata Corrente elettrica variabile con caratteristiche oscillanti, che non realizza un vero trasporto di cariche, ma solo di energia.

Corrente elettrica Flusso di elettroni, o in generale di particelle cariche, attraverso un conduttore; si misura in "ampère" (un ampère è equivalente al passaggio di una carica elettrica di un coulomb per ogni secondo attraverso una qualunque sezione del conduttore).

Cortocircuito Situazione in cui due punti di un circuito a potenziale diverso vengono connessi fra loro in modo diretto, dando luogo a un forte passaggio di corrente elettrica.

Decibel Unità di misura dell'amplificazione di una potenza elettrica o sonora, a volte usata come unità di misura assoluta della stessa, dopo aver fissato un riferimento costante.

Diodo Dispositivo asimmetrico, che presenta una diversa resistenza al passaggio della corrente nei due sensi. Esistono diodi a vuoto (valvole) e a semiconduttore (giunzioni p-n).

Drogaggio Processo per mezzo del quale si diffondono nel reticolo cristallino dei semiconduttori degli atomi di impurità

trivalente o pentavalente, al fine di creare cariche libere utili per la conduzione elettrica.

Elemento chimico Sostanza costituita di atomi tutti uguali fra loro; se ne conosce circa un centinaio.

Elettrodo Termine generico per indicare un terminale di un dispositivo elettronico dotato di una certa tensione variabile o costante.

Elettrone Particella elementare che possiede la più piccola carica elettrica (negativa) osservata in natura.

Feedback Detta in italiano "reazione" o "controreazione", è l'insieme delle tecniche con cui una grandezza fisica può venir controllata tramite se stessa, inviando segnali dall'uscita verso l'ingresso del dispositivo che la genera.

FET Sigla che sta per "Field Effect Transistor" (= transistor a effetto di campo). Si tratta di un dispositivo, in genere integrato, che controlla il passaggio della corrente attraverso due suoi terminali tramite la tensione applicata a un terzo terminale, detto "porta".

Filtro elettronico Dispositivo che esegue una determinata funzione elettronica, e cioè il trattamento discriminato di determinati segnali (in genere

l'elemento discriminante è la frequenza).

Frequenza Data una funzione periodica oscillante, si dice frequenza dell'oscillazione il numero di cicli che vengono eseguiti in un secondo. Si misura in Hertz.

Giogo di deflessione Bobina nella quale scorre una corrente che produce un campo magnetico di deflessione atto a indirizzare un fascio di elettroni in una direzione voluta.

Giunzione p-n Confine fra due zone di un semiconduttore drogato in modo diverso, l'una con elementi accettori, l'altra con elementi donatori di elettroni.

Griglia Elettrodo di una valvola che non genera portatori di corrente, ma ne controlla la velocità tramite il potenziale a esso applicato.

Impulso Variazione rapida ed estemporanea di una grandezza elettrica (tensione o corrente).

Impurità Costituiscono "impurità" elementi del terzo o del quinto gruppo della Tavola periodica degli elementi che, addizionati in dosi minime ai semiconduttori, li rendono debolmente conduttori.

Induttore Componente che presenta una tendenza a op-

porsi alle variazioni di corrente, in grado tanto maggiore quanto più esse sono brusche. Questa caratteristica si può quantizzare in una grandezza fisica, detta induttanza, che si misura in "henry".

Interferenza Interazione fra due onde elettromagnetiche o di altra natura, in seguito alla quale vi può essere rinforzo oppure anche completa estinzione delle onde stesse.

Interruttore Dispositivo in grado di aprire o chiudere un circuito su comando di un operatore o di un altro circuito preposto al controllo.

Isolante Sostanza che non permette passaggio di corrente elettrica al proprio interno.

Lacuna Posizione nel reticolo cristallino di un semiconduttore drogato nella quale si manifesta l'assenza di un elettrone, assimilabile alla presenza di una carica elettrica positiva.

Legge di Ohm Relazione per cui in un resistore o conduttore è sempre possibile trovare un rapporto costante fra tensione applicata e corrente elettrica fra i terminali, rapporto che è uguale alla resistenza elettrica del mezzo.

Massa Un punto di un circuito viene messo "a massa" quando viene collegato al sup-

porto metallico che contiene l'intera apparecchiatura, e che si trova a una tensione di riferimento costante. Quando la tensione è nulla (rispetto, diciamo così, al "pianeta terra"), allora si dice che il punto è messo "a terra".

Memoria Unità componente di un sistema di elaborazione nella quale i dati possono essere immagazzinati e usati all'occorrenza.

Metallo Sostanza in genere solida e piuttosto resistente, ma nello stesso tempo duttile e malleabile, caratterizzata da una elevata conducibilità elettrica e termica.

Microfono Apparecchio che serve a trasformare una successione di suoni in una serie di impulsi elettrici.

Modulatore Apparecchio con il quale viene modificata l'ampiezza o la frequenza di un'onda in base alle "istruzioni" di un'altra onda.

Molecola La più piccola parte di un materiale che ne conserva tutte le proprietà; essa è composta di uno o più atomi in genere diversi.

Multiplex Tecnica mediante la quale è possibile trasmettere contemporaneamente sulla stessa frequenza due o più conversazioni telefoniche.

Onda portante Onda elettromagnetica avente le giuste caratteristiche di intensità e frequenza per poter essere trasmessa su lunghe distanze; su di essa viene fatta agire l'onda modulante che rappresenta il segnale.

Onde elettromagnetiche Oscillazioni del campo elettrico e magnetico che si propagano senza bisogno di un supporto materiale, e possono venir generate o ricevute da apparecchiature dette antenne.

Oscillatore Qualunque dispositivo che, opportunamente sollecitato, presenta in uscita una funzione (tensione, corrente) che compie una oscillazione di frequenza definita.

Pila Dispositivo che genera ai suoi capi una differenza di potenziale costante e indipendente dal resto del circuito.

Polarizzazione Nel linguaggio dell'elettronica, si tratta di uno stato di un circuito (definito dalle tensioni nei nodi e dalle correnti nei rami) che può essere considerato come il "punto di lavoro" di quel circuito, nel senso che eventuali segnali variabili che si intendono trasmettere o amplificare con esso vengono "sovrapposti" a questo stato costante.

Ponte radio Stazione di trasmissione via etere che lancia

da un punto all'altro della superficie terrestre le trasmissioni radio, telefoniche, ecc. giunte fino a essa via cavo.

Porta logica Sotto questo nome si classificano tutti i dispositivi digitali (AND, OR, NOT) che eseguono operazioni logiche fra le variabili applicate in ingresso e ne danno il risultato in uscita.

Potenza Quantità di energia per unità di tempo che può venir erogata da un generatore, oppure dissipata da una resistenza o altro componente elettrico. Si misura in watt.

Potenzimetro Resistore il cui valore di resistenza può essere variato in modo continuo tramite una manopola.

Programma Elenco di istruzioni scritto in un opportuno codice intellegibile a un elaboratore elettronico, tramite il quale si possono far eseguire all'elaboratore delle operazioni logiche.

Raddrizzatore Dispositivo, realizzato in genere con l'aiuto di diodi, che converte una corrente alternata in una continua.

Radiofaro Apparato trasmettente il cui segnale viene impiegato da aerei e navi per riconoscere la loro posizione geografica, soprattutto in caso di scarsa visibilità.

Relè Congegno elettromeccanico di commutazione che può aprire o chiudere un circuito in modo simile a un interruttore.

Resistore Dispositivo che presenta una certa resistenza al passaggio della corrente, cioè un rapporto costante fra la tensione applicata ai suoi terminali e la corrente che vi scorre. La resistenza si misura in "ohm" (volt su ampère).

Ripetitore Stazione che raccoglie gli impulsi emessi da una trasmittente televisiva lontana, li rinforza e li rilancia nello spazio verso gli utenti o verso un altro ripetitore.

Scansione Tecnica mediante la quale viene esplorata punto per punto un'immagine luminosa, oppure viene prodotta a partire da segnali trasmessi elettricamente.

Segnale Si parla di segnale quando una certa quantità di informazione viene trasmessa fra due punti via etere o via cavo, rispettando un codice prestabilito.

Semiconduttore Elemento del quarto gruppo della Tavola periodica (silicio, germanio) che, pur avendo di norma caratteristiche di isolante, può condurre la corrente elettrica se opportunamente trattato con sostanze trivalenti o pentavalenti ("drogaggio").

Telecamera Apparecchio che serve a trasformare un'immagine luminosa, tramite la scansione, in una serie di impulsi elettrici.

Tensione Differenza di potenziale, espressa in volt, fra due punti di un circuito elettrico.

Tester Apparecchiatura che serve per effettuare rapidamente misure delle più importanti grandezze elettriche (tensione, corrente, resistenza, capacità).

Transistor Triodo a semiconduttore, in grado di amplificare una corrente o un segnale di tensione, oppure di funzionare come un "interruttore" elettronico, analogo al relè.

Triodo Dispositivo a tre terminali, nei quali la corrente o la tensione relativi a uno di essi controlla strettamente la corrente, in genere molto maggiore, che scorre fra gli altri due. Esistono triodi a vuoto (valvole) e a semiconduttore (transistor, FET).

Referenze fotografiche

A.N.S.A. 142; Archivio A.M.E. 10b, 13, 20, 21, 34, 51d, 52, 56, 58bd, 76, 77, 78, 99, 100, 105a, 115, 116b, 117, 122c-b, 126a, 134, 135, 143b, 159a-b, 181, 189, 191bs, 193a, 194, 203, 206, 210, 211b, 215, 216, 217, 222, 226-227, 228-229a, 245, 246, 247; Arvati, Verona 25b, 33, 35a, 38, 42, 43a, 45, 46, 50, 55, 58, 59, 86, 110, 191a, 191bd, 192, 208, 240; Back Pack, 207; Bazzecchi, I. 12, 120-121a; B.B.C. 200a, 201; Bell Telephones Laboratories 58bs, 73, 150; B.O.A.C. 170; Brunel University 205; Cella 234; C.I.S.E., foto G. Motto 53bs; Cobb, P. 211; Conservatoire des Arts et Metiers, photo Rapho 159a; Coton, Ken, courtesy I.B.M. World Trade Co. 87b; 40as, 171, 225; Curiel, Verona 18, 19, 22, 23, 26, 37as, 49, 51s, 53as, 64, 72, 74, 85, 94, 95, 97, 98, 102, 104, 106b, 109, 111, 113, 116a, 125, 129, 138, 165, 166b, 168a, 173, 200b, 202, 204, 209a, 230, 233ad, 242c, 243; Dal Gal, Verona 105b; De Gregorio (Ricciarini) 160, 161; W. Disney Production 108; European Space Research Institute, Frascati 175; Fantinelli 123ad; F.I.A.T., Torino 176a, 183b, 184; Fototeca Storica Nazionale 90, 223, 228b; General Post Office, London 232b; Grandi Motori, Trieste 182; Herman, Paris 157; Hewlett-Packard 169; Honeywell 122a; Hughes Aircraft Co. 235; Hyde, Roger, by permission of Queen Mary College, London 123b, courtesy of Ministry of Transport 176b; IBM World Trade Co. 87a, 158-159bc, 166-167; Jaski, Thomas, courtesy of New Scotland Yard, London 177; Ladd, G., Kitt Peak 10-11a; Leeds and Northrop 37ad; MID design 66-67b; Mullard 213; NASA 136-137a, 136b, 145; Pedone, Milano 209bs; Philips, Milano 2, 36, 36-37, 37b, 39, 40, 41a, 41b, 43b, 47a, 47b, 53ad, 53bd, 57, 62, 63, 67a, 68, 69, 70, 71, 75, 76b, 103, 143a, 151, 183a, 190, 193b, 214a, 214b; Pirelli, Milano 25a, 231; Plessey radar 244; Scianna, F. 139; S.E.F., Torino 168b; Selenia 242s; S.G.S., Milano 27, 60, 120b, 169b; Shell Int. Petroleum, London 153a; Siemens, Milano 35b, 106a, 107, 119, 209bd, 228a, 232a, 233b; SITCAP, Torino 126b; Sun, Layton Ltd, courtesy Science Museum, London 158bs; Texas Eastern Transmission Co., USA 152-153; Texas Instruments, 79; Time Life 152; USIS 140, 141; Valbusa, S. 101.

Questo volume è stato impresso
nel mese di settembre 1979
nelle Officine Grafiche di Verona
di Arnoldo Mondadori Editore
Stampato in Italia - Printed in Italy

Pubblicati

Flora e fauna delle Alpi

L'atlante dei funghi

Uccelli d'Europa

Guida ai cani di tutto il mondo
300 razze

Guida al gatto

Guida al cavallo

Guida alle bandiere
di tutto il mondo

Guida allo yoga pratico

Guida alla ginnastica
per la donna d'oggi

Guida alla meteorologia

Guida agli stili del mobile

Guida alle moto da competizione

Guida alle automobili d'oro

Guida ai velieri di tutto il mondo
dal 1200 a oggi

Guida alle corazzate
dalle origini a oggi

Guida all'elettronica

Guida agli aeroplani di tutto il mondo

1 dalle origini alla prima guerra mondiale

2 dal 1918 al 1935

3 la seconda guerra mondiale
parte prima

4 la seconda guerra mondiale
parte seconda

5 modelli civili dal 1935 al 1960

6 modelli militari dal 1945 al 1960

Serie di Storia Naturale

Il mondo della geologia

Il mondo dei fossili

Il mondo degli invertebrati

Il mondo delle piante

Il mondo degli insetti

Il mondo dei pesci

Il mondo degli anfibi e dei rettili

Il mondo degli uccelli

Il mondo dei mammiferi

Guida al corpo umano

Guida alle piante medicinali

Serie di Guide alla Natura

Guida alla natura d'Italia

Guida alla natura della Sardegna

Guida alla natura
del Lazio e dell'Abruzzo

Guida alla natura dell'Emilia,
della Romagna e delle Marche

Guida alla natura del Veneto
e del Friuli-Venezia Giulia

Guida al Po

Guida alla natura della Puglia,
Basilicata e Calabria

Serie Fatelo da soli

Guida alla manutenzione della casa

Guida alla vita all'aria aperta

Guida ai lavori in legno

Guida all'uncinetto

Guida alla maglia

Di prossima pubblicazione

Indice degli aeroplani
di tutto il mondo
dal 1903 al 1960

Guida alle erbe, spezie e aromi

**Il libro, in una chiave di lettura agevole,
guida efficacemente il lettore nel campo dell'elettronica
descrivendone i principi, i mezzi che impiega
e i fini che si propone**

**Elettronica, una tecnica giovane
dai confini non raggiunti e tantomeno prevedibili.
Le applicazioni di essa,
diffusissime ovunque si esplici l'attività dell'uomo,
ne condizionano largamente la vita**

