Elettricismo divulgato



ALI

Dello stesso autore:

- L'Aeroplano — Evoluzione dell'Aeronautica - Intro- duzione all'Astronautica — IV Edizione 1956	L.	1.000
— Dall'Aeronautica all'Astronautica — (Stralcio da « L'Aeroplano »)	L.	650
— Il Pilotaggio dell'Aeroplano e dell'Elicottero .	L.	550
— La Guerra Oggi	L.	150

ELETTRICISMO

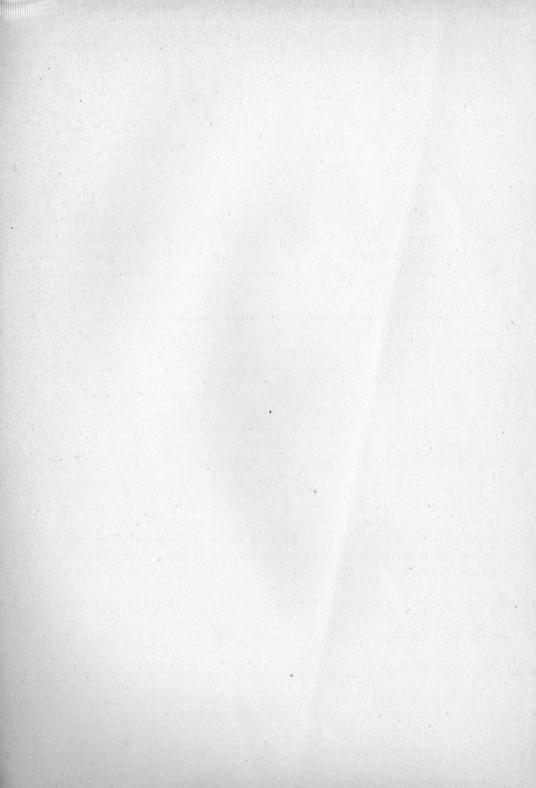
"Felix qui potuit rerum cognoscere causas"

(VIRGILIO - "Georgiche,, II 490)



ROMA - Via Agrigento 3

Alla memoria dei miei genitori



PREFAZIONE

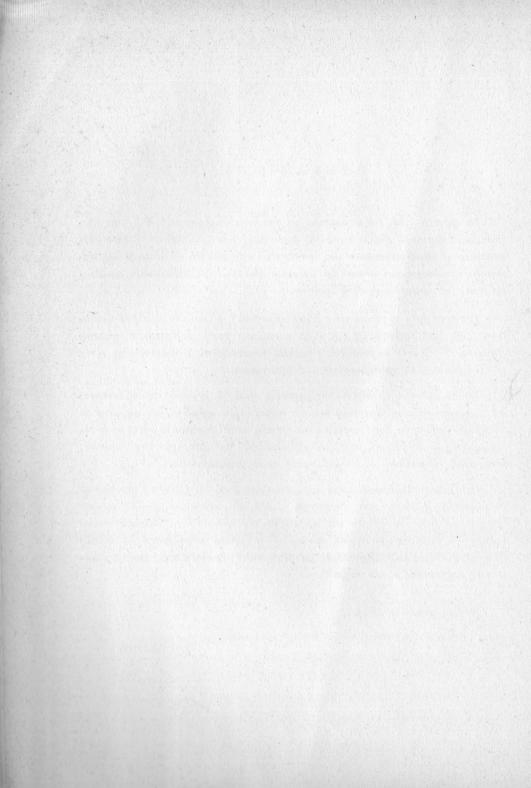
In questo libro si è cercato di rendere comprensibili i più importanti fenomeni dell'elettricità, per riuscire a spiegare in forma elementare il funzionamento dei molteplici dispositivi di natura elettrica che costituiscono ormai la maggior parte degli strumenti caratterizzanti la moderna civiltà tecnica.

Il titolo non comune di « Elettricismo » è stato scelto per includere più lecitamente in un solo termine, poco definito in quanto desueto, i diversi argomenti trattati, riguardanti l'elettrofisica e la elettrotecnica, la radiotecnica e l'elettronica.

La complessa e misteriosa materia mal si presta, notoriamente, ad una esposizione sintetica semplificata. Allo scopo di conseguire la maggiore efficacia divulgativa si è perciò continuamente ricorso a riferimenti di carattere pratico, abbondando in analogie meccaniche, termiche, idrauliche e sovente perfino aerodinamiche.

Il miglior risultato che ci si ripromette è di far capire l'essenziale in materia di elettricità, come già detto, augurandoci che il solerte lettore sia poi invogliato ad approfondire queste sue iniziali conoscenze — comprendere per amare — e possa proseguire lo studio di così meravigliosi argomenti su altri testi specializzati, del presente più autorevoli e più degni.

Roma, gennaio 1958



INDICE

Parte I. — ELETTRICITA'

 L'elettrone fattore comune della materia e dell'energia — Il meraviglioso e misterioso mondo atomico — Le inafferrabili particelle subatomiche — La tabella di Mendelejeff e gli isotopi . Gli elettroni agenti primari dei fenomeni chimici — Elettroni vincolati negli isolanti. Elettroni semiliberi fluiscono nei conduttori per pareggia- 	Pag.	3
re la densità di carica — Corrente elettrica e corrente d'aria	. ((11
3 — Gli urti degli elettroni contro le molecole causa della resistenza elettrica — La legge di Joule misura l'energia diventata calore — L'effetto termoelettrico e il suo inverso, con spiegazione alla Cretinetti del calorifero e del frigorifero))	19
4 — Importantissimo il concetto di potenziale — Co- me in una corrente liquida il dislivello così in una corrente elettrica la tensione influisce sulla portata ossia sulla intensità — La legge di Ohm fondamentale per le relazioni tra tensione resi-		26
stenza e intensità))	26
in energia chimica e viceversa	. »	34

6 —	Definizione del circuito elettrico — Nei circuiti rispettata sempre la legge di Ohm — Il corto circuito e la valvola a filo fusibile — I principî di		
	Kirchhoff regolano il transito agli incroci	Pag.	41
7 —	Il fenomeno della ionizzazione anche nei gas — L'elettricità atmosferica e il fulmine — La indu- zione elettrostatica dovuta alla misteriosa attra- zione e repulsione delle cariche — Il conden-		
	satore consente l'addensamento massimo degli		
, , , , ,	elettroni))	53
8 —	Il dielettrico del condensatore sede di energia potenziale di tipo elastico — Soccorrono sem- plici analogie meccaniche e idrauliche — La gabbia di Faraday utilizzata nei due sensi — Condensatore e accumulatore come ferro da sti-		
	ro e carbone di legna	»	62
	Parte II. — ELETTROMAGNETISMO		
9 —	Il magnetismo manifestazione della vorticosità degli elettroni — Importanti analogie aerodinamiche — La magnetizzazione per induzione do-		
10 —	vuta al propagarsi dei vortici nel campo Gli elettroni della corrente provocano vortici elettronici nello spazio — Un solenoide equivale ad una barra magnetizzata — L'elettromagne-	»	71
	te spiega subito il telegrafo — L'enorme potenza dei vortici	»	78
11 —	L'autoinduzione elettromagnetica dovuta sem- pre ai vortici elettronici — La legge di Lenz for- mulazione del principio di conservazione della energia — L'induttanza come un volano —		

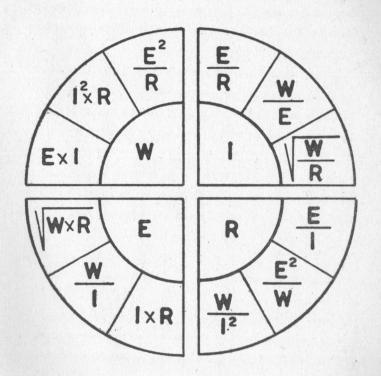
	L'attrito elettrico all'origine dell'elettroma-	
	gnetismo	Pag. 94
12 —	Gli elettroni sono deviati da un campo magne-	
	tico e possono compiere un lavoro meccanico —	
	Ancora analogie aerodinamiche che autorizza-	
	no infine a parlare di fluido elettronico — Sche-	
	ma elementare del motore elettrico	» 102
13 —	La generazione dinamica della corrente elettri-	
	ca — L'energia magnetica intermediaria tra il	
,	lavoro meccanico e la corrente — Dinamo e mo-	
	tore elettrico come ventilatore e aeromotore —	
	Correnti parassite talvolta sfruttate	» 109
14 —	La dinamo macchina generatrice di corrente	
	continua può funzionare anche come motore —	
	Caratteristiche dei motori eccitati in serie e in	
	derivazione. Il motore in serie è il più adatto	
	per la trazione	» 116
	Parte III. — Corrente Alternata	
15 —	La corrente alternata è versatile grazie alla pos-	
	sibilità di trasformarne agevolmente tensione e	
	intensità — La trasformazione rende conve-	
	niente e sicura dovunque l'utilizzazione della	
	energia elettrica — Lo spinterogeno	» 125
16 —	L'induttanza in una corrente alternata costitui-	
	sce una resistenza di tipo inerziale e provoca	
	lo sfasamento in ritardo della intensità rispetto	
	alla tensione — Influenza preminente della fre-	
	quenza — Che cosa è il reattore saturabile	» 137
17 —	La capacità in una corrente alternata opera co-	
	me uno stantuffo elastico in un circuito idrau-	

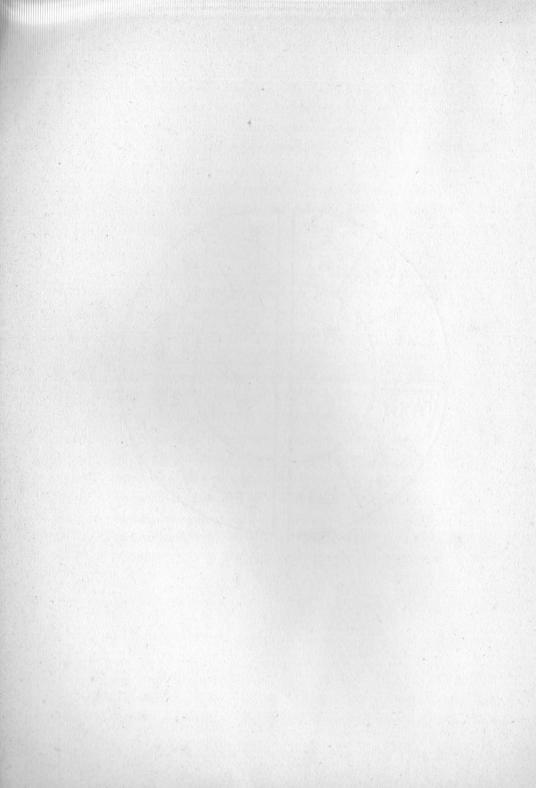
	lico — Sfasamento in anticipo della corrente: effetto strano ma spiegabile — Possibilità di compensare con la capacità gli effetti dell'in-		
	duttanza — Il fenomeno della risonanza	Pag.	145
18 -	 La produzione industriale di corrente alternata mediante gli alternatori — Cenni sulle reti di distribuzione e sugli impianti domestici — Au- 		
-	spicio per le centrali elettronucleari))	154
19 –	 Il motore a campo rotante Ferraris alimentato da corrente alternata è il preferito — Vantaggi del motore asincrono — Impiego estesissimo dei 		
	motori elettrici di ogni dimensione))	162
	Parte IV. — RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA		
20 -	 Le oscillazioni elettriche presentano analogie significative con le oscillazioni meccaniche — Induttanza e capacità fattori essenziali di un circuito oscillante — Risonanza anche in una conchiglia	»	175
21 -	— La radiazione elettromagnetica originata da vibrazioni elettriche — Per la definizione e il comportamento delle onde radio valgono i confronti con le onde fluide — Il dipolo circuito oscillante atrofizzato ma funzionale per le altissime frequenze))	184
22 -			
	Divagazioni sulla inerzia e sulla gravità))	194

23	-	La decisiva realizzazione di Marconi — I prin-		
		cipî fondamentali delle radiocomunicazioni —		
		Come si irradiano e come si propagano le onde		
		elettromagnetiche — Sfruttamento della disper-		
		sione ionosferica e troposferica	ag.	204
24	_	I bulbi elettronici elementi basilari degli appa-		
		rati per le radiocomunicazioni — Il diodo pri-		
		mo della serie — I raddrizzatori di corrente —		
		Filtri di spianamento e regolatori di tensione .))	216
25	_	Il trìodo dagli svariati usi: valvola elettronica,		
		amplificatore, oscillatore — I transistor sosti-		
		tuti vantaggiosi dei trìodi. Comparsa del crio-		
		tròne. Il solion — Gli invertitori di corrente .))	224
26				
		dulazione incide le onde secondo la forma parti-		
		colare dei suoni da trasmettere — Il microfono		
		traduce un suono in una corrente — La pro-		
		prietà piezoelettrica di certi cristalli messa a		
		profitto — Vantaggi della modulazione di fre-		
		quenza nelle radioaudizioni))	233
27		La captazione e la rivelazione delle onde elet-		
		tromagnetiche — Il ricevitore telefonico ritra-		
		duce la corrente in suono — Cenni sulla costi-		
		tuzione e sul funzionamento di un apparato ra-		
		dioricevente))	247
			"	
		Parte V. — ELETTRONICA		
28		Il flusso elettronico si fa lavorare nel chiuso co-		
		me il vapore — Il tubo a raggi catodici elemen-		
		to fondamentale per la televisione e per molte		
		altre apparecchiature elettroniche — Utilizza-		
		zione dei cavi coassiali in radio e in telefonia .))	259
			311741576	

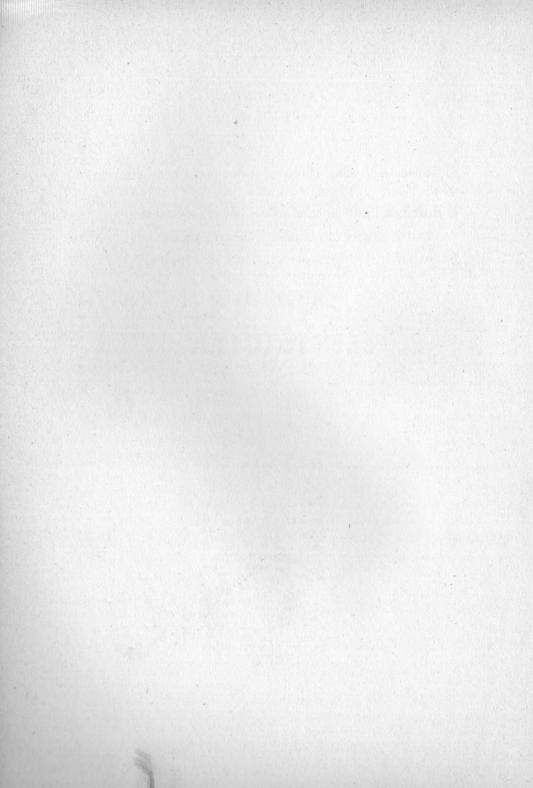
29 —	Il radar basato sull'eco elettromagnetica — La tecnica della trasmissione ad impulsi — Ancora analogie con gli ultrasuoni — La guida d'onda come un tubo portavoce		268
30 —	L'effetto fotoelettrico conferma la stretta pa- rentela tra elettroni e fotoni — La cellula fotoe- lettrica e le sue applicazioni alla TV e al cine-		
31	ma sonoro — Il magnetofono	•	279
32 —	che e il microscopio elettronico	>>	289
33 —	raggi canale e lo spettrografo di massa In vari modi dagli elettroni si può ricavare luce visibile: incandescenza, luminescenza, fluorescenza, dielettroluminescenza — Potenti macchine elettroniche per l'investigazione intima della materia e dell'energia: dal ciclotrone al		297
	sincrofasotrone — La radiazione all'origine del Creato		303

_	Indice analitico alfab	etico .			Pag.	313
-	Bibliografia))	318
	Errata - corrige				,,	319





PARTE I ELETTRICITA'



L'elettrone fattore comune della materia e dell'energia.

Il meraviglioso e misterioso mondo atomico. Le inafferrabili particelle subatomiche. La tabella di Mendelejeff e gli isotopi.

Anche in un libro che non è di pura erudizione non si può fare a meno di cominciare a dar conto della etimologia della parola « elettricità ». Diremo soltanto che questa deriva dal greco « electron », termine con il quale veniva indicata la sostanza « ambra »; e fu il medico inglese Gilbert, per la prima volta nel 1600, a definire « vis electrica » la strana proprietà che presenta appunto una bacchetta di ambra (o di vetro, ebanite, ceralacca, ecc.) di attirare dei leggerissimi trucioli (per es. polvere di sughero) dopo essere stata strofinata con un panno di lana. (Il comportamento è analogo a quello di una calamita nei riguardi della limatura di ferro).

Si definisce elettricità positiva quella del tipo elementarmente ottenuto strofinando una bacchetta di vetro; elettricità negativa quella ottenuta strofinando una bacchetta di ebanite.

Una legge fondamentale dell'elettricità è l'attrazione di cariche di nome contrario (positiva e negativa) e la repulsione di cariche dello stesso nome (entrambe positive o entrambe negative).

Così, se con un polverizzatore soffiamo polvere di zolfo, questa per strofinio si elettrizza negativamente e si attaccherà a corpi elettrizzati positivamente; se soffiamo polvere di minio (ossido di piombo) questa si elettrizza positivamente e si attaccherà a corpi elettrizzati negativamente.

Per migliaia di anni l'uomo non ha avuto alcuna precisa nozione dei veri e propri fenomeni « elettrici », e le comuni imponenti manifestazioni temporalesche, quali i fulmini, sono state riconosciute di natura elettrica soltanto alla fine del secolo XVIII, da Beniamino Franklin.

Non c'è da meravigliarsi, poichè i sensi con i quali l'uomo percepisce le altre familiari manifestazioni di energia (calore, suono, luce, ecc) non consentono di avvertire direttamente la presenza di elettricità se non sotto la forma di scossa elettrica, che nel passato non era del resto nemmeno provocabile artificialmente.

Quando si cominciò ad avere nozione della elettricità nella specie di oggetti elettrizzati, si pensò alla esistenza di un misterioso fluido (sono fluidi l'acqua, l'aria, i gas) sia pure infinitamente più tenue degli altri fluidi conosciuti, e perciò assolutamente invisibile e imponderabile.

Si credeva che in particolari condizioni un tal fluido riempisse di sè i corpi, che si sarebbero « imbevuti » di elettricità come una spugna si imbeve di acqua: l'elettricità sarebbe stata quindi qualcosa che si poteva aggiungere o togliere alla materia. Comunque, essa si manifestava così raramente da autorizzare a considerarla un « accessorio », non necessario e del tutto trascurabile, sia della materia che dello spazio.

Questa concezione è risultata fondamentalmente errata, in quanto oggi sappiamo che l'elettricità, sotto forma del suo « atomo » elementare denominato elettrone, è parte costitutiva essenziale della materia e dello spazio. Sappiamo anche che tutte le forme di energia sono derivabili da una energia unica universale che è la radiazione, e che la materia è « sostanziata » di elettricità al punto che materia e radiazione (energia) possono essere addirittura trasformate l'una nell'altra.

* * *

Ricordiamo innanzitutto che gli antichissimi scienziati greci (Democrito - 300 a. C.) già consideravano la materia composta di atomi, avendo definito come «atomo» (che significa «indivisibile») la particella elementare più piccola di materia.

Anche la fisica moderna definisce l'atomo quale particella infinitesimale di un elemento materiale, che conserva la identità dell'elemento stesso.

Gli elementi stabili esistenti in natura sono considerati nel numero di novantadue. Se ne citano alcuni: l'idrogeno (H), l'elio (He), l'ossigeno (O), l'azoto (N), il cloro (Cl), il carbonio (C), il calcio (Ca), il sodio (Na), il mercurio (Hg), il ferro (Fe), il rame (Cu), l'oro (Au), l'uranio (U).

(Esistono poi altri elementi, detti transuranici, che si è riusciti a creare artificialmente e risultano generalmente instabili).

Gli atomi di uno stesso elemento e di diversi elementi si possono combinare tra loro, spontaneamente o in seguito a reazioni chimiche provocate, per formare le molecole, cioè le particelle elementari costitutive delle innumerevoli sostanze esistenti in natura. Così per esempio un atomo di cloro (Cl) si unisce con un atomo di sodio (Na) per formare una molecola di cloruro di sodio (Na Cl) che è il comune sale da cucina.

Una molecola di acqua (H_20) è formata da due atomi di idrogeno (H) e da un atomo di ossigeno (O).

Le molecole degli *elementi semplici*, si ripete, possono essere formate da più atomi, naturalmente dello stesso elemento; tali sono, per es., le molecole dell'*idrogeno*, dell'*ossigeno*, dell'*azoto* formate da due atomi (molecola *biatomica*).

Quando invece la molecola è formata da un solo atomo si dice monoatomica: così è quella dell'elio, del neon, ecc.

Diversi elementi semplici e diverse sostanze possono, con procedimenti di natura fisica, naturali o artificiali, strettamente *legarsi* tra loro per dar luogo ad altre diversissime sostanze composte.

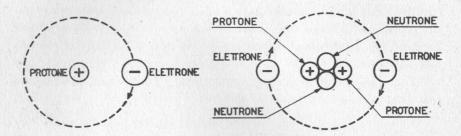
nk nk nk

Ma torniamo all'atomo per vedere qual'è la sua intima struttura, secondo le moderne vedute.

Il più semplice degli atomi è quello dell'idrogeno che si immagina formato da un nucleo centrale costituito da una particella materiale infinitesimale denominato protone, carico di elettricità detta positiva, e da una particella elementare infinitesimale di elettricità (definita negativa denominato elettrone, che si ritiene giri intorno al nucleo come un pianeta intorno al sole. (Fig. 1).

L'elettrone nella sua orbita è animato da una elevatissima velocità grazie alla quale compensa la forza attrattiva del protone, che essendo carico di elettricità di segno contrario esercita sull'elettrone una attrazione.

La massa del protone è di gran lunga maggiore della massa dell'elettrone (è precisamente 1.840 volte più grande), sicchè si può dire che la massa dell'atomo è senz'altro costituita dalla massa del protone, risultando trascurabile quella dell'elettrone.



Fic. 1 — Schemi dell'atomo dell'idrogeno (a sinistra) e dell'elio (a destra)

Si calcola che il « diametro » di un atomo sia dell'ordine di un centimilionesimo di cm; quello del nucleo è diecimila volte più piccolo; quello di un corpuscolo subatomico (protone, ecc) è fino a 100.000 volte più piccolo di quello dell'atomo.

Per avere un'idea delle dimensioni e delle distanze relative in un atomo, per es. di idrogeno, si può paragonare il protone ad un piroscafo di 18.000 tonnellate in mezzo all'Atlantico Sud, e l'elettrone ad un aeroplano (di circa 10 tonnellate) che gli giri velocissimamente intorno su un'orbita circolare tangente alle coste dell'Africa e della America.

Dopo l'atomo dell'idrogeno consideriamo l'atomo dell'elio (un altro gas molto leggero) il cui nucleo è formato da due protoni e da due neutroni.

Quì incontriamo una nuova particella, il neutrone, che si trova nei nuclei di tutti gli elementi (escluso l'idrogeno). Il neutrone ha una massa uguale a quella del protone, ma non possiede carica elettrica, cioè è neutro (da ciò il suo nome).

Gli elettroni presenti nell'atomo dell'elio, circolanti intorno al nucleo su due diverse orbite, sono due, e controbilanciano e neutralizzano con la loro carica negativa la corrispondente carica positiva posseduta dai due protoni del nucleo. Cosicchè in definitiva l'atomo dell'elio, come tutti gli atomi, si presenta in natura elettricamente neutro cioè non manifesta elettricità.

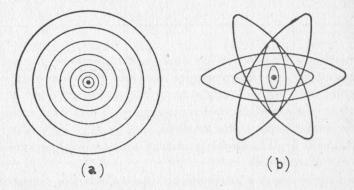


Fig. 2 — Modello schematico di un atomo a più orbite rappresentate in piano (a). Modello con le orbite rappresentate in diversi piani (b).

Anche nell'elio la massa dell'atomo è concentrata nel nucleo, formato come già detto da due protoni più due neutroni, e risultante perciò quattro volte maggiore della massa dell'idrogeno.

C'è da domandarsi come riescano i due protoni a restare insieme strettamente saldati, quando posseggono entrambi una carica positiva che comporta necessariamente una reciproca repulsione. E' stata da taluno attribuita ai neutroni la funzione di impedire detta repulsione, svolgendo essi così una pretesa ma inspiegata funzione di « collante » tra i protoni nell'interno del nucleo.

E' da supporre che tra i « nucleoni » (come sono genericamente denominate le particelle subatomiche del nucleo) si esercitino probabilmente forze di attrazione, del genere di « coesione », enormi, data la minima distanza tra essi.

Inoltre, pare che tra i nucleoni, forse disposti a strati « a guscio » concentrici, e in agitazione vorticosa, avvengano intensi interscambi di energia: un neutrone acquistando un « positone » (carica elettrica elementare positiva) diventerebbe un protone, e viceversa un protone perdendo un positone diventerebbe un neutrone. Potrebbe anche avvenire che un neutrone perdesse un elettrone diventando un protone.

Ancora, si è fatta l'ipotesi che la « coesione » nucleare sia determinata da un continuo scambio tra i nucleoni di altre speciali particelle, detti « mesoni », paragonabili ad elettroni pesanti (di massa circa 200 volte maggiore).

* * *

Procedendo via via con gli altri elementi sempre più pesanti si trova nel nucleo un numero sempre maggiore di protoni e un numero di neutroni che è uguale o superiore al numero dei protoni.

Così il carbonio ha un nucleo contenente sei protoni e sei neutroni; l'ossigeno otto protoni e otto neutroni; ecc.

Il numero degli *elettroni* in ciascun atomo risulta sempre uguale al numero dei *protoni*.

Ad ogni elemento è attribuito nu numero atomico, corrispondente al numero dei protoni (e quindi degli elettroni) che esso contiene, ed anche un peso atomico, corrispondente al numero totale dei protoni e dei neutroni presenti nel nucleo.

Perciò l'elemento carbonio ha numero atomico 6 e peso atomico 12 (6 + 6): l'ossigeno ha numero atomico 8 e peso atomico 16 (8 + 8).

Molti elementi esistono in diversa «composizione » nucleare, differente per il numero dei neutroni contenuti nel nucleo, eguale restando il numero dei protoni (e quindi degli elettroni orbitanti): ne risulta perciò diverso soltanto il peso atomico (somma dei protoni e dei neutroni, come sopra detto).

Così esiste un *uranio* 235 il cui nucleo contiene 92 protoni e 143 neutroni (92 + 143 = 235), ed esiste un *uranio* 238 il cui nucleo contiene 92 protoni e 146 neutroni (92 + 146 = 238).

L'uranio 238 è il più pesante dei 92 elementi naturali.

Le due specie di uranio ora definite hanno le stesse proprietà generali di natura chimica e si distinguono soltanto per alcune particolari caratteristiche fisiche.

Poichè, come detto, ogni elemento è caratterizzato da un determinato numero atomico (corrispondente al numero di elettroni presenti nell'atomo) si è autorizzati ad assegnare a ciascuno un ordina-

252,222	Gr. O	Gr. I	Gr. II	Gr. III	Gr IV	Gr. V	Gr VI	G. VIII	G. VIII
PERIODO	Gr. U	a b	a b		a b	a b	a b	a b	a b
I	_	1 H		<u></u>		_	_	_	_
II	2 H e	3 Li	4 B e	5 B	6 C	7 N	80	9 F	
III	10 Ne	11 Na	12 Mg	13 A I	14 Si	15 P	16 S	17 C L	_
IV	18 Ar	19 K 29 Cu	20 Ca 30 Zn	21 Sc 31 Ga	22 Ti 32 Ge	23 V 33 As	24 Cr 34 Se	25 Mn 35 Br	26 Fe 27 Co 28 Ni
A	36 Kr	37 Rb 47 Ag	38 Sr 48 Cd	39 Y 49 In	40 Zr 50 Sn	41 Nb 51 Sb	42 Mo 52 Te	43 Ma 53 I	44 Ru 45 Rh 46 Pd
VΙ	54 X	55 Cs 79 Au	56 Ba 80 Hg	57-71 (T. RARE) 81 TL	72 Hf 82 Pb	73 Ta 83 Bi	74 W 84 Po	75 Rg 85 At	76 Os 77 Ir 78 Pt
M	86 Em	87 Fr	88 Ra	89-92 (RADIOAT)	_	-	<u> </u>	-	_

Fig. 3 — Tabella di Mendelejeff: sistema periodico degli elementi. Gli elementi appartenenti ad una stessa colonna (Gruppo) hanno caratteristiche chimiche omologhe e presentano un egual numero di elettroni nel guscio più esterno.

to e determinato posto in una tabella generale degli elementi (detta di Mendelejeff). (Fig. 3).

Gli elementi che, come le due specie di uranio prima citate, differiscono soltanto per il peso atomico, si dicono isotopi (che vuol dire

« stesso posto ») in quanto avendo lo stesso numero atomico occupano appunto lo stesso posto nella tabella di *Mendelejeff*.

In questi ultimi anni hanno avuto estesa applicazione, nel campo delle ricerche scientifiche e mediche in particolare, gli *isotopi radio-attivi* di diversi comuni elementi, come il radio-iodio, il radio-calcio, ecc.

Per ora possiamo concludere che i componenti elementari comuni di tutti gli atomi, e quindi della materia in qualsiasi forma e condizione, sono le tre particelle sopra definite: elettrone, protone e neutrone.

Le particelle atomiche — si ripete — sono infinitamente piccole, non risultano nè visibili, nè rilevabili direttamente, e nessuno è in grado di dire come realmente siano fatte. Esse si rivelano e si individuano solo indirettamente in particolari condizioni.

Per trovare una analogia, si ponga mente ad un aeroplano attraversante l'atmosfera ad altissima quota, e non percepibile a vista; si sa che talvolta ce ne denuncia la presenza la scia di condensazione che esso produce. Tale scia ci autorizza ad affermare senz'altro che lassù viaggia un aeroplano, ma come quell'aeroplano sia fatto non si è in grado di dirlo.

2 — Gli elettroni agenti primari dei fenomeni chimici.

Elettroni vincolati negli isolanti. Elettroni semiliberi fluiscono nei conduttori per pareggiare la densità di carica.

Corrente elettrica e corrente d'aria.

L'elettrone è la particella più importante da conoscere, per gli scopi della presente trattazione: torniamo perciò subito a parlarne studiandone nel miglior modo possibile il comportamento.

Gli elementi che offrono maggior interesse nel campo dell'elettricità hanno gli atomi con numeri atomici più o meno elevati, cioè son dotati di numerosi elettroni che a grandissima velocità ruotano in orbite diverse intorno al nucleo, come già detto, formando come una « nebbia » elettronica. (Fig. 2).

Più che di orbite conviene invero parlare di gusci elettronici, nel senso che le orbite di due o più elettroni si immaginano contenute in diversi piani e in diverse superfici pressochè sferiche, concentriche con il nucleo, distanziandosi questi gusci sempre più con l'aumentare del numero degli elettroni che in ciascun guscio orbitano.

Precisamente si ammette che nel guscio più interno (indicato con la lettera K) si trovino due elettroni, nel guscio successivo (guscio L) otto elettroni, nel terzo guscio (guscio M) diciotto elettroni, nel quarto guscio (guscio N) trentadue elettroni, ecc.

Il guscio più esterno può o non può contenere al completo la sua dotazione di elettroni, nel senso che un atomo per es. con 20 elettroni (quello del calcio) ne conterrà 2 nel guscio K, 8 nel guscio L e i restanti 10 (anzichè 18) nel guscio M.

Per cause diverse qualche elettrone può saltare da una orbita contenuta in un guscio ad un'altra orbita contenuta in un guscio prossimo. Si ritiene che il salto che avviene da un guscio più interno ad un guscio più esterno richieda un assorbimento di energia esterna, da parte dell'atomo.

Se il salto di un elettrone avviene invece da un guscio più esterno ad un guscio più interno l'atomo irradia energia: si dice allora che è stato emesso un quanto di energia, costituendo perciò il quanto la minima quantità elementare di energia che può essere prodotta.

Altri importantissimi fenomeni sono connessi con la eventuale perdita, o l'acquisizione, di elettroni da parte del guscio più esterno di un atomo.

Consideriamo per esempio il sodio (che come il potassio appartiene al gruppo dei metalli detti alcalini). Esso ha 11 elettroni, disposti 2 nel guscio K, 8 nel guscio L ed 1 nel guscio M.

L'unico solitario elettrone del guscio più esterno viene a trovarsi in una condizione di instabilità e può essere facilmente ceduto ad un altro atomo. Quando ciò avviene il sodio rimane con 10 elettroni che non possono più compensare la carica positiva degli 11 protoni del nucleo, e allora l'atomo si presenterà non più neutro ma caricato positivamente (per l'eccedenza delle unità di elettricità positiva sulle unità negative).

L'atomo si trasforma allora in un ione positivo. Quegli elementi, come appunto il sodio, che presentano la caratteristica di avere un atomo « prodigo », disposto cioè a cedere elettroni alla prima occasione, sono definiti « elettropositivi » (Fig. 4).

Si possono creare, nei gas rarefatti, correnti (raggi canale) costituite da cariche positive che si spostano alla velocità di alcune centinaia di km al secondo: sono appunto gli ioni gassosi i supporti di queste cariche, la cui grandezza è perciò in tal caso dell'ordine di quella molecolare.

Vi sono altri elementi chimici la cui costituzione è tale da avere anch'essi incompleta la dotazione di elettroni del guscio esterno, ma con la tendenza a captarne qualcuno da atomi di altri elementi per conseguire una maggiore stabilità. (Si potrebbero definire atomi « ingordi »).

Per esempio l'atomo di *cloro* possiede 17 elettroni, disposti 2 nel guscio K, 8 nel guscio L, 7 nel guscio M. (Fig. 4).

Mettendo l'elemento cloro in presenza dell'elemento sodio succede che il primo capta l'elettrone che il secondo è disposto a cedere, e i due atomi si avvincono strettamente, in modo che l'elettrone del guscio M del sodio viene a far parte del guscio M del cloro. La combinazione dei due atomi, con un elettrone in condominio, in definitiva dà luogo alla creazione di una molecola neutra di cloruro di sodio, una nuova sostanza di aspetto e di caratteristiche del tutto differenti da quelle dei singoli elementi generatori. (Fig. 4).

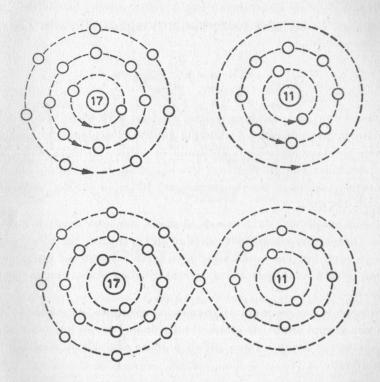


Fig. 4 — (Sopra): Schema dell'atomo di cloro (a sinistra) e dell'atomo di sodio trasformato in ione (a destra). (Sotto): Molecola di cloruro di sodio.

Si può dire che tutto il mondo della chimica è regolato da questi processi di scambi e di « compartecipazioni » di elettroni fra gli atomi.

Alcuni atomi, anche senza combinarsi con quelli di differenti elementi, hanno la tendenza a captare uno o più elettroni appartementi ad altri atomi oppure liberi. Allora vengono a trovarsi con una eccedenza di elettroni rispetto al numero dei protoni del nucleo, e ma-

nifestano in conseguenza verso l'esterno una carica negativa: sono perciò detti elementi « elettronegativi ».

Altri elementi ancora, come per es. l'elio che ha un solo guscio dotato di due elettroni, si presentano perfettamente stabili, senza alcuna tendenza nè a cedere nè a captare elettroni. Questi elementi, non « prodighi » nè « ingordi », bensì « indifferenti », si definiscono « inerti ».

Sono gas inerti, oltre l'elio, l'argo, il cripton, il radon (emanazione del radio) ecc.

afe afe afe

Quando in una sostanza, come il cloruro di sodio (salgemma) nominato in precedenza, gli elettroni periferici svolgono la funzione di tenere solidamente avvinti gli atomi di sodio e di cloro, viene meno la possibilità che gli elettroni stessi passino da un atomo all'altro permanendo, sia pure temporaneamente, liberi, o meglio semiliberi, dentro la sostanza.

In tali condizioni attraverso la sostanza non può avvenire passaggio di elettricità, passaggio normalmente costituito da uno spostamento di elettroni che può essere assicurato soltanto ad opera degli elettroni semiliberi (come sopra inteso). Si dice allora che la sostanza è isolante.

Isolante è per esempio il diamante, costituito da carbonio puro, in cui gruppi interi di atomi condividono i loro elettroni restando strettamente avvinti l'uno all'altro senza che alcun elettrone rimanga libero.

ofe ofe ofe

Nei metalli, la cui molecola è monoatomica, avviene invece che gli atomi presentano caratteristica « elettropositiva » avendo la tendenza a perdere degli elettroni, che passano facilmente da un atomo all'altro, pur restando incorporati nel metallo stesso (che risulterà all'esterno sempre elettricamente neutro).

Per esempio il *rame*, uno dei metalli ottimi conduttori, ha l'atomo costituito da 29 elettroni disposti in quattro « gusci », il più esterno dei quali porta un solo elettrone, il quale perciò passa con grandissima facilità da un atomo ad un altro vicino.

Cosicchè in un metallo come il rame si devono immaginare presenti miriadi di elettroni semiliberi che passando da un atomo all'altro vagano disordinatamente e incessantemente nella massa del metallo, muovendosi in tutte le direzioni e urtandosi continuamente, tra loro e con gli atomi, come fanno le molecole di un gas per il moto browniano. (Vedi in proposito anche il Cap. 22).

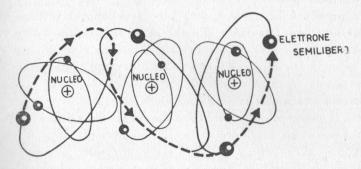


Fig. 5 — Negli atomi dei metalli conduttori gli elettroni del guscio esterno passano facilmente da un atomo all'altro, determinando la propagazione della corrente.

Si tratta ora di capire come si può trasformare questo moto disordinato in un flusso ordinato e continuo, in una regolare corrente elettrica insomma. (Fig. 5).

Serviamoci dell'analogia con una corrente gassosa, per esempio di aria, che possiamo sempre determinare in un tubo mettendone un'estremità in comunicazione, attraverso un rubinetto, con una bombola d'aria compressa (lasciando l'altra estremità libera alla pressione atmosferica).

Si nota che, prima di aprire il rubinetto della bombola, nel tubo esiste aria stagnante (alla pressione atmosferica), le cui molecole anno pur sempre dotate dei naturali moti molecolari browniani sopra ricordati. (La velocità propria delle molecole di azoto e di osageno dell'aria è di circa 500 metri al secondo).

Appena aperto il rubinetto le molecole d'aria contenute nella bombola, essendo a pressione (densità) maggiore — come dire più

« affollate » — rispetto alle molecole della libera atmosfera, si precipitano nel tubo occupandone tutto lo spazio e spostandosi con continuità, dalla bombola verso l'estremità libera del tubo, con la tendenza a pareggiare la densità molecolare (cioè l'affollamento delle molecole) nella bombola e nel tubo.

Del resto è noto che una corrente d'aria, nel significato più comune, si stabilisce in un corridoio quando si mettono in comunicazione, attraverso porte o finestre, zone dove regna una maggiore pressione con zone dove ne regna una minore.

Ricorrendo a paragoni ancora più grossolani, si verifica qualcosa di simile a quanto avviene allorchè in un ricevimento estivo una sala molto affollata viene messa in comunicazione con un'altra vuota: molte persone che si accalcavano (e accaldavano) nella prima sala si avviano subito verso la seconda, e dopo un pò di tempo si stabilisce una densità praticamente uniforme nelle due sale.

Così la corrente d'aria nel tubo durerà finchè esisterà nella bombola una pressione maggiore di quella atmosferica: dopo di che cesserà (si dirà allora che la bombola si è scaricata).

In un filo metallico percorso da una correne elettrica, si avrà a che fare non con molecole d'aria ma con elettroni (che sappiamo essere le particelle elementari di elettricità negativa); invece della maggiore densità (pressione) di molecole nella bombola, bisognerà disporre di una maggiore densità di elettroni (detta maggiore carica o maggiore tensione) ad un capo del filo; ciò che si può ottenere mediante un accumulatore o una pila, oppure un qualsiasi altro generatore di elettricità, di cui diremo in seguito.

* * *

La corrente elettrica si può dunque considerare costituita da un flusso continuo di elettroni: tanti se ne aggiungono ad un capo del filo, tanti ne escono all'altro capo (senza tuttavia essere individualmente gli stessi che sono entrati).

Per avere un'idea — molto grossolana — di ciò che avviene in un conduttore elettrico, si può paragonare la « propagazione » della corrente di *elettroni* alla « trasmissione » di mattoni mediante « passamano » da un punto dove sono accumulati ad un altro dove vengono utilizzati. Se i due punti sono collegati per es. da dieci file di manovali (questi assimilabili agli atomi), posto che ogni manovale abbia già un mattone in mano, appena ha inizio la richiesta da parte dei muratori i primi dieci mattoni vengono deposti a piè d'opera. Immediatamente dopo, trascorso il tempo necessario per il trasferimento di un mattone da un manovale al successivo, altri dieci mattoni giungono a destinazione a seguito dei primi, e così via: si stabilisce allora un « flusso » continuo di mattoni la cui « portata » complessiva dipenderà dal numero delle file dei manovali (oltre che dalla sveltezza media dei manovali stessi).

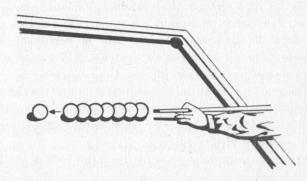


Fig. 6 — L'impulso impresso alla biglia si propaga senza sensibile spostamento delle biglie intermedie

Se le file dei manovali sono 100, oppure 1000, e la velocità di spostamento di un mattone è, per es. di due manovali per minuto secondo, ogni secondo 200, o rispettivamente 2000, mattoni arriveranno a destinazione. Dove si vede che — più che la velocità di spostamento dei mattoni — è il numero dei manovali a determinare la quantità di mattoni trasmessa.

Si è già detto che — come le molecole di un gas — gli elettroni nel loro moto si urtano continuamente tra loro e con gli ioni metallici, sicchè la loro apparente velocità di spostamento (velocità della corrente) lungo il filo risulta di molto inferiore alla velocità propria di agitazione istantanea (dell'ordine dei 300.000 Km/sec) che possiede un elettrone negli infinitesimali tratti « liberi » di cui si compone il suo disordinato moto in ogni direzione.

La velocità di propagazione della corrente in un conduttore metallico è infatti dell'ordine di un centinaio di Km al secondo.

(Analogamente, la corrente di aria nel tubo prima considerato avrà una velocità di gran lunga inferiore alla velocità propria di agitazione delle molecole di aria, già indicata dell'ordine dei 500 metri/sec.).

Come sopra accennato, l'alta conduttività elettrica dei metalli e dovuta però non alla velocità di agitazione degli elettroni ma al gran numero di elettroni semiliberi in seno ai metalli stessi, numero che è dello stesso ordine di quello delle molecole (in un centimetro cubo di rame è di circa 12×10^{22}).

E' anche da dire che gli elettroni in agitazione, pur così numerosi, nei loro movimenti compiono un « percorso libero » medio notevole, di circa 30 diametri atomici, data la relativamente grande distanza che separa gli atomi nella materia. (Si ripete che il diametro di un atomo è di un centimilionesimo di cm).

In definitiva, gli elettroni « sotto tensione » urtandosi si trasmettono una « spinta », diretta prevalentemente dai punti dove la « densità » elettronica è maggiore ai punti dove è minore; ma il loro spostamento effettivo risulta minimo.

Analogamente, fornendo un impulso alla prima biglia di una fila (Fig. 6) la spinta si propaga rapidamente e l'ultima palla si allontana velocemente, mentre lo spostamento delle altre risulta minimo. 3 — Gli urti degli elettroni contro le molecole causa della resistenza elettrica.

La legge di Joule misura l'energia diventata calore. L'effetto termoelettrico e il suo inverso, con spiegazione alla Cretinetti del calorifero e del frigorifero.

Ora è da rilevare che tutti i continui innumerevoli urti degli elettroni con le molecole (ioni) del metallo provocano un aumento del naturale moto di agitazione delle molecole stesse, e tale aumento di agitazione si traduce e si manifesta in un aumento della temperatura del conduttore. (Fig. 7).

Si conferma così che, come in tutti i movimenti, gran parte dell'energia posseduta dagli elettroni, servendo a vincere una resistenza « di attrito », si trasforma in calore.

E' questa la resistenza elettrica la quale definisce l'ostacolo, maggiore o minore, che un filo metallico presenta al passaggio del flusso elettronico.

Si constata e si dimostra — ed è facilmente intuibile pensando a quello che avviene in una conduttura di gas o di acqua — che la resistenza elettrica complessiva presentata da un conduttore risulta tanto minore quanto maggiore è la grossezza (sezione) del filo, e quanto minore ne è la lunghezza. (Fig. 8).

Ovviamente è sempre la natura del metallo che principalmente determina — a parità di altre condizioni — la maggiore o minore resistenza al passaggio della corrente elettrica, in dipendenza della struttura molecolare del metallo stesso.

Così il rame e l'argento avendo gli atomi molto ravvicinati, e nel guscio più esterno di ciascun atomo esistendo elettroni che agevolmente passano da un atomo all'altro, presentano piccola resistenza.

I metalli buoni conduttori, che offrono cioè minore resistenza, sono appunto il rame e l'argento, e poi anche l'alluminio. I conduttori elettrici si fanno perciò normalmente di rame o di alluminio. Un filo metallico buon conduttore viene denominato talvolta reoforo.

Presentano invece notevole resistenza la costantana, le leghe nichel-cromo, ecc.

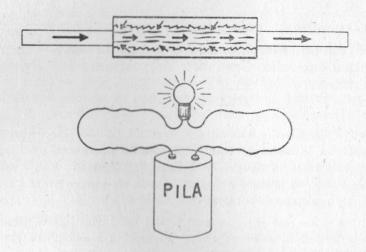


Fig. 7 — Analogamente a quanto avviene in una corrente liquida, la resistenza elettrica è causata dall'ostacolo frapposto dagli atomi materiali del conduttore al libero flusso degli elettroni.

Nelle stufe elettriche si adottano gli ora nominati metalli resistenti, e i fili si fanno sottili avvolgendoli in spirali molto lunghe, appunto per provocare un notevole « attrito » al passaggio della corrente, con conseguente massimo sviluppo di calore.

Nelle lampade ad incandescenza il finissimo filamento (di tungsteno) presenta grande resistenza e raggiunge una temperatura di oltre 2.400°; si arroventa perciò al bianco dando luce.

非非非

La resistenza elettrica si esprime in ohm (Giorgio Онм, fisico tedesco, 1789-1854).

Per dare un'idea della resistenza presentata normalmente dai comuni conduttori diremo che un cordoncino con filo di rame, di quelli che portano la corrente per la luce nelle case, presenta una resistenza di circa un centesimo di ohm al metro; la resistenza complessiva di una stufa elettrica casalinga da 2 kilowatt è di circa 30 ohm; di un ferro da stiro è di circa 100 ohm; del filamento di una lampadina da 60 watt è di circa 200 ohm.

Per confrontare la resistenza elettrica presentata dalle diverse sostanze è stata definita la resistenza specifica o resistività di ciascuna, costituendone un conduttore lungo un metro e della sezione di

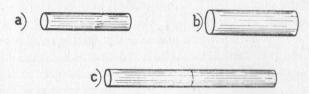


Fig. 8 — La resistenza opposta dal tubo b (di sezione doppia) è unitariamente metà di quella di a, La resistenza del tubo c (di lunghezza doppia) è doppia di quella di a.

1 mmq. Tale resistenza misurata alla temperatura di 0° è di 0,015 ohm per l'argento, di 0,016 per il rame, di 0,03 per l'alluminio, di 0,20 per il piombo, di 1 per il nichel-cromo, di 11,5 per la grafite (Fig. 9).

Il valore inverso della resistenza specifica si denomina conduttività (e misura anche la lunghezza in metri di un filo della sostanza, sempre di 1 mmq, che presenta la resistenza di 1 ohm). La conduttività ha il valore di 66,6 per l'argento, di 62,5 per il rame, di 33,3 per l'alluminio, di 5 per il piombo, di 1 per il nichel-cromo, di 0,09 per la grafite.

La resistenza elettrica varia con la temperatura: precisamente nel metalli essa aumenta sensibilmente con l'aumento della temperatura, per causa della maggiore agitazione molecolare che la più elevata temperatura comporta, e del conseguente maggior numero di collisioni degli elettroni nel loro moto con le molecole del metallo.

Per esempio la resistenza del rame aumenta dell'8% passando da 0° a 8°, e aumenta del 40% passando da 0° a 100°.

Alle bassissime temperature, vicine allo zero assoluto (-273° centigradi) si verifica all'opposto il fenomeno della superconduttività, consistente nel libero e indefinito passaggio della corrente elettrica nei conduttori, che non presentano praticamente più alcuna resistenza. Ciò è dovuto appunto alla quasi scomparsa delle collisioni degli elettroni con le molecole del metallo, le quali, ormai pressochè inerti, non « ingombrano » più il passaggio con la loro di-

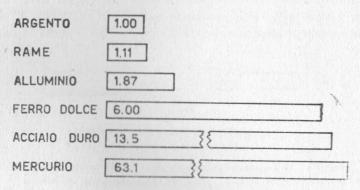


Fig. 9 — Resistenza di vari metalli, comparata con quella dell'argento fatta di valore 1.

sordinata agitazione termica, come avviene normalmente alle temperature superiori.

nie nie nie

Come già detto, il fluire di una corrente elettrica è sempre accompagnato da un riscaldamento del conduttore, cioè da un effetto termico, detto anche effetto Joule. Sull'effetto termico sono perciò basati molti strumenti di misura.

Il riscaldamento del conduttore evidentemente dipenderà dal numero complessivo degli urti che riceveranno le sue molecole nel passaggio del flusso elettronico.

Perciò esso sarà proporzionale alla resistenza che il conduttore presenta (dipendente dalla sua struttura molecolare), e soprattutto alla intensità della corrente che lo percorre (che misura la quantità degli elettroni fluenti nell'unità di tempo).

La formula che dà la potenza W trasformata in calore, in un conduttore di resistenza R percorso da una corrente di intensità I è la seguente:

$$W = I^2 \times R$$

E' questa l'espressione della legge di Joule che dice: In un conduttore elettrico la potenza trasformata in calore è data, in watt, dal prodotto del quadrato della intensità di corrente in ampere per la resistenza in ohm. (Vedi il Cap. seguente).

Dalla formuletta di *Joule* si vede che per ottenere una buona potenza in calore, in una stufa elettrica per esempio, si deve fare in modo che il lungo filamento sia attraversato da una corrente per quanto possibile intensa (la potenza è proporzionale a I²); perciò il filamento non deve presentare una resistenza complessiva troppo elevata, pur giungendo ad arroventarsi per irradiare maggior calore.

Moltiplicando la potenza per il tempo (numero di secondi) durante il quale agisce la corrente si ha il lavoro totale espresso in joule, che può anche essere espresso in calorie moltiplicando per il fattore 0,00024. (Vedi ancora il Cap. seguente).

* * *

Accenniamo a questo punto all'effetto termoelettrico, o fenomeno della temoelettricità, consistente nella generazione di corrente elettrica mediante il riscaldamento di conduttori metallici.

Precisamente si nota che riscaldando il punto di saldatura di due fili metallici diversi si produce una corrente elettrica, di debole intensità ma rilevabile con un galvanometro, se si chiudono in un circuito i due estremi liberi dei due fili metallici.

L'effetto termoelettrico si attribuisce ad una tensione di contatto esistente tra le molecole di due metalli diversi e dovuta alla differente energia richiesta per «estrarre » degli elettroni da ciascuno dei
metalli, cioè per rendere l'elettrone « semilibero », da vincolato come è negli atomi. Sicchè fornendo energia col riscaldare il punto
di saldatura, dal metallo che diremo più « tenero » un maggior numero di elettroni passerà al metallo più « duro », e si registrerà in
definitiva un passaggio di corrente dal primo verso il secondo.

(Talvolta tra i due metalli in contatto, per esempio zinco e rame, la perdita di elettroni dell'uno a favore dell'altro avviene spontaneamente a temperatura normale. E' questo il cosidetto « effetto Volta » del quale si parlerà nel Cap. 5).

Le tensioni termoelettriche così provocate sono in realtà molto basse, tanto che, anche mediante la « coppia » più favorevole ramecostantana, con 500° di differenza di temperatura si riesce ad ot-

tenere una differenza di potenziale di appena $\frac{26}{1000}$ di volt. (Vedi il

Cap. seguente). Ma la corrente può essere resa notevole riducendo al minimo la resistenza.

Comunque, detto fenomeno non viene in pratica preso in considerazione per produrre corrente, bensì si sfrutta per misurare indirettamente le elevate temperature, in condizioni nelle quali sarebbe assai difficile provvedere in diverso modo (per es. dentro un forno di fusione, nel gas di scarico di un motore, ecc).

Lo strumento all'uopo adoperato è il pirometro, costituito da una coppia termoelettrica formata da due idonei metalli o leghe (per es. ferro e costantana) saldati ad un estremo che è quello che si introduce nel punto di cui si vuole misurare la temperatura.

Gli altri estremi liberi della coppia fanno capo, come già detto, ad un galvanometro: cosicchè le indicazioni del galvanometro risultano proporzionali alla differenza di temperatura fra la saldatura riscaldata (posta per es. nell'interno del forno) e l'esterno. L'indice del galvanometro segna direttamente la temperatura interna, tenendo conto della taratura dello strumento e della temperatura esterna.

Come quasi tutti i fenomeni elettrici, il fenomeno termoelettrico è reversibile: ossia facendo passare una corrente da un metallo ad un altro di diversa natura si verifica, nel punto di saldatura, un aumento di temperatura, cioè si produce calore (fenomeno distinto dal normale effetto Joule del quale si è trattato in precedenza).

Se, nelle stesse condizioni, si inverte il senso della corrente si ha una diminuzione di temperatura, ossia ha luogo una sottrazione di calore.

Un tal fenomeno prende il nome di effetto Peltier, e si prevede di sfruttarlo in futuro, mediante una opportuna scelta di metalli o leghe, per costruire semplicissimi apparecchi destinati sia al riscaldamento che al raffreddamento. Il progresso tecnico in questo campo farebbe allora tradurre in realtà la « spiegazione alla Cretinetti » del funzionamento dei normali caloriferi e frigoriferi elettrici: mandando la corrente in un senso si produce calore, mandandola in senso opposto si provoca raffreddamento.

* * *

Infine una precisazione di carattere linguistico. Quando il termine « termolettrico » viene usato come attributo di « generatore », « impianto », ecc, si riferisce alla produzione di energia elettrica industriale mediante l'impiego di sorgenti di calore (carbone, nafta, ecc.) come sarà detto al Cap. 18.

4 — Importantissimo il concetto di potenziale.

Come in una corrente liquida il dislivello così in una corrente elettrica la tensione influisce sulla portata ossia sulla intensità.

La legge di Ohm fondamentale per le relazioni tra tensione resistenza e intensità.

Con il valore della resistenza incontrata dagli elettroni nel percorrere il conduttore varia la intensità della corrente, intensità definita dalla quantità di elettricità, cioè dal numero degli elettroni che fluiscono nel tempo di un secondo in una sezione del filo. Corrisponde alla portata di una conduttura nei riguardi di una corrente di acqua, portata che ovviamente dipende dalla sezione della conduttura e dalla velocità, questa a sua volta dipendente dal dislivello.

La intensità si misura in ampere (Andrea Ampere, fisico francese, 1775-1836). Un ampere equivale al passaggio di oltre 6 miliardi di miliardi di elettroni al secondo.

Gli strumenti normalmente adoperati per misurare l'intensità di corrente sono denominati ampérmetri o amperòmetri. Quando si tratta di correnti molto deboli si adoperano strumenti più sensibili chiamati galvanometri. (Fig. 10).

In una comune lampadina elettrica da 60 watt passa una corrente di circa 1/2 ampere; in un ferro da stiro casalingo passa una corrente di circa 2 ampere; in una stufa circa 8 ampere; in un elettromotore da 10 cavalli passa una corrente di circa 30 ampere.

A proposito di quantità di elettricità diremo che l'unità pratica che la misura è il coulomb (Carlo Agostino Coulomb, fisico francese, 1736-1806) ed equivale alla carica complessivamente contenuta in 6.285 miliardi di miliardi di elettroni.

Il già definito ampere corrisponde quindi al passaggio di un coulomb al minuto secondo.

Si ripete che la intensità della corrente in un conduttore dipende in particolare dalla differenza di livello (o potenziale o tensione) esistente tra i due capi del conduttore, appunto come in una corrente fluida la portata dipende dalla differenza di livello o di pressione esistente tra gli estremi della tubazione. (Fig. 11).

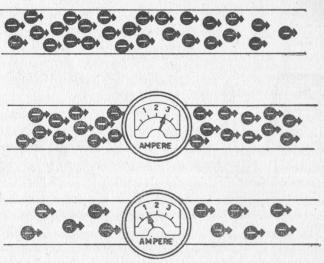


Fig. 10 — La corrente fluisce dai punti di maggiore densita elettronica ai punti di minore densità, e l'amperòmetro indica la intensità della corrente, ossia la « portata » del flusso elettronico.

Il concetto di potenziale elettrico è di capitale importanza. Può essere in generale paragonato — come già detto — al livello di una massa liquida, riferito al livello del mare considerato costante e assunto di valore zero.

Si sa che sulla Terra le quote si considerano positive se superiori al livello del mare, negative se inferiori: analogamente il potenziale elettrico viene riferito al potenziale della Terra assunto di valore zero.

E' da rilevare subito che più del potenziale assoluto è la differenza di potenziale che interessa per produrre una corrente e quindi un lavoro con l'elettricità. Sicchè se due punti hanno potenziale differente, anche se tutti e due positivi, collegandoli si avrà sempre una corrente che va dal punto a potenziale più elevato al punto a potenziale meno elevato. Non diversamente avviene nei fluidi: collegando due serbatoi d'acqua a diverse quote, entrambe al di sopra del livello del mare, si ottiene ovviamente una corrente in grado di produrre lavoro.

Analogamente, può produrre lavoro l'aria preventivamente compressa quando si mette in comunicazione con l'aria ambiente (come avviene nei martelli pneumatici, ecc.).



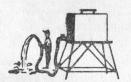


Fig. 11 — In una corrente liquida, quanto maggiore è il dislivello tanto maggiore sarà la pressione e la velocità del getto.

Il potenziale è un fattore che bisogna sempre valutare nella elettricità sia statica che dinamica (intendendo per elettricità statica quella che riguarda le cariche elettriche non in moto, contenute nei corpi conduttori o isolanti).

La tensione (o potenziale) sostanzialmente è originata dalla presenza o di cariche elettriche di segno contrario che tendono a neutralizzarsi, oppure — più spesso — di cariche elettriche omonime di diversa concentrazione (densità elettronica) che tendono ad equipararsi.

Come già detto, vale per la tensione l'analogia con quella che è la differenza di pressione nei gas, oppure la differenza di livello nei liquidi (differenza di livello che si traduce ugualmente in una differenza di pressione). Anche la tensione di una molla elastica può essere paragonata alla tensione elettrica di un condensatore, come si dirà al Cap. 7.

Analogamente a quanto avviene nei gas e nei liquidi l'elettricità tende sempre a passare spontaneamente dai punti a potenziale più elevato ai punti a potenziale meno elevato, e la sua energia — cioè la capacità a compiere un lavoro — è tanto maggiore quanto maggiore è la differenza di potenziale.

Normalmente, come vedremo meglio in seguito, non è l'elettricità statica (nè la scarica violenta detta disruttiva) ma l'elettricità dinamica e la scarica conduttiva, cioè la corrente elettrica, che si utilizza per produrre lavoro.

L'unità di energia (o di lavoro) in elettricità, come in meccanica, è il joule (Giacomo Joule, fisico inglese, 1818-89) e corrisponde al lavoro fatto per sollevare verticalmente il peso di un chilogrammo all'altezza di 10,2 centimetri.

La relazione tra potenziale e lavoro può esprimersi definendo l'unità di misura pratica del potenziale che è il volt o volta (Alessandro Volta, fisico italiano, 1745-1847).

Si dice che tra due punti esiste una differenza di potenziale di un volt quando occorre un joule di lavoro per trasportare un coulomb di carica elettrica dall'uno all'altro punto. (Si può anche dire: quando la carica elettrica di un coulomb passando spontaneamente da un punto all'altro compie il lavoro di un joule).

Gli strumenti usati per la misura del potenziale (tensione) sono denominati vòltmetri o voltòmetri.

Nelle linee di trasporto dell'energia elettrica a grande distanza la tensione normalmente è di almeno 20.000 e può superare i 100.000 volt; la tensione della corrente che alimenta un tram è di 500 volt; quella di un locomotore è di 3.000 volt; la tensione della corrente elettrica negli impianti di illuminazione delle case è di 120 o 160 volt; nel telefono è di 60 volt; in una lampada tascabile o portatile è di 1,5 - 4,5 volt.

* * *

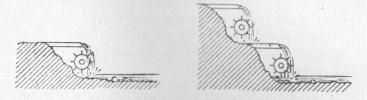
E' di fondamentale importanza conoscere la semplice relazione che lega tra loro i tre fattori caratterizzanti una corrente elettrica: resistenza (R), intensità (I), tensione (V).

La relazione $V=R\times I$ traduce in una semplicissima formula la legge di Ohm, la quale appunto dice: la tensione alle estremità di un conduttore percorso da corrente è direttamente proporzionale alla intensità della corrente e alla resistenza del conduttore.

Ciò significa in altre parole che se in un dato conduttore si vuole avere una intensità di corrente doppia bisogna applicare una tensione doppia. Ricorre facilmente, in proposito, la analogia con la corrente fluida provocata da una differenza di pressione, come già detto in precedenza.

Significa pure che, mantenendo inalterata la tensione applicata, se si riduce la resistenza del conduttore alla metà si otterrà ugualmente una intensità di corrente doppia.

Se un corso d'acqua, considerandone costante la portata (corrispondente all'intensità della corrente), è tale da far girare una ruota di mulino precipitando da una determinata altezza, lo stesso corso di acqua è in grado di azionare due mulini se precipita da una altezza doppia. (Fig. 12).



Fic. 12 — Se il dislivello è doppio la capacità di lavoro della corrente sarà doppia (potranno essere azionati due mulini anzichè uno).

Si vede dunque che — per una data intensità di corrente — raddoppiando il dislivello (differenza di potenziale o tensione) la resistenza che la corrente è in grado di vincere può essere doppia.

I tre fattori sopra definiti si misurano, come già detto: la resistenza in ohm, la intensità in ampere, la tensione in volt; sicchè per la legge di Ohm, moltiplicando gli ohm per gli ampere si hanno i volt: $R \times I = V$.

* * *

Citiamo un'altra unità di misura che si incontra frequentemente: il watt (Giacomo Watt, ingegnere inglese, 1736-1819) che è la unità di potenza ed esprime la rapidità con la quale viene compiuto un lavoro. Un watt è precisamente il lavoro fatto in un secondo dalla corrente di un ampere sotto la tensione di un volt.

In un circuito a corrente continua la potenza in watt è data dal prodotto dei volt per gli ampere $(W = V \times I)$.

La relazione ora scritta si può rendere evidente ricorrendo ancora ad una analogia con la corrente liquida. (Fig. 13).

Supponiamo che una corrente d'acqua della portata (intensità) di 4 tonnellate (4.000 litri) al secondo (I=4) precipitando da una determinata altezza (V=1) sia capace di azionare 4 mulini affianeati, ciascuno dei quali « assorba » 1 tonnellata (potenza totale assorbita W=4).

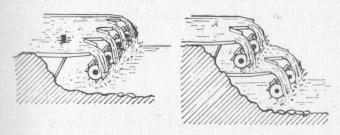


Fig. 13 — Se la portata della corrente è metà (figura di destra) ma il dislivello è doppio la capacità di lavoro resta la stessa (possono essere azionati ancora 4 mulini come nella figura di sinistra).

Se la corrente d'acqua è di portata metà (I = 2), ma l'altezza (II salto) è doppio (V = 2) del precedente, potranno con tale corrente essere ugualmente azionati 4 mulini: due prima e due dopo.

In tutti e due gli esempi risulta $W = V \times I$: nel primo si trova $I = 1 \times 4$; nel secondo $I = 2 \times 2$.

Nel caso, trattato al Capitolo precedente, in cui in un circuito esistono soltanto resistenze ohmiche e tutta l'energia elettrica si trasforma in calore (effetto Joule) l'espressione della potenza W = V I diventa quella già nota $W = I^2$ R sostituendo al posto di V il prodotto IR (V = IR per la legge di Ohm).

Quale unità pratica si adotta per la potenza il Kilowattòra che è la quantità di lavoro elettrico fatto in un'ora da una corrente della potenza di un Kilowatt (1.000 watt). La stessa unità misura ovviamente il corrispondente consumo di energia, e di ciò sono bene a conoscenza gli utenti di energia elettrica.

Si ricorda che in meccanica l'unità di misura della potenza è il chilogrammetro/sec, che è il lavoro fatto sollevando in un secondo la massa di un kg all'altezza di un metro. (La massa corrisponde alla intensità di corrente; il dislivello corrisponde al potenziale).

Si ricorda inoltre che la potenza meccanica si indica usualmente con il *Cavallo Vapore* (CV) che equivale a 75 Kgm/sec, oppure a 736 watt.

(II Cavallo Vapore inglese — HP — equivale a 76 Kgm/sec, oppure a 746 watt).

Così se una corrente di acqua la cui portata è di 75 litri (o Kg) di acqua al secondo si fa cadere per un dislivello di 10 metri, la sua potenza cioè il lavoro che è in grado di compiere, si valuta in 750 chilogrammetri al secondo (75 kg \times 10). Tale potenza si può esprimere anche in CV, e corrisponde nel caso ora visto a 10 CV.

* * *

Come esempio riepilogativo delle relazioni tra le « grandezze » esaminate nel presente capitolo, consideriamo un comune impianto domestico alimentato da una normale corrente di 10 ampere con una tensione di 125 volt.

La potenza di cui possiamo complessivamente disporre è data dalla relazione $V \times I = W$, cioè $125\ volt \times 10\ ampere = 1250\ watt$. Con tale potenza possiamo tenere accese $25\ lampadine$ da $50\ watt$ ciascuna; ma se vogliamo far funzionare anche una stufetta elettrica di soltanto $1.000\ watt$, per l'illuminazione rimangono disponibili $250\ watt$, sufficienti appena per $5\ lampadine$.

Se la corrente è invece del tipo « industriale », con una tensione di 250 volt, la potenza disponibile — sempre con la intensità di 10 ampere — diventa evidentemente doppia della precedente: 250 volt × 10 ampere = 2500 watt. E allora possiamo tranquillamente inserire un apparecchio di riscaldamento. (A parte la considerazione del minor costo unitario dell'energia industriale rispetto a quella dell'illuminazione). (Vedi anche Cap. 18).

Ci si può anche render conto — in base alla legge di Ohm — del perchè in un impianto di *illuminazione* si rende impossibile, o comunque inopportuno, inserire un apparecchio di riscaldamento in una presa destinata ad una lampadina.

Infatti il filamento della lampadina presenta una resistenza molto elevata (per es. 300 ohm) rispetto al filamento di una stufa (per es. 30 ohm). Allora, mentre nella lampadina passava una corrente della intensità di circa mezzo ampere ($\frac{V}{R} = I$, $\frac{125}{300} = 0.4$), nella stufa, e quindi nei fili conduttori (cordoncino) del circuito di cui la

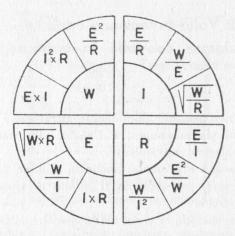


Fig. 14 — Relazioni conseguenti alla legge di Ohm. Ciascun fattore dei quattro fondamentali, che figura nella parte centrale, può essere ottenuto eseguendo le operazioni indicate nel rispettivo quadrante:

$$I = \frac{E}{R}$$
, $I = \frac{W}{E}$, ecc.

(Nelle relazioni può figurare E oppure V indifferentemente).

presa fa parte, viene ad essere richiamata una corrente della intensità di quattro ampere ($\frac{125}{30} = 4$). Una tale corrente può risultare eccessiva e non prevista per l'impianto, e provocare perciò un'immediata bruciatura del cordoncino, o una interruzione di corrente per fusione della « valvola ». (Vedi Cap. 6).

5 — Gli ioni portatori di cariche elettriche nei liquidi.

Utilizzazione del fenomeno nella placcatura dei metalli.

La pila di Volta invenzione capitale.

L'accumulatore converte la corrente in energia chimica e viceversa.

Gli elettroni non passano liberamente attraverso i comuni liquidi, come abbiamo già accennato, e l'acqua allo stato di assoluta purezza può considerarsi un isolante.

Se però nell'acqua è presente, anche in minime proporzioni, un acido oppure un sale, per esempio il solfato di rame, la corrente passa. Vediamo perchè.

Si constata che quando si versa nell'acqua del solfato di rame (il liquido si denomina allora elettròlito) molte molecole di esso si spezzano per formare due ioni: uno è lo ione rame, costituito da un atomo di rame che ha perso l'elettrone più esterno e quindi è diventato elettropositivo; l'altro è lo ione solforico (SO₄) costituito dall'insieme di un atomo di zolfo e da quattro atomi di ossigeno, che ha caplato gli elettroni persi dal rame diventando elettronegativo.

Supponiamo ora di immergere due sbarre di rame nel recipiente contenente la soluzione di solfato di rame (Fig. 15), e colleghiamole l'una al polo positivo di una batteria, l'altra al polo negativo.

Succederà che gli ioni solforici presenti nella soluzione essendo elettronegativi saranno attratti dalla prima barra, mentre gli ioni rame elettropositivi saranno attratti dalla seconda.

Si determinerà allora un flusso di cariche elettriche (trasportate dagli ioni) negative verso la barra positiva (denominato ànodo), e positive verso la barra negativa (denominato càtodo).

In tal modo la corrente passa attraverso il liquido e il circuito della batteria risulta completato, non interrotto dal liquido.

Questa volta, a differenza di quanto avviene nei conduttori metallici, il passaggio della corrente è accompagnato da un vero e proprio trasporto di materia (atomi allo stato di ioni). (« Ion » in greco significa « viandante »).

Infatti si verifica che lo *ione rame* attratto dalla barra che fa da càtodo si porta verso di essa e vi si attacca, cioè vi si deposita ingrossandola. Viceversa la barra che fa da ànodo respinge gli *ioni*-

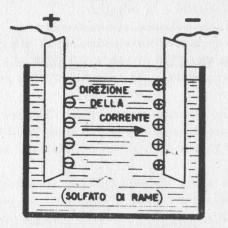


Fig. 15 — Elettròlisi del solfato di rame: gli ioni rame (+) vanno verso il catodo (—), mentre gli ioni solforici (—) vanno verso l'anodo (+).

rame e cede i suoi come se effettivamente si sciogliesse nel liquido, così progressivamente assottigliandosi.

Il processo ora descritto si chiama elettròlisi e viene sfruttato, tra l'altro, per produrre il metallo rame purissimo, partendo dal rame impuro. Analogamente viene prodotto l'alluminio.

Occorrono per questi processi delle correnti di elevatissima intensità (centinaia e migliaia di ampère).

Tutta l'industria della placcatura dei metalli (doratura, argentatura, cromatura, ecc.) è basata sui processi elettrolitici.

* * *

Ora mettiamo in rilievo un importante aspetto del fondamentale principio della reciprocità, che si riscontra nei fenomeni elettrici, come vedremo meglio in seguito.

Nel campo dell'elettròlisi si è visto che il passaggio ni una corrente elettrica determina delle alterazioni chimiche e sostanziali nei materiali. Ebbene, si verifica anche che provocando nei metalli opportune alterazioni chimiche e sostanziali si può produrre una corrente elettrica.

Come abbiamo già detto, quando un metallo viene immerso in una soluzione elettrolitica si determina uno scambio intenso e continuo di *ioni* tra il metallo e la soluzione.

Alcuni metalli, come il *rame*, assumono una carica positiva: si dice allora che hanno acquistato un « *potenziale di soluzione* » *positivo*, il cui valore va da circa 1/4 di volt a 1,5 volt.

Altri metalli, come lo zinco, acquistano un « potenziale di soluzione » negativo.

Avendo definito l'elettrone quale unità di carica negativa, ci si può anche esprimere dicendo che si determina un difetto di elettroni semi-liberi nel rame ed un eccesso di elettroni semi-liberi nello zinco.

In conclusione allora la concentrazione (la densità) di elettroni sarà maggiore nello zinco rispetto al rame. Basterà perciò congiungere i due elèttrodi con un filo metallico esterno per realizzare un flusso di elettroni dallo zinco verso il rame, cioè in definitiva una corrente elettrica continua. Così facendo si costruisce una pila elettrica.

Per una convezione adottata a suo tempo, quando non si conosceva la vera natura dell'elettricità, il senso della corrente nel filo si indica come rivolto dall'elèttrodo o polo positivo (rame) verso lo elèttrodo o polo negativo (zinco), mentre in effetti il flusso degli elettroni scorre nel senso contrario.

La pila di Volta fu il primo generatore di corrente elettrica (figura 16) e consiste sostanzialmente in una tazza contenente acido solforico diluito (elettròlito) nel quale sono immersi una lastra di rame e una lastra di zinco (elèttrodi).

(Il primo esemplare di generatore realizzato da Alessandro Volta era costituito da dischi di rame e di zinco accoppiati e sovrapposti in più coppie, ciascuna coppia restando separata dall'altra per mezzo di un disco di panno imbevuto di acqua acidulata con acido solforico. L'insieme assumeva l'aspetto di una colonna o « pila »: da ciò il nome dato all'apparecchio).

La pila di Volta, realizzata nell'anno 1800, è da considerare la invenzione capitale del mondo moderno, in quanto, mettendo a di-

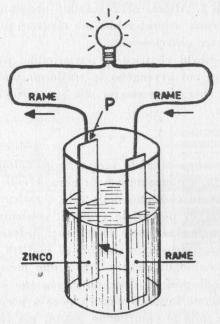


Fig. 16 — Schema della pila di Volta (le freccie indicano il senso del flusso degli elettroni, contrario al senso « convenzionale » della corrente).

sposizione dell'uomo la corrente elettrica, ha poi consentito tutte le innumerevoli scoperte nei campi della elettrodinamica, della radio, ecc., fondamentali per gli sviluppi della tecnica in ogni sua branca.

* * *

Abbiamo ora accennato alla teoria secondo la quale la forza elettromotrice della pila sarebbe determinata dalle reazioni elettrolitiche (scambio di ioni) che hanno luogo tra metallo e soluzione.

Secondo un'altra teoria la forza elettromotrice (f. e. m.) della pila avrebbe origine nel punto P di contatto tra zinco e rame, dove si verificherebbe l'« effetto Volta » (al quale si è già accennato al Cap. 3).

In relazione all'ipotesi di distribuzione degli elettroni nei gusci atomici, fatta nel Cap. 2, il rame (29 elettroni) presenterebbe un solo elettrone nel guscio più esterno; lo zinco (30 elettroni) ne presenterebbe invece 2. Allora, nello scambio incessante di elettroni tra i due metalli, il rame acquisterebbe più elettroni di quanti ne perde, e risulterebbe carico elettricamente.

Un tale squilibrio elettrico si trasferirebbe poi nella soluzione (elettròlito), entro cui avvengono le trasformazioni fisico-chimiche che producono l'energia necessaria alla generazione di una corrente elettrica continua.

* * *

La differenza di potenziale (detto anche voltaggio) esistente tra i due poli della pila elementare è di circa 1 volt.

Il funzionamento continuo della pila è assicurato dal permanere della differenza di potenziale (cioè di concentrazione, di densità elettronica) tra le due lastre metalliche, differenza di potenziale dovuta, come prima visto, allo scambio di ioni tra i metalli e l'elettròlito, e allo scambio di elettroni tra i due metalli.

Poichè gli ioni positivi dello zinco passano continuamente dal metallo alla soluzione lo zinco viene a poco a poco eroso e dissolto.

In pratica le pile si esauriscono presto, ma non perchè lo zinco arrivi a dissolversi completamente, bensì in conseguenza dello accumularsi degli ioni idrogeno della soluzione sulla lastra di rame: ioni che finiscono con l'isolare il rame impedendo il proseguimento del processo elettrochimico.

Tale fenomeno dicesi « polarizzazione della pila ». Nelle pile moderne si provvede, per mezzo di idonei reagenti chimici, a neutralizzare la polarizzazione.

Esistono diversi tipi di pile. Nelle pile a secco, estesamente usate ai nostri tempi, l'elèttrodo (polo) negativo è costituito dallo zinco che fa anche da recipiente contenitore, il polo positivo è costituito da una barretta di carbone; invece del liquido si immette nella pila una pasta porosa solida imbevuta di sale ammonico.

sk sk sk

Un'altra sorgente di energia elettrica basata su reazioni elettrochimiche è l'accumulatore. Immergendo in acqua acidulata con acido solforico due lastre di piombo e collegando le piastre ai poli di un generatore elettrico (per es. una pila) si verifica che al passaggio della corrente l'acqua viene decomposta nei suoi due elementi idrogeno ed ossigeno. (Figura 17).

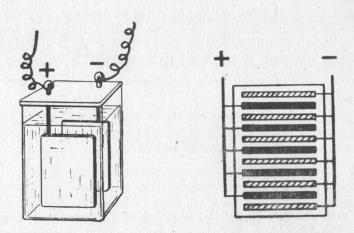


Fig. 17 — (A sinistra): Schema di un accumulatore elementare: nell'elettròlito (soluzione acquosa di acido solforico) sono immerse due lastre di piombo, collegate con i poli.
 (A destra): Schema della disposizione delle piastre in un accumulatore con più piastre.

L'idrogeno (ione positivo) è attratto dal polo negativo (cioè dalla lastra collegata con il polo negativo del generatore) e si combina con l'ossigeno contenuto nell'ossido di piombo della superficie della lastra riducendo questa a piombo metallico puro.

L'ossigeno (ione negativo) è attratto dalla piastra positiva e si combina con il piombo formando un ossido rosso di piombo.

In questo caso l'energia elettrica opera dunque una trasformazione chimica che, anzichè risolversi in una produzione di gas o in un trasporto di materiale metallico come nel procedimento di elettròlisi trattato in precedenza, produce nell'intima struttura delle lastre una particolare modificazione trasformandole in sostanze che hanno tendenza a ritrasformarsi in quella primitiva.

Una volta formato, l'accumulatore al piombo si può considerare del tutto analogo ad una pila (perciò è denominato talvolta « pila secondaria ») avente il piombo metallico come polo positivo e l'ossido di piombo come polo negativo.

Cosicchè se le lastre, dopo averle staccate dal circuito alimentatore, si collegano tra loro attraverso un conduttore esterno, comprendente eventualmente un apparecchio utilizzatore, si ha in questo secondo circuito passaggio di corrente, diretta in senso inverso a quella di carica. La corrente dura finchè le due lastre si ritrasformano tornando nelle condizioni iniziali, in seguito alla reazione chimica prodotta dall'idrogeno nella lastra negativa e dall'ossigeno nella lastra positiva.

Come si vede, l'accumulatore in sostanza converte corrente elettrica in energia chimica, nella fase di carica; riconverte poi l'energia chimica in corrente elettrica nella fase di scarica.

* * *

Si nota che la *polarità* dei morsetti dell'accumulatore (polo positivo e polo negativo) non cambia da quando l'accumulatore è sotto carica a quando è sotto scarica e funziona da generatore.

La f. e. m. di un accumulatore è di circa 2 volt. Occorre molta attenzione nella carica e nella scarica, per non superare i valori prescritti sia nella tensione che nella intensità di corrente.

La capacità di un accumulatore è misurata dalla quantità di energia elettrica erogata in una scarica completa. Espressa in coulomb è data dal prodotto della intensità di corrente in ampere per il numero dei minuti secondi di durata della scarica.

Come misura pratica della capacità degli accumulatori si usa tuttavia l'ampere-ora — equivalente a 3.600 coulomb — che è la quantità di elettricità trasportata in un'ora dalla corrente di un ampere.

In pratica gli accumulatori si costruiscono disponendo più piastre in uno stesso recipiente in modo da ottenere per ciascun elemento una capacità dell'ordine dei 40 ampere-ora. (Fig. 17 - destra).

Altre considerazioni sull'accumulatore saranno esposte alla fine del Cap. 8.

6 — Definizione del circuito elettrico. Nei circuiti rispettata sempre la legge di Ohm. Il corto circuito e la valvola a filo fusibile. I principi di Kirchhoff regolano il transito agli incroci.

L'insieme dei conduttori e degli altri elementi (generatori e utilizzatori) variamente collegati, nei quali circola corrente elettrica, costituisce un circuito elettrico.

Nella sua più semplice espressione un circuito è costituito da un generatore (per es. una pila, una batteria di pile) e da un certo numero di apparecchi utilizzatori (per es. delle lampadine) costituenti in definitiva delle resistenze elettriche (Fig. 16).

Due fili metallici, buoni conduttori dell'elettricità, collegano i generatori agli utilizzatori, in andata e in ritorno. Talvolta uno dei due fili del circuito può essere eliminato servendosi della *Terra* come conduttore di ritorno: ciò si fa nel telegrafo (Fig. 44). Nel caso del tram è la rotaia che fa da conduttore di ritorno (Fig. 18).

Un circuito si dice chiuso quando è conchiuso, cioè completo, in modo che la corrente vi fluisca in ogni tratto con continuità.

Si dice aperto quando è interrotto in un qualche punto, sicchè la corrente non vi può più circolare.

Affinchè circoli corrente nel circuito — che come ora detto deve essere chiuso — occorre sempre una forza elettro motrice (f. e. m.) che determini e mantenga lo « squilibrio » sufficiente a costringere gli elettroni a scorrere nel circuito stesso.

Sappiamo per la legge di Ohm che tale f.e.m. (E) provoca una corrente I (intensità di corrente) tanto maggiore quanto minore è la resistenza (R) complessivamente presentata dal circuito: precisamente $E = I \times R$.

Ora si osserva che in un circuito elettrico completo la stessa intensità di corrente I fluisce non soltanto lungo tutti i conduttori e le resistenze del circuito ma anche nell'interno del generatore, incontrando anche qui inevitabilmente una resistenza. Possiamo perciò distinguere nel circuito una resistenza esterna (Re) ed una resistenza interna (Ri) essendo questa la resistenza interna della pila, nel caso in esame. Ovviamente la resistenza complessiva è data dalla somma delle due.

Allora sarà

$$E = I \times (Re + Ri)$$
 $E = (I \times Re) + (I \times Ri)$

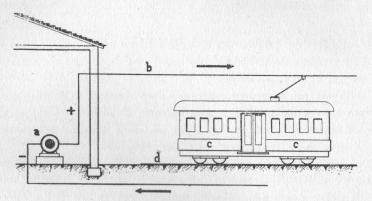


Fig. 18 — Schema del circuito elettrico di una tram-via: a) generatore;
b) conduttore aereo; c) motori; d) conduttore di ritorno (rotaia).

Supponendo che la Re sia di 20 ohm e la resistenza interna Ri di 5 ohm; se la corrente I, che è la stessa in qualsiasi punto del circuito, ha il valore di 0,2 ampere, la f.e.m. E sarà:

$$E = (0.2 \times 20) + (0.2 \times 5) = 4 + 1 = 5 \text{ volt}$$

Nella pratica interessa generalmente conoscere, più che la f.e.m. E, la differenza di potenziale V esistente ai morsetti del generatore (ai poli della batteria) ai quali fanno capo i conduttori del circuito esterno con gli apparecchi di utilizzazione la cui resistenza è Re. Tale differenza di potenziale $V = I \times Re$.

Essendo $E = (I \times Re) + (I \times Ri)$ sarà ancora: $V = E - (I \times Ri)$.

Si avrà allora:

 $V = 5 \text{ volt} - (0.2 \times 5) \text{ volt} = 5 \text{ volt} - 1 \text{ volt} = 4 \text{ volt}$

Come si vede, la differenza di potenziale ai morsetti (V) risulta sempre inferiore alla f.e.m. del generatore (E).

* * *

In un circuito le resistenze esterne, che chiameremo d'ora in poi semplicemente resistenze, si dicono disposte in serie, quando sono messe una di seguito all'altra, in modo che la stessa corrente le attraversi una dopo l'altra (Fig. 18). In tal caso la resistenza complessiva Re del circuito (che indicheremo semplicemente con R) sarà uguale alla somma aritmetica delle singole resistenze:

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

Se $R_1 = 3$ ohm, $R_2 = 7$ ohm, $R_3 = 10$ ohm, sarà R = 3 + 7 + 10 = 20 ohm. (Si prescinde in questi esempi dalla resistenza presentata dal conduttore, che si considera trascurabile).

E' importante osservare che — come già detto — la corrente è la stessa in qualsiasi punto del circuito, semprechè non vi siano perdite dovute per esempio a cattivo isolamento (lo stesso come in una conduttura di acqua).

Nel caso in esame, essendo V=4 volt ed R=20 ohm, si avrà per la legge di Ohm ($I=\frac{V}{R}$) una corrente della *intensità* di 0,2 ampere.

Invece la tensione (differenza di potenziale), misurata tra due punti del circuito, varia a seconda della posizione di detti punti, in relazione alle resistenze interposte.

Si dice che in corrispondenza di ogni resistenza ha luogo una caduta di tensione.

Nel circuito di Fig. 19, fermo restando il valore di 4 volt della tensione V ai morsetti A e D, la caduta di tensione provocata dalla resistenza R_1 , cioè la tensione V_1 misurata tra A e B, applicando sempre la legge di Ohm, sarà:

$$V_1 = I \times R_1 = 0.2 \times 3 = 0.6 \text{ volt}$$

Così la tensione V2 tra B e C sarà:

$$V_2 = I \times R_2 = 0.2 \times 7 = 1.4 \ volt$$

e ancora, la tensione V3 tra C e D sarà:

$$V_3 = I \times R_3 = 0.2 \times 10 = 2 \text{ volt}$$

La tensione V ai morsetti (tra A e D) risulta quindi uguale alla somma delle cadute di tensione parziali: $V = V_1 + V_2 + V_3 = 4$ volt.

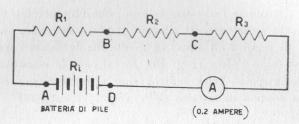


Fig. 19 — Nelle resistenze disposte in serie tutta la corrente passa successivamente attraverso tutti gli apparecchi utilizzatori. (La resistenza esterna $Re = R_1 + R_2 + R_3$).

Un'analogia termica si può trovare immaginando una caldaia di termosifone che alimenti dei radiatori disposti in serie (Fig. 19 - bis).

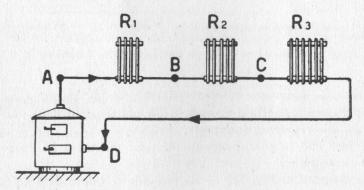


Fig. 19 bis — Analogia termica, in un circuito di riscaldamento con radiatori disposti in serie.

Supponiamo che l'acqua, dopo essere passata attraverso i radiatori, entri nella caldaia in D alla temperatura di 20°. Se il focolare della caldaia è in grado di *elevare la temperatura* dell'acqua, per es. da 20° a 50°, la differenza di temperatura tra A e D sarà ovviamente di 50° . Tra i punti A e B la differenza di temperatura sarà quella corrispondente alla « caduta » che si verifica in seguito alla irradiazione di calore del radiatore R_1 , che supponiamo sia di 8° . Tra i punti B e C supponiamo sia di 10° ; tra i punti C e D supponiamo sia di 12° . (Si prescinde dalla irradiazione del tubo).

Facendo le somme di queste cadute di temperatura parziali si ritrova ovviamente la caduta totale, corrispondente alla elevazione di temperatura di cui è capace il « generatore » di calore: infatti 8° + 10° + 12° = 30° .

Nel confronto con un circuito elettrico, evidentemente la temperatura corrisponde alla tensione; il calore irradiato dai radiatori (che dipende essenzialmente dalla superficie totale degli elementi del radiatore); corrisponde alla corrente consumata nelle resistenze; la

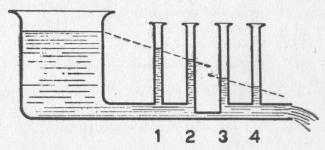


Fig. 20 - La caduta di livello (o di pressione) in una corrente idraulica.

quantità di acqua che circola, ossia la portata, misurata in un qualsiasi punto della tubazione, corrisponde alla intensità di corrente, che si mantiene costante, come detto in precedenza.

Una sensazione visiva di qualcosa di analogo alla caduta di tensione si può avere riferendosi alla caduta di livello che si riscontra in una serie di tubicini verticali posti lungo la tubazione di scarico (orizzontale) partente dal fondo di un recipiente contenente del liquido (Fig. 20).

Si nota che la pressione del liquido, denunciata dal livello nei tubicini verticali, si abbassa con il procedere da 1 verso 4, in conseguenza appunto della resistenza incontrata dal liquido nella tubazione. Se tra i punti 2 e 3 esiste una strozzatura, tale da accrescere la resistenza allo scorrimento, la caduta di livello relativa aumenta.

Le resistenze disposte in un circuito in modo che la corrente si suddivida tra i diversi rami derivati si dicono in parallelo o in derivazione (Fig. 21).

In questo caso la corrente totale I sarà eguale alla somma delle correnti parziali: $I = I_1 + I_2 + I_3$.

Supponiamo che i valori delle resistenze siano: $R_1=40$ ohm; $R_2=20$ ohm; $R_3=12,5$ ohm.

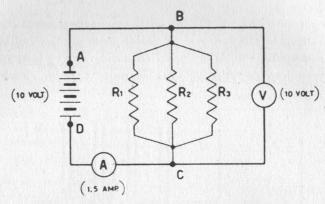


Fig. 21 — Resistenze disposte in parallelo. E' indicato con (A) un amperòmetro, con (V) un vòltmetro.

La differenza di potenziale V tra i punti A e D sarà la stessa di quella tra i punti B e C, che supponiamo abbia il valore di 10 volt.

Le correnti parziali risulteranno allora : $I_1 = \frac{10 \text{ volt}}{40 \text{ ohm}} = 0,25$

ampere;
$$I_2 = \frac{10 \text{ volt}}{20 \text{ ohm}} = 0.5 \text{ ampere}; I_3 = \frac{10 \text{ volt}}{12.5 \text{ ohm}} = 0.8 \text{ ampere}.$$

La corrente totale misurata dall'amperometro (A) sarà:

$$I = 0.25 + 0.5 + 0.8 = 1.5$$
 ampere.

La resistenza totale R è tale che il suo inverso $(\frac{1}{R})$ risulta uguale alla somma degli inversi delle resistenze parziali:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Questa affermazione viene verificata se sostituiamo alle lettere i valori numerici considerati nel circuito di Fig. 21:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{40} + \frac{1}{20} + \frac{1}{12,5}$$

$$R = \frac{1}{\frac{1}{40} + \frac{1}{20} + \frac{1}{12,5}}$$

$$R = \frac{1}{0,025 + 0,05 + 0,08}$$

da cui $R = \frac{1}{0,155} = 6,4$ ohm.

La intensità di corrente indicata dall'amperometro (A) sarà allora $I=\frac{V}{R}=\frac{10}{6,4}=1,5$ ampere, come si era già trovato sommando le correnti parziali.

Ugualmente per la resistenza totale, applicando la legge di Ohm a tutto il circuito (R = $\frac{V}{I}$) e sostituendo alle lettere i valori si ha:

$$R = \frac{10 \text{ volt}}{1.5 \text{ ampere}} = 6.4 \text{ ohm.}$$

Se le tre resistenze (r) fossero tutte eguali tra loro risulterebbe $\frac{1}{R} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r} + \frac{1}{r} = \frac{3}{r}$ da cui la resistenza totale $R = \frac{r}{3}$: sarebbe cioè un terzo della resistenza singola.

Le resistenze in un circuito possono anche essere disposte parte in serie e parte in parallelo, in modo cioè che gruppi di resistenze in parallelo siano tra loro collegate in serie: il collegamento si dice allora in serie-parallelo o misto. In tale caso per calcolare le resistenze e le correnti bisogna prima considerare ciascun gruppo separatamente, e poi procedere al calcolo finale coi dati ricavati per i diversi gruppi.

* * *

Il collegamento in serie o in parallelo interessa non soltanto le resistenze ma anche i generatori, come le pile e gli accumulatori.

Così, nel caso degli accumulatori, quando occorrono correnti molto intense, più accumulatori (n) uguali si collegano in parallelo, unendo tra loro tutti i poli positivi e tra loro tutti i poli negativi (Fig. 22 - sinistra).

In tal modo la f.e.m. totale resterà uguale alla f.e.m. del singolo accumulatore (sarà cioè sempre di 2 volt circa); ma, siccome la
resistenza interna totale (trattandosi di resistenze disposte in parallelo) sarà diminuita risultando n volte minore della resistenza interna di un singolo accumulatore, la intensità di corrente totale nel circuito sarà n volte maggiore della corrente che dà un singolo accumulatore.

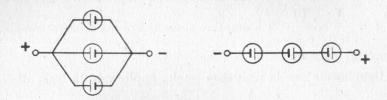


Fig. 22 — Collegamento di accumulatori in parallelo (a sinistra), oppure in serie (a destra).

Per gli usi pratici occorrono generalmente tensioni notevolmente superiori ai 2 volt. Allora gli accumulatori si collegano in serie per formare una batteria (Fig. 22 - destra) unendo il negativo del primo con il polo positivo del secondo, il polo negativo del secondo con il polo positivo del terzo e così via.

Rimangono così liberi il polo positivo del primo e il polo negativo dell'ultimo. Tra questi due poli esiste una tensione che praticamente è uguale alla f.e.m. di un singolo accumulatore moltiplicata per il numero degli accumulatori della batteria.

In una batteria di accumulatori in serie la capacità totale è eguale a quella di un singolo accumulatore poichè tutti gli elementi sono percorsi dalla stessa corrente. Da notare che la resistenza interna degli accumulatori, a differenza della resistenza interna delle pile, risulta minima (essendo le piastre vicinissime l'una all'altra) e praticamente è trascurabile nei calcoli.

Si possono anche con i generatori avere dei collegamenti *misti*, con parte degli elementi collegati in parallelo, unendo poi in serie i gruppi risultanti.

* * *

I fili di un circuito si calcolano di sezione tale da non presentare in condizioni normali eccessiva resistenza, per evitarne il conseguente sensibile riscaldamento. Peraltro non conviene eccedere nella sezione per ovvie ragioni di costo.

In un circuito nel quale sono inserite delle lampadine, supponiamo che la resistenza complessiva sia di 240 ohm: con una tensione di 120 volt la corrente nei fili sarà allora di ½ ampere (120: 240) e la sezione dei fili può farsi di circa mezzo mmq.

Può succedere però che i fili del circuito, sovente vicini l'uno all'altro, talora avvolti in una stessa trecciola, vengano accidentalmente a contatto. Si dice in tal caso che si è prodotto un corto circuito, in quanto il circuito si chiude nel punto di contatto senza che la corrente passi attraverso le lampadine, quindi senza incontrare resistenza.

Restando escluse le lampadine, la resistenza diventa dunque minima, ridotta a quella del solo filo di rame (supponiamo che sia per es. di 1 ohm). Perciò l'intensità di corrente crescerà improvvisamente diventando di ben 120 ampere (120: 1).

Allora, per effetto joule, i fili si riscalderanno al punto da arroventarsi e bruciare l'involucro, con il rischio di appiccare il fuoco ad eventuali sostanze con le quali sono a contatto. Anche le lampadine poste eventualmente a monte del punto dove si è prodotto il corto circuito vengono attraversate da una corrente eccessiva e restano « fulminate » (il filamento viene fuso).

Per evitare inconvenienti di questo genere si inseriscono nei circuiti delle valvole a filo fusibile, che sono costituite semplicemente da brevi tratti di sottile filo di piombo (od altro metallo fusibile a temperatura poco elevata) racchiusi in una scatola di materiale isolante. Quando, al prodursi di un « corto circuito », si eleva improvvisamente l'intensità di corrente, per la maggiore resistenza presentata dal piombo rispetto al rame la temperatura raggiunge subito nelle valvole il limite al quale il piombo fonde, e il circuito vi si interrompe cestando la corrente senz'altro danno.

Nello studio dei circuiti di qualsiasi forma bisogna tener presente altri principi importanti, come quelli di Kirchhoff (Gustavo Kirchhoff, fisico tedesco, 1824-87) l'uno riguardante le correnti, l'altro le tensioni.

Il primo afferma che in un nodo di un circuito, dove si incontrano più conduttori, la somma algebrica delle correnti è sempre uguale a zero. Ciò equivale a dire che tanti ampere vi entrano e tanti ve ne escono, dato che la corrente non vi può essere nè creata nè distrutta.

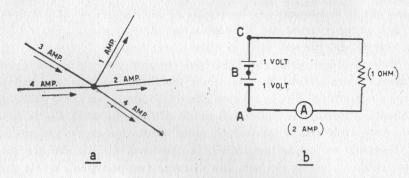


Fig. 23 — Illustrazione elementare dei principî di Kirchhoff: in un nodo (a) e in una maglia (b).

Si intende che nel fare la somma bisogna attribuire un certo segno (per es. positivo) alle correnti che entrano, il segno opposto, cioè negativo, a quelle che escono (Fig. 23 a). Infatti: 4+3-1-2-4=0.

Il principio di Kirchhoff sulle tensioni afferma che in una maglia di circuito la somma algebrica delle f.e.m. — che equivale alla somma algebrica delle resistenze moltiplicate per le intensità di corrente esistenti in ciascun tratto della maglia — è sempre uguale a zero.

La Fig. 23 b illustra, sia pure in un caso molto semplice, la veridicità del principio.

Partendo dal punto A si osserva che tra il punto A e il punto B vi è un aumento di tensione di 1 volt. Tra B e C vi è un altro aumento di tensione di 1 volt. Tra il punto A e il punto C l'aumento di tensione è quindi di 2 volt.

Secondo il principio di Kirchhoff, tra il punto C e il punto A vi deve essere, attraverso la resistenza, una caduta di tensione di 2 volt, ciò che ovviamente si verifica nel caso in esame: infatti 1 ohm $\times 2$ ampere = 2 volt.

* * *

Nelle figure illustranti il presente Capitolo si vedono simbolicamente inscriti nei circuiti degli strumenti di misura quali amperòmetri e vòltmetri.

Quì si intende precisare il modo in cui tali strumenti vengono in pratica utilizzati per la misura, rispettivamente, della corrente e della tensione.

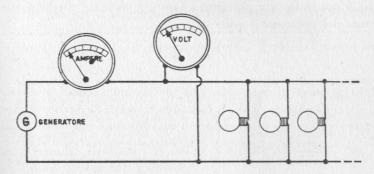


Fig. 24 — Gli amperòmetri vanno inseriti in serie nel circuito; i vòltmetri vanno inseriti in derivazione.

L'amperòmetro, dovendo misurare la intensità di corrente che passa in un circuito, deve essere logicamente attraversato da tutta la corrente. Perciò viene disposto in serie nel circuito, e se ne rende minima la resistenza interna, per evitare inutile perdita di energia in calore (Fig. 24).

Quando si tratta di correnti molto forti, per evitare un eccessivo assorbimento, e conseguente riscaldamento, nello amperometro, si devia una parte della corrente in una determinata resistenza posta in parallelo (inglese shunt) con lo strumento. La resistenza è calcolata in modo che attraverso di essa passino pes es. i 9/10 della corrente,

mentre soltanto 1/10 passa per l'amperometro: l'indicazione fornita dallo strumento dovrà allora essere moltiplicata per 10 per ottenere il valore della intensità di corrente nel circuito.

Il voltmetro invece, dovendo misurare una differenza di tensione tra due punti, si dispone in derivazione, tra i punti stessi, e se ne rende elevata la resistenza interna in modo da farlo attraversare da una corrente di minima intensità. Allora praticamente tutta la corrente continuerà a passare nel circuito principale, le cui caratteristiche si possono così considerare non alterate dalla presenza dello strumento di misura. La funzione di questo è ridotta quasi a quella di un galvanometro, cioè di un misuratore di correnti deboli.

D'altra parte, essendo costante la resistenza interna dello strumento, la intensità della corrente che l'attraversa resta proporzionale alla differenza di tensione tra i due punti del circuito dove è derivato: cosicchè è possibile, con opportuna taratura, segnare direttamente sul quadrante del vòltmetro i volt.

* * *

Nelle apparecchiature elettriche si trovano spesso i reostati, costituiti da resistenze variabili a comando, inserite in serie nel circuito utilizzatore allo scopo di introdurvi una resistenza maggiore o minore che faccia diminuire o aumentare la intensità di corrente che lo percorre. Come analogia il reostato si può paragonare ad un freno, applicato per esempio alle ruote di un'automobile.

Quando il reostato è inserito in derivazione nel circuito prende il nome di *potenziometro*, in quanto fa variare, abbassandolo, anche il *potenziale* (tensione) facendo ancora diminuire in conseguenza la intensità di corrente. E' come se il freno fosse appplicato al motore dell'automobile anzichè alle ruote.

Quando una resistenza, di determinato valore, viene introdotta appositamente in un circuito per provocarvi una voluta diminuzione (caduta) di potenziale prende il nome di resistore. 7 — Il fenomeno della ionizzazione anche nei gas. L'elettricità atmosferica e il fulmine. La induzione elettrostatica dovuta alla misteriosa attrazione e repulsione delle cariche. Il condensatore consente l'addensamento massimo degli elettroni.

Anche nei gas il trasporto di cariche elettriche può avvenire soltanto mediante il fenomeno della *ionizzazione*. Senonchè, mentre tale fenomeno si produce facilmente nei liquidi, si verifica molto difficilmente nei gas.

Consideriamo per esempio l'aria, che è formata essenzialmente di un miscuglio di ossigeno e di azoto. Le molecole di questi due elementi non si ionizzano facilmente. Per ionizzarle, cioè per spezzarle, occorrono quantità notevoli di energia, da spendere sotto forma di violente scariche elettriche, o con irradiazione mediante raggi ultravioletti, o anche con una fiamma.

In una fiamma infatti la temperatura è molto elevata e le molecole d'aria che vi si trovano vengono enormemente accelerate nei loro disordinati moti browniani. Poichè tali moti comportano innumerevoli urti (collisioni), può accadere che in seguito alle collisioni più violente le molecole si spezzino in due frammenti. Ciascuno di questi frammenti diventa allora uno ione: dei due ioni l'uno avrà carica positiva e l'altro carica negativa.

La ionizzazione per collisione si può però provocare, in modo molto più efficace, mediante una scarica elettrica.

Se nell'aria, come sempre avviene, è presente almeno uno ione, supponiamo positivo, e noi creiamo nelle vicinanze immediate una forte differenza di potenziale, lo ione si precipiterà verso il punto a potenziale negativo, e acquisterà una velocità tale da spezzare facilmente una qualche molecola con la quale viene a collisione. I frammenti-ioni così creati, a loro volta subiranno l'acceleramento dovuto

al campo elettrico nel quale si trovano immersi e spezzeranno altre molecole creando altri ioni, e così via con progressione rapidissima.

Questo processo di reazione « a catena » può spiegare nell'atmosfera il fenomeno del *fulmine*: la più impressionante manifestazione naturale dell'elettricità.

Per produrre una scintilla elettrica nell'aria, cioè per far avvenire la scarica violenta di un flusso di elettroni, tra due sfere di 20 mm

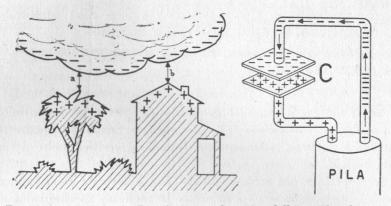


Fig. 25 — (A sinistra): Distribuzione schematica delle cariche elettrostatiche tra una nube e il sottostante terreno: il fulmine scoppia tra i punti ravvicinati (a) e (b). (A destra): Distribuzione delle cariche elettrostatiche tra le due armature di un condensatore.

di diametro, distanti 1 mm, occorre una differenza di potenziale di circa 5.000 volt. Per distanze di alcuni centimetri, occorre una differenza di potenziale dell'ordine dei 100.000 volt; per una distanza di tre metri occorre un milione di volt.

Se la scarica deve avvenire tra punti lontani centinaia di metri, occorrono migliaia di milioni di volt.

Tali differenze di potenziale si creano in effetti durante i temporali per cause non bene conosciute: probabilmente in seguito alla condensazione dell'umidità atmosferica con la conseguente formazione di nuvole e poi di innumeri gocce di pioggia che trasportano notevoli cariche elettriche.

Una nube carica di elettricità può indurre, cioè richiamare, in una nube vicina o sulla terra, elettricità di segno contrario: quando la differenza di potenziale e la distanza tra i due punti affacciati sono tali da provocare una scarica disruttiva si ha il fulmine (Fig. 25) la cui

manifestazione luminosa è il lampo accompagnato dal tuono. Il tuono è il colpo (detonazione) prodotto dal brusco aumento di pressione (onda d'urto) analogamente a quanto avviene nello scoppio di una bomba, o nel momento in cui un aeroplano raggiunge la velocità del suono (« bang » sonico).

Il fulmine, attraverso una differenza di potenziale dell'ordine di qualche miliardo (1.000.000.000 = 109) di volt, scarica correnti di intensità anche superiore a 100.000 ampere, liberando quantità di energia di oltre 10 joule (10 miliardi di joule).

* * *

A questo punto conviene parlare un poco più diffusamente del fenomeno della « induzione elettrostatica ».

Come già detto, le cariche elettriche si manifestano di due specie: l'una positiva, l'altra negativa: cariche dello stesso nome si respingono, cariche di nome contrario si attraggono.

Un corpo elettrizzato crea intorno a sè un campo elettrico, definendosi così lo spazio entro il quale il corpo esercita le sue azioni elettriche. (Analogamente il campo gravitazionale è lo spazio entro il quale una massa, per es. la Terra, esercita l'attrazione di gravità sugli altri corpi. Si potrebbe anche definire come campo termico lo spazio entro il quale un corpo caldo fa sentire i suoi effetti).

In due sfere vicine fortemente elettrizzate (Fig. 26 a) le cariche si dispongono in modo da presentarsi di segno contrario nelle parti che si fronteggiano. Se tra le sfere si pone una lastra di ebanite (isolante) sulla quale si fa cadere della polvere cristallina di gesso, le minuscole scagliette si elettrizzano — ciascuna con due polarità opposte — disponendosi lungo linee di forza elettriche. Queste risultano normali alla superficie delle sfere, e rappresentano le linee secondo le quali si esercitano nel « campo » le forze elettriche provocate dalle cariche esistenti sulle sfere stesse. (Vedi anche Fig. 29 - destra).

Se in un campo elettrico, e precisamente nelle immediate vicinanze di un corpo elettrizzato, per es. positivamente, portiamo un altro corpo neutro si constata che questo secondo si elettrizza a sua volta, con elettricità negativa nella parte più vicina al primo, con elettricità positiva nella parte più lontana.

Nel secondo corpo avviene cioè una separazione delle cariche positive da quelle negative, per il fatto che le cariche elettriche positive esistenti nel primo corpo richiamano per attrazione le cariche negative dell'altro, respingendo invece, cioè allontana do, le cariche positive.

(Per la minore distanza interposta tra la carica positiva del primo e la carica negativa del secondo corpo, la forza di attrazione risulta allora maggiore della forza di repulsione, cosichè il secondo corpo — se è molto leggero, per es. una pallina di sughero — viene materialmente attratto fino a venire a contatto con il primo. Senonchè con il contatto la pallina si carica totalmente di elettricità positiva e perciò viene respinta. E' questo il « pendolino elettrico » Fig. 26 b).

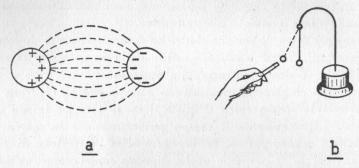


Fig. 26 — (A sinistra): Le linee di forza elettriche tra due sfere cariche di elettricità. (A destra): Il fenomeno di attrazione e di repulsione che si verifica in un pendolino elettrico.

Nel corpo influenzato le cariche elettriche risultano dunque distinte, e in mezzo si forma una zona neutra. Si può anche con opportuni accorgimenti — sui quali erano basate le antiche macchine elettrostatiche a strofinio — raccogliere e accumulare (condensare) separatamente le cariche positive e le cariche negative.

Del resto l'elettricità dovuta a strofinio si può raccogliere facilmente, talvolta anche nostro malgrado. Così, quando si cammina lungo un corridoio d'albergo completamente ricoperto da un tappeto di lana ci si carica di elettricità, al punto da vedere scoccare una scintilla nel momento in cui, cavata di tasca la chiave, la si avvicina alla serratura.

Così pure, sfilandosi una camicia di *nailon*, in ambiente secco, si possono facilmente produrre scintille.

Ancora, basta lisciare il pelo, con mano asciutta, ad un gatto per caricarsi di elettricità.

In tutti i casi ai quali si è ora accennato, con lo *strofinio* si riesce materialmente a strappare, a « raschiare », degli elettroni da un corpo trasferendoli all'altro che perciò viene a caricarsi negativamente, mentre il primo rimane con una deficienza di elettroni e risulta carico positivamente.

Il fenomeno dell'induzione elettrostatica può spiegare anche l'attrazione esercitata dall'ambra sui pezzettini di sughero o di altro materiale leggero (Cap. 1): ciascun pezzettino si elettrizza per induzione, come il « pendolino », e perciò viene attratto.

Tuttavia non appare affatto evidente nè facilmente comprensibile la causa prima dell'attrazione tra cariche elettriche di nome contrario (e della repulsione tra cariche omonime), pure se si considera l'esistenza di « atomi di elettricità » di carica positiva (denominati positoni) simili ai meglio conosciuti atomi di elettricità negativa (elettroni).

Si può pensare ad una polarizzazione, ossia ad un particolare comune orientamento, assunto dai singoli elettroni rotanti anche di una sola « specie », con conseguente tendenza alla attrazione o alla repulsione delle molecole contigue, di cui gli elettroni fanno parte. secondo che il senso di rotazione degli elettroni stessi sia discorde o concorde.

Comunque, è da notare che tali azioni (attrazioni o repulsioni) nel campo elettrostatico normalmente risultano di piccola portata materiale, di gran lunga inferiore alle enormi forze esercitate negli analoghi fenomeni che si verificano, però a carattere « vorticoso », nel campo elettrodinamico (se ne tratterà nel Cap. 10).

* * *

Sul fenomeno sopra descritto, definito « induzione elettrostatica », sono basati i condensatori, che passiamo ora a descrivere.

Un condensatore è costituito da due lamine metalliche affacciate, denominate armature, distanziate e separate da aria oppure da un materiale isolante (dielettrico).

Se si pongono le due armature in contatto con i due poli di una pila o di un accumulatore ciascuna lamina si caricherà di elettricità dello stesso nome del polo con il quale è collegata (Fig. 25 - destra). Essendo breve la distanza che separa le lamine, tra le cariche si eserciteranno forze di attrazione reciproche di notevole intensità, e tali da richiamare sulle due armature la massima quantità di carica elettrica (l'una di segno contrario all'altra).

Nel «campo» tra le due armature (Fig. 29 - destra) le linee di forza elettriche risultano parallele tra loro e normali alle armature stesse. (Per convenzione si dà alle linee di forza il senso dall'armatura positiva alla negativa).

Anche dopo averle staccate dai poli della pila le armature del condensatore conservano la loro carica e sono in grado di fornire una corrente — naturalmente breve — quando vengono messe in comunicazione attraverso un conduttore in modo che possa avvenire la scarica del condensatore.

La quantità di elettricità che può essere così accumulata, o meglio condensata, dipende dalla differenza di potenziale esistente tra le due armature (crescendo con essa) e dalle caratteristiche fisiche intrinseche dell'insieme, che si esprimono con il termine capacità del condensatore.

Il termine capacità fà pensare ad un recipiente o serbatoio: e infatti esiste una certa analogia tra un condensatore ed un recipiente o serbatoio destinato a contenere un liquido o un gas.

Consideriamo per esempio un recipiente nel quale immettiamo del gas (aria).

Un recipiente di acciaio, se è capace di contenere un mc di aria (circa un chilogrammo) alla pressione di una atmosfera (oppure due kg di aria alla pressione di due atmosfere, oppure tre kg di aria alla pressione di tre atmosfere) diciamo che ha la capacità (volume) di un mc.

Se però il recipiente è di gomma, cioè di un materiale elastico, noi potremo immettervi due kg di aria alla pressione di due atmosfere, e il recipiente si dilaterà fino al volume di 2 mc, assumendovi il gas la pressione di una atmosfera.

Potremo allora dire che la *capacità* di questo secondo recipiente è di 2 mc.

Moltiplicando la capacità (volume) assunto dal recipiente per la pressione (densità) del gas si trova la quantità del gas in kg contenuto nel recipiente stesso. Dividendo la quantità per la pressione si ottiene la capacità.

Nel caso del recipiente di acciaio la capacità è sempre di 1 me: 1 Kg diviso 1 atm = 1 mc; 2 Kg diviso 2 atm = 1 mc.

Nel caso del recipiente di gomma la capacità diventa doppia (2 mc) in quanto: 2 Kg diviso 1 atm = 2 mc.

Analogamente in un condensatore elettrico la capacità è l'attitudine a contenere la massima quantità di elettricità al minore poten-

ziale (C = $\frac{Q}{V}$, Q = C V). (Nel confronto con il recipiente contenente gas, la quantità di elettricità corrisponde alla quantità di gas; il potenziale corrisponde alla pressione).

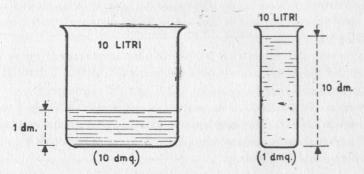


Fig. 27 — Presenta maggiore capacità il recipiente a sinistra nel quale una stessa determinata quantità di liquido assume un livello inferiore.

Ricorrendo ad un'altra grossolana ma evidente analogia con un recipiente per liquidi, la maggiore capacità corrisponde alla ampiezza (larghezza) del recipiente. Se questo è per es. di forma cilindrica, rispetto ad un recipiente più stretto, può contenere una maggiore quantità di liquido a parità di livello. In altre parole si può anche dire che un recipiente ha maggiore capacità di un altro quando, versando nei due una stessa quantità di liquido, nel primo il livello aumenta meno che nel secondo. (Fig. 27).

E se supponiamo che i due recipienti, considerati alti quanto si voglia, abbiano il fondo poroso tale da perdere liquido quando la pressione superi un certo valore (per es. 1 kg/cmq) avverrà che nel recipiente più largo (la cui base abbia per es. un'area di 100 cmq) noi

possiamo tranquillamente versare fino a cento litri di acqua, che vi assumerà il livello di un metro. Nel secondo invece (la cui base abbia per es. un'area di 10 cmq), possiamo versare soltanto dieci litri di acqua, che vi assumerà ugualmente il livello di un metro: se aggiungiamo altra acqua il livello aumenta e con esso aumenterà la pressione esercitata sul fondo superando quella limite sopportabile, con conseguente fuoruscita e perdita. Ecco come si constata che il primo recipiente presenta una effettiva maggiore capacità rispetto al secondo.

* * *

In un condensatore elettrico la capacità dipende dalla superficie delle armature (crescendo con il crescere della superficie), dalla distanza tra di esse (crescendo con il diminuire della distanza), dall'isolante o dielettrico interposto.

La natura del dielettrico ha particolare importanza (come lo ha nel caso del gas la natura elastica del *materiale* di cui è fatto il recipiente); ciò sarà meglio spiegato nel Capitolo seguente.

L'unità di misura della capacità è il farad (Michele FARADAY, fisico inglese, 1791-1867): corrisponde alla capacità di un condensatore, o di un conduttore isolato, che può contenere la carica di 1 coulomb con il potenziale di 1 volt.

Si può anche dire che ha la capacità di un farad un condensatore in cui la corrente di un ampere affluente per un secondo ad una sua armatura vi fa condensare una carica elettrica che assume il potenziale di un volt. (L'altra armatura del condensatore si mette in comunicazione con la terra in modo da portarla al potenziale zero).

Tale unità di capacità è molto grande, poichè l'elettricità ha tendenza a sfuggire dai conduttori, e difficilmente vi si accumula in simili enormi quantità (ricordiamo che un coulomb equivale a oltre 6 miliardi di miliardi di elettroni).

Al riguardo si può paragonare il fenomeno della « condensazione elettrica » alla condensazione del vapor d'acqua atmosferico che avviene su una parete fredda, sotto forma di goccioline: la quantità di acqua così condensata è minima in confronto a quella che esiste nell'ambiente sotto forma di invisibile vapore: e l'acqua condensatasi ha sempre tendenza ad evaporare appena aumenta la temperatura ambiente.

Per gli usi pratici si fa riferimento ad un sottomultiplo del farad, il microfarad, che equivale alla milionesima parte di un farad.

L'energia W contenuta in un condensatore di capacità C al potenziale V è data dalla espressione: $W = \frac{1}{2}$ C V^2 . (Si noti l'analogia con la formula della energia cinetica, o forza viva, in meccanica: $E = \frac{1}{2}$ m v^2 , dove m è la massa del corpo e v la velocità da cui è animata).

Per maggiore precisazione analogica possiamo citare, invece della comunissima formula dell'energia cinetica, la meno nota formula della energia potenziale elastica immagazzinata in una molla di costante elastica s sottoposta ad una forza f: $W = \frac{1}{2} \frac{1}{s} f^2$. Nel confronto con l'energia elettrostatica del condensatore la s corrisponde all'inverso della capacità $(\frac{1}{C})$, la f corrisponde al potenziale.

S'intende che un condensatore costituisce sempre una « resistenza », nel senso che esso determina un « ritardo » all'aumento della tensione quando alle sue armature si applichi improvvisamente un impulso di corrente.

8 — Il dielettrico del condensatore sede di energia potenziale di tipo elastico.

Soccorrono semplici analogie meccaniche e idrauliche.

La gabbia di Faraday utilizzata nei due sensi. Condensatore e accumulatore come ferro da stiro e carbone di legna.

Nel fenomeno di induzione elettrostatica di cui si è trattato nel Capitolo precedente ha particolare importanza la costante dielettrica: un coefficiente che esprime l'attitudine delle sostanze isolanti a « trasmettere » le azioni elettriche di induzione (per es. tra un'armatura e l'altra del condensatore). Si considera eguale a 1 la costante dielettrica dello spazio vuoto; anche la costante dielettrica dell'aria è praticamente eguale a 1; quella della carta è di circa 2; della mica e del vetro è di circa 6; dell'alcole è di circa 30.

Così quando tra le armature di un condensatore c'è della mica invece dell'aria, la capacità diventa circa 6 volte maggiore; se c'è dell'alcole la capacità aumenta di circa 30 volte; ecc.

Questo perchè il dielettrico è esso soprattutto sede delle azioni elettriche che influiscono, e in misura prevalente come si vede, sulle cariche complessive presenti nel condensatore.

Si può immaginare infatti che gli elettroni delle orbite atomiche del dielettrico, pur non essendo liberi di spostarsi come nei metalli, subiscano le azioni di attrazione e repulsione deformando le orbite stesse e generando quindi delle tensioni elettriche di tipo « elastico » (come tante « molle » che si schiacciano).

E' l'attrazione delle cariche elettriche opposte, esistenti nelle due armature del condensatore, che determina nel campo elettrico interposto, cioè dentro il dielettrico, la « deformazione elastica » delle orbite elettroniche, con il conseguente accumulo di energia (corrente di spostamento).

L'energia viene poi restituita nella scarica, quando le cariche sulle armature si pareggiano e le « molle » interposte si distendono.

Lo fa anche presumere il fenomeno della piezoelettricità presentato da cristalli di quarzo e di altri minerali. Se su uno di tali cristalli, posto tra due placche metalliche, si esercita una materiale pressione, si genera tra le facce del cristallo (e quindi tra le due placche) una differenza di potenziale elettrico.

(Si tratta dunque, ancora una volta, di un fenomeno reversibile). Alla ricerca di una analogia di carattere meccanico, si può paragonare un condensatore ad una molla metallica elicoidale di determinata forza elastica. La forza elastica corrisponde alla capacità del condensatore e dipende ovviamente dalle dimensioni, dalla forma e specialmente dalla natura del metallo (questo corrisponde al dielettrico).

Sottoponendo la molla ad una pressione (la quale corrisponde alla tensione elettrica applicata al condensatore) essa si carica contraendosi: immagazzina così direttamente energia meccanica, che poi è in grado di restituire scaricandosi.

Per rendersi conto della funzione del dielettrico nel condensatore si consideri ancora un materasso a molle: la maggiore importanza, ai fini dell'elasticità del materasso, l'ha proprio la parte non appariscente, costituita appunto dalle molle. Le quali molle si deformeranno più o meno, sopportando un « carico » maggiore o minore, in relazione alla loro elasticità intrinseca.

La forma della scarica in una molla può essere violenta (scatto) oppure graduale (distensione), secondo la resistenza che la molla incontra quando si libera.

Analogamente nel condensatore: se il circuito elettrico attraverso il quale avviene la scarica presenta minima resistenza la scarica sarà rapidissima e la corrente di elettroni risulterà intensissima.

Un tale fenomeno si sfrutta nel « flash » elettronico, usato in fotografia per produrre appunto un istantaneo lampo di grande intensità luminosa.

* * *

Servendoci di un'altra analogia meccanica possiamo paragonare il condensatore ad una lamina o membrana elastica che separa due camere contenenti gas in pressione. Se aumenta la pressione su una faccia della membrana questa si inarca e trasmette la pressione al gas esistente dall'altra parte, dopodichè non si verifica altro movimento. E' il caso del condensatore che si carica con una corrente continua.

Se poi si mettono in comunicazione le due camere, attraverso una tubazione esterna, il gas passerà dalla camera a pressione maggiore alla camera a pressione minore, e la membrana ritornerà nella posizione primitiva di equilibrio (eventualmente dopo alcune oscillazioni in un senso e nell'altro).

Nel caso che il condensatore sia inserito in un circuito a corrente alternata — della quale si tratterà in seguito — risultando tale corrente costituita da una serie di oscillazioni o pulsazioni succedentisi in un senso e nel senso opposto, il condensatore si caricherà e si scaricherà, in una armatura e nell'altra, alternativamente; come farebbe deformandosi elasticamente la membrana sopra indicata se la pressione fluida sulle sue due facce aumentasse e diminuisse alternativamente (Fig. 28 e Fig. 29).

Allora la pulsazione della pressione gassosa determinerebbe una vibrazione della lamina, con lo stesso ritmo della pressione, sicchè la lamina non costituirebbe più un'ostacolo alla trasmissione di una tal corrente pulsante.

La teoria e la pratica dimostrano che una corrente alternata passa effettivamente — nel significato sopra precisato — attraverso un condensatore, e il pulsare delle forze elettriche è anche denunciato dal riscaldamento del « dielettrico » (che si conferma perciò essere la vera sede delle azioni elettriche nel condensatore).

Quando aumenta il ritmo delle pulsazioni (aumenta cioè la frequenza della corrente alternata) il riscaldamento diventa sempre più notevole.

Noi sappiamo peraltro che l'aumento di temperatura in un corpo significa l'intensificarsi delle vibrazioni molecolari interne del corpo, vibrazioni che è da presumere siano a loro volta provocate dalla naturale agitazione degli elettroni spaziali esistenti tra le molecole, oltre che — nei conduttori — dagli urti con le molecole degli elettroni semiliberi che trasmettono la corrente elettrica.

Nel dielettrico (isolante) del condensatore non esistono come nei conduttori elettroni semiliberi in grado di trasmettere la corrente, e dobbiamo immaginare che l'agitazione elettronica si limiti alla « deformazione » delle orbite elettroniche — cui si è prima accennato — o comunque ad una vibrazione elettronica dovuta alla tensione elettrica applicata alle armature. E' perciò che tali deformazioni o vibrazio-

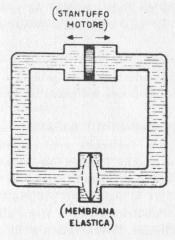


Fig. 28 — Una corrente fluida pulsante (alternata) si trasmette attraverso una membrana elastica.

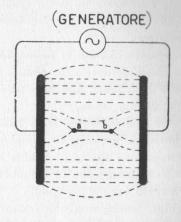


Fig. 29 — Rivelazione delle vibrazioni elettriche nel campo di un condensatore: nel conduttore a b passa corrente alternata.

ni, nel caso delle correnti alternate ad alta frequenza venendo ripetute milioni di volte al minuto secondo determinano una agitazione sufficiente a fare aumentare anche le vibrazioni delle molecole, con il conseguente aumento di temperatura.

Non soltanto, ma è da aggiungere che se lo spazio tra le due armature del condensatore è privo di materia, ossia è vuoto, non risulta mai privo di elettroni, sicchè le « vibrazioni elettroniche » dovute al campo elettrico alternato vi si trasmettono ugualmente e si possono anche rivelare, quando sono di alta frequenza cioè sono dotate di una elevata energia. Basta per questo interporre nello spazio di cui trattasi un'asticina metallica (Fig. 29); in essa vengono provocate vibrazioni elettroniche che danno luogo — trattandosi di un

conduttore —ad una vera e propria corrente alternata, alla quale si dà ancora il nome di corrente di spostamento. (Se ne riparlerà nel Cap. 21).

* * *

Dopo aver parlato di conduttori e di isolanti diciamo che è possibile « isolare » un certo spazio,, ossia renderlo immune da influenze elettriche esterne, racchiudendolo in una « gabbia » formata da conduttori.

Questo in base al principio di Faraday, secondo il quale si verifica che l'elettricità distribuita sopra i conduttori della gabbia, o esistente al di fuori, non fa sentire alcuna influenza nei punti all'interno della gabbia stessa.

Su tale principio sono basate le protezioni dei fabbricati contro l'elettricità atmosferica, quando vengono realizzate con conduttori formanti una specie di gabbia a larghe maglie (gabbia parafulmine).

Si aggiunge che la « gabbia » di Faraday funziona anche in senso inverso (che è poi quello . . . attinente al significato proprio della parola), poichè essa non lascia uscire l'elettricità che si trova all'interno. Da ciò si trae profitto per realizzare la schermatura di certi dispositivi elettrici producenti scariche (per esempio candele di accensione dei motori) quando si vuole impedire che tali scariche influenzino, disturbandoli, apparati radio situati in prossimità.

La schermatura a cui ora si è accennato assume la forma di una guaina metallica.

* * *

Un condensatore, in relazione alla sua capacità, sopporta una determinata differenza di potenziale tra le sue armature, superando la quale si provoca una scarica disruttiva tra le stesse. (Analogamente, se la pressione è eccessiva una bombola può scoppiare, o può rompersi la membrana nel dispositivo mostrato dalla Fig. 28).

Quando è necessario resistere ad una forte differenza di potenziale si dispongono più condensatori in serie. Allora praticamente è come se le cariche delle armature esterne restassero separate da uno spessore di dielettrico eguale alla somma dei singoli dielettrici.

In tal caso, per l'aumentato spessore del dielettrico, la capacità complessiva risulta minore ed equivale alla capacità di un singolo condensatore diviso il numero dei condensatori (considerati tutti uguali).

Se invece si vuole aumentare la capacità si dispongono i condensatori in parallelo. Allora è come se si avesse un solo condensatore con una superficie multipla di quella del singolo condensatore, e la capacità complessiva risulta maggiore e multipla di quella singola (il fattore di moltiplicazione è dato ovviamente dal numero degli elementi)-

* * *

Abbiamo parlato nel Cap. 5 dell'accumulatore e nel presente del condensatore.

L'apparente somiglianza di significato dei due termini può generare confusioni e indurre in errore: chiariamo perciò meglio l'essenza dei fenomeni a confronto.

Nel condensatore all'atto della carica si verifica, in un tempo brevissimo, semplicemente un richiamo, un « addensamento » di cariche elettriche sulle armature, per effetto della tensione applicatavi. All'atto della scarica, dette cariche elettriche « sgombrano » rapidissimamente e le armature ritornano neutre. Nessuna « alterazione » chimica o sostanziale si produce nelle armature stesse e nel dielettrico.

I potenziali in gioco nel condensatore sono elevatissimi, mentre la quantità di elettricità condensata è relativamente piccola o piccolissima. Perciò il « lavoro » che ci si può attendere da un condensatore non può essere cospicuo.

Analogamente in una molla metallica, sottoponendola a pressione elevata si potrà poi ottenerne uno scatto anche violento, ma l'energia meccanica in gioco sarà sempre assai limitata.

Come grossolana analogia termica, si pensi ad un semplice ferro da stiro vecchio tipo (senza alimentazione) da scaldare tenendolo a contatto con il fuoco, e che restituisce poi il calore al panno da stirare.

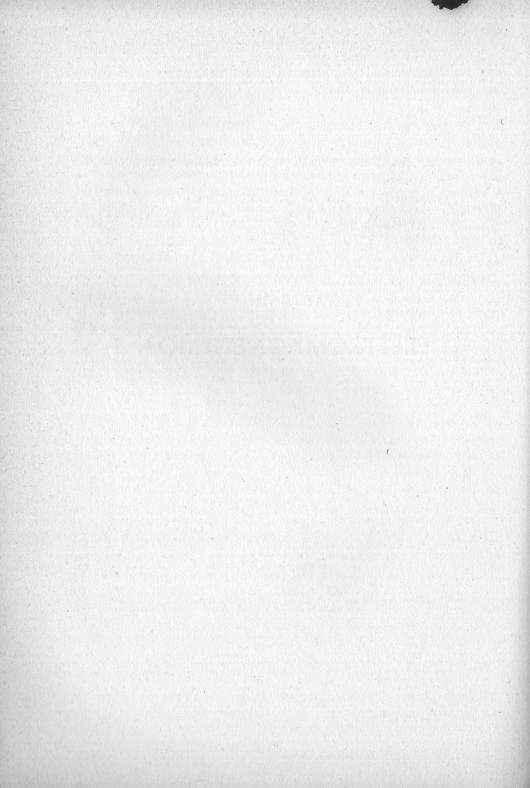
Nell'accumulatore invece la corrente di carica opera nelle piastre, in un tempo notevolmente lungo, una lenta e profonda trasformazione elettrochimica, interessando una quantità enorme di elettroni, quelli appunto degli innumerevoli atomi costituenti le piastre metalliche. Alla scarica poi, attraverso un processo inverso, gli elettroni si convo-

gliano in un nuovo lento flusso che costituisce la corrente di scarica; questa dura a lungo, fino a quando dura nelle piastre la reazione elettrochimica che la provoca.

Con riferimento al modo di formazione, per l'accumulatore può valere l'analogia termica con il carbone di legna, il quale si ottiene spendendo una certa quantità di energia calorifica, attraverso un processo di combustione parziale (resa incompleta per difetto di aria) della legna normale: la energia calorifica spesa e così immagazzinata è poi restituita quando il carbone viene bruciato. Lo « accumulo » di energia calorifica conseguito è confermato dalla costatazione che mentre la legna, anche perfettamente secca, ha un potere calorifico di 3.600 calorie per Kg, il carbone di legna (con un peso specifico praticamente uguale) ha un potere calorifico doppio, cioè di 7.000 calorie per Kg.

S'intende che nel caso del carbone di legna il processo di « arricchimento di calorie » si verifica una volta soltanto, mentre nel caso dell'accumulatore l'analogo processo di « arricchimento di elettroni » si ripete ad ogni carica.

PARTE II ELETTROMAGNETISMO



 Il magnetismo manifestazione della vorticosità degli elettroni.

Importanti analogie aerodinamiche.

La magnetizzazione per induzione dovuta al propagarsi dei vortici nel campo.

Con il termine magnetismo è stata indicata la proprietà che presenta un minerale di ferro detto magnetite (dalla antica città di Magnesia nell'Asia Minore) di attrarre dei pezzettini di ferro.

Tale proprietà può essere comunicata ad altri materiali (oltre al ferro e alle sue leghe) come al nichel e al cobalto, per strofinio o per contatto, o semplicemente per induzione avvicinando questi metalli ad un materiale magnetizzato.

Se una barretta di ferro magnetizzato (che prende il nome di magnete o calamita) si immerge nella limatura di ferro, si nota che questa si attacca alle estremità della barretta (Fig. 30) e niente affatto nella zona mediana.

Le estremità della barretta prendono il nome di *poli*: si denomina precisamente *polo nord* quello che, in un ago magnetizzato libero di muoversi, si rivolge verso il polo Nord terrestre, *polo sud l'altro*.

Come per le cariche elettriche anche per i poli magnetici vige la regola che poli omonimi si respingono e poli eteronimi si attraggono.

Ma è da notare subito che mentre le cariche elettriche sono isolabili, sicchè si può anche avere un corpo carico solo positivamente ed un altro carico solo negativamente, i poli nord e sud non sono mai separabili in un magnete.

Se un magnete si suddivide in due, e poi in quattro, ecc. all'infinito, si trova che i singoli magneti sempre più piccoli che se ne ricavano presentano ciascuno un polo nord ed un polo sud. Invariabilmente, nel punto in cui si taglia il magnete, si trova un polo nord affacciato ad un polo sud (Fig. 31). Se ne può concludere, prima di tutto, che le polarità magnetiche non sono dovute a qualcosa di « estraneo » che si possa aggiungere o togliere al corpo; in secondo luogo, che esse derivano da una particolare condizione di orientamento di questo qualcosa insito nel corpo.

Diciamo fin d'ora — anticipando le nozioni sulle strettissime relazioni tra elettricità e magnetismo che saranno tra breve messe in evidenza — che il magnetismo, come l'elettricità, è da attribuire all'esistenza degli *elettroni*. Con la particolarità che sono ora da consi-

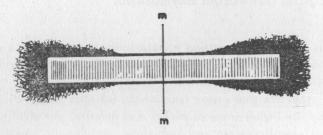


Fig. 30 — Come la limatura di ferro attratta si attacca ad una barra magnetica.

derare anche i moti di rotazione dell'elettrone, sia intorno a se stesso (spin) a guisa di un giroscopio, sia di rivoluzione in un piano normale al proprio asse di rotazione.

Inoltre, a differenza di quanto supposto al Cap. 7 per spiegare la « polarità » elettrica, la polarità magnetica sarebbe dovuta più che alla polarizzazione dei singoli elettroni nei singoli atomi, alla rotazione « vorticosa » di notevoli masse elettroniche spaziali, oltre che molecolari.

In un magnete infinitesimale, se la polarità nord è per es. determinata in un'estremità dal moto rotatorio concorde di tutti gli elettroni nel senso orario (il senso di moto delle lancette dell'orologio), dall'altra estremità del magnete il senso di rotazione degli stessi elettroni apparirà antiorario, epperciò vi si determinerà la polarità opposta, che è quella sud.

Per analogia si consideri una vite (Fig. 31) e la si guardi dalla parte della sua estremità sinistra: vediamo che il senso della filettatura è « antiorario ».

Se la stessa filettatura la guardiamo dalla estremità destra il suo senso appare « orario », opposto cioè a quello dell'altro estremo.

Evidentemente, comunque si spezzi e si suddivida la vite (in due, in quattro, in quante si voglia parti) si troverà sempre che in ciascuna porzione una estremità avrà il senso antiorario, l'estremità opposta avrà il senso orario.

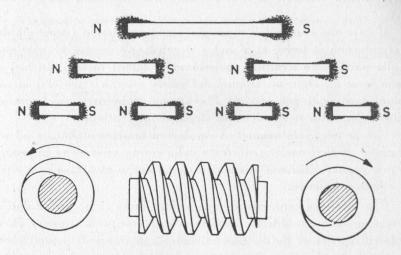


Fig. 31 — (In alto): Inseparabilità dei due poli magnetici, (In basso): il senso della filettatura nella vite appare opposto nelle due facce.

In relazione a quanto sopra detto, un corpo magnetizzato si suole immaginare composto di tanti infinitesimali magneti elementari orientati tutti nella stessa direzione. (Ciascun magnete elementare si può considerare costituito da un microcristallo e, al limite, da una singola molecola).

Nei corpi non magnetici, o quando un magnete si smagnetizza, i magneti elementari non avrebbero o perderebbero la comune orientazione, restando o tornando nel più completo disordine, sicchè all'esterno non se ne rivela più alcun effetto magnetico.

In realtà tale condizione viene confermata dall'esperienza, sia pure in scala macroscopica. Se in un tubo di cartone si pone della limatura d'acciaio e si sottopone il tubo ad un'azione magnetizzante esso si comporta come una barra calamitata, presentando il polo nord ad un estremo e il polo sud all'altro. Ciò in seguito all'avvenuta ma-

gnetizzazione, e al conseguito comune orientamento, di tutti gli innumerevoli granelli di limatura assimilabili ciascuno ad un magnete elementare.

Se poi il tubo si scuote, in modo da rimescolare la limatura, esso cessa di comportarsi come un magnete, venendo i granelli di limatura a trovarsi nuovamente in disordine, sicchè i singoli magnetini elementari risultano orientati in tutti i sensi e non sommano più i loro effetti.

Il fatto che i materiali magnetici siano pochissimi (come già detto si riducono al ferro, al nichel e al cobalto) è dovuto probabilmente alla particolare struttura molecolare di questi metalli. In essi saranno forse gli elettroni atomici del guscio esterno a trovarsi in condizioni favorevoli per ruotare liberamente e indurre una rotazione dello stesso senso negli elettroni degli atomi contigui.

Che la proprietà magnetica sia dovuta fondamentalmente ad una rotazione di elettroni è confermato dalla constatazione che imprimendo una rapida rotazione meccanica ad un corpo metallico esso rivela un effetto magnetico.

Una ulteriore conferma di quanto ora detto si ha anche dall'osservazione delle cosiddette macchie solari, costituite appunto da giganteschi vortici di fluido gas-elettronico generatori di potenti campi magnetici che arrivano ad influenzare la terra (tempeste magnetiche). Si è pure notato che vortici di senso contrario determinano effetti magnetici eteronimi.

Per quanto riguarda l'attrazione tra i poli omonimi, e la repulsione tra poli eteronimi, non è facile trovare una analogia in altri campi, se non nell'aerodinamica.

Si possono infatti considerare per similitudine due vortici fluidi vicini nello spazio, aventi gli assi allineati e ruotanti in modo che i loro sensi di rotazione — visti da un osservatore interposto — risultino opposti. Se i due vortici sono molto vicini finiscono con l'attrarsi e fondersi in un più violento vortice unico.

Se i suddetti vortici affacciati ruotassero invece in modo che il senso di ciascuno apparisse il medesimo ad un osservatore interposto, avvicinandosi finirebbero con il neutralizzarsi disfacendosi.

Trasportando le rotazioni in un piano, anzichè nello spazio, e materializzandole in dispositivi meccanici, si può vedere come due ruotismi contigui, se girano in senso *contrario* (cioè l'uno in senso orario e l'altro in senso antiorario) possono sommare i loro effetti e determinare, per es., l'aspirazione di un liquido. (Si pensi in proposito ai ruotismi delle pompe ad ingranaggi). Se invece le rotazioni avvengono nello stesso senso gli effetti si neutralizzano, con azione risultante nulla.

* * *

Torniamo ora a considerare un magnete rettilineo, sopra il quale disponiamo una lastra di vetro. Se sulla lastra si lascia cadere della limatura di ferro, imprimendo alla lastra stessa una vibrazione in

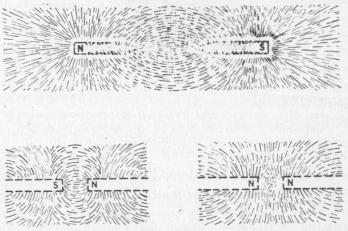


Fig. 32 — (In alto): Spettro magnetico di una barra calamitata. (In basso): Linee di forza tra due poli eterònimi e tra due poli omònimi.

modo da fare sollevare continuamente i granelli di limatura, questi, liberi di orientarsi, si dispongono lungo linee caratteristiche che partono dalle zone polari del magnete (Fig. 32). La figura risultante dall'insieme di queste linee si denomina spettro magnetico.

Tali linee materializzano le linee di forza o di flusso, e rappresentano in ciascun punto la direzione secondo cui si esercitano le forze magnetiche.

Per convenzione si attribuisce un « senso » alle linee di forza magnetiche, e precisamente si ammette che escano dal polo nord ed

entrino nel polo sud, e in generale siano dirette dal polo nord di un magnete al polo sud di un altro magnete (Fig. 33).

Lo spazio nel quale un magnete esercita la sua azione magnetica è detto campo magnetico. (L'intensità della forza magnetica, cioè del campo, decresce con l'allontanarsi dai poli, essendo, come sempre, inversamente proporzionale alla distanza).

Disponendo due magneti con i poli eteronimi affacciati le linee di forza assumono la forma visibile nella Fig. 32 (sinistra). Da ciò è confermato che si determinano forze di attrazione reciproca e le linee di forza si congiungono nello spazio tra i poli.

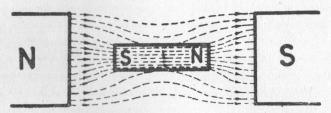


Fig. 33 — Se si dispone un pezzo di ferro in un campo magnetico le linee di forza vi si addensano e il ferro si magnetizza.

Per quanto prima detto, una linea di forza si può in sostanza considerare l'asse di un vortice elettronico, vortice formato da un insieme di elettroni aventi lo stesso « spin » e animati da un moto vorticoso. Il senso di rotazione è connesso con il senso attribuito alla linea di forza: per es. il senso è rotatorio « orario » guardando il polo nord di un magnete (antiorario guardando il polo sud) rispetto ad un osservatore disposto in modo che le linee di forza gli entrino dai piedi e gli escano dalla testa.

Le linee di forza si possono anche paragonare grossolanamente a linee materiali elastiche, collegate ai poli, che tendono a raccorciarsi il più possibile.

Nel caso di *poli omonimi* le forze sono invece di repulsione e le linee di forza si allontanano, divergendo senza toccarsi (Fig. 32 - destra).

Si nota che le linee di forza non possono mai incrociarsi, poichè in ogni punto non può esistere che un solo determinato valore in grandezza e direzione della forza magnetica.

(Ricordiamo che analoghe linee di forza elettrica si determinano in un campo elettrico e che per convenzione si dà ad esse il senso che va dalle cariche positive verso le negative, come detto al Cap. 7).

* * *

Se in un campo magnetico si dispone un pezzo di materiale magnetico (per es. ferro) si osserva che le linee di forza si addensano nel ferro, tendono cioè a passare attraverso di esso come se vi trovassero minore resistenza rispetto a quella che trovano nell'aria. Si dice che il ferro è più permeabile dell'aria, al flusso magnetico (Fig. 33).

Come grossolana analogia, si può pensare alla maggiore permeabilità all'acqua della sabbia, per esempio, rispetto all'argilla.

Un pezzo di ferro immerso in un campo magnetico si magnetizza perciò per induzione, assumendo una polarità nord e una polarità sud, in conseguenza dell'orientamento comune assunto dai suoi magnetini elementari per effetto delle linee di forza magnetica (vortici elettronici) che lo attraversano. Sono dunque sempre i vortici elettronici del campo che si propagano per contiguità agli elettroni del metallo provocandone la rotazione orientata.

Il nuovo magnete indotto presenterà la polarità sud allo estremo affacciato al polo nord del magnete inducente, la polarità nord all'altro estremo (Fig. 33).

La magnetizzazione per induzione spiega perchè una calamita attira la limatura a grappoli: ciascun granello di limatura diventa un piccolo magnete e a sua volta ne magnetizza un altro vicino attirandolo, e così via.

Si denomina precisamente induzione (indicata normalmente con la lettera B) l'intensità di magnetizzazione che si produce nel ferro immerso in un campo magnetico (induttore) di intensità H. Il rap-

porto $\frac{B}{H}$ si definisce permeabilità magnetica e si indica con la lettera greca μ (mu).

Per i valori della permeabilità magnetica, vedere al Cap. 10.

Sia l'intensità di magnetizzazione che l'induzione magnetica si misurano in gauss (Carlo Gauss, scienziato tedesco, 1777-1855).

10 — Gli elettroni della corrente provocano vortici elettronici nello spazio.

Un solenoide equivale ad una barra magnetizzata.

L'elettromagnete spiega subito il telegrafo.

L'enorme potenza dei vortici.

Ora iniziamo la trattazione di uno dei più importanti fenomeni elettrici: l'effetto magnetico determinato dalla corrente e, come sèguito, la reciproca generazione della corrente elettrica per effetto magnetico.

Si constata che un filo percorso da corrente elettrica determina intorno a sè un campo magnetico, rivelato da linee di forza circola-ri concentriche al filo (Fig. 34).

Ciò può essere rilevato disponendo un piano, per es. di cartone, intorno al filo conduttore e ad esso perpendicolare, e facendovi cadere la solita limatura di ferro.

Il senso di queste linee di forza resta precisato con un ago magnetico (piccola losanga di acciaio magnetizzata) posto sul piano predetto. L'ago, libero di ruotare, si disporrà tangenzialmente alle linee di forza circolari (si prescinde dalla influenza del campo magnetico terrestre) e il senso delle linee di forza sarà quello indicato dal polo nord dell'ago.

(Come detto in precedenza, le linee di forza escono dal polo nord ed entrano nel polo sud).

Questo fenomeno fu notato per la prima volta dal fisico danese Oersted (1774-1851).

Tra le diverse regole pratiche utili per definire il senso delle linee di forza magnetiche intorno ai fili percorsi da corrente elettrica si citano le seguenti: 1. - La regola del cavatappi che dice: disponendo un cavatappi (un succhiello) lungo un filo, e ruotandolo in modo che avanzi nel senso della corrente, il senso di rotazione del cavatappi sarà quello delle linee di forza. (Come senso della corrente si assume quello convenzionale, dal polo positivo al polo negativo di una pila: nel caso della figura la corrente va dal basso verso l'alto).

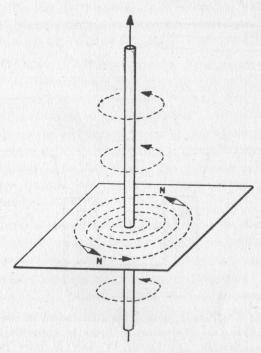


Fig. 34 — Linee di forza magnetiche intorno ad un filo percorso dalla corrente elettrica.

2. - La regola della mano destra che dice: disponendo la mano destra lungo il filo, con le dita dirette nel senso della corrente e la palma rivolta verso l'ago magnetico, il pollice — aperto — indicherà il senso verso cui tenderà a disporsi il polo nord dell'ago, e quindi il senso delle linee di forza (Fig. 40).

Nelle rappresentazioni grafiche, volendo segnare nel piano del foglio le circonferenze costituenti le linee di forza magnetiche, si usa indicare il filo conduttore (perpendicolare al foglio) con un cerchietto dentro cui si traccia una crocetta se la corrente è diretta dall'avanti verso l'indietro, rispetto al foglio; vi si traccia un punto se la corrente è diretta dall'indietro all'avanti, cioè verso l'osservatore (Figura 35 alto).

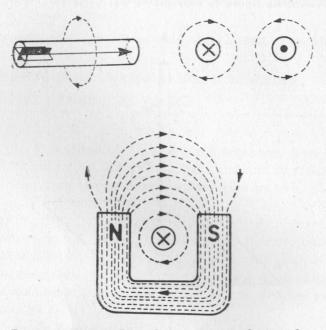


Fig. 35 — (Il alto): Linea di forza intorno ad un conduttore. (Vista del conduttore: di fianco in prospettiva; di dietro; davanti). (In basso): Le linee di forza intorno ad un conduttore (indicato x) determinano le polarità in un «ferro di cavallo» immerso nel campo.

(E' come vedere una freccia, con impennaggio cruciforme, dalla parte della coda o dalla parte della punta).

Il senso delle linee di forza magnetiche determina poi la polarità magnetica del campo o di un materiale magnetico in esso immerso (Fig. 35 - basso).

Fatta l'affermazione sulla corrispondenza tra polarità magnetica e senso delle linee di forza rimane da chiarire l'intimo significato del fenomeno. Intanto, per cercare di dare una spiegazione, sempre grossolana, della comparsa delle linee di forza magnetiche al passaggio di una corrente elettrica, consideriamo l'effettivo moto degli elettroni lungo un conduttore.

Ricordiamo che il senso del moto reale degli elettroni è opposto a quello convenzionale attribuito alla corrente: nel caso delle figure 34 e 36 gli elettroni si muoveranno dunque dall'alto verso il basso.

Aggiungiamo che gli elettroni della corrente, nel saltare da un atomo all'altro del conduttore attraversano spazi vuoti relativamente ampi, dove esistono altri elettroni spaziali « liberi » non vincolati agli atomi.

Allora si può immaginare che gli elettroni semiliberi i quali — animati dal proprio « spin » — corrono lungo il conduttore, « inciampino » negli altri elettroni e « arrotolandosi » provochino la formazione di minuscoli vortici elettronici. Questi si propagano agli elettroni circonvicini esistenti nello spazio dentro e immediatamente intorno al conduttore, finendo con l'interessare un notevole volume di spazio, tanto maggiore quanto più elevata è la loro energia. (Vedi anche il Cap. seguente).

Per analogia si pensi ad una veloce corrente d'acqua di un canale, che azioni una serie di ruote a palette — mulinelli — disposte lungo il suo corso come nella Fig. 37.

Del resto tutti avranno avuto occasione di notare i vortici (in questo caso di dimensioni macroscopiche) che una automobile in corsa al margine di una strada solleva in una banchina polverosa.

Ora, considerando quello che avviene in un piano normale al conduttore elettrico, troviamo che, in ciascuna delle singole circonferenze concentriche al filo, i minuscoli vortici adiacenti formeranno nell'insieme un anello toroidale dotato di proprietà magnetiche, secondo quanto detto nel paragrafo precedente. Si conferma perciò che una « linea di forza » magnetica viene a rappresentare l'asse di tali vortici elettronici contigui (Fig. 36).

In qualsiasi punto si interrompa idealmente detto anello, si troverà sempre una faccia Nord (quella guardando la quale il moto vorticale degli elettroni è nel senso orario) contrapposta ad una faccia Sud (quella dove il moto degli elettroni si presenta nel senso antiorario). Potremo allora concludere che si crea un magnete, o comunque si genera un'azione magnetica, tutte le volte che si riesce a provocare dei vortici elettronici: la polarità è determinata dal senso di rotazione degli elettroni, come sopra detto.

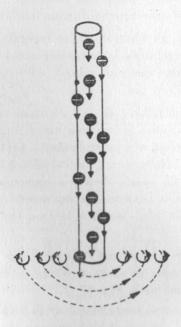


Fig. 36 — Gli elettroni che corrono lungo un conduttore determinano la formazione di vortici elettronici (accennati solo nella estremità inferiore della figura). Le linee di forza magnetiche (a tratti) sono disposte su un piano normale al conduttore.

Intorno ad un filo rettilineo percorso da corrente le linee di forza magnetiche — come si è detto all'inizio — sono circolari e concentriche. Tali linee diventano tanto più numerose (le circonferenze si espandono con raggio sempre maggiore) quanto più numerosi sono gli elettroni, e quanto più velocemente corrono, cioè in definitiva quanto più elevata è l'intensità della corrente e la tensione applicata al conduttore.

Si può anche dimostrare sperimentalmente che il moto degli elettroni può generare un campo magnetico, facendo passare velocemente, e ripetutamente, una carica elettrica vicino ad un ago calamitato. (Basta per questo che l'elemento isolato portatore della carica elettrica sia fatto ruotare rapidamente, disponendo l'ago vicino alla circonferenza descritta dalla carica).

L'ago — sospeso ad un filo — si muoverà accusando una azione magnetica.

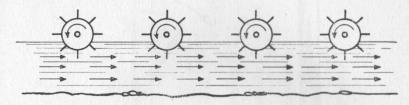


Fig. 37 — La corrente di un canale può far girare delle ruote a palette disposte lungo il suo corso. (Vista in sezione longitudinale).

Lo stesso effetto si ottiene se le cariche elettriche (elettroni) corrono lungo un reoforo, cioè un filo percorso da corrente (Fig. 38): si conferma che è il moto degli elettroni — questa volta convogliati nel filo — a generare il campo magnetico che fa muovere l'ago.

* * *

Tornando al conduttore percorso dalla corrente osserviamo che gli effetti magnetici che in pratica si sfruttano sono normalmente quelli prodotti non da un filo rettilineo isolato, nè da una sola spira, bensì da avvolgimenti con più spire pressochè parallele e vicine: si forma allora una bobina (o solenoide).

Il campo magnetico prodotto da una *spira* assume l'aspetto mostrato nella Fig. 39 a; quello prodotto da un *solenoide* l'aspetto della Fig. 39 b.

Una spira isolata si comporta come una lamina magnetica: un solenoide come una barra magnetica.

L'intensità del campo magnetico di un solenoide è determinata dal prodotto dell'intensità di corrente per il numero di spire esistenti nell'unità di lunghezza del solenoide: si misura in amperspira/metro oppure, più brevemente, in ampere/metro.

Chiamando L il coefficiente d'induttanza, ossia genericamente l'attitudine di un solenoide a convertire (e riconvertire) corrente elettrica in flusso magnetico, lo stesso solenoide potrà immagazzinare una quantità di energia elettromagnetica data da $W=\frac{1}{2}$ L I^2 . (Si può

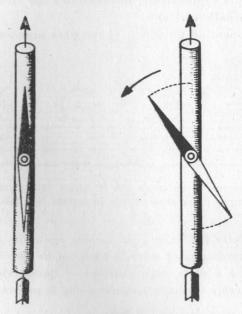


Fig. 38 — Se si dispone un ago magnetico vicino e parallelo ad un conduttore, al passaggio della corrente l'ago devia rivelando la nascita di un campo magnetico.

notare ancora una volta l'analogia con l'espressione dell'energia cinetica, già richiamata nel Cap. 7 trattando del condensatore).

In questo caso, confrontando le due espressioni si vede che alla massa che figura nell'energia cinetica corrisponde la induttanza elettromagnetica, la qual cosa conferma l'analogia dell'effetto di « inerzia » attribuito all'induttanza, come si vedrà meglio in seguito. Comunque, si può subito dire che l'induttanza provoca un « ritardo » all'aumento di corrente quando ai suoi terminali si applica istantaneamente una tensione.

La definizione del coefficiente L sarà data nel Cap. 11.

Per quanto abbiamo visto nel paragrafo precedente a proposito del magnete, diremo che la faccia Nord di questo solenoide, detto elettromagnete, è quella da cui le linee di forza escono (quella destra nella Fig. 39 b); la faccia Sud è quella in cui le linee entrano (quella sinistra nella figura).

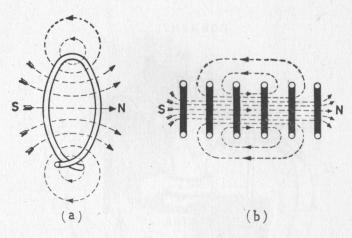


Fig. 39 — Campo magnetico prodotto da una spira (a) vista in prospettiva, e da un solenoide (b) visto in sezione.

Ponendo mente al senso convenzionale della corrente (opposto al senso di moto degli elettroni) vale la seguente regola mnemonicografica: si ha la faccia Sud dove la corrente circola nel senso delle frecce poste alle estremità della lettera S, cioè nel senso orario. (Analogamente per la faccia Nord riferendosi alla lettera N per il senso antiorario).

Anche nel caso della spira (o del solenoide) è valida altresì la regola della mano destra disposta all'esterno lungo il filo della spira e rivolta con la palma verso l'interno della spira stessa (Fig. 40).

E' valida pure la regola del cavatappi, la quale si può ora così applicare: immaginando di disporre il cavatappi lungo l'asse del solenoide e di girarlo nel verso della corrente, il senso delle linee di forza magnetiche sarà dato dal senso di avanzamento del cavatappi. Quanto ora detto circa il riconoscimento della faccia Nord (e della faccia Sud) di una spira, come riferimento al senso della corrente che vi circola, può sembrare a prima vista in contrasto con l'opposta conclusione alla quale si era giunti in precedenza quando si è attribuita la polarità magnetica ad un moto rotatorio vorticoso degli elettroni (magnetismo Nord se la rotazione è oraria, magnetismo Sud

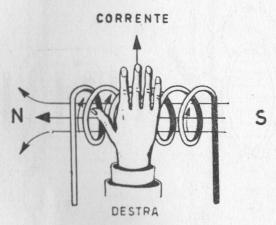


Fig. 40 — La regola della mano destra applicata ad un solenoide.

se è antioraria). Ma, a parte il fatto che si tratta di elementi di base diversi nei due casi, è anche da ricordare che il senso effettivo di moto degli elettroni lungo un filo percorso da corrente elettrica è opposto al senso convenzionale della corrente.

ph 1/4 1/4

A questo punto accenniamo al magnetismo terrestre per dire soltanto che la Terra si comporta come una enorme calamita il cui asse risulta poco discosto dall'asse di rotazione, sicchè i poli magnetici sono prossimi ai Poli geografici. Come in tutti i magneti, si possono immaginare esistenti linee di forza magnetiche che circondano la terra (con andamento simile ai meridiani ma in modo un pò irregolare) uscenti da una polarità ed entranti nell'altra.

E' secondo una di tali linee che si dispone l'ago magnetico della bussola, in un punto qualsiasi della Terra.

C'è quì da osservare che avendo definito come magnetismo nordi quello della punta dell'ago che si rivolge verso il Nord, è da concludere che il magnetismo esistente al Polo Nord magnetico è di segno contrario al predetto della punta nord dell'ago, ossia si tratta di un magnetismo sud.

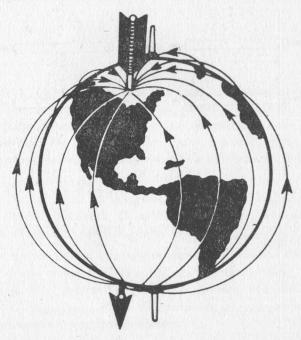


Fig. 41 — La Terra si comporta come una calamita, con magnetismo di « polarità sud » al Polo Nord, e magnetismo di « polarità nord » al Polo Sud.

Ciò non deve sorprendere: anzi viene a confermare quanto già detto sull'origine del magnetismo. Attribuendo infatti il magnetismo ad effetti di rotazione (rotazione che per la Terra può essere stata rapidissima alle origini) si verifica che la Terra ruota — guardando dall'alto il Polo Nord — nel senso antiorario, quello che precisamente determina la polarità sud.

Le linee di forza magnetiche che circondano la terra saranno quindi orientate come in Fig. 41: resta sempre rispettata la regola che le linee escono dalla polarità nord ed entrano nella polarità sud.

* * *

Gli elettromagneti si comportano in modo identico ai magneti, per quanto riguarda le azioni di attrazione e di repulsione.

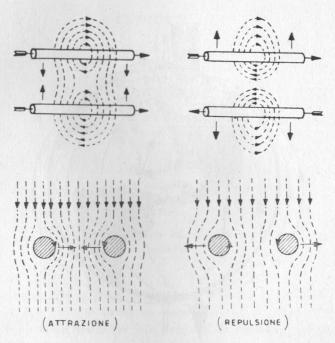


Fig. 42 — (In alto): Azioni di attrazione e di repulsione tra due conduttori vicini e paralleli percorsi da corrente elettrica. (In basso): Attrazione e repulsione tra due cilindri rotanti nell'aria (visti in sezione) per Effetto Magnus.

Azioni di attrazione e di repulsione si verificano anche fra due conduttori vicini percorsi da corrente, in conseguenza dei campi magnetici ad essi connessi, e per effetto dei vortici elettronici denunciati dalle linee di forza magnetiche.

Se i conduttori sono percorsi da correnti dirette nello stesso senso (Fig. 42 - alto), in modo che i vortici elettronici contigui ad assi paralleli (perpendicolari al piano del foglio) ruotino in senso contrario, si ha attrazione. Nel caso opposto si ha repulsione.

E' interessante notare ancora a questo proposito l'analogia aerodinamica presentata da due cilindri rotanti, vicini e paralleli: se i cilindri ruotano in senso contrario anche i vortici fluidi contigui che si generano alla loro superficie hanno senso contrario, e provocano in definitiva precisamente una attrazione tra i due cilindri (Figura 42 - basso). Se le rotazioni avvengono nello stesso senso si ha repulsione.

* * *

Il flusso magnetico, ossia l'intensità della magnetizzazione prodotta da una bobina percorsa dalla corrente, dipende — come già detto — dalla intensità della corrente e dal numero delle spire: il che era prevedibile. Ma l'intensità del flusso dipende anche e soprattutto dalla natura della materia che si trova nell'interno della bobina.

Infatti se nell'interno della bobina esiste materiale ferroso il flusso attraverso di esso, per la maggiore permeabilità magnetica del ferro rispetto all'aria, aumenta di molto, e con esso aumentano quindi gli effetti magnetici prodotti dalla bobina.

Ciò è da attribuire al maggior numero di vortici elettronici presenti nel ferro rispetto all'aria. Il che confermerebbe che anche i campi magnetici generati dai magneti permanenti sono dovuti agli elettroni del metallo, i quali determinano in seno al metallo stesso correnti molecolari vorticose orientate.

Tali correnti è da ritenere che esistano sempre nei materiali metallici, ma normalmente restano disordinate sicchè si neutralizzano a vicenda e non manifestano un effetto magnetico esterno. Soltanto i metalli magnetici hanno la proprietà di orientare tutte uniformemente le loro correnti molecolari quando si immergono in un campo magnetico.

Un'esperienza ci può far convinti di quanto ora affermato. Consideriamo una sbarretta di ferro sospesa circondata da una bobina nella quale si possa lanciare, mediante la scarica di un condensatore, una corrente istantanea (1/1000 di sec.) (Fig. 43). Alla chiusura

dell'interruttore si noterà una rotazione della sbarretta (accusata da un indice luminoso); la rotazione è dovuta all'impulso di precessione giroscopica conseguente all'orientamento contemporaneo dei vortici

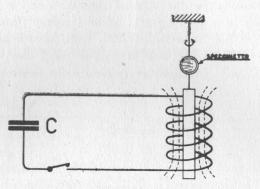


Fig. 43 — L'azione istantanea di «orientamento» contemporaneo delle correnti vorticose molecolari nel ferro, determinata dalla scarica nella bobina, fa ruotare la sbarretta. (Un raggio di luce incidente nello specchietto accusa la minima rotazione).

elettronici esistenti nel metallo. I vortici, prima disordinati, vengono infatti dalla corrente instantaneamente orientati tutti con i loro piani parallelamente all'asse della bobina. (Vedi anche Cap. 9).

* * *

La permeabilità magnetica (che, come già detto nel Cap. 9, si indica con la lettera μ) per l'aria si considera di valore 1 (e praticamente uguale all'aria è per le sostanze non magnetiche come il rame, lo alluminio, il legno, il cartone, ecc.); assume il valore di 600-1000 per la ghisa, di circa 4.000 per l'acciaio dolce, di 5.000 per il ferro.

Quando si magnetizza il ferro o l'acciaio mediante la corrente elettrica (per induzione) si osserva che la magnetizzazione del metallo non cresce uniformemente con il crescere dell'intensità della corrente e quindi del campo magnetico.

Cresce prima lentamente, poi più rapidamente fino ad un massimo che non si eleva più anche se si continua ad accrescere l'intensità della corrente inducente. Si dice allora che il metallo ha raggiunto la saturazione magnetica, il che può corrispondere all'avvenuto completo orientamento di tutte le infinite correnti molecolari nel metallo stesso.

Se a questo punto diminuiamo la corrente fino al valore zero, annullando quindi anche il campo magnetico, si nota nel ferro un comportamento differente da quello dell'acciaio.

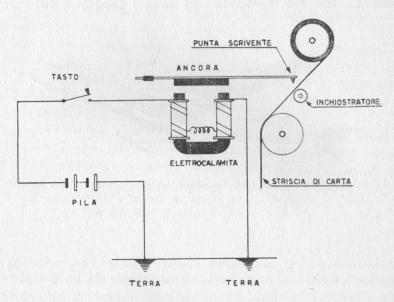


Fig. 44 — Schema elementare di un telegrafo: ad ogni passaggio di corrente l'elettrocalamita attira l'ancora e la punta scrivente preme sulla striscia.

Nel ferro all'annullarsi della corrente scompare praticamente tutto il magnetismo indotto; l'acciaio invece, particolarmente l'acciaio duro contenente una percentuale relativamente elevata di carbonio (circa l'1%), conserva permanentemente quasi tutto il magnetismo indottovi. Tale comportamento si definisce dicendo che l'acciaio presenta una maggiore forza coercitiva, oppure che nell'acciaio è maggiore l'isteresi magnetica.

Ciò è dovuto probabilmente ad una maggiore « viscosità » o inerzia delle correnti molecolari, che si verifica nello acciaio per la presenza delle molecole di carbonio insieme con le molecole di ferro.

In elettrotecnica le maggiori e più varie applicazioni si hanno per gli *elettromagneti* contenenti ferro dolce, appunto perchè questo si magnetizza e si smagnetizza quasi istantaneamente al passaggio e al cessare della corrente elettrica.

Tra le applicazioni più importanti e più comuni degli elettromagneti citiamo: il telegrafo, il campanello elettrico, gli interruttori automatici, ecc. Per il telefono vedi anche i Cap. 26 e 27.



Fig. 45 — I velivoli sono sostenuti da forze generate dagli invisibili vortici fluidi. Nella Figura un Boeing « 707 » pesante 112 ton. e capace di volare a 1000 Km/h.

Accenniamo quì al telegrafo dicendo soltanto che, nella sua più semplice espressione, è costituito essenzialmente da un circuito elettrico a corrente continua, nel quale sono inseriti un interruttore a tasto e una elettrocalamita che attira una puntina scrivente contro una striscia di carta scorrente con continuità (Fig. 44). Premendo il tasto si chiude il circuito e la puntina traccia una linea sulla striscia; rilasciandolo la corrente si interrompe e la linea pure.

Tratti di linea lunghi e brevi costituiscono rispettivamente le « linee » e i « punti », per mezzo dei quali sono rappresentate le lettere dell'alfabeto (alfabeto *Morse*) con cui si compongono i messaggi.

* * *

S'intende che un *elettromagnete* di grandi dimensioni può essere usato in pratica come una *gru*, per sollevare metalli ferrosi, ricavandone così direttamente un cospicuo lavoro materiale.

Può sorprendere a prima vista il fatto che senza alcun agente visibile si riesca ad esercitare degli sforzi meccanici anche rilevantissimi. Ma, come si è detto, attribuendo le attrazioni magnetiche ad azioni di « vortici elettronici », si può comprendere come il numero stragrande di tali vortici e la velocità enorme da cui sono animati possano produrre effetti materiali di imprevedibile potenza, allo stesso modo delle trombe d'aria, vortici fluidi, capaci di piegare travi di ferro come fuscelli, di sradicare alberi giganteschi, di smantellare palazzi, pur essendo costituiti da tenue impalpabile gas.

Nello stesso ordine di idee, si ricorda che anche la sostentazione aerodinamica, per mezzo della quale si sollevano in volo aeroplani del peso di centinaia di tonnellate, è dovuta all'effetto di vortici fluidi, infinitesimali e invisibili, producentisi sulla superficie alare alle elevate velocità. (Fig. 45).

Tale costatazione, e le altre analoghe frequentemente richiamate in questa trattazione, giustificano la presunzione che alla base dei fenomeni elettromagnetici si possa postulare l'esistenza di un *fluido* elettronico. (Vedi anche Cap. 11, Cap. 12, Cap. 22).

 L'autoinduzione elettromagnetica dovuta sempre ai vortici elettronici.

La legge di Lenz formulazione del principio di conservazione dell'energia.

L'induttanza come un volano.

L'attrito elettrico all'origine dell'elettromagnetismo.

Ricordiamo quanto detto al Cap. 10 sul campo magnetico che nasce intorno ad un conduttore percorso da corrente elettrica. Tale campo è dovuto — si è supposto — alle rotazioni elettroniche provocate dagli elettroni scorrenti nel filo, e può essere materializzato da linee di forza magnetiche concentriche al filo stesso.

Si è anche fatta l'analogia con una corrente liquida di un canale, che può far ruotare numerosissimi mulinelli aventi le palette immerse nella corrente (Fig. 37).

Supponiamo che inizialmente l'acqua del canale sia ferma e imprimiamo ad essa (per es. per mezzo di una pompa) un moto da sinistra verso destra. La corrente non assumerà istantaneamente la sua velocità di regime (si prescinde dalla inerzia massica propria dell'acqua) in quanto dovrà prima mettere in moto i mulinelli, spingendo le palette immerse nel liquido. Così si trasmetterà alle palette una parte della energia cinetica della corrente trasformandosi nel moto rotatorio dei mulinelli.

Quando poi interrompiamo il funzionamento della pompa la corrente liquida non si arresterà istantaneamente (si prescinde sempre dall'inerzia propria) ma continuerà ancora a fluire per un pò di tempo, in quanto e fino a quando i mulinelli ruoteranno per la loro inerzia meccanica, ritrasformando la loro energia rotatoria negli impulsi che le palette imprimono al liquido, e così determinando un breve prolungarsi del flusso di corrente.

Come si vede, è la presenza dei mulinelli e la loro inerzia rotatoria che spiega il fenomeno. Analogamente in un circuito elettrico a corrente continua contenente una bobina (costituente in questo caso l'induttanza), all'atto in cui si immette corrente — quando cioè si « chiude » il circuito — la corrente stessa non assume istantaneamente il suo valore di regime (Fig. 46) ma lo assume solo dopo un certo tempo (come se una nuova corrente di senso opposto la contrastasse).

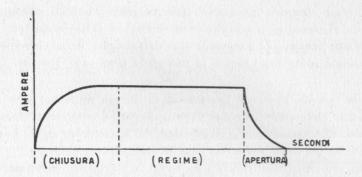


Fig. 46 — Diagramma della intensità di corrente che fluisce in un conduttore alla « chiusura » e alla « apertura » del circuito.

Ancora, dopo che si è stabilita nel circuito la corrente di regime, se interrompiamo il flusso di corrente — se cioè si « apre » il circuito — la corrente non cessa istantaneamente, ossia non cade di colpo a zero, ma si estingue gradualmente in un certo tempo (come se una nuova corrente dello stesso senso vi si aggiungesse).

Si può in proposito osservare che inizialmente, alla « chiusura » del circuito, parte dell'energia elettrica va in realtà spesa per la creazione del campo magnetico e perciò non fluisce come corrente. Durante la creazione del campo magnetico si può immaginare che si generi una corrente autoindotta, dovuta all'azione dei vortici elettronici che attraversano la sezione del conduttore: questi vortici con i loro impulsi inducono gli elettroni « semiliberi » a muoversi lungo il conduttore, cioè provocano una corrente, il cui senso è tale da opporsi al deflusso degli elettroni determinato nel conduttore stesso dalla tensione applicatavi (la normale corrente).

(Rispetto agli infinitesimali vortici elettronici la sezione del conduttore risulta di dimensioni enormi).

All'apertura del circuito, la corrente supplementare fluente nel conduttore ancora una volta è una corrente autoindotta, generata per la rapida variazione (ora diminuzione) del campo magnetico che passa dal valore di regime al valore zero quando si interrompe la corrente primaria.

Si può ancora dire che in tale ultima fase il campo magnetico creato all'inizio si distrugge, cioè i vortici elettronici esauriscono la loro energia rotatoria generando una corrente elettrica autoindotta, restituita al circuito a compenso di quella sottratta prima per creare il campo stesso. (Si prescinde qui dall'energia della corrente inevitabilmente spesa per vincere la resistenza ohmica e dissipata in calore).

Tale seconda corrente autoindotta è dovuta anch'essa al riattraversamento del conduttore da parte dei vortici elettronici formatisi all'inizio, che imprimono agli elettoni del conduttore degli impulsi, questa volta nel senso della corrente, prolungandone il flusso.

Una giustificazione del fenomeno ce la dà infine, direttamente e sinteticamente, la legge di Lenz (Emilio Lenz, fisico russo, 1804-1865) così enunciata in generale:

Quando si produce energia (per es. corrente elettrica) il senso della forza-effetto che ne deriva è tale da opporsi alla forza-causa che l'ha generata.

Tale legge costituisce una formulazione con altre parole del noto principio della conservazione dell'energia, secondo il quale non si può mai creare energia dal nulla, ma soltanto col trasformare altra energia.

Nel caso in esame si considera quale causa la variazione di flusso magnetico attraverso al conduttore percorso da corrente: l'effetto è la comparsa di una corrente autoindotta nel conduttore stesso.

E poichè alla chiusura del circuito la corrente primaria nel conduttore è in aumento (da zero al valore di regime), e con essa è in aumento il flusso magnetico, la corrente autoindotta sarà tale da opporsi all'aumento della corrente e del flusso; da ciò il ritardo con cui la corrente primaria raggiunge il valore di regime (Fig. 46).

L'opposto succede all'apertura del circuito.

Le correnti secondarie sopra definite, che si producono sempre in un circuito elettrico, si chiamano dunque correnti di autoinduzione o autoindotte. (Sono state talvolta denominate extra corrente di chiusura ed exstra corrente di apertura).

* * *

Dopo quanto si è detto si può anche concludere genericamente che una induttanza in un circuito elettrico svolge la funzione analoga a quella di un volano in un meccanismo rotatorio: immagazzina cioè energia, sotto forma di energia magnetica quale è quella contenuta nei vortici elettronici, e poi la restituisce al cessare della corrente primaria.

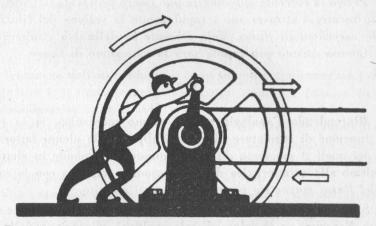


Fig. 47 — L'energia magnetica contenuta nei « vortici elettronici » è paragonabile alla inerzia meccanica di un volano materiale.

Così in una macchina come quella della Fig. 47, quando si applica una forza alla manovella per azionare, per es. una mola attraverso una cinghia, parte dell'energia all'inizio va spesa per mettere in moto il volano. Questo volano, assunto che abbia la velocità di regime, anche se si abbandona la manovella continua per inerzia a girare per un certo tempo, trascinando la cinghia che a sua volta continuerà a far girare la mola.

Nel caso della corrente, come sopra detto l'inerzia è rappresentata, anzichè da una massa materiale in rotazione, dalle innumere voli rotazioni elettroniche (vortici elettronici) i cui assi sono individuati dalle linee di forza magnetiche del campo costituenti la induttanza.

Si ripete che tali vortici sono prodotti nella fase iniziale dalla corrente primaria del conduttore. Nella fase finale, dopo l'interruzione della corrente primaria, si può immaginare che essi non scompaiano istantaneamente ma continuino a ruotare come mulinelli infinitesimali, esaurendo la loro energia col fornire degli impulsi agli elettroni lungo il filo: determinano così un prolungarsi della corrente (come avveniva con i mulinelli a palette nel caso della corrente liquida).

E' da ritenere che per « attivare » gli elettroni del conduttore occorrano numerosissimi « impulsi » ripetuti a brevissimi intervalli.

Perciò la corrente autoindotta può essere provocata dai vortici soltanto mentre « attraversano » rapidamente la sezione del filo durante le variazioni di flusso. Tale corrente in definitiva risulterà tanto più intensa quanto più rapida sarà la variazione di flusso.

* * *

Riprendendo l'analogia con il volano meccanico, si sa che la sua funzione di regolatore di velocità dipende da alcuni fattori, primo dei quali il momento d'inerzia: questo corrisponde in elettromagnetismo alla caratteristica detta induttanza, connessa con la intensità del flusso magnetico concatenato con il circuito.

Si sa poi che in un volano la rapidità con cui si raggiunge la velocità di regime, e il valore di tale velocità, dipendono dalla forza (pressione) applicata alla manovella: questa pressione corrisponde alla f.e.m. (tensione elettrica) applicata. Vale anche la reciproca.

Analogamente nella induttanza, al variare della corrente primaria, quanto maggiore e quanto più rapida sarà la variazione del flusso magnetico tanto più elevata sarà la tensione autoindotta e quindi la corrente autoindotta nel circuito.

Nel Cap. 10 è stato definito qualitativamente il coefficiente di induttanza L di un solenoide. Ora precisiamo che esso si denomina coefficiente di autoinduzione e viene riferito alla variazione di corrente che provoca una tensione e quindi una corrente indotta.

Il coefficiente di autoinduzione L è misurato dal rapporto tra l'impulso di tensione indotto (in volt secondi) e la variazione della corrente (in ampere).

L'autoinduzione (come pure la mutua induzione tra due circuiti) si misura in unità hènry (Giuseppe Henry, fisico statunitense, 1797-1878).

Si dice che l'induttanza di un circuito ha il valore di un henry quando, variando la corrente che la percorre di un ampere al secondo, vi si manifesta la f.e.m. di un volt.

(Invece di henry si può parlare di volt secondi/ampere).

In pratica si usano i sottomultipli di detta unità, quali il millihenry che è eguale ad un millesimo di henry, e il micro-henry eguale ad un milionesimo di henry. Una bobina con 1000 spire, della superficie di 1 cmq, ha una induttanza di 130 micro-henry.

* * *

Il fenomeno dell'autoinduzione (e in generale dell'induzione) elettromagnetica è di fondamentale importanza, come già detto, e merita delle considerazioni particolari.

La generazione dei vortici elettronici è da ritenere causata dallo attrito elettrico, cioè dagli « inciampi » che incontrano gli elettroni nel loro deflusso lungo un conduttore, per la presenza degli altri elettroni e degli atomi materiali (come detto al Cap. 10).

Valga l'analogia con l'attrito solido, attraverso l'esempio seguente.

Quando si spinge un rullo, con forza costante, sopra un piano che presenta attrito, il rullo comincia a rotolare, appunto per causa dell'attrito, e all'inizio si verifica un ritardo nel conseguire la velocità di traslazione che al rullo compete in relazione alla forza applicata.

Al cessare della spinta — a prescindere dall'inerzia di massa e dalla velocità di traslazione assunta — per l'inerzia rotatoria acquisita il rullo continua a rotolare prolungando perciò la sua corsa, cioè in definitiva il suo moto di traslazione.

Si consegue così alla fine un ricupero dell'energia spesa all'inizio per vincere l'attrito presentato dal piano. (Si prescinde in questo ragionamento anche dalla parte di energia che va inevitabilmente spesa in calore, quale diretta conseguenza dell'attrito).

E' noto del resto che sul principio ora esposto è basato il trasporto a ruote, applicato alla serie innumerevole dei veicoli terrestri. (Sull'attrito sono pure basati i sistemi di trasmissione dell'energia meccanica mediante cinghie). La stessa analogia vale per l'attrito fluido, con la relativa vorticosità dei fluidi (aria e acqua), fenomeno sul quale è basata la propulsione ad elica e la portanza alare dei velivoli.

Tornando all'attrito elettrico e alla connessa vorticosità elettronica alla quale esso dà origine, come visto in precedenza, è da dire che tale vorticosità, manifestantesi nei fenomeni dello elettromagnetismo, costituisce il fondamento delle macchine elettriche, delle quali tratteremo nei Capitoli successivi.

* * *

Rileviamo ora che per effetto di una corrente comunque variabile in un circuito, si verifica sempre, in un circuito vicino che sia interessato dalla rapida variazione del flusso magnetico prodotto dall'altro, il fenomeno della mutua induzione.

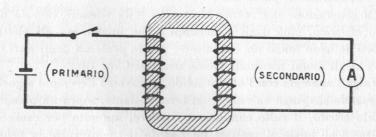


Fig. 48 — Il fenomeno della mutua induzione tra due circuiti « concatenati ».

Consideriamo per es. due circuiti distinti e separati, che abbiano però in comune un nucleo magnetico sul quale entrambi sono avvolti (Fig. 48). Il valore del coefficiente di mutua induzione (M), relativo ad un circuito accoppiato con un altro, dipende dalla posizione reciproca dei circuiti e dalla presenza di materiale magnetico.

I circuiti così fatti si dicono magneticamente concatenati.

Il primo colleghiamolo ai morsetti di una pila e chiamiamolo circuito *primario*; l'altro sarà il circuito *secondario*.

Nel momento in cui chiudiamo l'interruttore del circuito primario si determina intorno al circuito stesso — come sappiamo — una rapida variazione di flusso magnetico, che passa dal valore zero al valore corrispondente al regime normale della corrente.

Poichè la stessa variazione di flusso interesserà — attraverso il nucleo di ferro — il circuito secondario, si genererà in questo una corrente indotta (rivelata dall'amperometro A) che dura soltanto per il brevissimo tempo intercorrente tra la chiusura dell'interruttore e lo stabilirsi della corrente di regime nel primo circuito.

(Il fenomeno si ripete, in senso inverso, alla apertura dell'interruttore del circuito primario).

Per quanto detto in precedenza, sono i vortici elettronici, propagantisi rapidamente nello spazio in seguito alla variazione di corrente nel circuito primario, ad « attivare » con i loro impulsi gli elettroni del conduttore secondario nel momento in cui l'attraversano, determinando in esso un flusso di corrente.

(C'è anche da osservare che la corrente indotta che circola — sia pure per brevissimo tempo — nel secondario, determina a sua volta una variazione di flusso magnetico nel nucleo, e conseguentemente induce una debole corrente indotta nel primario, corrente che avrà sempre senso opposto a quello della corrente originaria, per la legge di Lenz prima ricordata).

Tale fenomeno di influenza reciproca dei due circuiti concatenati, denominato appunto di *mutua induzione*, assume una importanza grandissima nelle correnti alternate, di cui si dirà appresso (Cap. 15 e Cap. 16).

Infatti, se nel circuito primario circola una corrente alternata, in esso la rapida variazione di corrente, e conseguentemente del flusso magnetico, non si verifica soltanto alla chiusura e all'apertura del circuito, ma avviene istante per istante come intensità, e ad ogni alternanza come senso, interrompendosi la corrente alternata due volte in ogni ciclo (una corrente industriale ha una frequenza di 50 cicli al minuto secondo).

Allora nel circuito secondario sarà « indotta » una corrente, anch'essa variabile e alternata con la stessa frequenza della primaria. 12 — Gli elettroni sono deviati da un campo magnetico e possono compiere un lavoro meccanico. Ancora analogie aerodinamiche che autorizzano infine a parlare di fluido elettronico.

Schema elementare del motore elettrico.

Esaminato il fenomeno della creazione di un campo magnetico ad opera di una corrente elettrica, vediamo ora subito l'effetto che un campo magnetico ha su una corrente.

Immaginiamo di disporre una calamita come in Figura 49 e di dirigere un sottile fascio di elettroni verso il campo magnetico esistente tra i due poli della calamita, campo materializzato da linee di forza dirette verso l'alto.

Si osserverà che il fascio elettronico viene deviato verso sinistra ad angolo retto, in una direzione che risulta normale sia alla direzione primitiva del fascio sia alle linee di forza del campo magnetico.

Possiamo spiegarci il fenomeno ricordando quanto detto in precedenza allorchè si è attribuito il magnetismo ad una rotazione di elettroni e si sono considerate le linee di forza magnetiche come materializzazioni di assi di vortici elettronici.

Nella Figura 49 ciascuna linea di forza magnetica rappresenta infatti un asse di rotazione elettronica (rotazioni che, viste dall'alto, si proiettano su un piano orizzontale e appaiono dirette in senso orario).

Un elettrone proveniente dalla destra del magnete, appena si imbatte in questi vortici elettronici, rotanti come tanti infinitesimali mulinelli a palette, riceve un impulso che lo fa deviare verso sinistra rispetto alla sua direzione primitiva, restando nel piano orizzontale.

Il fenomeno si può rendere in grande materialmente visibile facendo scoccare l'arco voltaico in un campo magnetico, essendo l'arco voltaico costituito proprio da un flusso di elettroni diretto dal carbone negativo verso il carbone positivo (al solito in senso opposto a quello convenzionale della corrente). Se gli elettroni invece di fluire nello spazio scorrono dentro un filo conduttore libero di muoversi subiscono ugualmente la sollecitazione a deviare verso sinistra, ed allora è tutto il filo che si sposta verso sinistra parallelamente a sè stesso (Fig. 50 a).

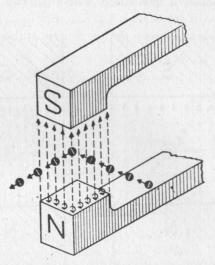


Fig. 49 — Il fascio di elettroni diretto da destra verso sinistra viene deviato da un campo magnetico. (Gli elettroni ricevono un impulso deviante ad opera dei vortici esistenti nel campo magnetico, i cui assi sono materializzati dalle linee di forza magnetiche).

Allo stesso risultato si giunge se si ragiona soltanto in termini di linee di forza, considerando insieme alle linee del campo magnetico della calamita anche le linee di forza magnetiche che circondano il conduttore. Combinando i due campi magnetici, come si vede nella Fig. 50 (b), il campo magnetico risultante è tale da spingere il filo nel senso indicato dalla freccia. Il che appare convicente se si ricorda che le linee di forza sono state assimilate ad elastici tesi che hanno tendenza ad accorciarsi: in seguito a questa tendenza esse spingono allora il filo verso sinistra.

Il senso di spostamento del conduttore, rispetto al senso convenzionale della corrente, è indicato dalla « regola delle tre dita della mano sinistra »: disposte a triedro trirettangolo (Fig. 51) le prime tre

dita della mano sinistra, con il medio diretto nel senso convenzionale della corrente, e l'indice nel senso delle linee di flusso del campo magnetico, il pollice indicherà il senso secondo cui si sposterà il conduttore, cioè il senso della forza che sposta il filo.

Anche in questo caso può essere richiamata una analogia aerodinamica, precisamente il già citato « effetto Magnus »: un cilindro

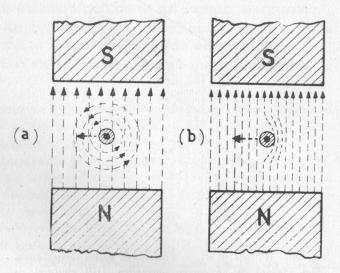


Fig. 50 — Un conduttore percorso da corrente viene spostato da un campo magnetico. (Nella figura il conduttore si vede in sezione; il senso convenzionale della corrente è verso l'avanti; il filo si sposterà verso sinistra). In (a) le linee di forza magnetiche della calamita e del conduttore sono separate; in (b) sono fuse.

rotante, investito lateralmente da una corrente fluida subisce per azione aerodinamica uno spostamento, in direzione normale al flusso e in senso opposto alla rotazione del cilindro (Fig. 51). Volendo applicare anche per tal fenomeno la regola delle tre dita della mano sinistra bisogna far corrispondere al vettore « corrente elettrica » un vettore rappresentante il senso di rotazione del cilindro (nel caso della Figura un vettore rivolto dall'indietro verso l'avanti, per il senso orario); al senso del flusso magnetico il senso del flusso aereo; il senso di spostamento del cilindro (nel caso della Figura verso sinistra) corrisponderà al senso di spostamento del conduttore elettrico.

Si nota quì che lo stesso effetto sopra ricordato per il cilindro rotante si ha con un'ala di determinato « profilo », investita da corrente aerea oppure avanzante nell'aria in modo da determinare una corrente « relativa » stabile sulla sua superficie. Su tale fenomeno è basata la portanza alare, cioè in definitiva l'aviazione.

In base alle considerazioni che siamo venuti facendo in questi ultimi paragrafi si può dire che in fin dei conti la concezione dell'elettricità come « fluido » non è poi da condannare del tutto, quando

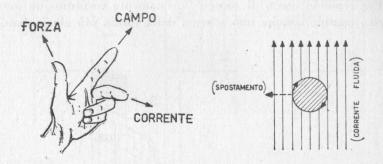


Fig. 51 — (A sinistra): Disposizione delle dita a triedro per l'applicazione della «regola della mano sinistra». (A destra): Un cilindro rotante investito lateralmente da una corrente fluida subisce uno spostamento in direzione normale alla corrente (Effetto Magnus).

si riguardino i fenomeni elettromagnetici quale conseguenza del moto vorticoso degli elettroni. Naturalmente si tratta non di vortici molecolari più o meno macroscopici come nei comuni fluidi, bensì di invisibili e immateriali vortici elettronici: ma, come si è notato, l'analogia con i moti vorticosi fluidi appare più che plausibile.

(La concezione della esistenza di un *fluido elettronico spaziale* sarà ripresa nel seguito della trattazione, e nel Cap. 22 si parlerà di un vero e proprio *etere cosmico*).

Abbiamo ora constatato uno dei più importanti fenomeni dello elettromagnetismo: la possibilità di far muovere un conduttore percorso da corrente, cioè di produrre un lavoro, per azione di un campo magnetico statico sulla corrente elettrica.

Il fenomeno ora descritto è infatti quello su cui sono basati i motori elettrici, i quali nella tecnica moderna hanno avuto una così

estesa diffusione da caratterizzare la civilità meccanica e il modo di vita di tutta la nostra epoca: innumerevoli e svariate ne sono le utilizzazioni, non soltanto di carattere industriale, ma perfino domestiche, che vanno notoriamente dal frigorifero all'aspirapolvere, dal frullino al rasoio elettrico.

* * *

Per renderci conto di come è intimamente costituito un motore elettrico consideriamone uno schema della forma più elementare.

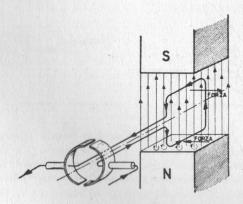


Fig. 52 — Schema elementare di un motore elettrico costituito da una sola spira in campo magnetico. (Le frecce sulla spira indicano il senso del flusso degli elettroni). I segmenti metallici semicilindrici costituiscono il commutatore; i bastoncini di carbone a contatto con essi sono le spazzole.

Nel campo magnetico uniforme esistente tra le due espansioni polari di un magnete poniamo una *spira* che possa ruotare intorno ad un asse mediano contenuto nel piano della spira stessa (Figure 52 e 52 bis).

Se la spira è disposta, come in figura, con il piano parallelo alle linee di forza magnetiche, al passaggio della corrente il filo inferiore è sollecitato a spostarsi verso sinistra mentre il filo superiore è sollecitato a spostarsi verso destra. Essendo imperniata al centro la spira ruoterà allora di un quarto di giro fino a disporsi perpendicolarmente alle linee di forza magnetica. In tale posizione (a) le forze agenti sui fili risultano sul piano dell'asse di rotazione e perciò non producono più alcun movimento. (Il piano mediano parallelo ai poli si denomina piano neutro).

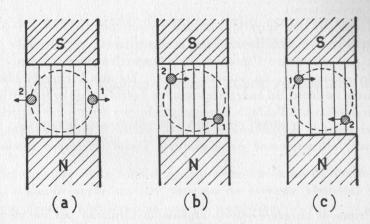


Fig. 52 bis — Le fasi di rotazione della spira in un motore elementare. (Vista schematica in sezione).

Ma supponiamo che la spira superi per inerzia — come avviene facilmente — il punto morto predetto (b). Se allora, mentre la spira si trova nella posizione b, invertiamo il senso della corrente, il filo più basso sarà sollecitato a spostarsi verso sinistra e il filo più alto verso destra, in senso cioè favorevole alla continuazione della rotazione, sicchè la spira raggiungerà ancora una posizione trasversale di punto morto e potrà superarla per inerzia, dopo di che, in c, si inverte nuovamente la corrente e il ciclo ricomincia e si ripete.

L'inversione della corrente avviene per mezzo di un commutatore costituito da due semianelli, ciascuno collegato con un capo della spira, che ruotano a contatto strisciante con i cilindretti di carbone (spazzole) portatori della corrente (derivata dai poli di un generatore elettrico).

Ad ogni semigiro il semianello che era a contatto con il carbone positivo viene a contatto con il carbone negativo, e viceversa l'altro anello. Cosicchè ad ogni semigiro si inverte il senso della corrente nella spira, come si desidera per realizzare la rotazione continua. (Vedi anche Cap. 14).

In pratica i motori elettrici si fanno molto più complessi, per creare potenze rilevanti e per conseguire il massimo rendimento.

Il campo magnetico in cui ruotano le spire è generalmente prodotto da un elettromagnete, anzichè da una semplice calamita, e si alimenta l'elettromagnete con la stessa corrente che si fa circolare negli avvolgimenti.

Invece di una spira si adottano sempre moltissime spire in più avvolgimenti, e nell'interno degli avvolgimenti si introduce ferro dolce per aumentare l'intensità del campo magnetico.

In conclusione, un motore elettrico trasforma energia elettrica (elettroni in moto) in energia meccanica (avvolgimenti rotanti): agente intermediario è l'energia magnetica, che per effetto dei vortici elettronici provoca il frenamento per « deviazione » degli elettroni della corrente, ottenendosene come risultato finale un lavoro meccanico.

* * *

Prima di chiudere questo argomento torniamo per un momento alla semplice spira elementare di Fig. 52 per dire che un dispositivo del genere, con l'aggiunta di una molla di contrasto, costituisce il fondamento di molti strumenti per le misure elettriche.

La molla è disposta sull'asse dell'avvolgimento, e tende a riportare nella posizione iniziale la spira quando si sposta. Al passaggio di una corrente nella spira questa, come si è visto, ruota, per es. verso destra. La molla si oppone al movimento, e allora la spira si arresta in una posizione di equilibrio, spostata di un settore angolare proporzionale all'intensità della corrente che la percorre.

Negli strumenti, alla spira è collegato un indice che ruota in un quadrante dove, mediante opportune tarature, viene scritto direttamente il numero degli ampere, per es., della corrente della quale si misura l'intensità. Abbiamo così costruito un amperòmetro (o ampèrmetro), del quale si è già trattato nel Cap. 6.

Quando sono in gioco correnti molto deboli lo strumento sopra descritto prende il nome di galvanòmetro (Luigi Galvani, fisico italiano, 1737-98).

13 — La generazione dinamica della corrente elettrica. L'energia magnetica intermediaria tra il lavoro meccanico e la corrente.

Dinamo e motore elettrico come ventilatore e aeromotore.

Correnti parassite talvolta sfruttate.

Nel Capitolo precedente si è visto come un fascio di elettroni in moto, e quindi anche un filo percorso da corrente elettrica, viene spostato quando attraversa un campo magnetico.

Con perfetta reciprocità si verifica il fenomeno inverso e cioè: spostando un filo metallico attraverso un campo magnetico si produce nel filo un moto di elettroni ossia una corrente elettrica.

Per rendersi bene conto del fenomeno conviene riguardare la Figura 49 e la Fig. 50.

Consideriamo un filo metallico, al posto del fascio di elettroni in moto da destra verso sinistra, restando immutate le polarità N e 5 del magnete.

Immaginiamo di spostare rapidamente il filo verso l'avanti del magnete, parallelamente a se stesso, in modo da tagliare un certo numero di linee di forza magnetica. Chiudendo il filo in circuito su un galvanometro si rileverà, solo durante il movimento, un passaggio di corrente attraverso il filo.

Mediante il movimento di un conduttore attraverso un campo magnetico si riesce così a *indurre* (cioè a far muovere) una corrente elettrica nel conduttore.

Ricordando quanto detto nel Capitolo 12 per spiegare la deviazione degli elettroni, possiamo renderci conto di come ciò avvenga.

Sappiamo che in un filo metallico esistono molti elettroni semi liberi disposti a muoversi con facilità: quando il filo si sposta trasversalmente viene allora ad incontrare, in corrispondenza di ogni linea di forza magnetica che taglia, tanti vortici elettronici: questi vortici, similmente a mulinelli a palette, forniscono una serie di impulsi successivi agli elettroni, accelerandoli e inducendoli a muoversi lungo il filo. (Vedi anche Cap. 11).

Il complesso di tali innumerevoli ripetuti impulsi che ricevono gli elettroni del filo provoca in definitiva nel filo stesso un flusso continuo di elettroni da sinistra verso destra, cioè una corrente elettrica.

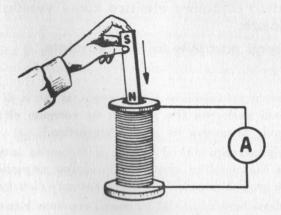


Fig. 53 — All'atto dell'introduzione del magnete dentro il rocchetto si nota passaggio di corrente nell'amperometro (A).

Di impulsi ne occorre certo un numero grandissimo, per mettere in moto con continuità gli elettroni; perciò è necessario interessare nello spostamento del filo moltissimi vortici elettronici.

Il numero degli impulsi ovviamente sarà, nel tempo per es. di un secondo, proporzionale al numero delle linee di forza tagliate, (cioè dei vortici elettronici incontrati). L'intensità della corrente provocata nel filo sarà allora proporzionale alla rapidità di spostamento del filo e alla intensità del campo magnetico attraversato (maggiore intensità vuol dire ovviamente maggiore numero di linee di forza presenti per unità di superficie).

Tenendo presente la conclusione, possiamo anche esprimerci in altro modo, considerando il circuito completo di cui fa parte il filo,

ed osservando che durante lo spostamento varia il flusso magnetico attraversante il circuito, cioè il flusso concatenato col circuito. Si può allora affermare che si verifica passaggio di corrente in un circuito tutte le volte che si fa comunque variare il flusso magnetico che l'attraversa. (Si ripete che la corrente dura soltanto per il tempo della variazione).

Così anche in una bobina immobile, i cui capi siano collegati ad un galvanometro, si rileverà passaggio di corrente semplicemente introducendo nell'interno della bobina un magnete, e soltanto nell'atto dell'introduzione. (Fig. 53).

Si rileva ancora passaggio di corrente, questa volta in senso inverso al precedente, nell'atto in cui si estrae il magnete dalla bobina.

A questo punto notiamo che l'autoinduzione (di cui si è trattato al Cap. 11) costituisce un caso particolare dell'induzione derivante dal « taglio » delle linee di forza magnetiche, in quanto la corrente autoindotta che si genera nel filo (le cui dimensioni risultano enormi rispetto ai vortici elettronici) è sempre dovuta al fatto che il filo stesso viene tagliato dalle linee di forza magnetiche: da quelle che si formano e si espandono all'atto della chiusura, e da quelle che si riconcentrano e si annullano all'atto della apertura del circuito.

In tutti i casi sopra citati si origina dunque nel conduttore una forza elettro motrice (f.e.m.) indotta, con relativa corrente indotta se il filo si chiude in circuito.

* * *

Per conoscere il senso della f.e.m., o della corrente, che si genera in un conduttore che taglia un flusso magnetico vale la regola delle tre dita della mano destra: se si dispongono a triedro trirettangolo le prime tre dita della mano destra, con il pollice diretto nel senso del moto del conduttore e l'indice nel senso delle linee di forza del campo, il medio indicherà il senso della corrente generata nel filo. (Fig. 54).

C'è un altro sistema per conoscere la direzione della corrente indotta, ed è quello indicato dalla già ricordata Legge di Lenz, che si può ora enunciare nelle seguenti due equivalenti formulazioni:

- 1 In un conduttore mobile che attraversa un flusso magnetico si genera una corrente indotta il cui senso è tale da opporsi (con il nuovo flusso magnetico che la corrente produce) al movimento che la genera;
- 2 In un circuito nel quale si determina una variazione di flusso magnetico si genera una corrente indotta il cui senso è tale da opporsi (con il nuovo flusso magnetico che essa produce) alla variazione di flusso che la genera.

Allora, se — come prima accennato — in una bobina introduciamo il polo *Nord* di un magnete (Fig. 53) nascerà nella bobina una corrente il cui senso è tale da determinare nella sua faccia su-

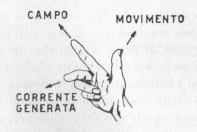


Fig. 54 — Disposizione a trirettangolo delle tre dita per la regola delle « tre dita della mano destra ».

periore una polarità pure Nord, che eserciterà un'azione di repulsione verso il magnete, in modo da opporsi al movimento che provoca la corrente.

Se così non fosse, se cioè si creasse nella faccia superiore della bobina una polarità Sud, anzichè Nord, l'avvicinarsi del magnete sarebbe favorito (attrazione) anzichè ostacolato, e in definitiva si verrebbe a creare dell'energia (la corrente elettrica) senza dispendio di altra energia: il che non è ammissibile e non si verifica mai, nelle macchine di qualsiasi genere.

Il fenomeno dell'induzione elettromagnetica è di fondamentale importanza in quanto ha consentito con i generatori dinamici la produzione economica di correnti elettriche di qualsivoglia intensità, e in conseguenza l'impiego imponente ed esteso di energia elettrica per gli usi più svariati.

(Prima dei generatori dinamici non c'era che la pila in grado di produrre corrente elettrica, in quantità irrisorie e per limitatissimi usi).

* * *

Il principio su cui è basato un generatore dinamico è reso evidente dall'esame della Fig. 52, la stessa che è servita per illustrare il principio del motore elettrico.

Questa volta dovremo spendere energia meccanica per imprimere un movimento di rotazione (per es. verso destra) alla spira intorno al suo asse. Collegando i due carboni ad un galvanometro osserveremo che, durante la rotazione, nella spira e quindi nel circuito passa corrente (di senso inverso a quello indicato nella Figura, in base alla legge di Lenz).

La corrente si invertirà nella spira ad ogni mezzo giro, ma se desideriamo produrre corrente continua, un commutatore a contatti striscianti (Fig. 53) provvederà al momento opportuno ad immetterla nel circuito utilizzatore facente capo alle spazzole, in modo che vi circoli sempre nello stesso senso.

Si osserva subito che durante il giro, pur mantenendo una velocità angolare (di rotazione) costante, la spira non taglia, in tempi uguali, lo stesso numero di linee di forza. Ne taglierà il massimo quando è in posizione prossima alla verticale (posizione a della Fig. 52 bis); il minimo quando è in posizione prossima alla orizzontale.

In conseguenza, anche la corrente prodotta, per quanto risulti continua come senso, sarà di intensità variabile, e precisamente apparirà del tipo pulsante, con un massimo ed un minimo ad ogni giro della spira (un giro = 2π).

In pratica i generatori non presentano tale difetto, poichè si fanno con avvolgimenti multipli, opportunamente sfalsati l'uno rispetto all'altro (ciascuno con un proprio commutatore) in modo che la corrente raccolta alle spazzole diventi praticamente uniforme.

Come nei motori, anche nei generatori si mette ferro nell'interno degli avvolgimenti, per rendere più intenso il campo magnetico.

Il generatore elettrico trasforma dunque energia meccanica (rotazione di avvolgimenti) in energia elettrica (movimento di elettroni nei fili): agente intermediaria è ancora l'energia magnetica che, per

effetto dei vortici elettronici, provoca un acceleramento degli elettroni contenuti nei fili, ottenendosene in conseguenza appunto una corrente elettrica. Questa volta si spende energia meccanica per accelerare in definitiva gli elettroni e farli fluire come corrente.

Da quanto finora detto si desume che un motore elettrico a corrente continua è perfettamente reversibile e può funzionare anche da

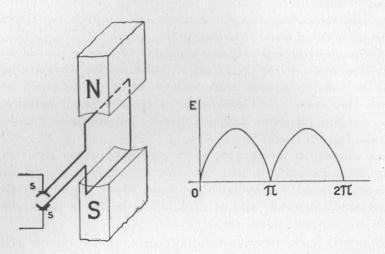


Fig. 55 — Schema di dinamo elementare ad una sola spira (a sinistra) con il diagramma della corrente da essa prodotta (a destra). (Le spazzole della dinamo, appoggiate ai contatti del commutatore, sono indicate con s s).

generatore (dinamo) se ad esso viene fornita corrente. Nel primo caso il motore trasforma energia elettrica in energia meccanica, nel secondo la stessa macchina, funzionando da dinamo, trasforma energia meccanica in energia elettrica. (Vedi anche Cap. 15).

Non è difficile trovare in proposito analogie di ordine fluido meccanico. Si può pensare per esempio al confronto tra un aeromotore ed un ventilatore: il primo trasforma una corrente aerea in energia meccanica, il secondo trasforma energia meccanica in corrente aerea.

* * *

Abbiamo ora parlato della corrente che si genera nel filo conduttore di un circuito, mobile in un campo magnetico. Se invece del filo conduttore si tratta di un corpo massiccio, comunque non filiforme, ma sempre metallico (come per es. un disco di rame) gli elettroni vengono ugualmente sollecitati a muoversi ma, non trovando come nel filo una via ben tracciata e definita che li convogli tutti in una stessa direzione, finiscono con il circolare in spazi ristretti formando tanti piccoli circuiti chiusi, nell'interno della massa metallica.

In questi piccoli circuiti chiusi vengono allora a circolare innumerevoli correnti indotte che producono come effetto essenziale il solito inevitabile riscaldamento del metallo.

Dette correnti sono denominate parassite o di Foucault (Leone Foucault, fisico francese, 1819-1868).

In particolare, se il disco si fa ruotare tra le espansioni polari di un elettromagnete, in base alla legge di Lenz le correnti parassite avranno un senso tale da determinare, nelle zone del disco che si avvicinano o si allontanano rispetto ai poli del magnete, polarità omonime od eteronime rispettivamente, in modo sempre da opporsi alla rotazione del disco. Ciò è messo facilmente in evidenza dal fatto che ruotando a mano il disco, quando non passa corrente nell'elettromagnete non si incontra alcuna resistenza (salvo quella minima di attrito dei perni). Quando invece l'elettromagnete è sotto corrente (eccitato) e quindi produce un flusso, la resistenza alla rotazione diventa molto sensibile risultando il disco realmente frenato.

Questa reazione elettromagnetica tra campo induttore e correnti parassite indotte viene talvolta sfruttata per ottenere appunto il frenamento di dispositivi mobili in un campo magnetico. (Il principio trova applicazione anche nei contatori di energia elettrica).

Generalmente però le correnti parassite si rivelano del tutto nocive (da ciò la loro denominazione) e si cerca di impedirne la generazione, o comunque di ridurne l'intensità e quindi gli effetti non graditi. Così i nuclei di ferro dei motori e dei generatori si fanno, anzichè massicci, laminati, cioè composti da una serie di sottili lamierini isolati tra loro in modo da « frazionare » il più possibile le parti attive dei piccoli circuiti di corrente che si formano nel ferro.

14 — La dinamo macchina generatrice di corrente continua può funzionare anche come motore.

Caratteristiche dei motori eccitati in serie e in derivazione.

Il motore in serie è il più adatto per la trazione.

Accenniamo ora a qualche particolare di costituzione delle dinamo e dei motori.

Nelle dinamo le polarità induttrici sono ottenute per mezzo di elettromagneti i quali hanno naturalmente bisogno di una corrente detta di eccitazione, per funzionare come tali.

Si può ricorrere all'auto-eccitazione, sfruttando il magnetismo residuo che sempre esiste nei nuclei induttori anche a dinamo ferma.

Grazie a tale magnetismo, quando la dinamo si avvia si produce una piccola f.e.m. indotta che provoca nel circuito di eccitazione una debole corrente la quale comincia ad eccitare l'elettromagnete determinando un aumento del flusso magnetico che a sua volta fa crescere l'intensità della corrente indotta, e così via. In brevissimo tempo (dell'ordine del secondo) si raggiunge la saturazione dei nuclei magnetici e la dinamo è in grado di funzionare in piena regolarità.

Una dinamo così fatta (schema indicato nella Fig. 56 a) si dice eccitata « in serie » in quanto tutta la corrente ricavata ai morsetti passa attraverso le bobine eccitatrici. Sicchè quanto più intensa è la corrente erogata (corrispondente al « carico » esterno, cioè al consumo degli apparecchi utilizzatori) tanto più intensa è la tensione ai morsetti e il campo magnetico induttore.

Per rendere in certo grado indipendente dal carico esterno la tensione ai morsetti del generatore si può eccitare la dinamo « in derivazione » (Fig. 56 b) derivando dai morsetti soltanto una minima parte della corrente per farla passare attraverso le bobine eccitatrici: la massima parte si invia invece al circuito utilizzatore esterno.

Le caratteristiche della dinamo possono essere migliorate con eccitazione del tipo composito (inglese compound); allora si dispongono, oltre agli induttori eccitati in derivazione, induttori eccitati in serie dalla stessa corrente che circola nel circuito esterno. (Fig. 56 c).

Come già detto nel Capitolo precedente, le dinamo presentano non una sola coppia di bobine e di spazzole, ma più coppie disposte in simmetria radiale.

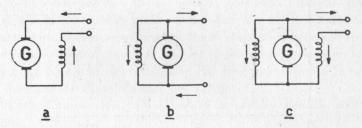


Fig. 56 — Schema di dinamo eccitata «in serie» (a); eccitata «in derivazione» (b); eccitata « compound » (c). (Le bobine eccitatrici sono indicate con una spiralina).

Così, mentre la corrente prodotta da una dinamo elementare ad una sola spira (Fig. 55) assume l'andamento mostrato dal diagramma della stessa Figura, con due massimi ad ogni giro completo, aumentando il numero delle spire (per es. mettendo due spire a 90°) la corrente assume l'andamento mostrato dal diagramma a linea tratteggiata della Fig. 57, con quattro massimi ad ogni giro.

Se le spire diventano 4 la corrente complessiva che si raccoglie sui segmenti del collettore assume l'andamento del diagramma a tratto pieno, con 8 massimi ad ogni giro: così la pulsazione si fa sempre meno sensibile e la corrente diventa praticamente continua.

Nelle dinamo primitive, secondo il modello prototipo ideato da Antonio Pacinotti (fisico italiano 1814-1912) l'indotto era « ad anello », attorno al quale si avvolge il conduttore in cui si genera la corrente (Fig. 58). Senonchè tale indotto presenta l'inconveniente di lasciare inattiva la parte dei conduttori all'interno dell'anello, poco o niente immersi nel campo magnetico inducente, le cui linee di forza — colleganti un polo all'altro del magnete — si addensano dentro la massa ferrosa sicchè non vengono « tagliate » dai conduttori interni.

L'inconveniente è stato eliminato adottando l'indotto « a tamburo », nel quale l'« armatura » è costituita anzichè da un anello da un

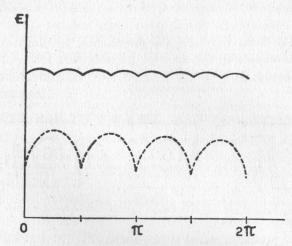


Fig. 57 — Se le spire nella dinamo sono due (a 90°) la corrente assume l'andamento della linea a tratti; se sono quattro assume l'andamento della linea piena.

cilindro (Fig. 58) rotante tra le espansioni polari, e i conduttori sono disposti secondo le generatrici, risultando così tutti « esterni » e immersi nel campo magnetico inducente: tali conduttori vengono col-



Fig. 58 — (A sinistra): Schema di una dinamo con indotto ad anello (tipo Pacinotti); (A destra): Schema prospettico di indotto a tamburo. (Tutti i conduttori sono attivi esclusi i tratti adagiati sulle facce del cilindro).

legati da fili, relativamente corti, adagiati sulle due « basi » del cilindro e inattivi poichè si muovono in piani paralleli alle linee di forza del campo inducente. Il rendimento della dinamo, cioè il rapporto tra i watt di energia elettrica ricavata ai morsetti e i watt di energia meccanica spesi per farla ruotare, è dell'ordine del 70-90%.

* * *

Come già detto, ogni dinamo può funzionare da motore quando viene alimentata con corrente continua.

C'è da osservare che in un motore, ruotando l'indotto (avvolgimento) tra le espansioni polari dell'induttore, i fili conduttori dell'avvolgimento tagliano le linee del flusso magnetico e perciò si produce nell'avvolgimento stesso una f.e.m. indotta la quale, per la legge di Lenz, provoca una controtensione che contrasta e limita la intensità della corrente di alimentazione del motore.

Di ciò si tiene conto nel calcolare la sezione del filo dell'avvolgimento.

D'altra parte, quando il motore è fermo non esiste ovviamente la controtensione, sicchè all'atto in cui la corrente viene immessa nell'avvolgimento l'intensità vi assumerebbe valori eccessivi tali da « bruciare » il filo.

Si evita tale grave inconveniente disponendo in serie sul circuito un reostato di avviamento, costituito da una resistenza graduabile, calcolata in modo da ridurre l'intensità di corrente induttrice ad un valore sopportabile dal filo. Avviato il motore il reostato si disinserisce gradualmente, provvedendo ormai il motore stesso a limitare l'intensità di corrente per effetto della controtensione, come prima detto.

Analogamente a quanto visto per la dinamo, il tipo di eccitazione nei motori può essere in serie, quando le bobine eccitatrici sono in serie con il circuito indotto e vengono quindi attraversate da tutta la corrente che alimenta il motore. (Fig. 59 a).

In tal caso, all'avviamento tutta la corrente attraversa le bobine eccitatrici producendo quindi una coppia motrice (di « spunto ») di valore elevato (più che doppia di quella a regime di pieno carico).

Una caratteristica del genere rende il motore in serie adatto per quegli usi, come la trazione elettrica (treni, tram, filobus) o gli apparecchi di sollevamento (ascensori, gru) in cui alla partenza è necessario disporre di una forza rilevante per vincere l'inerzia del carico da trainare o da sollevare, e in cui i carichi sono variabili.

Così, riferendoci alla trazione, appena il treno è avviato, la resistenza da vincere (« carico » esterno) è tale che il motore dovrà girare molto lentamente: diminuisce allora immediatamente anche la corrente assorbita (e con essa la coppia motrice prodotta).

Se il peso del treno è rilevante o il treno è in salita — il numero di giri resta sì limitato, ma la coppia motrice conserva ancora un

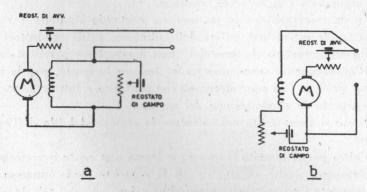


Fig. 59 — a) Motore eccitato in serie; b) Motore eccitato in derivazione. (Le bobine eccitatrici sono indicate con una spiralina; sono indicati anche il reostato di avviamento e il reostato di campo).

elevato valore (per una determinata corrente assorbita, diminuendo la velocità di rotazione aumenta la coppia).

Quando il treno è leggero, o corre in piano, la coppia necessaria per la trazione sarà piccola e il numero di giri del motore aumenterà allora notevolmente, e con esso aumenterà anche la velocità del treno.

In conclusione, si può dire che in un motore eccitato in serie la coppia motrice varia in ragione inversa della velocità di rotazione (aumentando l'una diminuisce l'altra). (Fig. 60 b).

Nelle Figg. 60 a e 60 b sono rappresentate in diagramma la caratteristica elettrica e la caratteristica meccanica del motore eccitato in serie. Nella prima si vede come varia la « coppia » al variare della intensità della corrente che alimenta il motore; nella seconda si vede come varia la coppia al variare del numero dei giri, ossia della velocità di rotazione del motore.

Nel motore in derivazione (inglese shunt) il circuito di eccitazione è derivato dalla linea di alimentazione, trovandosi perciò in derivazione (in parallelo) anche rispetto all'indotto: la corrente che circola nel circuito di eccitazione (induttore) è quindi di valore praticamente costante, risultando indipendente dal carico. (Fig. 59 b).

In tal caso all'avviamento la coppia motrice è naturalmente inferiore a quella del motore in serie; essa può variare poi entro ampi limiti senza che vari molto la velocità di rotazione (Fig. 61).

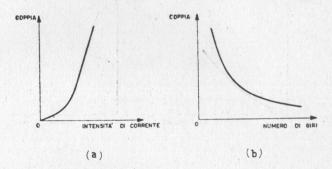


Fig. 60 — Caratteristica elettrica (a) e caratteristica meccanica (b) del motore eccitato in serie.

Crescendo il carico, il numero dei giri decresce un poco, ma il rallentamento fa subito elevare la corrente del rotore: cosicchè la coppia si adatta al nuovo carico.

In definitiva la caratteristica del motore in derivazione è quella di avere una velocità praticamente costante (variabile al massimo del 5%, dalla marcia a vuoto alla marcia a pieno carico).

Un tal motore trova estesa applicazione nelle macchine utensili. Le Figg. 61 a e 61 b mostrano i diagrammi della caratteristica elettrica e della caratteristica meccanica del motore in derivazione.

Sia nei motori eccitati in serie che in quelli eccitati in derivazione si può regolare la marcia influendo sulla intensità del campo inducente mediante un reostato di campo: questo viene inserito nel circuito di eccitazione e serve a regolare appunto l'intensità della corrente di eccitazione che passa negli avvolgimenti inducenti. (Fig. 59).

Azionando il reostato di campo si varia il flusso di eccitazione e conseguentemente la coppia motrice. A tal fine si può paragonare la funzione del reostato di campo a quella di un acceleratore di motore a scoppio nei riguardi del gas immesso nei cilindri.

Anche nel motore, come nella dinamo, si possono avere forme composite di eccitazione (in serie e in derivazione) facendo in modo da indebolire la corrente inducente al crescere della corrente d'indotto: ciò per assicurare una migliore costanza del numero dei giri.

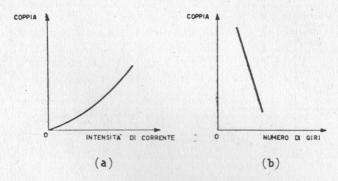


Fig. 61 — Caratteristica elettrica (a) e caratteristica meccanica (b) del motore eccitato in derivazione.

Il senso di rotazione dei motori a corrente continua con bobine di campo è indipendente dal senso della tensione applicata ai morsetti. Per invertire il senso di rotazione bisogna invertire il senso della corrente soltanto nel rotore o soltanto nel campo.

La potenza di un motore, quella resa sull'albero, estrinsecantesi — come già detto — in una coppia di forze animate da una certa velocità di rotazione, si esprime in watt o in cavalli vapore.

Il rendimento di un motore elettrico è misurato dal rapporto tra i watt meccanici resi e i watt elettrici assorbiti: raggiunge, a pieno carico, valori del 70-95%.

PARTE III CORRENTE ALTERNATA

(#4 A N

ATTENDAGEN OF ALTERNATION OF

15 — La corrente alternata è versatile grazie alla possibilità di trasformarne agevolmente tensione e intensità.

> La trasformazione rende conveniente e sicura dovunque l'utilizzazione dell'energia elettrica.

Lo spinterogeno.

Finora abbiamo considerato la corrente elettrica continua, quale costituita da un flusso di elettroni che scorre in un circuito appunto con continuità, sempre nello stesso senso.

Ma esiste un altro tipo di corrente, sotto molti aspetti più interessante di quella continua, detta alternata in quanto presenta la particolare caratteristica di invertire periodicamente (per es. 50 volte al minuto secondo) il senso del moto degli elettroni.

Vediamo schematicamente come si produce una corrente alternata per esaminarne poi, a mano a mano, le particolarità.

Consideriamo, analogamente a quanto fatto a suo tempo per la corrente continua (Fig. 55), un generatore elementare costituito da una spira che ruota in un campo magnetico (Fig. 62).

Sappiamo che durante la rotazione della spira si genera ai suoi capi una f.e.m. indotta. Saldando a ciascun capo dell'indotto un anollo che strisci a contatto con un morsetto, e collegando i morsetti attraverso un circuito chiuso (comprendente le resistenze) circolerà nel circuito una corrente « alternata ». (Vedi poi il Cap. 18).

Infatti, il senso e l'intensità della corrente generata saranno ovviamente quelli della f.e.m. indotta. Ora si osserva che la f.e.m. indotta si inverte quando il piano della spira passa da una parte all'altra del piano mediano parallelo alle espansioni polari induttrici (piano neutro), transitando necessariamente, come intensità, per il valore zero. (Il piano neutro nella Fig. 62 risulta orizzontale).

Si osserva inoltre — come già accennato in precedenza — che, pur restando costante la velocità di rotazione della spira, la intensi-

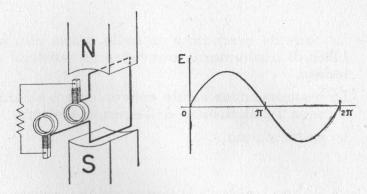


Fig. 62 — Schema di generatore elementare di corrente alternata ad una spira. (A destra): Diagramma della corrente sinusoidale prodotta).

tà della f.e.m. sarà massima quando la spira taglia un massimo numero di linee di forza (quando viene a passare davanti alle espan-

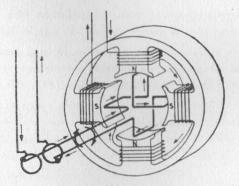


Fig. 62 bis — Disegno schematico di un alternatore con due coppie di poli induttori.

sioni polari), sarà minima quando la spira taglia il minimo numero di linee di forza (quando viene a trovarsi a 90° con la precedente posizione).

Perciò la caratteristica di una corrente alternata è l'andamento sinusoidale: il valore massimo o ampiezza della corrente è dato dalla massima ordinata della sinusoide (diagramma di Fig. 62 o Fig. 63)

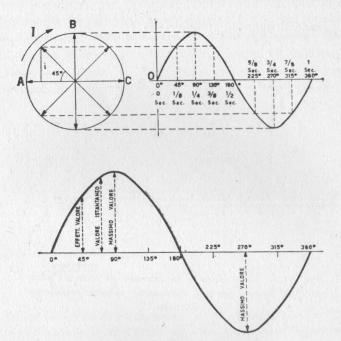


Fig. 63 — (Sopra): Generazione grafica di una sinusoide con un vettore rotante (raggio del cerchio) alla velocità di un giro al sec. (Sotto): Valori caratteristici di una corrente alternata.

Si definisce valore efficace di una corrente alternata l'intensità corrispondente al 70,7% del valore massimo (Ie = 0,707 Imax): esso rappresenta il valore della corrente indicato da un amperometro a filo caldo (corrisponde anche al valore istantaneo riferito al punto della sinusoide a 45° dalla origine). (Fig. 63).

La potenza media (W) trasformata in calore da una corrente alternata è data dal prodotto del quadrato del valore efficace (Ie) per la resistenza (R) del conduttore: $W = Ie^2 R$ (dove W è espresso in watt, I in ampere, R in ohm).

La fase corrispondente ad una rotazione di 180° (π) si chiama alternanza.

Il ciclo completo, che consta di due alternanze opposte si chiama periodo (tempo T in secondi); si compie in una rotazione intera (360° = 2 π) e si ripete tante volte al minuto secondo per quanti giri al minuto secondo compie la spira: il numero di periodi al minuto secondo prende il nome di frequenza f ($f = \frac{1}{T}$).

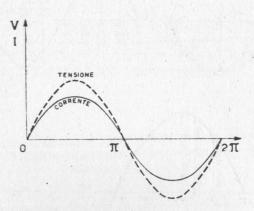


Fig. 64 — La tensione e la intensità di corrente sono in fase in un circuito contenente soltanto resistenze ohmiche.

Si denomina pulsazione (ω) la caratteristica angolare legata alla frequenza ($\omega = 2 \pi f$).

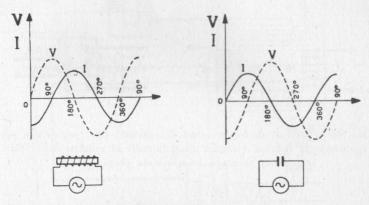
Una corrente alternata sinusoidale si può considerare, graficamente, generata da un vettore rotante (raggio del cerchio di Fig. 63).

Nel diagramma, sull'asse delle ascisse (orizzontale) si riportano gli angoli di cui il raggio ruota (oppure i tempi corrispondenti); sull'asse delle ordinate si riportano i valori del seno degli angoli suddetti, corrispondenti alla distanza dal diametro AC dell'estremo I del raggio rotante.

Due grandezze alternate si dicono in fase quando passano entrambe nello stesso istante per il valore zero e nello stesso istante per il valore massimo. Così è delle sinusoidi che rappresentano i valori della tensione e i valori della corrispondente corrente in un circuito contenente soltanto resistenze ohmiche. (Fig. 64).

Due grandezze alternate si dicono sfasate di un certo angolo (per es. 90°) quando il valore zero e il valore massimo dell'una seguono (di 90°) rispettivamente il valore zero e il valore massimo dell'altra.

Così è sfasata di 90° in ritardo rispetto alla tensione la sinusoide che rappresenta la corrente in un circuito a c.a. nel quale esistono soltanto induttanze, ossia avvolgimenti. (Per dir meglio, dove la resistenza ohmica è del tutto trascurabile rispetto all'induttanza, come si preciserà in appresso. Se nel circuito esiste anche resistenza ohmica lo sfasamento è minore di 90°). (Fig. 65 - sin.) (Vedi Cap. 16).



Fic. 65 — (A sinistra): Sfasamento in ritardo della corrente rispetto alla tensione in un circuito induttivo. (A destra): Sfasamento in anticipo della corrente in un circuito capacitivo.

Viceversa, in un circuito dove sono presenti soltanto delle capacità (condensatori) la sinusoide della corrente risulta sfasata di 90° in anticipo rispetto alla tensione. (Se esiste anche resistenza ohmica lo sfasamento sarà minore di 90°). (Fig. 65 - destra). (Vedi Cap. 17).

* * *

Mettiamo ora subito in rilievo una caratteristica della corrente alternata che ha valso più delle altre a farla preferire alla corrente continua nella maggior parte degli usi pratici. Questa caratteristica consiste nella possibilità di trasformare la corrente, variandone secondo come necessita la tensione e l'intensità.

Il trasformatore di corrente è basato sul fenomeno della induzione già trattato in precedenza. Vediamo come funziona. Consideriamo un circuito (primario) percorso da corrente alternata, e un circuito (secondario) con esso « concatenato » nel significato elettromagnetico, pure essendo dal primo separato e distinto.

Come già detto nel Cap. 11, la mutua induzione, si verifica sempre quando uno dei circuiti è percorso da corrente alternata.

Infatti, per definizione, la corrente alternata, oltre ad essere di intensità continuamente variabile, assume il valore zero — cioè viene interrotta — due volte ogni periodo, e due volte riprende istantaneamente a fluire in senso contrario al precedente.

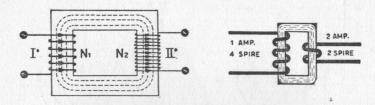


Fig. 66 — Schemi di trasformatori di corrente. (Nel primarto e nel secondario le tensioni risultano proporzionali al numero delle spire, le correnti risultano inversamente proporzionali).

In conseguenza il flusso magnetico da essa prodotto varia con grandissima rapidità, invertendosi ad ogni interruzione di corrente, e determinata perciò una corrente indotta di notevole intensità.

Poichè è lo stesso flusso magnetico che circola nel primario e nel secondario, la f.e.m. indotta che si creerà nel secondario subirà — per ciascuna spira — la stessa variabilità che ha nel primario.

Chiamando e detto valore, e indicando con N_1 le spire del primario e con N_2 le spire del secondario, ammesso che non ci siano perdite di energia, si avrà nel primario una f.e.m. complessiva $E_1 = e N_1$, e nel secondario $E_2 = e N_2$.

II rapporto tra le f.e.m. E_1 ed E_2 dei due circuiti sarà allora: $\frac{E_1}{E_2}=\frac{eN_1}{eN_2}=\frac{N_1}{N_2}$

Cioè a dire: le f.e.m. nei due circuiti sono direttamente proporzionali ai numeri delle spire.

Lo stesso rapporto vale, in via approssimata, anche per le tensioni V_1 e V_2 che si ricavano ai morsetti dei due circuiti.

Cosicchè se le spire del secondario sono, per esempio, rispetto al primario, in numero doppio, la tensione nel secondario sarà doppia.

Ma se la tensione è diventata doppia, dovendo restare immutata l'energia W complessivamente trasmessa al secondario (si suppone

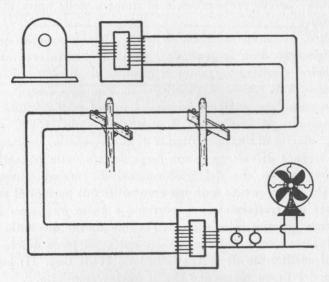


Fig. 67 — Trasformazione della corrente dal generatore agli apparecchi utilizzatori. La tensione viene prima elevata per il trasporto dell'energia, poi abbassata per la utilizzazione negli apparecchi (lampade, ecc).

che non ci siano perdite sensibili) dovremo trovare nel secondario una corrente di intensità I_2 ridotta alla metà rispetto a quella I_1 del primario. (In tal modo risulta assicurata la conservazione dell'energia, cioè sarà sempre $W = V_1 \times I_1 = V_2 \times I_2$).

Si conclude quindi che le correnti nei due circuiti sono inversa-

mente proporzionali ai numeri delle spire:
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$
.

Un dispositivo così fatto prende il nome di trasformatore in quanto serve appunto a trasformare una corrente alternata in un'altra corrente pure alternata ma avente diverse caratteristiche di tensione (e conseguentemente di intensità).

Dal punto di vista fisico si può immaginare che i vortici del campo, esistenti nell'interno degli avvolgimenti (Cap. 10) agiscano come
tanti « rulli oscillanti » che imprimono agli elettroni delle spire « impulsi » nei due sensi, ad ogni « periodo ». Il numero degli impulsi,
e conseguentemente la velocità di vibrazione (tensione) degli elettroni, risulterà perciò proporzionale al numero delle spire di ciascun
avvolgimento.

Peraltro, restando invariata l'energia elettromagnetica in gioco, nell'avvolgimento dove la tensione è minore (quello con minor numero di spire) risulterà maggiore la quantità degli elettroni in vibrazione (intensità di corrente). (Vedi per es. Fig. 66 - destra).

Come grossolana analogia meccanica un tal trasformatore può essere paragonato ad una specie di cric, nel quale la vite primaria abbia una velocità di rotazione doppia della secondaria, risultando allora questa capace di esercitare una forza doppia della primaria.

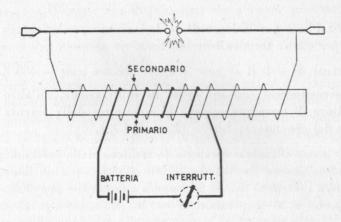
Diciamo subito che nei trasformatori di correnti alternate industriali (la cui frequenza è di una cinquantina di periodi al secondo), e in genere nei trasformatori di corrente a bassa frequenza (per es. di frequenza acustica, che sono dell'ordine di un diecimila periodi al secondo) sono contenuti sempre dei nuclei di ferro dolce, per accrescere il coefficiente di mutua induzione (vedi Cap. 11) attraverso l'aumento del flusso magnetico che il nucleo comporta.

Quando invece si tratta di correnti ad elevata frequenza (per es. di radiofrequenza, dell'ordine dei milioni di periodi al secondo) il coefficiente di mutua induzione è già elevato per causa dell'alta frequenza, e non c'è più bisogno del nucleo nei trasformatori, costituiti allora soltanto da bobine più o meno ravvicinate.

A questo punto si osserva che anche una corrente continua, se viene periodicamente e frequentemente interrotta (in modo da provocare il fenomeno dell'induzione) mediante un qualsiasi sistema meccanico (ruttore). può essere trasformata in una corrente, tipo pulsante, di diversa tensione. Il rapporto tra le tensioni è sempre proporzionale al rapporto tra il numero delle spire del primario e del secondario. Un dispositivo tipico è il rocchetto di Ruhmkorff (Fig. 68).

Si sfrutta tale principio nei dispositivi di accensione a spinterogeno (bobina) installati normalmente nei motori di automobile: la corrente continua a bassa tensione fornita da una batteria di accumulatori viene trasformata in una corrente pulsante ad alta tensione e inviata poi alle candele tra le cui punte farà scoccare la scintilla destinata ad accendere la miscela.

Talvolta necessita disporre di corrente continua ad elevata tensione, per avere notevole potenza. Si ricorre allora a gruppi motore-



Fic. 68 — Schema elementare di un rocchetto di Ruhm-korff: ad ogni interruzione di corrente nel circuito primario (a bassa tensione) scoppia la scintilla nel secondario (ad alta tensione).

generatore, costituiti da un motore (alimentato da corrente alternata o da corrente continua) che fa girare una dinamo generatrice della corrente avente le caratteristiche desiderate.

(La corrente alternata può anch essere direttamente trasformata in corrente continua mediante i *raddrizzatori*, di cui si dirà al Capitolo 24).

Quando il generatore di corrente è mosso da un motore termico il complesso prende il nome di gruppo elettrogeno.

* * *

Con l'avvento della corrente alternata è stato reso pratico e agevole, grazie precisamente ai trasformatori, il trasporto a distanza dell'energia elettrica, niente affatto conveniente con la continua. Infatti, se si dispone di un generatore che dà una corrente della potenza per es. di 1000 Kilowatt (Kw) con una tensione di 5000 volt e vogliamo utilizzare l'energia in un punto distante 30 Km trasportandola mediante conduttori di ragionevoli dimensioni la cui resistenza complessiva sia per es. di 12 ohm, la corrente sulla linea avra

una intensità di 200 ampere (I =
$$\frac{watt}{volt} = \frac{1.000.000}{5.000} = 200$$
).

In tal caso per la legge di Joule, saranno perduti lungo la linea stessa per effetto termico ben 480~Kw.

Infatti
$$W = I^2 R = 200^2 \times 12 = 480.000 \text{ watt} = 480 \text{ Kw}.$$

Raccoglieremo così sul luogo di utilizzazione, all'altro estremo della linea di trasporto, appena la metà circa della potenza elettrica inviata dal generatore: 1.000-480=520~Kw.

Se invece all'inizio eleviamo la tensione della corrente prodotta, portandola per es. da 5.000 a 20.000 volt, la corrente immessa sulla linea avrà l'intensità di soli 50 ampere e le perdite per effetto termico si riducono a 30 Kw. Infatti $W = 1^2$ $R = 50^2 \times 12 = 30$ Kw.

All'arrivo si procede alla trasformazione inversa (Fig. 67).

In conclusione, all'altro estremo della linea raccoglieremo — anche considerato una perdita di circa 20 Kw in ciascuna trasformazione — il 93% della potenza inviata: precisamente 930 Kw.

Quanto maggiore è la distanza di trasporto dell'energia elettrica tanto maggiore sarà la tensione alla quale conviene elevare in partenza la corrente: fino a decine e a centinaia di migliaia di *volt*.

Peraltro, più elevata è la tensione e più difficile e costoso diventa l'isolamento dei conduttori: e ciò costituisce una limitazione di cui bisogna tener conto nello stabilire la tensione massima che dovrà avere la corrente sulla linea.

Nella utilizzazione può essere necessario talvolta procedere allo abbassamento di tensione con elevato rapporto di trasformazione per disporre, invece che di elevatissima tensione con basse intensità, di forti intensità di corrente. Così avviene nei cosiddetti forni a induzione, dove il secondario del trasformatore è ridotto addirittura ad una sola spira, formata a cunetta con materiale refrattario. Nella cu-

netta si pone il metallo da fondere, e la fusione avviene per effetto della temperatura determinata dalla elevatissima intensità di corrente (si possono raggiungere decine di migliaia di ampere).

* * *

E' da tener presente poi la necessità inderogabile che la corrente portata nelle officine od abitazioni sia a bassa tensione, per ragioni di sicurezza, ai fini dell'incolumità delle persone, risultando pericolose per l'organismo umano le correnti di tensione superiore a 260 volt.

Come intensità ci si riferisce ai comuni valori di frazioni di ampere, oppure di qualche ampere, utilizzati negli impianti domestici. A tal proposito è però da fare molta attenzione alle condizioni particolari in cui ci si può venire a trovare quando si maneggiano apparecchi elettrici: se si è a contatto con condutture, o si poggiano i piedi su un pavimento umido o bagnato (o peggio se si è addirittura immersi nel bagno) allora per la presenza dell'acqua ottima conduttrice dell'elettricità la resistenza complessiva offerta dal corpo diventa molto inferiore alla normale, e la corrente che viene ad attraversarlo assume una elevata intensità, così da risultare spesso letale.

* * *

Nei trasformatori a nucleo di ferro c'è da osservare che in definitiva l'energia in gioco, che dal primario passa al secondario, è quella complessivamente immagazzinata, cioè contenuta, nel nucleo sotto forma di flusso magnetico: la quale energia ha perciò una limitazione nella « saturazione » del nucleo stesso.

Allora avviene che, se la tensione nel primario è troppo elevata, oppure se la richiesta di corrente (« carico ») da parte del secondario è eccessiva, si determina nel nucleo un sovraccarico magnetico, nel senso che vi affluirà molta più energia di quanta ne possa naturalmente contenere. In conseguenza si abbasserà l'efficienza e il rendimento del trasformatore; l'erogazione all'uscita sarà inferiore a quella prevista; l'energia in eccesso « non trasformata » si perderà in calore, calore che può anche danneggiare il trasformatore.

Per quanto ora detto, i normali trasformatori sono opportunamente progettati per funzionare con regolarità e con buon rendimento sempre al di sotto dei *limiti di saturazione*.

Talvolta però il fenomeno cui ora si è accennato della saturazione viene convenientemente sfruttato, come si fa nei cosiddetti trasformatori di picco, utilizzati in alcune apparecchiature elettroniche.

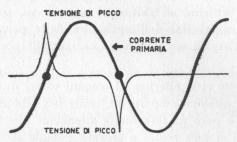


Fig. 69 — Diagramma della corrente primaria e della tensione in un trasformatore di picco.

Tali trasformatori sono studiati in modo che la saturazione vi avvenga già con una corrente primaria di basso valore, cosicchè essi funzionano con buon rendimento — ossia trasformano una apprezzabile quantità di energia — soltanto nei brevi momenti in cui il primario è attraversato da bassissima corrente.

Nella corrente alternata ciò succede in vicinanza dell'asse dei tempi (Fig. 69); ed è soltanto nella piccola frazione di ciclo relativa a questi brevi tratti, in cui si verifica la inversione della corrente, che ha luogo la trasformazione in impulsi di elevata tensione.

Il diagramma della tensione nel secondario presenterà perciò — in corrispondenza dei tratti suddetti — delle elevazioni in forma di vetta molto acuta (picco) (Fig. 69).

16 — L'induttanza in una corrente alternata costituisce una resistenza di tipo inerziale e provoca lo sfasamento in ritardo della intensità rispetto alla tensione.

> Influenza preminente della frequenza. Che cosa è il reattore saturabile.

Il fenomeno dell'autoinduzione, già trattato al Cap. 11, assume particolare importanza nelle correnti alternate, specialmente quando nei circuiti relativi sono presenti vere e proprie induttanze, costituite — come sappiamo — da filo avvolto in bobina. (E' il caso dei comuni circuiti industriali, che comportano sempre motori, trasformatori, ecc).

Si è visto che in un generatore e in un circuito a c. a. il valore della f.e.m. varia sinusoidalmente (linea a tratti della Fig. 64).

Se nel circuito non esistesse alcuna induttanza la corrente prodotta avrebbe andamento pure sinusoidale e sarebbe in fase con la f.e.m., cioè la sinusoide della corrente coinciderebbe, nei punti zero e nei massimi, con quella della f.e.m. (linea continua della Fig. 64).

Ricorrendo, come al solito, ad una analogia meccanico-idraulica possiamo rappresentare il fenomeno (Fig. 70) con un circuito idraulico nel quale lo stantuffo spingente rappresenta il generatore della f.e.m. alternata, e la corrente liquida la corrente elettrica prodotta dalla spinta dello stantuffo. La pressione esercitata dallo stantuffo si traduce evidentemente in velocità della corrente liquida ad esso contigua. (Si suppone quì che lo stantuffo e il liquido siano privi di inerzia propria e non esistano resistenze di attrito).

Quando lo stantuffo assume le posizioni 0 - 1 - 2 - 3 - 4, esercitando pressioni corrispondenti ai valori delle ordinate della sinusoide a tratti (Fig. 70) anche la corrente liquida nel circuito assumerà (come velocità) valori proporzionali: precisamente quelli indicati dalle rispettive ordinate della sinusoide piena.

Ora supponiamo che nel circuito idraulico sia inserita una *ruota* a palette (Fig. 70 bis). Avverrà che nella fase 0 - 1, mentre lo stantuffo assume da zero la massima velocità esercitando nel punto 1 la massima pressione, la corrente liquida si mette in moto nel ramo sinistro

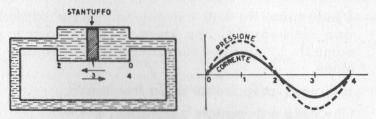


Fig. 70 — In un circuito idraulico la velocità della corrente è in fase con la pressione esercitata dallo stantuffo.

del circuito e giunta in corrispondenza della ruota (punto 0) spinge la paletta pl e le successive riempiendo gradualmente il settore inferiore della sede della ruota e mettendo in rotazione la ruota stessa.

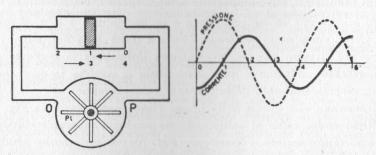


Fig. 70 - bis — Inserendo in un circuito idraulico a corrente alternata una ruota volano a palette, la velocità della corrente risulta sfasata di 90° rispetto alla pressione.

Succederà che solo dall'istante 1 in poi la corrente liquida si avvertirà anche nel ramo destro del circuito (oltre il punto P).

Tale corrente assumerà un valore massimo nell'istante 2, nonostante la caduta della pressione nell'intervallo 1 - 2.

Questo perchè le palette della ruota, ormai in moto in senso orario, per l'inerzia propria della ruota imprimono degli impulsi alla corrente incrementando la velocità ad essa conferita dallo stantuffo. Nell'istante 2 lo stantuffo inverte la sua corsa e perciò si inverte contemporaneamente la pressione (avendo considerato il liquido senza inerzia). La ruota però, che conserva il moto anti-orario, continua ad imprimere ancora alla corrente una velocità nello stesso senso, velocità che peraltro decresce fino ad annullarsi nell'istante 3.

Nell'istante 3 prevale la pressione dello stantuffo (al massimo valore) e la corrente inverte il senso: lo inverte anche la ruota la quale — prima obbedendo alla pressione e poi per la propria inerzia — determina nel tratto OP il moto in senso orario della corrente fino all'istante 5 (corrispondente all'istante 1).

Dopodichè si riproducono le condizioni dell'istante 1 e il ciclo si ripete.

Riportando in diagramma (Fig. 70 - bis) i valori della pressione e della corrente in funzione del tempo si ottengono le sinusoidi dissegnate in linea a tratti e in linea piena. Dove si vede che la sinusoide della corrente è sfasata in ritardo di un quarto di periodo (90°) rispetto alla pressione.

Cosa analoga avviene in un circuito elettrico, dotato di sola resistenza induttiva, per la corrente rispetto alla tensione del generatore di una f.e.m. alternata.

La funzione di « volano » esercitata dalla ruota a palette nel circuito idraulico corrisponde nel circuito elettrico alla funzione della induttanza (avvolgimento) la quale assorbe e immagazzina energia — sotto forma di flusso magnetico — nelle fasi in cui la f.e.m. è crescente; la restituisce sotto forma di corrente autoindotta nelle fasi in cui la f.e.m. è decrescente. (Vedi anche Cap. 11).

Comunque una induttanza, come una ruota a palette in un circuito idraulico, rappresenta sempre una resistenza al fluire della corrente, in un circuito a c.a. Tale resistenza prende il nome di resistenza induttiva o reattanza, e si aggiunge a quella ohmica che in pratica ogni circuito inevitabilmente comporta.

La resistenza induttiva (RL) e quella ohmica (Ro) non si sommano però aritmeticamente bensì geometricamente, formando, i corrispondenti vettori, i due cateti di un triangolo rettangolo la cui ipotenusa rappresenta la resistenza totale detta impedenza (Z) (Fig. 71): sicchè risulta $Z = \sqrt{Ro^2 + RL^2}$.

La presenza della resistenza ohmica in un circuito induttivo fa sì che l'angolo di *sfasamento* della corrente rispetto alla tensione non sia più di 90° ma minore. Detto angolo è misurato precisamente dal

rapporto
$$\frac{\text{Ro}}{\text{Z}} = \cos (2.$$

Il numero $\cos \varphi$ è denominato fattore di potenza e risulta tanto più piccolo quanto più grande (cioè vicino a 90°) è l'angolo di sfasamento: se l'angolo di sfasamento è di 90° il fattore è zero; se lo sfa-

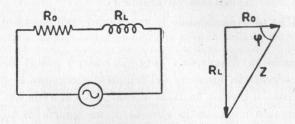


Fig. 71 — In un circuito contenente una resistenza induttiva, oltre alla resistenza ohmica, la resistenza totale (impedenza) risulta dalla composizione geometrica delle due resistenze.

samento diventa 0º il fattore di potenza assume il valore massimo che è 1.

La legge di Ohm si applica ugualmente ad un circuito a c.a.: soltanto bisogna allora considerare, anzichè la resistenza ohmica, la resistenza totale o impedenza (Z). Cossichè la formula $V = R \times I$ diventa $V = Z \times I$.

(Come sempre V si esprime in volt, Z in ohm, I in ampere). La potenza di una corrente alternata è data dall'espressione

$$W = V \times I \times \cos \varphi$$

Dove V e I sono i valori efficaci della corrente alternata (vedi Capitolo 15). Il fattore $\cos \varphi$ è — si ripete — il fattore di potenza sopra definito e caratterizza appunto l'espressione della potenza di una corrente alternata, differenziandola da quella di una corrente continua.

Si spiega la presenza di tale fattore con la considerazione che essendo normalmente sfasate tra loro la tensione e la corrente, quando in ogni punto delle sinusoidi si va a fare l'integrale, cioè la sommatoria, dei prodotti $v \times i$ (valori istantanei) per ottenere la potenza totale, molti prodotti singoli risultano negativi essendo i fattori di segno contrario: al limite, con uno sfasamento di 90°, i prodotti negativi sono tanti quanti i prodotti positivi, e la potenza totale diventa nulla. (Infatti per $\cos 90^{\circ} = 0$ la formula dà potenza zero).

Quando invece tensione e corrente sono in fase la potenza risulta massima, essendo $\cos 0^{\circ} = 1$, e allora $W = V \times I$, come in una corrente continua.

* * *

In un circuito induttivo ha molta importanza la frequenza della corrente alternata, cioè il numero dei cicli al minuto secondo.

Si dimostra che la sopra definita reattanza (RL), per un dato valore dell'induttanza L, cresce proporzionalmente alla frequenza f: RL = $2 \pi f L = 6.28 f L$. (Si indica con π il fattore 3,14).

Chiamando V_i la tensione induttiva e i la corrente autoindotta.

essendo in generale R =
$$\frac{V}{i}$$
, si può anche scrivere RL = $\frac{V_i}{i}$ = 6,28 f L.

Poichè la tensione ohmica V_0 , sfasata di 90° in anticipo, si compone algebricamente con la V_i , la tensione V risultante, e la corrispondente intensità di corrente (ampiezza della sinusoide) in un circuito induttivo diminuirà proporzionalmente alla frequenza.

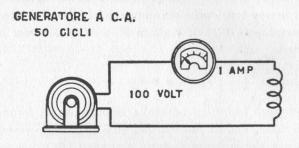
Così se con un generatore la cui f.e.m. è di 100 volt, alla frequenza di 50 cicli si ha una corrente di 1 ampere, raddoppiando la frequenza (100 cicli) la intensità di corrente si dimezza (½ ampere) (Fig. 72).

Ricordando il volano meccanico-idraulico, si pensi in proposito che la sua azione di « frenamento » sulla corrente liquida si fa sentire ad ogni alternanza, e sempre per un numero doppio di volte quando si raddoppia la frequenza: parte della energia viene così dissipata, finendo molta corrente con il circolare, anzichè nel circuito, nella sede della ruota.

Si può pensare ad un altro grossolano paragone meccanico. Si supponga che due segatori azionino una sega a mano, compiendo in un minuto primo 60 movimenti di va e vieni (60 cicli), in modo che

ciascuna « alternanza » duri mezzo secondo ed abbia una « ampiezza » ' per esempio di 20 centimetri.

Se gli stessi segatori, spendendo la stessa energia, raddoppiano la frequenza, compiendo in un minuto primo, anzichè 60, 120 movimenti di va e vieni (120 cicli), ciascuna alternanza durerà un quarto di secondo e risulterà, necessariamente dell'ampiezza di 10 centimetri (metà della precedente).



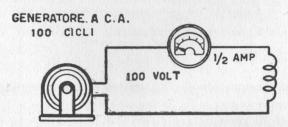


Fig. 72 — Se la frequenza della corrente alternata si raddoppia la intensità della corrente si dimezza.

Quando in una corrente alternata la frequenza f è molto elevata si può trascurare la resistenza ohmica, considerando la impedenza costituita tutta dalla reattanza totale $Z=\frac{V}{i}$ 6,28 f L. Alle elevate frequenze il coefficiente di autoinduzione L risulta infatti sempre elevato, anche se non sono presenti bobine nel circuito.

* * *

Accenniamo ora ad un'altra importante conseguenza dell'effetto di autoinduzione in un conduttore percorso da corrente alternata.

Un conduttore possiamo immaginarlo costituito da tanti tubi coassiali, in ciascuno dei quali passa la corrente. Naturalmente intorno a questi tubi si produrranno linee di forza magnetiche.

Ricordando quanto detto al Cap. 11, si nota che nel caso la corrente sia alternata, ad ogni inizio di alternanza si ha una « espansione » di linee di forza e ad ogni fine di alternanza si ha una « concentrazione » delle stesse linee. Quando la frequenza è molto elevata le alternanze si susseguono a così brevi intervalli di tempo che le linee di forza « emesse » dai tubi più interni non arrivano a « tagliare » il tubo più esterno, nella loro corta pulsazione di andata e ritorno, mentre i tubi più interni saranno sempre con maggiore frequenza « tagliati » dalle linee emesse dai tubi circonvicini.

In conclusione, il coefficiente di autoinduzione, e quindi l'impendenza risulterà massima al centro e minima alla periferia del conduttore « complessivo ».

Ne consegue che la corrente alternata ad alta frequenza non fluisce più nei « tubi » interni del conduttore e finisce con lo addensarsi tutta alla sua periferia, ossia praticamente scorre soltanto lungo un sottile strato superficiale, come dire sulla « pelle » del conduttore. Tale effetto è stato denominato perciò « effetto pelle ».

In tali condizioni la « sezione » del conduttore realmente attraversata da corrente è minima, e pertanto la resistenza ohmica specifica (per mmq) diventa elevata, ben maggiore di quella che competerebbe al conduttore « pieno » percorso da corrente a bassa frequenza.

* * *

Un importante dispositivo basato sull'induttanza è il cosiddetto reattore saturabile, costituito da una induttanza particolare regolabile, che può a sua volta regolare in un circuito la potenza di una corrente alternata, in modo analogo a quanto fa un potenziòmetro in un circuito a corrente continua. (Cap. 6).

Da notare che in questi ultimi tempi si incontra sovente nelle cronache tecniche il termine « reattore », per indicare diversi dispositivi, tra i quali ricordiamo: il « reattore nucleare », destinato alla disintegrazione controllata dell'atomo per ricavarne energia termica, e il « reattore d'aviazione » costituito dal motore a getto impiegato per la propulsione dei velivoli.

Il reattore saturabile del quale qui si tratta assume schematicamente la forma indicata nella Fig. 73.

La colonna centrale del nucleo di ferro porta un avvolgimento percorso da una corrente continua, (di intensità relativamente bassa) per mezzo della quale si può creare un elettromagnete, si può cioè regolare il flusso magnetico che attraversa tutto il nucleo.

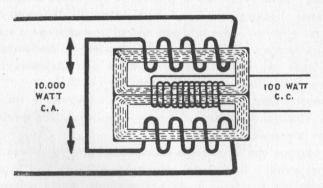


Fig. 73 - Schema costitutivo di un reattore saturabile.

Allora anche gli avvolgimenti laterali percorsi dalla corrente alternata si trovano a contenere un nucleo di ferro in parte già « saturo », in maggiore o minor misura. Quanto maggiore sarà tale saturazione tanto minore risulterà la « permeabilità » e l'induttanza « acquisibile » ulteriormente dal nucleo per effetto della c.a.: tanto minore sarà quindi l'energia della c.a. ancora immagazzinabile sotto forma di flusso magnetico.

Induttanza minore vuol dire reattanza minore (RL = 2π f L) nel circuito generale, con conseguente aumento della intensità della corrente alternata nel circuito stesso. Il contrario succede se aumenta l'induttanza.

Ecco come, attraverso la regolazione della corrente continua del « reattore » si può controllare il valore della corrente alternata nel circuito. Dispositivi del genere sono impiegati per la regolazione delle luci nei palcoscenici dei teatri, per la regolazione della temperatura nei forni industriali, ecc.

17 — La capacità in una corrente alternata opera come uno stantuffo elastico in un circuito idraulico.

> Sfasamento in anticipo della corrente: effetto strano ma spiegabile.

> Possibilità di compensare con la capacità gli effetti dell'induttanza.

Il fenomeno della risonanza.

Si è detto a suo tempo (Cap. 8) che un condensatore non costituisce ostacolo al passaggio di una corrente alternata, intesa questa come trasmissione di impulsi elettrici susseguentisi con frequenza più o meno elevata.

Si è allora paragonato il condensatore ad una membrana o lamina elastica posta in una tubazione contenente liquido sottoposto a pressione alternata.

Ai fini della presente trattazione giova meglio paragonare il condensatore ad uno stantuffo elastico (a doppia faccia con molla interposta) muoventesi in un cilindro posto in una tubazione a corrente liquida dove un generatore G genera una pressione alternata sinusoidale, rappresentata in diagramma dalla linea a tratti (Fig. 74).

Consideriamo positiva la corrente che nel cilindro è diretta da destra verso sinistra; negativa quella diretta in senso opposto. Nel caso in esame, essendo il liquido incompressibile, la pressione dal generatore impressa al liquido stesso (corrispondente nell'analogia alla tensione di un generatore di c.a.) si traduce in velocità della corrente e quindi, nel cilindro, in velocità dello stantuffo (questa corrisponde analogicamente alla intensità di corrente elettrica, rappresentata nel diagramma dalla linea continua).

Negli istanti successivi all'inizio (istante 0) nel quale lo stantuffo si trova nella posizione So Do della Fig. 74, e per tutto il primo quarto di periodo, la pressione è positiva e crescente, e determina il veloce spostamento della corrente e dello stantuffo da destra verso

sinistra, in senso positivo. Tale velocità è massima all'inizio quando lo stantuffo non incontra resistenza (si prescinde dagli attriti e dall'inerzia) ma poi diminuisce perchè la pressione va spesa nel comprimere la molla posta tra le due facce dello stantuffo.

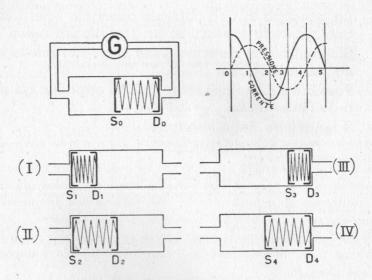


Fig. 74 — Inserendo in un circuito idraulico a corrente alternata uno stantuffo elastico, la velocità della corrente risulta sfasata in anticipo di 90° rispetto alla pressione.

Dopo un quarto di periodo (istante 1) il cilindro, con le due facce a contatto e la molla tutta compressa (posizione I) si trova fermo nel punto morto S_1 D_1 : la corrente nel cilindro ha quindi valore zero.

Nel secondo quarto di periodo (dall'istante 1 all'istante 2) la pressione decresce dal massimo al valore zero. In questa fase la molla si distende e la faccia destra dello stantuffo preme sul liquido determinando, nel cilindro e nel resto della tubazione, una corrente diretta da sinistra verso destra, cioè negativa, che assume il suo valore massimo nell'istante 2, nel quale lo stantuffo verrà a trovarsi nella posizione S_2 D_2 (posizione II).

Nel terzo quarto di periodo (dall'istante 2 all'istante 3) la pressione torna ad aumentare, ma cambia segno: si eserciterà quindi sulla faccia sinistra dello stantuffo, che perciò verrà spinto ancora verso destra fino al punto morto S_3 D_3 , ma con velocità che và diminuen-

do poichè la pressione ancora una volta va spesa nel caricare nuovamente la molla (posizione III).

Nel quarto quarto di periodo (dall'istante 3 all'istante 4) la pressione sulla faccia sinistra diminuisce e permette alla molla di distendersi spingendo la faccia sinistra e la corrente verso sinistra, cioè in senso positivo, con velocità che raggiunge il suo massimo nell'istante 4 (fine del ciclo) in cui lo stantuffo viene a trovarsi nel punto S_4 D_5 (posizione IV).

Da questo istante le fasi si ripetono identicamente per tutti i cicli successivi.

In conclusione, come mostra il diagramma della Fig. 74 (linea continua) la corrente ha un andamento sinusoidale identico a quello della pressione, ma sfasato in anticipo di un quarto di periodo (90°) rispetto alla pressione.

Il fenomeno dell'anticipo appare in verità poco comprensibile a prima vista, sembrando strano che l'effetto (corrente) preceda la causa (pressione). La spiegazione è da cercare nella presenza della molla elastica dello stantuffo: è la molla infatti che comprimendosi assorbe energia (pressione) e poi distendendosi la restituisce dando luogo alla corrente come se ne fosse essa la sorgente, prima ancora che nel circuito si manifesti la pressione determinata dal generatore.

Si vede che l'andamento della corrente è inverso, rispetto a quello della pressione; ossia mentre la pressione è in fase crescente la corrente è in fase decrescente, e viceversa. E' come se la corrente prevenisse — con l'anticipo di un quarto di periodo — l'andamento della pressione.

Il ragionamento ora fatto per il circuito idraulico si può ripetere applicandolo analogicamente ad un circuito elettrico a c.a., sostituendo al posto del cilindro con stantuffo elastico il condensatore, e parlando, anzichè di pressione, di tensione elettrica, e, anzichè di corrente liquida, di corrente elettrica.

Si conclude che in un circuito a c.a. la funzione del condensatore è quella di immagazzinare ad ogni alternanza energia sotto forma di carica elettrica, tendendo a mantenere costante la tensione tra le armature del condensatore stesso.

E' da rilevare ancora che la presenza di un condensatore in un circuito a c.a. comporta una perdita di energia e quindi determina sempre una resistenza al passaggio della corrente, sebbene di valore

inversamente proporzionale alla capacità (come inevitabilmente costituisce una resistenza la presenza dello stantuffo con molla nel circuito idraulico). Tale particolare resistenza è denominata resistenza capacitiva o capacitanza (Rc) e si aggiunge anch'essa alla solita resistenza ohmica (Ro). —

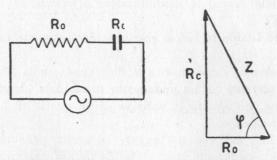


Fig. 75 — In un circuito contenente una resistenza capacitiva, oltre alla resistenza ohmica, la resistenza totale (impedenza) risulta dalla composizione geometrica delle due resistenze.

Le due resistenze non si sommano aritmeticamente ma geometricamente — analogamente a quanto si è visto nel caso della resistenza induttiva — e la resistenza totale o impedenza (Z) è data dalla formula: $Z = \sqrt{Ro^2 + Rc^2}$.

Anche in questo caso la *impedenza* Z risulta geometricamente rappresentata dall'ipotenusa di un triangolo rettangolo che ha per cateti Rc ed Ro. (Fig. 75).

La legge di Ohm resta sempre valida nel circuito considerando, al posto della resistenza ohmica, l'impedenza: $V = Z \times I$.

La presenza anche di una resistenza ohmica in un circuito capacitivo fa sì che lo sfasamento in anticipo della corrente, rispetto alla tensione, sia inferiore a 90° (analogamente a quanto visto per il circuito induttivo).

Poichè la carica e la scarica del condensatore, in un senso e nell'altro, al succedersi delle alternanze, sono determinate da una variazione di tensione, è la rapidità di tale variazione, ossia è la frequenza della c.a., quella che determina l'intensità del flusso di corrente che attraversa la capacità, corrente che risulterà perciò tanto più intensa quanto maggiore è la frequenza.

(Si pensi, in proposito, alla molla dello stantuffo prima considerato: quanto più frequenti saranno le compressioni-espansioni tanto più violenti saranno gli impulsi che essa fornisce, e tanto più veloce risulterà la corrente liquida nel cilindro).

Così se un generatore di c.a., in un circuito capacitivo, con una tensione di 100 volt fornisce 1 ampere di corrente alla frequenza di 50 cicli/secondo, un generatore che abbia una frequenza doppia, di 100 cicli/secondo, sempre con una tensione di 100 volt, determinerà nel condensatore una corrente doppia, ossia 2 ampere.

Si può dire in conclusione che in un circuito a c.a. la resistenza capacitiva (Rc) è inversamente proporzionale, oltre che alla capacità

(C) alla frequenza (f): $Rc = \frac{1}{2 \pi fC}$. (Si osserva ancora che la capacità del condensatore corrisponde alla forza elastica intrinseca della molla, nella analogia prima fatta).

Si rileva infine che la presenza di una resistenza ohmica in un circuito capacitivo determina un rallentamento del flusso di elettroni e una minore intensità del flusso stesso, sicchè il condensatore si caricherà, e si scaricherà, più lentamente. Questa caratteristica si qualifica con il termine costante di tempo (T), che equivale al tempo necessario affinchè la corrente, o la tensione, raggiunga il 63% del suo valore massimo.

Anche la capacità del condensatore influisce direttamente sulla costante di tempo, nel senso che se la capacità è grande il livello di potenziale cresce, o decresce, più lentamente.

In un circuito comprendente resistenza ohmica (R) e capacità (C) in serie risulta la costante di tempo T=R C (cioè T è direttamente proporzionale alla resistenza e alla capacità: T si esprime in secondi, R in ohm, C in farad).

* * *

Accenniamo ora ad un fenomeno elettrico di grande importanza, sfruttato specialmente negli apparati radio: la risonanza. (Vedi in proposito anche il Cap. 20).

E' nota l'analogia meccanica che comunemente si cita: quella di un pendolo oscillante che ha una frequenza propria di oscillazione, dipendente dalla sua lunghezza, alla quale frequenza le oscillazioni assumono la maggiore ampiezza e tendono a conservarsi indefinitamente (prescindendo dagli attriti). Nelle applicazioni pratiche (orologi) le perdite di energia causate dagli attriti vengono compen-

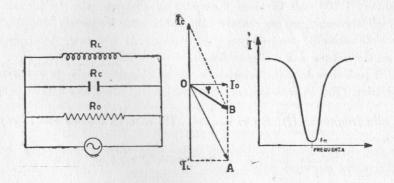


Fig. 76 — Circuito comprendente resistenza ohmica, resistenza induttiva e resistenza capacitiva poste in derivazione: la corrente risultante è rappresentata dal vettore OB. Il diagramma a destra mostra la condizione di risonanza.

sate ad ogni oscillazione con un opportuno e tempestivo impulso, fornito da una molla o da un peso.

Ora supponiamo che in un circuito percorso da c.a. siano presenti, oltre alla resistenza ohmica, una resistenza induttiva e una resistenza capacitiva, ipoteticamente separate e poste in derivazione (Figura 76).

Sappiamo che nel ramo dove esiste la sola resistenza ohmica la corrente (Io) è in fase con la tensione (E). Nel ramo puramente induttivo la corrente (IL) è sfasata di 90° in ritardo. Nel ramo puramente capacitivo la corrente (Ic) è sfasata 90° in anticipo.

Rappresentando geometricamente la corrente in ciascuno dei tre rami con dei vettori (segmenti orientati, di lunghezza proporzionale all'intensità) si avrà la disposizione della Fig. 76 (al centro).

Per ottenere il valore della intensità di corrente nel circuito, basta procedere alla composizione geometrica (regola del parallelogramma) dei vettori IL ed Io, che danno per risultante il vettore OA, e poi del vettore OA con il vettore Ic, ottenendosi come risultato finale il vettore OB.

Il vettore OB rappresenta il valore della corrente risultante nel circuito, e l'angolo ϕ è l'angolo di sfasamento rispetto alla tensione.

Lo sfasamento o risulterà in ritardo o in anticipo secondo che nel circuito prevalga l'induttanza o la capacità. Nella figura lo sfasamento è in ritardo.

Osservando la Fig. 76 si desume che, nel caso in cui Ic = IL, il punto B viene a coincidere con l'estremità del vettore I_o , la corrente risultante risulta in fase con la tensione, e la sua intensità è la stessa di quella che si avrebbe nel circuito se fosse presente la sola resistenza ohmica. In tali condizioni gli effetti dell'induttanza e della capacità si compensano perfettamente.

Ciò vuol dire che le correnti Ic ed IL, normalmente di valore maggiore della Io, circoleranno soltanto nei rami Rc ed RL del circuito.

Le due correnti IC e IL risultano in opposizione di fase (sfasate di 180º l'una dall'altra) e passano dall'uno all'altro ramo alternativamente, il tempo occorrente a caricare il condensatore essendo esattamente eguale al tempo nel quale si annulla il flusso magnetico dell'induttanza.

In tal caso sarà sufficiente che il generatore fornisca una f.e.m. capace di mantenere unicamente la corrente Io, compensando le sole perdite che si hanno per la presenza nel circuito della resistenza ohmica.

(In pratica la resistenza ohmica non si trova in un ramo separato ma è presente — per la resistenza propria dei conduttori — negli stessi rami induttivo e capacitivo).

Quanto sopra risulta anche dalla formula algebrica che dà l'impedenza totale in funzione delle solite tre resistenze Ro, RL ed Rc.

$$Z = \sqrt{Ro^2 + (RL - Rc)^2}$$

Se RL = Rc sarà:

$$Z = \sqrt{Ro^2} = Ro$$

cioè l'impedenza si ridurrà alla sola resistenza ohmica.

Abbiamo visto in precedenza che la RL e la Rc dipendono dalla frequenza della c.a. e, poichè l'una cresce e l'altra diminuisce al crescere della frequenza, esse avranno generalmente valore diverso, e diverso sarà quindi il valore della corrente nei due rami induttivo e capacitivo.

Ma esisterà sempre una determinata frequenza, ed una soltanto, per la quale le due resistenze risuteranno eguali, e perciò risulteranno eguali anche le intensità di corrente nei due rami.

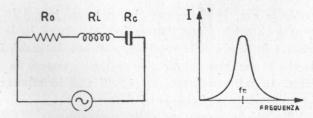


Fig. 77 — Circuito comprendente resistenza ohmica, resistenza induttiva e resistenza capacitiva poste in serie.
 Il diagramma della intensità di corrente mostra la condizione di risonanza.

A tale frequenza si verificherà allora la condizione di risonanza nella quale, come si è prima visto, la corrente circola alternativamente soltanto nei bracci induttivo e capacitivo.

Se non esistesse affatto resistenza ohmica questo scambio continuerebbe all'infinito, così come un pendolo oscillerebbe all'infinito se non esistessero attriti. Siccome in pratica la resistenza ohmica è sempre presente in ogni tratto di circuito con la relativa perdita per calore, occorrerà ad ogni ciclo reintegrare la perdita stessa fornendo una certa quantità di corrente dalla linea.

La intensità di tale corrente (I), per quanto sopra detto, risulterà allora minima proprio in corrispondenza della frequenza di risonanza (fr): il diagramma relativo è quello riportato a destra nella Fig. 76.

और और और

Se sulla linea percorsa da c.a. l'induttanza e la capacità sono disposte *in serie* (Fig. 77) alla frequenza di *risonanza* si verifica ugualmente lo scambio alternativo della massima quantità di energia tra

l'induttanza e la capacità. Ma in tale situazione la stessa massima corrente deve necessariamente fluire attraverso tutta la linea. L'impedenza complessiva nella linea allora risulta minima.

Ad ogni altra frequenza la corrente scambiata tra induttanza e capacità — e quindi la corrente alternata di linea — sarà sempre inferiore alla corrente massima di risonanza (diagramma della Fig. 77); è come se la impedenza complessiva aumentasse, come infatti aumenta, molto rapidamente, al minimo scostarsi della frequenza da quella di risonanza.

18 — La produzione industriale di corrente alternata mediante gli alternatori.

Cenni sulle reti di distribuzione e sugli impianti domestici.

Auspicio per le centrali elettronucleari.

I generatori di corrente alternata sono denominati alternatori. Un alternatore, nella sua più semplice espressione, funziona secondo lo schema elementare rappresentato nella Fig. 62. (Cap. 15).

Si potrebbe far ruotare tra le espansioni polari di un elettromagnete — questo alimentato (eccitato) da corrente continua prodotta da una dinamo — un *indotto* del tipo di quello che si usa per le dinamo, disponendo, al posto del collettore, due *anelli* isolati sui quali si appoggiano le *spazzole* collegate con i morsetti dai quali si preleva la corrente.

La corrente prodotta risuterebbe alternata sinusoidale (diagramma della Fig. 62).

In generale però gli alternatori di media e di grande potenza si costruiscono con indotto fisso e induttore rotante: ciò per il fatto che le matasse di filo di rame dell'indotto assumono volume e peso notevoli, e non è più possibile sistemarle nelle cave del rotore, sia per ragioni di spazio sia per le sollecitazioni che subirebbero per effetto della forza centrifuga. (Fig. 78).

Il numero dei poli dell'induttore è sempre superiore a due: se p è il numero delle coppie di poli, un conduttore A (Fig. 78) in ogni giro inverte la direzione della sua f.e.m. 2p volte.

Dal numero (p) delle coppie di poli, e dal numero dei giri (N al minuto primo), dipende la frequenza (f) della corrente alternata

 $(f = \frac{\text{N p}}{60})$. Con 4 *coppie* di poli si avrà perciò una frequenza di 50 periodi se l'alternatore fa 750 *giri* al 1'.

Quando l'alternatore è sotto carico, cioè quando eroga corrente utilizzata in un circuito esterno, la tensione ai morsetti risulta normalmente minore della tensione a vuoto (f.e.m.). Tale differenza (caduta di tensione) dipende notevolmente dal fattore di potenza della corrente erogata, e cioè in definitiva dalla presenza di induttanze nel circuito.

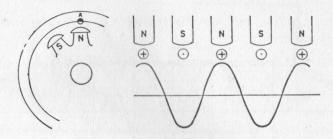


Fig. 78 — Schema parziale di alternatore con indotto fisso (esterno) e induttore rotante (interno). (Nel diagramma di destra si vede che con p coppie di poli un conduttore A inverte la sua f.e.m. 2p volte durante un giro).

La caduta di tensione percentuale è dell'ordine del 6-8% quando il circuito esterno, comprendente per es. apparecchi per illuminazione e riscaldamento, non è induttivo ($\cos \varphi = 1$); diventa del 15-25% per carichi induttivi normali, comprendenti motori, trasformatori, ecc. ($\cos \varphi = 0.8$).

In pratica è necessario mantenere costante la tensione ai morsetti, al variare del carico esterno. Questa regolazione dell'alternatore si ottiene agendo opportunamente sulla corrente di eccitazione dell'alternatore stesso.

* * *

Per gli usi industriali e nelle reti di distribuzione viene normalmente impiegata non la corrente monofase ma la corrente alternata trifase, la quale si produce con alternatori che hanno come indotto, anzichè un solo avvolgimento, tre avvolgimenti spostati angolarmente di 120° (360: 3) l'uno dall'altro.

I tre circuiti indotti sono distinti, e le f.e.m. in essi generate risultano sfasate di 120° l'una dall'altra. Le tre correnti risultano an-

ch'esse sfasate di 120° l'una dall'altra, se i circuiti esterni sono equilibrati, cioè se sopportano lo stesso carico. (Fig. 79).

(Ciascuna corrente resta sempre da parte sua sfasata dell'angolo 17 rispetto alla propria tensione).

I tre circuiti generatori si collegano poi tra loro, e con gli apparecchi esterni utilizzatori, in due modi: a stella o a triangolo.

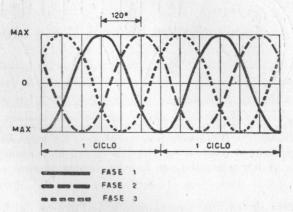


Fig. 79 — Le tre correnti di un generatore trifase di corrente alternata, sfasate tra loro di 120°.

Nel collegamento « a stella » si uniscono i capi dei tre avvolgimenti indotti (al centro): dai tre morsetti partono tre fili di fase che vanno agli apparecchi utilizzatori i cui circuiti possono essere ugualmente collegati a stella. (Fig. 80).

I centri delle stelle O e O possono essere collegati con un filo neutro nel quale la corrente, essendo somma istantanea delle tre correnti, risulta nulla se i circuiti sono equilibrati, sicchè normalmente tale filo si può sopprimere. I punti O e O vengono allora messi in comunicazione con la terra.

In definitiva la corrente alternata trifase viene immessa su tre conduttori: sono quelli che si vedono dovunque, portati dalle caratteristiche palificate a traliccio, attraverso montagne e pianure lungo linee di centinaia di chilometri, per condurre l'energia elettrica dalle centrali di produzione alle operose città.

(Il quarto cavo che spesso collega i piloni alla sommità non porta corrente e si denomina « cavo di guardia »).

Si nota a questo punto che comunque, le tre correnti essendo sfasate tra di loro, uno dei tre fili può sempre portare la corrente di ritorno degli altri due; cioè in uno stesso filo possono coesistere più correnti di fase diversa, che lo percorrono in tempi diversi.

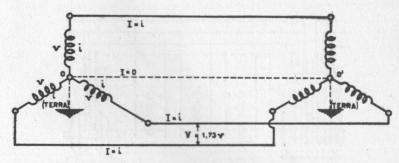


Fig. 80 — Collegamento a stella di indotti e di circuiti per corrente alternata trifase.

(Questa coesistenza, a prima vista strana, di diversi correnti in uno stesso circuito, o nello spazio, si noterà frequentemente in seguito. Bisogna prenderne atto fin d'ora, considerandola ben possibile, in analogia a quanto avviene per esempio con i suoni nell'aria).

Nel collegamento « a stella » la corrente (I) in ciascun filo, e quindi in ciascun circuito formato unendo due fili di fase, è la stessa corrente (i) prodotta dal generatore.

La tensione tra fase e fase, detta tensione di linea (V), è invece maggiore di quella (v) prodotta in ciascuna fase del generatore, e risulta precisamente $V = \sqrt{3} v$; (V = 1,73v); (v = 0,578 V).

Nelle reti di distribuzione si usa mettere sempre il filo neutro, il quale parte, come già detto, dal centro neutro del generatore, o del trasformatore (Fig. 81).

Allora gli apparecchi utilizzatori, come per es. le lampade a incandescenza per le quali è conveniente una tensione bassa (per es. 150 volt), si inseriscono in derivazione nel circuito monofase formato dal filo neutro e da un filo di fase. Si ottiene così l'indipendenza dei diversi circuiti utilizzatori.

Anche se non si raggiunge il perfetto equilibrio tra i vari gruppi di lampade, il filo neutro non sarà mai percorso da una corrente molto forte, e può essere di sezione minore (metà) del filo di linea.

La tensione v tra un filo di fase e il neutro (di valore per esempio 150 volt) si denomina tensione di fase. Si utilizza per le normali lampade da illuminazione (Fig. 81).

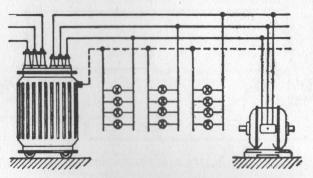


Fig. 81 — Schema di distribuzione di corrente alternata trifase, con filo neutro, dal trasformatore agli apparecchi utilizzatori (lampade, motore industriale).

La tensione V tra due fili di fase, denominata tensione di linea o concatenata, risulta, come già detto, eguale a 1,73 v e quindi del valore di 260 volt. E' questa che si utilizza per uso elettrodomestico (cucina, riscaldamento, piccoli motori per aspirapolvere ecc.).

E' noto, che nelle abitazioni le prese per le due specie di corrente sono diverse: per la corrente « luce » i due fori della presa sono distanti 19 mm; per l'energia cosiddetta « industriale » la distanza è di 25 mm.

L'energia per i motori industriali veri e propri, sempre di notevole potenza, viene prelevata dalle tre fasi, come si vede nella Figura 81 (Vedi anche Cap. 19).

Oltre che « a stella » il collegamento nell'alternatore (e similmente nella rete di distribuzione) può essere fatto « a triangolo » unendo un capo di un avvolgimento indotto con un capo del successivo, e facendo partire i tre fili di linea dai punti di unione, risultanti così ai vertici di un triangolo. (Fig. 82).

In tal caso la tensione di linea (V) tra una fase e l'altra è uguale alla tensione di fase (v) prodotta dal generatore. Invece la corrente di linea (I) è maggiore della corrente di fase (i) prodotta dal generatore, poichè in ciascun filo si sovrappongono le correnti di due fasi.

Precisamente risulta $I = \sqrt{3}i$; (I = 1.37i); (i = 0.578I).

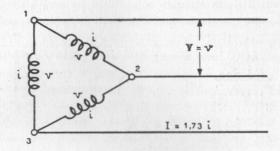


Fig. 82 — Collegamento a triangolo degli indotti di un alternatore per corrente alternata trifase.

Non è detto che il collegamento nella rete di distribuzione debba essere dello stesso tipo di quella del generatore: può essere anche a triangolo se il primo è a stella, o viceversa.

* * *

Spesso occorre accoppiare, collegare tra loro, due o più alternatori installati o nella stessa centrale o in centrali diverse anche molto distanti tra loro: ciò si rende necessario per far fronte al carico della rete di distribuzione quando esso aumenta, e per distribuire equamente tale carico tra diverse unità generatrici.

L'accoppiamento si dice in parallelo quando le f.e.m. dei due alternatori risultano in parallelo rispetto al circuito esterno, e le rispettive correnti si sommano nel circuito stesso.

Affinchè due alternatori possano accoppiarsi in parallelo occorre che tra i morsetti degli alternatori, come tra le sbarre attraverso le quali gli alternatori si collegano alla rete esterna, si abbiano eguali tensioni, eguali frequenze, eguali fasi. I due alternatori marciano allora in perfetto « sincronismo ».

Si ricorda a questo punto che la regolazione della tensione viene fatta agendo sulla corrente di eccitazione, e la regolazione della frequenza agendo sul numero dei giri.

La regolazione della fase si effettua disponendo in derivazione su un circuito sussidiario, tra i morsetti dei due alternatori, un voltmetro ed una lampadina. Finchè non si avrà eguaglianza di tensione e di fase, attraverso detto circuito sussidiario passerà corrente: la lampadina si accenderà e le sue pulsazioni di luce accuseranno la differenza di frequenza. Il richiesto perfetto « parallelo » sarà denunciato dallo spegnersi della lampadina: allora si potrà chiudere l'interruttore che collega i due alternatori tra loro e con il circuito esterno, immettendo la corrente nella rete di distribuzione.

* * *

La potenza in un circuito trifase equilibrato, se i tre circuiti fossero separati e indipendenti l'uno dall'altra, sarebbe in ciascun circuito $W = v i \cos \varphi$, e complessivamente $3 W = 3 v i \cos \varphi$.

Se invece, come avviene normalmente, si fa il collegamento a stella o a triangolo, o la tensione di linea (v) o la corrente di linea (I) risultano — come prima visto — maggiori di quelle del generatore (secondo il fattore 1,37). Sicchè la potenza totale nel circuito risulta in watt:

$$W = 1.73 \ V \ I \cos \varphi$$

in cui V è la tensione efficace di linea in volt, I la corrente efficace di linea in ampere, φ l'angolo di sfasamento tra la tensione di fase v e la corrente di fase i.

La potenza effettiva di un alternatore trifase è quella medesima data dalla formula ora vista ($W=1.73~V~I~cos~\phi$) e dipende quindi dal fattore di potenza cos (7, che a sua volta dipende dalle caratteristiche del circuito da alimentare.

Per indicare la potenza propria di un alternatore, quale deriva dalle sue caratteristiche intrinseche, indipendentemente dal circuito da alimentare, si è adottata l'espressione potenza apparente, data dal prodotto in volt-ampere della tensione normale (V) per la corrente massima (I) normalmente erogabile. In un alternatore monofase essa è quindi semplicemente in Volt-Ampere = VI, oppure in $Kilo\ Volt$

$$Ampere = \frac{VI}{1000}.$$

In un alternatore trifase la potenza apparente è = $1,73 \ V \ I$.

La potenza effettiva, in Watt o in Kilowatt, è data dalla potenza apparente moltiplicata per il fattore di potenza: così sarà la potenza in Kilowatt = Kilo Volt Ampere × cos ().

* * *

Normalmente la corrente alternata, nelle quantità sempre crescenti occorrenti per i bisogni della moderna civiltà tecnico-industriale, viene prodotta da apposite centrali di rilevante potenza.

Per azionare i grandi alternatori si sfruttano quasi sempre le cadute di acqua che attraverso condotte forzate mettono in moto delle turbine che a loro volta muovono gli alternatori: tali complessi costituiscono le centrali idroelettriche.

Nelle centrali termoelettriche l'energia è fornita da combustione di carbone oppure di olio pesante per produrre vapore, e l'azionamento degli alternatori avviene mediante turbine a vapore.

(Sono stati di recente realizzati in Italia grandi *alternatori*, destinati a centrali termoelettriche, del peso di 270 ton. e della potenza di 160.000 Kilo Volt Ampere).

Si incominciano ora a costruire anche centrali elettro-termonucleari, sfruttando l'energia termica fornita dagli elementi « fissionabili » (uranio, ecc.), anzichè dai normali combustibili, per produrre il vapore destinato ad alimentare i turbogeneratori. Attualmente (1937) le predette centrali sono in grado di produrre energia elettrica ad un costo già conveniente, suscettibile di ulteriori riduzioni, sicchè nel prossimo futuro si renderà disponibile ed economicamente accessibile, come non mai, una quantità enorme di energia elettrica, ciò che determinerà un impulso grandioso delle attività industriali in tutto il mondo.

19 — Il motore a campo rotante Ferraris alimentato da corrente alternata è il preferito.

Vantaggi del motore asincrono.

Impiego estesissimo dei motori elettrici di ogni dimensione.

Un alternatore del genere di quelli prima descritti è, analogamente ad una dinamo, perfettamente reversibile: staccandolo dalla motrice e fornendo ad esso corrente alternata si comporta come un motore, continuando a marciare alla stessa velocità dell'alternatore che lo alimenta: un tal motore si denomina appunto motore sincrono.

Un motore sincrono per funzionare ha sempre bisogno di una corrente continua per gli elettromagneti costituenti i poli (corrente di eccitazione), e ciò richiede l'installazione di una dinamo apposita.

Nei motori sincroni normalmente la parte ruotante è costituita dai poli magnetici e si denomina rotore; la parte dove circola la corrente alternata di alimentazione è fissa e si denomina statore.

I motori sincroni, contro il vantaggio di marciare a velocità rigorosamente costante, presentano notevoli difetti, tra cui la difficoltà di avviamento.

Un modo di avviamento è il seguente: prima si porta il rotore al numero dei giri di sincronismo (per mezzo di un motorino ausiliario); poi si eccita il rotore stesso inviandovi corrente continua; infine si collega lo statore al circuito esterno della c.a. di alimentazione.

Un'interessante proprietà del motore sincrono è la possibilità di far variare la fase della c.a. che lo alimenta variando la corrente di eccitazione del motore stesso.

Infatti, riducendo la corrente continua di eccitazione, analogamente a quanto si è visto nel « reattore saturabile » (Cap. 16) la c.a.

assorbita dal motore cresce e risulta in forte ritardo sulla tensione; il contrario succede incrementando la corrente continua di eccitazione. Per un certo valore della corrente di eccitazione la c.a. risulta in fase e poi — incrementando ancora la corrente continua — la c.a. va in anticipo rispetto alla tensione.

Si sfrutta tale caratteristica nelle reti di distribuzione nelle quali sono presenti molti motori (elevata induttanza) comportanti perciò un notevole sfasamento in ritardo della corrente sulla tensione. In tali reti si inserisce allora, al termine della linea generale di alimentazione, un motore sincrono ruotante a vuoto con forte eccitazione, in modo da sfasare in anticipo la c.a.: si compensa così, in tutto o in parte, lo sfasamento in ritardo prodotto dai motori-utenti, migliorando il fattore di potenza nella rete, come appunto si desidera.

In funzione di *rifasatori* di corrente, tali motori sincroni sono anche definiti *condensatori rotanti*, poichè nei circuiti a c.a. hanno un'applicazione analoga a quella dei condensatori che — come si è visto nel Cap. 17 — determinano precisamente lo sfasamento in anticipo della corrente.

* * *

I motori a c.a. più diffusi sono del tipo asincrono trifase, detto anche a induzione o à campo rotante, inventato dal fisico italiano Galileo Ferraris (1847-97).

Consideriamo un campo magnetico determinato dai due poli Nord e Sud di una calamita (Fig.83) e disponiamo tra i poli un ago magnetico imperniato su un asse normale al piano orizzontale contenente i poli stessi. Facendo ruotare meccanicamente la calamita si vedrà ruotare anche l'ago, trascinato dalla rotazione del campo magnetico nel quale è immerso.

L'importanza della scoperta fatta e applicata da G. Ferraris consiste nella possibilità di creare e mantenere un campo magnetico rotante senza produrre materialmente una rotazione di magneti, ma semplicemente con l'inviare correnti alternate di diversa fase in bobine fisse opportunamente disposte in uno statore.

Per presentare una analogia meccanica, si consideri un dispositivo del tipo di quello della Fig. 84, dove è possibile comporre due oscillazioni ortogonali e di uguale frequenza, ottenendone come risultato un moto circolare.



Fig. 83 — La rotazione meccanica del magnete determina la rotazione del campo magnetico e dell'ago calamitato.

Le due molle a foglia a e b, capaci di oscillare in piani paralleli e vicini, portano all'estremità una piastra con una fenditura, orizzontale nella prima, verticale nella seconda, così che le due fenditure risultano in croce.

Facciamo oscillare le due molle con la differenza di fase di 1/4 di periodo: ossia mentre la a è ferma portiamo la b tutta a sinistra. Allora le due fenditure avranno in corrispondenza il punto iniziale 1 (Fig. 85), attraverso il quale potremo infilare un'asticciola.

Successivamente facciamo compiere alla molla a un ottavo di oscillazione verso l'alto, e contemporaneamente alla molla b un ottavo di oscillazione verso destra: le due fenditure avranno in comune il punto 2, che rappresenterà la nuova posizione dell'asticciola.

Continuando, dopo un quarto di periodo dall'inizio, il punto in comune sarà il 3, dopo un mezzo periodo sarà il 5, e così via.

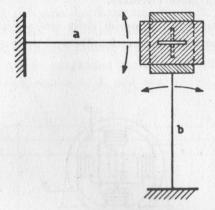


Fig. 84 — Mediante la composizione dei moti oscillatori di due molle (a e b) è possibile ottenere un moto rotatorio.

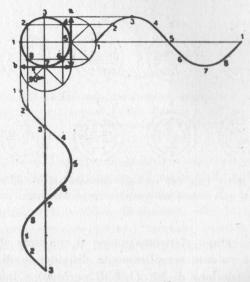


Fig. 85 — Dimostrazione geometrica della composizione di due moti oscillatori in un moto rotatorio.

Ultimato il ciclo il punto in comune tornerà ad essere l'1. (I numeri finora citati sono quelli posti sulla circonferenza).

Come si vede, durante un ciclo l'asticciola avrà compiuto una intera circonferenza. Ed ecco come dalla composizione di due moti alterni è derivato un moto circolare.

(I numeri posti sulle sinusoidi della stessa Fig. 85 indicano gli scostamenti successivi di ciascuna fenditura rispetto alla posizione iniziale).

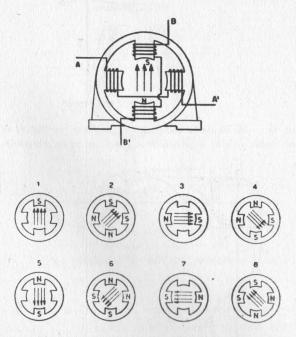


Fig. 86 — Con due correnti alternate sfasate di 90° si può creare un campo magnetico rotante.

Tornando al campo elettromagnetico si conclude che è possibile creare un campo rotante semplicemente disponendo di due correnti alternate sfasate tra loro di 90° (1/4 di periodo) e inviandole nelle coppie di bobine A A' e B B' come indicato nella Fig. 86.

Ad ogni ottavo di periodo (45°) la direzione del campo magnetico determinato dai poli dello statore ruota pure di 45°, assumendo successivamente le posizioni indicate con i numeri da 1 a 8 (Fig. 86).

Così nell'istante l la corrente d è nulla, mentre la corrente d è massima negativa, tale da produrre, per es., un campo magnetico diretto dal basso verso l'alto.

Nell'istante 2 si hanno due correnti, e quindi due campi magnetici uguali di intensità e disposti ortogonalmente: uno diretto dal basso verso l'alto, l'altro da sinistra verso destra. Essi si compongono, risultandone un campo magnetico inclinato di 45° verso destra, rispetto al campo dell'istante 1. E così via.

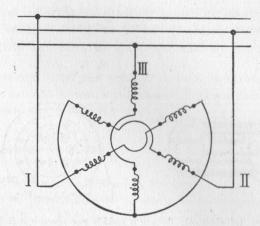


Fig. 87 — Inviando tre correnti alternate sfasate di 120° in tre gruppi di bobine disposte a 120° si ottiene un campo magnetico rotante

In conclusione il campo magnetico compie un giro completo nel tempo corrispondente esattamente ad un periodo della corrente alternata bifase che alimenta i poli dello statore.

Si dimostra, e si verifica facilmente, che lo stesso risultato si ottiene con una corrente trifase, facendo passare tre correnti alternate sfasate tra loro di 120° in tre gruppi di bobine fisse disposte anch'esse a 120 l'una dall'altra. (Fig. 87).

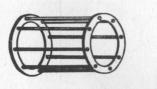
Ma tre gruppi di bobine così disposte non costituiscono altro che un *indotto* di alternatore trifase, sicchè inviando corrente alternata trifase in un tale indotto si ottiene un campo magnetico rotante.

Il sistema trifase è il preferito perchè dà miglior rendimento e comporta il minor costo di impianto.

Come per gli alternatori (Cap. 18) la relazione tra il numero dei giri al minuto primo (N), la frequenza (f) della corrente, il numero (p) delle coppie di poli, è la seguente:

$$N = \frac{60 \ f}{p}$$

Per ottenere con un campo magnetico rotante un motore elettrico basterebbe disporre dentro il campo un elettro-magnete, che a guisa dell'ago di Fig. 83 sarebbe trascinato in rotazione alla velocità del campo stesso.



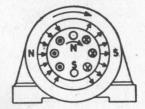


Fig. 88 — (A sinistra): Rotore a gabbia per motore a induzione. (A destra): Schema costitutivo semplificato di un motore a induzione

Ma così facendo costituiremmo niente altro che un motore sincrono, con i difetti già visti in precedenza.

Un tipo di motore molto più semplice e conveniente si può invece ottenere disponendo nel campo magnetico rotante un rotore a forma di gabbia (Fig. 88 - sinistra) formato con conduttori (sbarre ed anelli di rame o alluminio). Nell'interno di detta gabbia si dispone un nucleo di ferro dolce (laminato), al solito scopo di rinforzare il flusso magnetico che l'attraversa.

Il flusso magnetico prodotto dallo statore — si ripete — è un flusso magnetico rotante, e perciò viene a generarsi, nei conduttori della gabbia che lo tagliano essendo in esso immersi, una f.e.m. e una corrente indotta di forte intensità.

Tale corrente indotta determina nella gabbia una polarità Nord e una polarità Sud con i poli orientati ortogonalmente rispetto a quelli dello statore (Fig. 88 - destra).

Le conseguenti forze di attrazione e di repulsione tra i poli dello statore e i poli del rotore faranno allora sì che la gabbia-rotore venga trascinata in veloce rotazione dal campo magnetico rotante.

(Nei motori di maggiore potenza il rotore è costituito da veri e propri « avvolgimenti », anzichè da una « gabbia »).

La velocità del rotore non può essere mai eguale a quella del campo rotante, altrimenti le sbarre non verrebbero più tagliate dal flusso rotante e quindi si annullerebbero le f.e.m. indotte e le relative correnti indotte. Perciò un tal tipo di motore si denomina asincrono.

Il rotore assume bensì una velocità di poco inferiore a quella del campo rotante. Indicando con n il numero di giri al minuto del rotore, e con N quello del campo il rapporto

$$s = \frac{N - n}{N} \text{ oppure } \qquad s = \frac{N - n}{N} \quad 100\%$$

si definisce scorrimento o slittamento (o slip).

Nel campo di funzionamento normale lo scorrimento resta compreso nei limiti 2 — 4%: la variazione della velocità del motore risulta minima: il motore asincrono è da considerare un motore stabile.

Tale « scorrimento » trova un'analogia meccanica in quello che ha luogo materialmente tra una cinghia e la puleggia da essa trascinata: la puleggia infatti conserva una velocità periferica leggermente inferiore a quella della cinghia.

Nella puleggia notoriamente è l'attrito che determina il « trascinamento »; nel motore elettrico analoga funzione è esercitata dall'induzione elettromagnetica.

* * *

Un motore a induzione asincrono del tipo ora descritto presenta all'avviamento « a vuoto », cioè senza carico, l'inconveniente di avere una ridotta coppia motrice iniziale, essendo minimo il valore dello scorrimento, per l'elevata velocità del rotore non soggetto a sforzi: perciò risulta minimo il numero delle linee di forza magnetiche tagliate nella rotazione in tali condizioni.

Inoltre, quando la gabbia-rotore è ancora ferma, i conduttori della gabbia stessa vengono tagliati molto velocemente dal flusso magnetico rotante. In conseguenza si genera in essi una f.e.m. e una corrente indotta molto intensa, sfasata rispetto alla f.e.m. medesima per effetto dell'elevata induttanza.

Tale corrente a sua volta richiama per induzione nello statore una intensa corrente di alimentazione, anch'essa sfasata, che abbassa perciò il fattore di potenza della corrente alternata nella rete.

Per ovviare ai suddetti inconvenienti, che sono trascurabili o sopportabili nei motori di piccola potenza di 3-5 Cavalli, ma che si fanno sensibili per potenze superiori, si aumenta artificiosamente all'avviamento la resistenza elettrica del rotore, in modo che si abbia all'inizio una partenza sotto carico, anzichè a vuoto, conseguendo un maggiore « scorrimento » e quindi un incremento della coppia motrice.

Nello stesso tempo si ottiene che la corrente iniziale indotta che circola nel rotore non assuma valori elevati superiori a quelli di regime.

Per questo gli avvolgimenti del rotore si fanno in modo che possano essere collegati con una resistenza esterna costituita appunto da un reostato di avviamento.. Il collegamento si effettua con contatti striscianti (spazzole) su tre anelli ai quali fanno capo gli avvolgimenti predetti, generalmente del tipo trifase riuniti a stella. (Fig. 89).

Dopo avviato il motore si disinserisce gradualmente il reostato, e poi si staccano le spazzole dagli anelli, così che a regime gli avvolgimenti restano chiusi su sè stessi in corto circuito, come quelli dell'elementare gabbia.

Il fattore di potenza di un motore asincrono varia con il carico. In seguito al forte sfasamento cui s'è prima accennato, a vuoto il fattore di potenza è molto basso: 0,2 — 0,3. Al crescere del carico anche il fattore di potenza aumenta e a pieno carico raggiunge i valori 0,8 — 0,9.

Il rendimento di un motore asincrono varia secondo la grandezza del motore, elevandosi nelle macchine di maggiori dimensioni dove è possibile meglio proporzionare le parti e ridurre le perdite. Assume valori intorno a 0,60 — 0,75 nei piccoli motori di potenza inferio-

re ad 1 Cavallo, raggiungendo 0,90 — 0,95 nei motori di oltre 100 Cavalli.

Il motore asincrono mal si presta ad una regolazione della velocità, regolazione richiedente dispositivi complessi e poco pratici, comportanti un notevole abbassamento del rendimento.

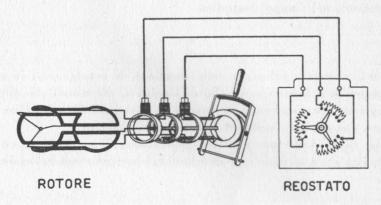


Fig. 89 — Schema di motore asincrono trifase con reostato di avviamento, rotore, anelli e apparecchio di corto circuito.

Un tipo di motore a c.a., nel quale risulta agevole variare la velocità indipendentemente dal carico, entro ampi limiti, è il motore trifase a collettore (sistema Schrage). In esso il rotore porta due avvolgimenti distinti: il primo è un comune avvolgimento a triangolo facente capo a tre anelli ai quali arriva la corrente trifase di alimentazione; il secondo è un avvolgimento a tamburo per dinamo, sul cui collettore sono calettate sei spazzole collegate ai capi dell'avvolgimento statorico.

Ruotando opportunamente le spazzole, cioè cambiandone la posizione rispetto all'avvolgimento dello statore, si fa variare la intensità di corrente nello statore stesso, e in conseguenza varia la velocità del rotore.

* * *

Con un adatto avvolgimento nello statore si può ottenere infine un campo rotante anche con una corrente alternata monofase. Un tale motore monofase a induzione necessita di particolari artifizi per l'avviamento, presenta un fattore di potenza minore, ed offre un rendimento inferiore, rispetto al motore trifase.

Ha però il grande vantaggio di potersi collegare alle normali reti di distribuzione provviste soltanto di *due fili*: esso perciò trova largo impiego come motore di piccola potenza, anche di minuscole dimensioni, nel campo domestico.

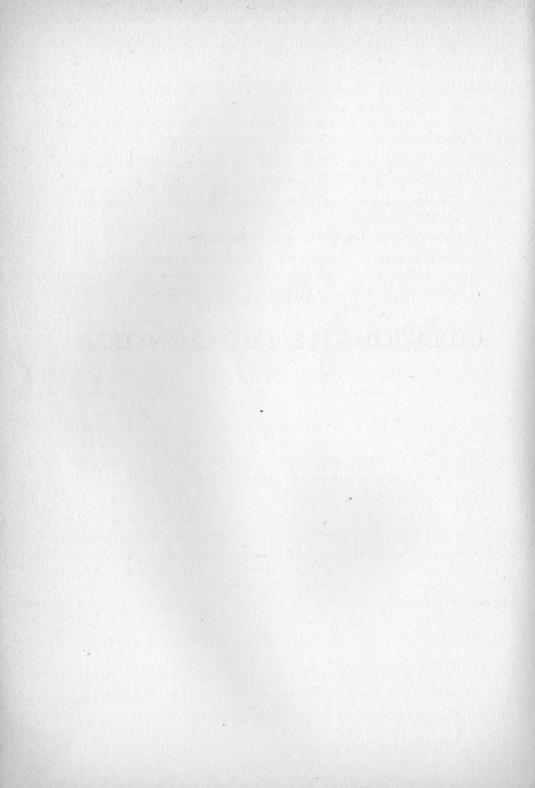
* * *

Sul medesimo principio della rotazione di avvolgimenti in campi magnetici si basano molti tipi di *ripetitori*, dispositivi che appunto ripetono identicamente a distanza la rotazione di un indice, essendo i due apparati collegati soltanto elettricamente.

Lo stesso dicasi per i telecomandi (comandi a distanza), estesamente impiegati in molte apparecchiature elettromeccaniche moderne.

PARTE IV

RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA



20 — Le oscillazioni elettriche presentano analogie significative con le oscillazioni meccaniche. Induttanza e capacità fattori essenziali di un circuito oscillante.

Risonanza anche in una conchiglia.

Per ben comprendere il fenomeno delle oscillazioni elettriche è utile fare riferimento al fenomeno materiale delle oscillazioni meccaniche, per es. di un dispositivo costituito da una sfera metallica fissata in mezzo ad una molla spirale. (Fig. 90 a sinistra).

Se si sposta la sfera dalla sua posizione di riposo (1) verso sinistra si mette in tensione la semimolla destra (2) comprimendo nello stesso tempo la semimolla sinistra; lasciata ora libera la sfera questa, per l'elasticità della molla, ritorna verso destra, raggiunge la posizione iniziale (3) e la sorpassa per inerzia spostandosi ancora verso destra (4). Così facendo comprime la molla destra tendendo la sinistra; perciò nel tempo successivo la sfera tornerà a sinistra (5), e le oscillazioni si ripeteranno, di ampiezza sempre minore, fino a cessare completamente.

Il fenomeno durerà tanto più a lungo quanto maggiore sarà — per una data massa della sfera — la forza elastica della molla: è questa energia elastica, messa in gioco nel primo spostamento della sfera, che viene spesa per produrre le oscillazioni e si consuma negli attriti interni molecolari della molla stessa durante le tensioni e le compressioni.

La durata di una singola oscillazione completa — dalla posizione (3) alla posizione (7) — dipende direttamente dalla massa della sfera e inversamente dalla elasticità della molla.

Le oscillazioni elettriche, o meglio elettromagnetiche, consistono nel passaggio alternato di energia elettromagnetica da una parte all'altra di un particolare circuito, detto circuito oscillante. Precisamente, come nel dispositivo meccanico prima descritto esiste una sfera (sede di energia di massa inerziale) ed una molla (sede di energia elastica), così in un circuito oscillante esiste una bobina (sede di energia magnetica quando è percorsa da corrente

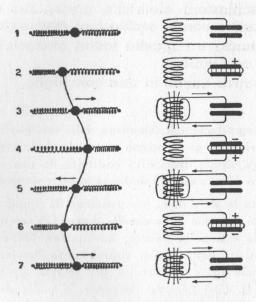


Fig. 90 — (A sinistra): Dispositivo meccanico oscillante (con massa inerziale e molla elastica). (A destra): Circuito elettrico oscillante (con induttanza e capacità).

variabile) ed un condensatore (sede di energia elettrica nelle fasi alterne di carica). La resistenza elettrica corrisponde alla resistenza di attrito che la sfera incontra nell'oscillare.

Ovviamente in un dispositivo meccanico si avranno oscillazioni, di una certa frequenza, soltanto se gli attriti saranno ridotti al minimo e se le caratteristiche del dispositivo (elasticità e massa in gioco) saranno tali da consentire un rapido e ripetuto scambio di energia tra la sfera (massa inerte) e la molla (mezzo elastico): altrimenti la sfera, spostata dalla sua posizione centrale, vi ritornerebbe lentamente senza sorpassarla, e le oscillazioni non avrebbero luogo.

Così avverrebbe infatti se il dispositivo sopra descritto fosse immerso, anzichè nell'aria dove l'attrito di spostamento è minimo in una sostanza vischiosa dove invece la resistenza diventa rilevante.

Analogamente in un circuito elettrico, di minima resistenza ohmica, si avranno pure oscillazioni, semprechè la sua induttanza (L) e la sua capacità (C) raggiungano determinati valori. La frequenza (f) dipenderà dalle caratteristiche L e C, secondo la formula:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{6,28\sqrt{LC}}$$

(Può essere quì ricordata anche l'analogia con la corda vibrante di uno strumento musicale: la frequenza di vibrazione, cioè la nota musicale emessa, dipende dalla grossezza e dalla lunghezza della corda).

Per ottenere « oscillazioni elettromagnetiche » di notevole frequenza, quali occorrono per le radiocomunicazioni, si è ricorso alla scarica dei condensatori.

Come detto a suo tempo, se le armature di un condensatore carico vengono collegate attraverso un conduttore, ha luogo la scarica del condensatore, consistente nel rapido passaggio degli elettroni — attraverso il conduttore — dall'armatura « negativa » dove sono più addensati, all'armatura « positiva ».

Se infatti il conduttore presenta piccola resistenza il flusso di elettroni avrà tale velocità che gli elettroni stessi affluiranno sulla armatura positiva in numero esuberante, in modo da provocarvi un addensamento superiore a quello restante sull'armatura negativa. Allora la scarica si ripeterà in senso inverso, e così via, in una serie rapidissima di oscillazioni fino a pareggiare il numero degli elettroni sulle due armature. (In una scarica del genere la frequenza può assumere valori dell'ordine di miliardi di vibrazioni al secondo).

(Come analogia materiale grossolana si può pensare, oltre che al classico pendolo, ad un serbatoio di acqua di grande capacità che si scarichi su un altro serbatoio vuoto — il cui fondo è a livello inferiore — quando sia messo istantaneamente in comunicazione con esso attraverso una tubazione di minima resistenza. Nel deflusso l'acqua per inerzia salirà nel secondo serbatoio ad un livello superiore a quello che aveva nel primo. Allora avverrà un altro deflusso

in senso inverso, dal secondo al primo serbatoio, e così via. Dopo una breve serie di oscillazioni « smorzate » l'acqua avrà raggiunto lo stesso livello nei due serbatoi e cesserà ogni movimento).

* * *

Consideriamo ordunque (Fig. 90 - destra) un circuito elettrico costituito da un condensatore di capacità C e da una bobina di induttanza L.

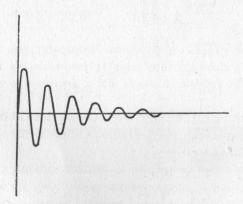


Fig. 91 — Diagramma di una corrente oscillante smorzata: l'ampiezza diminuisce rapidamente, restando invariato il periodo.

Nella condizione (2) il condensatore è carico, e nella Figura sono indicate le linee di forza elettriche tra le due armature. Nella condizione (3) il condensatore si è scaricato attraverso l'induttanza e la corrente di scarica ha prodotto nell'induttanza stessa un campo magnetico, che nel tempo successivo (4) scomparendo genera una corrente autoindotta, di senso opposto alla precedente, la quale caricherà nuovamente il condensatore. Nella condizione (5) si scarica ancora una volta il condensatore, ripetendosi in senso opposto quanto è avvenuto nella condizione (3). E così di seguito.

In definitiva nel circuito fluisce una corrente oscillante, di intensità decrescente, cioè smorzata (del tipo rappresentato graficamente dalla Fig. 91), verificandosi uno scambio di energia dal condensatore alla bobina e viceversa.

Analogamente a quanto avviene nell'oscillatore meccanico, il numero delle oscillazioni nel circuito condensatore-bobina sarà tanto maggiore quanto minore sarà l'attrito elettrico (cioè la resistenza ohmica) che la corrente incontra nel circuito stesso.

Le successive oscillazioni, di ampiezza decrescente, conservano sempre uguale durata, la quale durata, che si definisce periodo (T) risulta direttamente proporzionale ai valori dell'induttanza e della capacità, secondo l'espressione $T=2~\pi~\sqrt{LC}=6.28~\sqrt{LC}$.

Come noto, si definisce frequenza il numero di periodi al minuto secondo, cioè $f=\frac{1}{T}$; $f=\frac{1}{6,28\sqrt{LC}}$.

Facendo L e C di valore sufficientemente piccolo il periodo T si riduce ad una piccolissima frazione di secondo: si ha allora una corrente oscillante ad alta frequenza.

In un circuito oscillante ad alta frequenza, dopo aver alimentato il condensatore con un circuito a parte, si può provocare la scarica oscillante per mezzo di uno spinterometro. Questo è costituito da due sferette ravvicinate, la cui distanza è calcolata in modo che tra di esse la scintilla (attraverso la quale il condensatore si scarica) scocchi quando la tensione tra le due armature del condensatore ha raggiunto un determinato valore. (Analogamente a quanto avviene tra le punte della candela di accensione di un motore a scoppio).

Allora la scintilla — che appare unica alla vista ma in realtà è formata da una serie di numerosissime scariche susseguentisi per quanti sono i passaggi di corrente nei due sensi — fa da collegamento elettronico istantaneo che chiude il circuito condensatore-bobina alternativamente in un senso e nell'altro.

Nei circuiti oscillanti ad alta frequenza l'effetto di autoinduzione (vedi Cap. 11 e Cap. 15) è naturalmente molto notevole, data la rapidità di variazione della corrente: così pure l'effetto induttivo su un circuito vicino, che si dice accoppiato (magneticamente) al primo: tale effetto, attraverso la corrente generata per induzione, può essere rivelato dall'accensione di una lampadina inserita nel secondo circuito. (Fig. 92).

Anche la « corrente di spostamento » tra le armature del condensatore assume valori elevati (come visto nel Cap. 8 - Fig. 29) tanto da provocare, in un'asticina metallica interposta (ab) una corrente al-

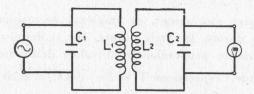


Fig. 92 — Circuito oscillante primario $(L_1 \ C_1)$ e circuito oscillante secondario $(L_2 \ C_2)$ accoppiati induttivamente. (L'accoppiamento è realizzato dalle bobine L_1 e L_2).

ternata di conduzione, dovuta alle vibrazioni rapidissime degli elettroni, vibrazioni presenti nell'asticina come in tutto il « campo » tra le armature.

* * *

Le correnti oscillanti sopra considerate sono — come già detto — « smorzate », ossia tali da decrescere rapidamente di intensità fino ad annullarsi. Ma è possibile produrre anche oscillazioni elettriche non smorzate, cioè persistenti, e sono queste che rivestono la maggiore importanza.

Per ottenere oscillazioni persistenti bisogna che al circuito sia fornita energia, prelevandola da una sorgente esterna, al fine di reintegrare continuamente le perdite subite dalla corrente oscillante per effetto Joule. Non diversamente si procede in un orologio dove, ad ogni oscillazione, si fornisce al pendolo, per mezzo del bilanciere, la energia perduta per gli attriti prelevandola da quella accumulata in una molla o in un peso (come già detto al Cap. 17).

Un dispositivo del tipo indicato nella Fig. 93 mostra come un circuito elettrico possa oscillare in modo continuo, autocomandato, a bassa frequenza. (L'energia è fornita dalla batteria).

Fa da interruttore automatico la lancetta di un amperometro (i) che stabilisce il contatto con il filo (f) soltanto quando oscilla da sinistra verso destra. Quando oscilla da destra verso sinistra il contatto non avviene essendo la lancetta rivestita nella parte sinistra di materiale isolante.

Nel dispositivo ora mostrato le oscillazioni elettriche sono denunciate dall'indice dell'amperometro, che oscillerà regolarmente con moto pendolare permanente; una lampadina inserita nel circuito si accenderà ad ogni contatto, ad intervalli regolari, corrispondenti al « periodo » dell'oscillazione.

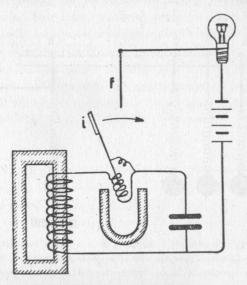


Fig. 93 — Schema di circuito oscillante autocomandato per la generazione di oscillazioni persistenti a bassa frequenza (i = indice).

Poichè l'interruttore di cui trattasi (lancetta con molla) presenta una certa inerzia meccanica la frequenza delle oscillazioni prodotte non può risultare mai molto elevata.

Per conseguire frequenze elevate, superiori a mille periodi al secondo e fino a milioni di periodi, bisogna ricorrere ad interruttori di natura « elettronica », che non abbiano inerzia meccanica. Questi esistono e sono i trìodi, dei quali si dirà nei Cap. 25 e 26.

* * *

Osserviamo ora che un oscillatore meccanico, per es. un qualsiasi pendolo, una volta eccitato, oscilla liberamente con la frequenza propria, dipendente dalle sue caratteristiche meccaniche. Ma il pendolo può essere anche costretto ad oscillare « forzatamente », con una frequenza diversa dalla propria, mediante una opportuna « eccitazione ».

Il dispositivo della Fig. 94 mostra dei pendoli a molla spiraliforme di diverse lunghezze (con sfere della stessa massa) sospesi ad un'asta a sbalzo che porta all'estremità un pendolo « eccitatore »:

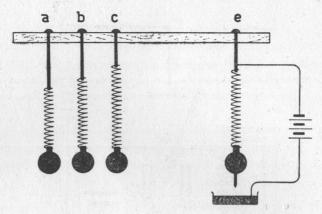


Fig. 94 — I pendoli a molla a, b e c sono collegati mediante l'asta orizzontale con il pendolo eccitatore e. Il pendolo c avendo la stessa lunghezza del pendolo e oscillerà — esso soltanto — in risonanza con e.

questo può essere fatto oscillare automaticamente (in su e in giù) mediante l'inserimento in un circuito elettrico (che serve soltanto da interruttore).

(L'interruzione si ottiene dopo che la punta sotto la piccola sfera, nella fase in cui la molla si allunga per il peso della pallina, ha toccato il mercurio della vaschetta: così si chiude il circuito e la corrente passando nelle spire determina un'attrazione tra le spire stesse causando la contrazione della molla; la corrente perciò cessa, e allora la molla si allunga nuovamente per il peso della sfera, ristabilendo il contatto; e così via).

Oscillando il pendolo eccitatore oscilla l'asta e trasmette gli impulsi di oscillazione agli altri pendoli ad essa sospesi, che eseguono così anch'essi delle oscillazioni forzate la cui frequenza è la stessa di quella dell'eccitatore.

Le ampiezze di tali oscillazioni saranno in genere piccole: le oscillazioni di massima ampiezza le compierà soltanto il pendolo c, che avendo una lunghezza eguale a quella del pendolo eccitatore oscillerà « in risonanza » con esso. (Si veda quanto detto nel Cap. 17 sulla risonanza).

Analoga cosa avviene nei circuiti elettrici, nei quali la funzione di « collegamento », esercitata materialmente dall'asta nel caso dei pendoli, è affidata al campo elettromagnetico concatenato.

Anche in un circuito elettrico oscillante indotto si potrà ottenere il massimo valore della corrente (analogo alla massima ampiezza dell'oscillazione pendolare) quando le caratteristiche di induttanza e capacità del circuito siano state scelte opportunamente in modo da metterlo « in risonanza » con il circuito eccitatore.

* * *

Diciamo di passaggio che in meccanica i fenomeni di risonanza devono essere tenuti nel massimo conto nel calcolo per es. delle strutture di un ponte metallico, oppure di velivoli, ecc.

E' accaduto talvolta che ponti metallici grandiosi (Tacoma Narrows) siano crollati, non in seguito alla violenza diretta del vento,
ma per aver questo provocato nei tiranti della struttura semplicemente delle vibrazioni continue le quali, amplificate appunto perchè
in risonanza con il periodo di oscillazione proprio dei tiranti stessi,
hanno determinato la rottura.

In acustica poi i fenomeni di risonanza sono alla base della costruzione degli strumenti musicali. Esiste anche un semplicissimo dispositivo, il risonatore di Helmholtz che serve per selezionare tra tante una determinata nota: è costituito da una sfera cava con una apertura svasata dalla quale entrano le onde sonore. L'onda sonora, la cui lunghezza corrisponde al diametro della cavità, per successive riflessioni nell'interno della cavità stessa si mette in risonanza e si amplifica rendendosi ben udibile.

Del resto tutti sanno che una comune conchiglia, avvicinata allo orecchio, produce un certo suono: perchè seleziona tra i tanti esistenti nell'aria quello che con la cavità della conchiglia risulta in risonanza.

Si vedrà a suo tempo (Cap. 29) l'importanza delle cavità nei fenomeni di risonanza delle vibrazioni elettromagnetiche. 21 — La radiazione elettromagnetica originata da vibrazioni elettriche.

Per la definizione e il comportamento delle onde radio valgono i confronti con le onde fluide.

Il dipolo circuito oscillante atrofizzato ma funzionale per le altissime frequenze.

Nel dispositivo meccanico oscillante preso in considerazione nel Capitolo precedente la « massa » oscillante, localizzata nella sfera, era nettamente distinta dal « mezzo elastico », localizzato nella molla.

Ma esistono sistemi oscillanti nei quali una tal netta differenziazione non è possibile: per esempio una corda metallica che vibri.

Cosa analoga si verifica in qualche particolare sistema elettrico.

Consideriamo per esempio un circuito oscillante semplificato come quello della Fig. 95 a, in cui l'induttanza è ridotta ad un semplice anello conduttore. Se deformiamo l'anello, come indicato nelle Figure 95 b e 95 c, anche il condensatore scompare e — immaginando le armature costituite dalle estremità del conduttore — lo spazio interessato dal campo elettrico del condensatore diventa tutto lo spazio circostante al conduttore.

Un dispositivo così formato, percorso da corrente elettrica oscillante, si denomina « dipolo » in quanto si comporta, dal punto di vista elettrico, analogamente ad una barra magnetica, la quale — come è noto — presenta alle estremità due polarità opposte, da cui si dipartono le linee di forza (dirette nel dipolo alternativamente in un senso e nel senso opposto).

Se la corda metallica cui si è prima accennato, tesa e fissata ai suoi estremi (Fig. 96) la facciamo vibrare, sollecitandola nel senso alto basso, essa assumerà, nella massima oscillazione, le posizioni indicate in figura, e l'ampiezza dello scostamento materiale delle molecole della corda, nel senso alto-basso, si rileverà massima al centro (« ventre » dell'oscillazione) e nulla alle estremità (« nodi »).

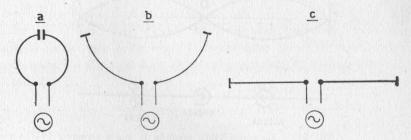


Fig. 95 — Come si può concepire un dipolo (c) derivato da un circuito oscillante chiuso (a).

Quando un dipolo oscilla elettricamente il diagramma della oscillazione elettrica è simile a quello della corda vibrante: soltanto che nel dipolo non avviene alcuno spostamento di materia, ma è la vibrazione degli elettroni, nel senso della lunghezza, ossia è la corrente alternata che lo percorre, che assume la massima intensità al centro e si annulla alle estremità del conduttore.



Fig. 96 — Una corda vibrante, fissata ai suoi capi, assumerà nella vibrazione le posizioni estreme indicate con linee tratteggiate.

E' noto che una corda può vibrare anche secondo le oscillazioni armoniche, aventi un periodo $\frac{T}{2}$, $\frac{T}{3}$, $\frac{T}{4}$, ecc. rispetto al periodo T della nota fondamentale, in modo cioè che la corda comprenda nella sua lunghezza un numero intero di fusi. Si dice allora che le oscillazioni (vibrazioni), ripetentisi identicamente nel tempo, sono stazionarie.

Nelle onde stazionarie i punti in cui lo spostamento è nullo (nodo), e i punti in cui lo spostamento è massimo (ventre), restano immutati nel corso delle vibrazioni.

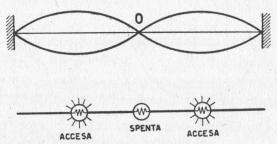


Fig. 97 — La corda vibra secondo la sua « prima armonica » presentando un « nodo » nel punto 0. (Analoga cosa è per il dipolo, nel quale la lampadina al centro rimane spenta).

Così nel caso della Fig. 97 - sopra la corda vibra secondo la sua pri-

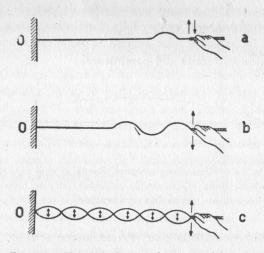


Fig. 98 — Una fune fissata ad un capo (o) può essere fatta oscillare in onde stazionarie.

ma armonica $(\frac{T}{2})$ con lunghezza d'onda metà della precedente, in modo che nel punto O si ha un « nodo ».

Analogo fenomeno si verifica in un dipolo nel quale, in corrispondenza di un « nodo », la vibrazione elettrica, cioè la corrente, ugualmente si annulla, sicchè una lampadina posta in quel punto resta spenta (Fig. 97 - sotto).

Onde stazionarie di tipo meccanico, cioè sistemi di onde in cui l'oscillazione si riproduce sempre nella identica posizione, sono anche quelle della fune della Fig. 98. Nella fune infatti le oscillazioni si « riflettono » nel punto fisso O sovrapponendosi di ritorno alle onde di andata.

* * *

Per comprendere il meccanismo della propagazione nel mezzo vibrante dell'onda stazionaria ci si può riferire alla fune, nella quale la propagazione avviene in quanto l'oscillazione nel senso alto-basso impressa dalla mano ad un'estremità della fune stessa viene trasmessa progressivamente (a, b, c) in tutta la lunghezza, grazie alla elasticità propria degli elementi strutturali della corda e, in ultima analisi, grazie allla possibilità che hanno le molecole di distanziarsi e avvicinarsi tra loro per la propria natura vibratoria.

Lo stesso succede, per quanto in modo meno appariscente, per la vibrazione meccanica che si propaga lungo l'asta che porta appesi i pendoli nella Fig. 94.

Nelle classiche onde provocate dalla caduta di un sasso in uno stagno sono le molecole di acqua, dotate di una propria mobilità e di un notevole grado di libertà, che oscillano nel senso alto-basso, e si trasmettono l'un l'altra per strati contigui il moto oscillatorio.

Nel caso delle onde acquee, a differenza di quanto avviene nelle onde stazionarie, la propagazione avviene in modo progressivo, ossia in ciascun punto l'intensità (ampiezza) della oscillazione assume progressivamente tutti i valori, da zero al massimo, in un senso e nell'altro (Fig. 99).

Così un punto qualsiasi del mezzo (la particella a della superficie liquida) viene a compiere, nel tempo corrispondente ad un periodo, una oscillazione completa nel senso alto-basso, senza spostarsi lateralmente.

Infatti un pezzo di sughero che si trovi nel « campo » interessato dalla perturbazione rileverà l'esistenza dell'onda in quanto si metterà ad oscillare nel senso alto-basso, senza subire alcuna traslazione sulla superficie dello stagno. Ciò conferma che nei fenomeni ondulatori non si verifica trasporto di materia ma soltanto propagazione della perturbazione.

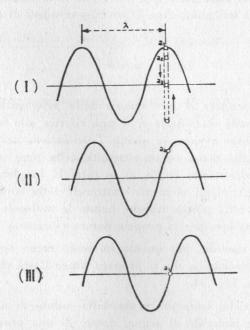


Fig. 99 — Posizioni successive di una onda acquea mentre si propaga da sinistra verso destra. Nel tempo di 1/4 di periodo la particella a assume le posizioni successive a_1 a_2 a_3 . (λ = lunghezza d'onda).

L'impressione visiva che dà invece l'onda, di spostarsi radialmente dal punto di eccitazione (dove è caduto il sasso) riguarda la direzione di propagazione della perturbazione. Tale propagazione avviene, infatti, in linea retta, in tutte le direzioni (e quindi l'onda assume l'aspetto circolare con circonferenza di raggio crescente) ad una velocità che dipende esclusivamente dalla natura del mezzo oscillante.

La lunghezza d'onda, (λ) , ossia la distanza tra due massimi positivi, o tra due massimi negativi, viene allora a dipendere dalla velocità di propagazione e dalla frequenza, secondo la relazione $\lambda = \frac{\mathbf{v}}{2}$.

Lo stesso succede per un'onda elettrica (Fig. 100).

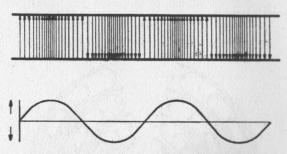


Fig. 100 — Istantanea immaginaria di un'onda elettrica (guidata) che si propaga da sinistra verso destra. (Le frecce indicano con il loro addensamento la intensità e con la loro direzione la direzione del campo). (In basso: la sinusoide rappresentativa del campo).

Si aggiunge che quando si vogliono provocare onde nell'acqua, p. es., si deve intervenire con una certa « energia » per « eccitare » convenientemente la materia acqua. (Si può immaginare, p. es., il pendolo c) della Fig. 94 provvisto di una punta che urti ad ogni oscillazione una superficie acquea).

Analogamente una corda musicale, se la si preme lentamente, anche con grande forza, si deforma senza dar luogo ad alcun suono: la vibrazione sonora si provoca bensì con un urto istantaneo, non necessariamente poderoso, come quando semplicemente si « pizzica » la corda di uno strumento musicale.

In effetti, il suono si produce soltanto quando le vibrazioni della corda superano la frequenza di 16 periodi al secondo.

Così è pure per la perturbazione elettromagnetica, che per essere provocata richiede uno « stimolo », cioè una frequenza eccitatrice sempre superiore a 500 cicli al secondo (in pratica di almeno 10.000 cicli) da parte della « scarica » alternata che ne è l'origine.

In tutti i casi di oscillazioni materiali prima ricordati siamo in presenza di una vibrazione elastica, cioè di energia meccanica manifestantesi come moto oscillatorio di molecole, che si propaga attraverso la materia (metallo, canapa, acqua, ecc.) con una certa velocità di propagazione, dipendente dal tempo occorrente agli elementi vibranti per far sentire ai contigui l'effetto della oscillazione ad essi impressa da una forza « eccitatrice ».

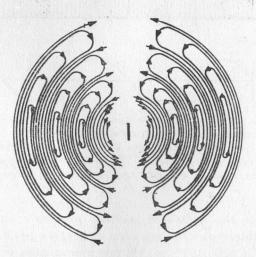


Fig. 101 — Configurazione del campo elettrico (linee di forza elettriche) intorno ad un dipolo emittente.

Nel caso del dipolo — come abbiamo detto — l'oscillazione è invece costituita da una vibrazione elettronica, cioè da una corrente alternata di intensità variabile nei diversi punti del dipolo. A tale distribuzione di corrente nel conduttore corrispondono determinati valori della tensione nello spazio, cioè nel campo elettrico circostante, tensione variabile anch'essa con la stessa legge di variazione della corrente: è questa in sostanza la radiazione propagantesi nello spazio.

Del resto, come già detto all'inizio di questo Capitolo, lo spazio intorno al dipolo può essere considerato elettricamente nelle condizioni in cui si trova lo spazio fra le armature di un condensatore a sca-

rica oscillante. In esso perciò si potrà notare una corrente di spostamento analoga a quella di cui si è trattato nel Capitolo precedente.

Quale rivelatore-ricevitore della corrente in detto spazio può essere usato un dipolo della stessa dimensione del dipolo che fa da oscillatore-emittente, in modo da ottenere nel ricevitore stesso, per lo effetto di risonanza, la massima intensità di vibrazione elettronica. (Analogamente al pendolo c della Fig. 94).

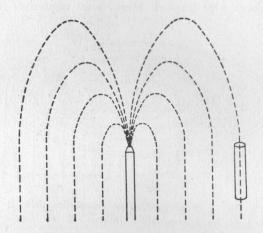


Fig. 102 — Gli zampilli di un getto d'acqua verticale sono contenuti in piani verticali.

In definitiva si constata nello spazio l'esistenza di vibrazioni elettriche stazionarie della stessa natura di quelle provocate nel dipolo.

Rivelando e rilevando, ossia misurando, la corrente di spostamento nei diversi punti dello spazio si possono individuare le linee di forza del campo elettrico intorno a un dipolo, cioè le linee lungo le quali si esercitano le forze elettriche.

Tale campo elettrico viene ad avere la configurazione presentata nella Fig. 101, considerato il piano del foglio contenente il dipolo-emittente. Ciò vuol dire che un dipolo-ricevitore collocato lungo una linea di forza rivelerà massima intensità di corrente: rivelerà invece corrente nulla se viene collocato normalmente alle linee di forza elettriche.

Come la corrente elettrica nel dipolo è alternata così risulterà alternato anche il campo elettrico, e le linee di forza si seguiranno quindi nel tempo alternativamente dirette in un senso e nel senso opposto.

Molto grossolanamente, soltanto per analogia « visiva » di figura, si può immaginare un dipolo (anzi un semi-dipolo emittente) materializzato da un ugello verticale di una fontana, dal quale esca un getto di acqua (Fig. 102). Gli zampilli in cui si fraziona il getto, che corrisponderebbero alle linee di forza, sono contenuti in piani verti-

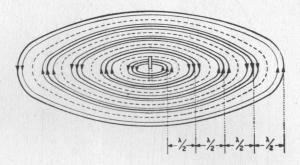


Fig. 103 — Rappresentazione schematica delle linee di forza magnetiche intorno ad un dipolo emittente (λ = lunghezza d'onda).

cali: sicchè se si dispone un cannello (conduttore) orientato come nella figura vi passerà dell'acqua; non vi passerebbe se invece si disponesse trasversalmente agli zampilli.

L'intensità del campo elettrico, cioè la densità delle linee di forza elettriche, decresce con l'aumentare della distanza dal dipolo emittente, come avviene in tutte le irradiazioni.

Ma contemporaneamente al campo elettrico, nello spazio circostante al dipolo si genera anche un campo magnetico, dovuto sempre alla corrente alternata che scorre nel dipolo stesso. Come sappiamo (Cap. 10) le linee di forza di tale campo appaiono circolari e giacenti su piani normali all'asse del dipolo, su piani risultanti quindi orizzontali perpendicolari ai piani contenenti le linee di forza elettriche, se il dipolo è verticale (Fig. 103). Il campo magnetico si manifesta pur esso alternativo, come la corrente che lo produce.

A sua volta un flusso magnetico variabile alternato produce — come è noto — delle correnti indotte, sempre alternate.

Si conferma che le oscillazioni elettriche sono sempre indissolubilmente connesse con le oscillazioni magnetiche.

Per fornire un'immagine materiale — molto grossolana ovviamente — di tale connessione, si consideri il modo di azionamento di un trapano a cursore (Fig. 104). Al movimento alternato, nel sen-



Fig. 104 — Un trapano a cursore materializza nel moto alternato lineare del cursore l'oscillazione elettrica, nel moto alternato rotatorio della punta l'oscillazione magnetica.

so alto-basso, del cursore (paragonabile alla oscillazione elettrica della c.a. in un conduttore) è connesso il moto rotatorio alternato, nel senso antiorario e orario, del trapano (moto rotatorio paragonabile alla oscillazione magnetica).

Il verificarsi del complesso « campo elettrico e campo magnetico » nello spazio costituisce la radiazione elettromagnetica, scoperta e studiata dal fisico germanico Enrico Herrz (1797-1870): è questa scoperta da porre all'origine del meraviglioso mondo della radio, una delle più alte e feconde conquiste della scienza e della tecnica moderne.

22 — Alla ricerca di una spiegazione sulla natura delle onde elettromagnetiche con riferimenti agli analoghi fenomeni fluido-meccanici.

Immaginando lo spazio tutto pieno di elettroni vibranti riprenderebbe corpo l'etere cosmico.

Divagazioni sulla inerzia e sulla gravità.

Per cercare di comprendere qual'è la natura delle onde elettromagnetiche riprendiamo in esame le analogie, già citate, con le oscillazioni di carattere « materiale », e il modo di propagazione delle relative « onde », queste agevolmente rilevabili dai nostri sensi.

Poichè le onde elettromagnetiche si propagano nello spazio, e non su una superficie come le onde di uno stagno, preferiamo ora assimilare le prime più opportunamente alle *onde sonore*.

Le onde sonore si propagano anch'esse nello spazio, in tutte le direzioni a partire dalla sorgente sonora, secondo sfere concentriche. Esse sono costituite da vibrazioni, intendendosi per vibrazione una oscillazione completa di un punto materiale — al limite di una molecola — in un senso e nell'altro, rispetto al luogo dove si trova normalmente quando non è « eccitata » da forze esterne.

Se la propagazione del suono avviene nell'aria sono in realtà le molecole d'aria a oscillare: oscillando si trasmettono una « spinta » in un senso e nell'altro, determinando degli strati d'aria più compressi (cioè con le molecole più addensate) e degli strati meno compressi (cioè con le molecole meno addensate) che si susseguono alternandosi, con la frequenza — nel tempo — determinata dalla sorgente delle vibrazioni.

Infatti eccitando, cioè facendo entrare in vibrazione, la corda di uno strumento musicale per ottenere una certa « nota » (alla quale corrisponde una determinata « frequenza »: per esempio la nota « la » corrisponde a 435 vibrazioni al secondo) il relativo suono si trasmette nell'aria, attraverso le compressioni ed espansioni cui ora si è accennato, e noi lo percepiamo quando l'aria fa entrare in vibrazione il timpano del nostro orecchio.

Non solo, ma se dette vibrazioni dell'aria raggiungono la corda omonima di un altro strumento musicale la fanno vibrare con la medesima frequenza della prima corda eccitata, così da fare emettere anche dalla seconda corda la stessa nota musicale della prima (vibrazione in risonanza).

Lo stesso dicasi per due diapason.

Si ripete che — come nell'onda acquea della Fig. 99 — anche nell'onda sonora non ha luogo trasporto di materia, ossia le molecole d'aria non corrono nello spazio da uno all'altro dei due strumenti sopra citati. Esse si muovono, nel luogo dove ciascuna si trova, ma si limitano ad oscillare, cioè a vibrare con la rapidità relativa alla frequenza del suono.

Indipendentemente da questa rapidità di vibrazione, il suono si propaga nell'aria con una determinata velocità (338 metri al secondo a 0° centigradi), la quale velocità dipende esclusivamente dalla velocità propria naturale di cui sono sempre dotate le molecole di aria (moti browniani). Allo stesso modo la velocità di trasmissione di un messaggio in una corsa a staffetta dipende dalla velocità media che i corridori sono capaci di sviluppare.

Cosicchè quando la temperatura dell'aria aumenta, e con essa aumenta la velocità molecolare di agitazione delle molecole, aumenta anche la velocità di propagazione del suono: si passa così, per es., da 338 metri/sec alla temperatura di 0°, a 350 metri/sec alla temperatura di 30°.

Da quanto siamo andati dicendo si conclude che la propagazione di una vibrazione ha luogo soltanto se esistono i mezzi, cioè i veicoli idonei, che nel caso del suono nell'aria sono le molecole d'aria (come nel caso della trasmissione del suono nell'acqua o attraverso un metallo sono le molecole rispettivamente dell'acqua o del metallo). Infatti nel vuoto, cioè nello spazio dove non esiste materia, il suono non si tramette.

Si può aggiungere anzi che se non avessimo nozione della esistenza dell'aria, per difetto dei nostri sensi o per mancanza di idonei stru-

menti di indagine, l'aria potremmo ugualmente definirla come « un ente reale capace di trasmettere il suono » alla nota velocità, e ancora considerarla sicuramente composta di particelle materiali aventi caratteristiche tali da propagare il suono stesso mediante vibrazioni.

Ancora è da dire che la vibrazione sonora può assumere frequenze elevate (ultrasuoni) che da oltre 16.000 periodi al secondo raggiungono fino i 100 milioni di periodi. Alle massime fra dette frequenze le molecole di aria risultano troppo rade, troppo distanziate l'una dall'altra (in media 500 diametri atomici, equivalenti a 10-6 mm) per poter trasmettere dall'una all'altra tale rapidissima vibrazione, che infatti allora non si propaga più nell'aria. Continua invece a propagarsi nei metalli, dove le molecole sono molto più ravvicinate.

Se ne desume che nella trasmissione di una vibrazione ha importanza anche la « consistenza », come dire la « densità », del mezzo attraverso cui la vibrazione si propaga.

Ora, tornando alle onde elettromagnetiche, si constata che queste si trasmettono alla velocità di 300.000 Km/sec (la più alta velocità possibile in natura) anche attraverso lo spazio vuoto di materia.

D'altra parte si sa che i fenomeni elettromagnetici presuppongono l'esistenza di elettroni. Si dovrebbe concludere — sia pure come generica intuizione — che gli elettroni sono presenti dovunque nello spazio, cioè « riempiono » anche lo spazio che normalmente è considerato « vuoto » di materia. E ancora, che gli elettroni sono in un qualche stato « naturale » di agitazione con velocità propria che — data la loro infinitesimale massa materiale — risulta elevatissima e raggiunge i $300.000 \ Km/sec$.

In definitiva tutto lo spazio, anche quello nell'interno della materia, escluso soltanto la parte di volume occupato dai nuclei atomici, sarebbe riempito da una specie di « fluido elettronico », di notevole « densità », costituito da elettroni molto vicini l'uno all'altro e in perpetua agitazione. E' a un tale « fluido » che si può dare il nome di « etere », e propriamente di « etere cosmico ».

Che l'elettricità si possa presentare sotto aspetti diversi non deve poi far meraviglia, se si pensa che anche nel campo molecolare macroscopico, ben più accessibile ai nostri sensi e alle nostre indagini tecniche, la stessa materia assume forme e consistenza talmente diverse da sembrare che l'una non abbia alcuna parentela con l'altra.

Si consideri per esempio l'acqua la quale può esistere — anche contemporaneamente nello stesso luogo — secondo lo stato di agitazione e di « libertà » delle sue molecole, allo stato solido, liquido e aeriforme, diventando come aeriforme addirittura invisibile.

Analogamente alle molecole, di acqua, e fatte le debite differenzazioni, possiamo considerare anche gli elettroni in tre possibili « stati di aggregazione »: vincolati negli atomi, quando sono presenti nella materia come sua parte costituitiva; semiliberi quando fluiscono da un atomo all'altro sotto forma di corrente nei conduttori; liberi e in vibrazione nell'etere.

* * *

A suo tempo, per spiegare il fenomeno dell'elettromagnetismo, abbiamo considerato le linee di forza magnetiche costituite da vortici elettronici orientati contigui sullo stesso asse. Questo perchè si è supposto che gli elettroni, dotati già di un moto intorno al proprio asse (spin), abbiano una naturale tendenza a « vorticare », come le molecole d'aria nell'atmosfera.

(La tendenza a « vorticare » del fluido elettronico, ipotizzata nella presente trattazione, si può ritenere attendibile in base ad esperimenti, eseguiti in America, di interazione tra campi magnetici e aggregati fluidi del tipo « plasma » composti di elettroni e di ioni. Tali aggregati fluidi assumono infatti, in determinate condizioni, una configurazione a spirale che ha indotto a pensare ad una analoga formazione delle galàssie, le quali rivelerebbero perciò l'esistenza di uno stato vorticoso dell'etere negli immensi spazi degli ammassi stellari).

Trattando della corrente di spostamento (Cap. 8 e Cap. 20) si è pure attribuita tale corrente — di tipo alternato — al susseguirsi di « pulsazioni » delle orbite elettroniche.

Perciò, anche nello spazio dove non esiste materia, è da pensare che siano i « vortici elettronici » prima considerati a subire le « pulsazioni » cui si è accennato.

Una tale ipotesi porta a raffigurare il campo elettromagnetico intorno a un dipolo, e in particolare le linee di forza magnetiche ed elettriche, come nella Fig. 105.

Ad un certo istante si possono considerare presenti nello spazio vortici elettronici disposti in modo che vortici « coassiali » contigui

seguano l'andamento di un « parallelo », e vortici « complanari » contigui seguano l'andamento di un « meridiano ».

Dove si vede che una linea di forza magnetica si può considerare costituita da una serie di vortici elettronici contigui « coassiali », aventi cioè lo stesso asse e formanti nel complesso un anello chiuso concentrico e normale al conduttore. Una linea di forza elettrica si può considerare a sua volta costituita da una serie di vortici elettro-

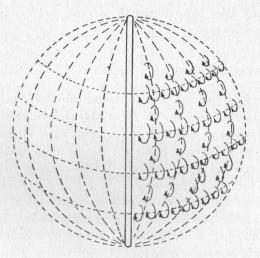


Fig. 105 — Intorno ad un dipolo, in un certo istante, si possono considerare presenti vortici elettronici, disposti in modo che vortici «coassiali » contigui seguano l'andamento di un « parallelo » e vortici « complanari » contigui seguano l'andamento di un « meridiano ».

nici adiacenti « complanari » con assi paralleli, formanti nel complesso un arco contenuto in un piano passante per il conduttore.

* * *

Cerchiamo ora di spiegare come può avvenire la propagazione di questa « perturbazione » elettromagnetica, immaginando che l'energia elettromagnetica sia dovuta alle rotazioni e pulsazioni elettroniche « organizzate e orientate », come si è prima detto.

Prendiamo in esame un conduttore lineare percorso da una corrente oscillante sinusoidale, quale sorgente delle « onde elettromagnetiche ».

Analogamente a quanto si verifica con le onde sonore, una onda elettromagnetica si può allora immaginare costituita dalla « compressione » e dalla « espansione » alternata dei « cerchietti elastici » rappresentanti le rotazioni elettroniche, compressioni ed espansioni che si traducono in addensamenti e in rarefazioni di elettroni, così come avviene per le molecole d'aria nel caso delle onde sonore.

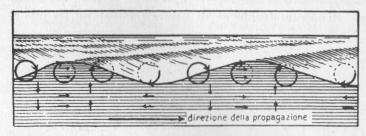


Fig. 106 — Propagazione di una onda acquea con il moto orbitale delle particelle, determinante la forma dell'onda (da Enciclopedia Italiana).

In particolare, il propagarsi delle « rotazioni elettroniche », attraverso l'innesco successivo di vortici, darebbe luogo alla propagazione delle linee di forza magnetiche; la pulsazione (schiacciamento alternato) degli stessi « vortici elettronici » darebbe luogo alla propagazione delle linee di forza elettriche, rivelantisi nella corrente alternata « di spostamento » misurabile lungo ciascuna di esse.

Come analogia fluido-meccanica può anche essere tenuto presente il modo di formazione e di propagazione di un'onda acquea (Fig. 106), in cui le singole particelle descrivono un « moto orbitale » così fatto da rivelare in definitiva una « oscillazione alternata », nel senso alto-basso, alla quale si è già accennato (vedi Fig. 99).

Si è detto nel capitolo precedente che per provocare una perturbazione elettromagnetica nello spazio bisogna « eccitare » lo spazio stesso mediante una corrente alternata di elevata frequenza (di almeno 10.000 cicli al secondo). Ora si può comprendere meglio tale esigenza ricordando che l'energia in gioco, in un fenomeno vibratorio, è tanto maggiore quanto maggiore è la frequenza della vibrazione

e considerando che le onde elettromagnetiche si propagano per « pulsazioni » nello spazio « elettronico » in modo analogo — a tale riguardo — al propagarsi delle onde sonore nello spazio « molecolare ».

In proposito diciamo fin d'ora che lo stesso fenomeno « vibrazione elettromagnetica» si presenta in forme nuove e diverse quando la frequenza si eleva e supera determinati valori: diventa per es. luce visibile, raggi X, raggi gamma.

* * *

Come già visto (Figg. 91, 99, 100) anche la vibrazione elettromagnetica, essendo un fenomeno di natura ondulatoria, si può rappre-

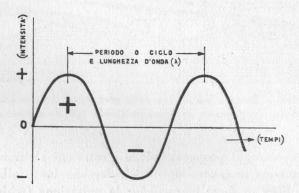


Fig. 106 - bis — Sinusoide rappresentativa di un'onda elettromagnetica.

sentare con una sinusoide, riportando sull'asse delle ascisse il tempo, sull'asse delle ordinate l'intensità (della corrente o della tensione). (Fig. 106 - bis).

In un'onda elettromagnetica si distinguono perciò l'ampiezza (massimo valore dell'intensità), e il periodo (o ciclo) che è — si ripete — il tempo intercorrente tra due valori massimi (entrambi positivi o entrambi negativi).

Questi valori possono rappresentare l'intensità di corrente, oppure la tensione, oppure l'intensità del campo magnetico; ma in sostanza sono da considerare sempre connessi alla densità degli elettroni presenti in un punto e alla loro velocità sia vibratoria che di rotazione.

La frequenza di una oscillazione elettromagnetica (Cap. 20) si esprime, per gli alti valori, con numeri indicanti le migliaia di cicli al secondo (Kilocicli) o i milioni di cicli al secondo (Megacicli). Spesso si usa, invece dell'unità « cicli al secondo », l'unità hertz: si parla allora di Kilohertz e di Megahertz (KHz e MHz).

Si è visto anche nel Cap. 20 che la frequenza dipende dai valori

$$L$$
 e C del circuito oscillante, secondo la formula $f = \frac{1}{6,28 \ V \ L \ C}$.

Se si vuol esprimere, invece della frequenza, la lunghezza d'onda λ in metri, essendo $\lambda=\frac{v}{f}$ (Cap. 21) e ricordando che la velocità di propagazione delle onde e.m. è di 300.000.000 di metri al secondo, la formula diventa:

$$\lambda = \frac{300.000.000}{f} = 1885 \sqrt{LC}$$

(in questa formula L si misura in microhenry e C in microfarad). Quando si dice che un'onda elettromagnetica è lunga per es. 100 metri significa che ogni 100 metri si ripetono gli stessi valori del campo elettrico e del campo magnetico.

* * *

Torniamo all'etere cosmico per una breve divagazione non strettamente attinente all'elettricismo ma da considerare un semplicistico tentativo — più ingenuo che presuntuoso — alla ricerca di una qualche spiegazione « afferrabile » di certi immanenti quanto misteriosi fenomeni o aspetti del mondo fisico, come la inerzia e la gravità.

Postulato dunque l'esistenza dell'etere cosmico quale fluido universale elettronico che riempie totalmente lo spazio, anche quello nell'interno della materia, escluso soltanto il volume che compete ai nuclei atomici, si può riguardare il comportamento della massa di un corpo rispetto all'etere analogamente a quello del volume di un corpo rispetto ad un fluido (acqua, aria, ecc.) nel quale è immerso.

Allora, allo stesso modo come per spostare, per es. una sfera immersa in un fluido si incontra una certa resistenza dipendente esclu-

sivamente dal volume del fluido spostato (e cioè dal volume della sfera) così per spostare un corpo nel vuoto si incontrerà una resistenza (di inerzia) dipendente esclusivamente dal volume dei suoi nuclei atomici, cioè dalla massa del corpo.

E come, per esempio, il fluido aria spostato da un corpo in moto « gli si richiude dietro » (risucchio) e tende a seguirlo e a spingerlo (pensare all'incremento di velocità di cui beneficiano i ciclisti « dietro motore ») il fluido etere si richiuderebbe dietro la massa in moto (considerata composta dell'insieme dei singoli nuclei) conferendo ad essa una spinta la quale risulterebbe equivalente alla forza occorsa per « spostare » l'etere stesso, sicchè il moto iniziale continuerebbe all'infinito (in assenza di forze resistenti esterne).

Tornerebbe ad avere valore — con l'ora esposta ipotesi — la antica concezione aristotelica dell'inerzia, riferita però non all'aria (come erroneamente supponeva Aristotele) bensì all'etere, e quindi non alla « massa apparente » dei corpi ma alla loro «massa nucleonica».

E' per tale massa, traducibile in volume di etere spostato, che può valere il principio della « natura che aborre il vuoto » (horror vacui).

Quanto alla gravità, sempre ammesso l'etere cosmico, si può supporre valido analogicamente il paragone con la spinta di galleggiamento che nasce quando una certa quantità di fluido acqua si solidifica diventando ghiaccio. Tale spinta è un risultato delle pressioni che le libere molecole del fluido « spostato » esercitano sul ghiaccio per il fatto che questo ha assunto un volume maggiore di quello che la stessa materia occupava prima allo stato fluido.

Si potrebbe pensare che all'atto della creazione della materia, cioè quando i *nuclei* si sono costituiti in seno al fluido etere — questo essendo nelle condizioni primigenie di «fluido cosmico» o «Ylem» formato da particelle elementari non aggregate — i nuclei stessi abbiano assunto un volume maggiore di quello del corrispondente « Ylem ».

Sicchè il libero fluido cosmico spostato è venuto ad esercitare una « pressione » sulla « materia aggregata » analoga a quella dell'acqua sul ghiaccio.

Maggiore è la quantità di materia aggregata (massa) maggiore sarà il fluido da esso spostato e quindi la « densità » e la « pressione » esercitata sulla massa del corpo. Allora, un pezzo di materia allontanato da una massa (Terra) verrebbe a trovarsi nelle condizioni di un pezzo di ghiaccio che staccato, dal basso, da un *iceberg*, tende a riattaccarsi allo *iceberg* come se ne fosse attratto.

Il punto neutro, dove cessa la forza di attrazione, nello *iceberg* si trova in corrispondenza della superficie dell'acqua. Nel caso dell'attrazione esercitata, per es., dalla massa della Terra, il punto neutro è il centro della sfera terrestre, dove le « pressioni » da ogni direzione si equilibrano.

Con *l'etere cosmico* costituito da elettroni vibranti si potrebbe infine risolvere anche il *dilemma corpuscolo-onda* che presentano le manifestazioni degli agenti « elettroni » o « fotoni » in diversi fenomeni.

Basterebbe infatti riferirsi all'analogo ma ben più macroscopico comportamento, nel campo molecolare, del fluido aria, per esempio. La quale aria, come è noto, nei fenomeni relativi al suono si manifesta per onde, mentre nei fenomeni di pressione agisce e si manifesta per corpuscoli.

23 — La decisiva realizzazione di Marconi.

I principî fondamentali delle radiocomunicazioni.

Come si irradiano e come si propagano le onde elettromagnetiche.

Sfruttamento della dispersione ionosferica e troposferica.

Si deve a Guglielmo Marconi (1874-1937) la prima decisiva e fondamentale utilizzazione delle onde elettromagnetiche per la trasmissione dei segnali a distanza, con la realizzazione della radiotelegrafia avvenuta nel 1895.

Marconi ideò per l'irradiazione delle onde elettromagnetiche un conduttore verticale, denominato antenna (od anche aereo) percorso da corrente oscillante.

Un conduttore così disposto, la cui estremità inferiore è a contatto con la terra, (Fig. 107 - sinistra) può funzionare da circuito oscillante cosiddetto « a costanti distribuite » in quanto la capacità e l'induttanza non vi sono localizzate in determinati punti ma si immaginano distribuite in ogni suo punto (come avviene del resto nel dipolo).

Un tal sistema costituisce dunque pur sempre un circuito oscillante, che si definisce del tipo aperto per distinguerlo dal circuito oscillante vero e proprio, detto chiuso (essendo in questo il condensatore e l'induttanza, separati e ben individuabili, collegati in un circuito chiuso).

Comunque, si rileva che il campo elettrico e il campo magnetico si producono ugualmente in un circuito oscillante aperto, con la particolarità, rispetto al circuito oscillante chiuso, che detti campi invece di restare confinati nel condensatore e nell'induttanza, scambiandosi alternativamente energia attraverso conduttori di minima resistenza, si diffondono disperdendosi nello spazio intorno all'antenna e tra l'antenna e la terra (assimilabili l'una e l'altra ad armature di condensatori).

Cosicchè un circuito oscillante aperto si presta benissimo per la irradiazione nello spazio dell'energia elettromagnetica.

La corrente e la tensione non assumono — nello stesso istante — valori uguali in ogni punto dell'antenna, ma risultano sfasate di 1/4 di

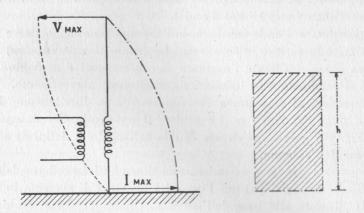


Fig. 107 — (A sinistra): In un'antenna marconiana il diagramma della corrente è rappresentato dalla linea a tratti e punti, il diagramma della tensione dalla linea a tratti. (A destra): Altezza efficace (h) di un'antenna marconiana.

periodo, cioè mentre la corrente in un punto (per es. alla base dell'antenna) assume intensità massima, la tensione vi assume valore minimo. (L'opposto avviene contemporaneamente all'estremità libera dell'antenna).

I diagrammi della corrente e della tensione sono rappresentati da archi di sinusoidi (Fig. 107 - sinistra).

Ci si può anche esprimere dicendo che la corrente presenta un « ventre » alla base e un « nodo » in cima, mentre la tensione presenta un « nodo » alla base e un « ventre » in cima.

Un'antenna così fatta oscilla liberamente, cioè naturalmente (vedi Cap. 20) su una frequenza propria corrispondente alla lunghezza di onda uguale a 4 volte l'altezza dell'antenna. Si dice allora che la antenna oscilla in quarto d'onda.

Così per es. un'antenna alta 25 metri oscilla liberamente, e irradia quindi nelle migliori condizioni di efficienza, su onda di 100 metri (corrispondente ad una frequenza di 3000 kilocicli al secondo).

Tale lunghezza di 100 metri si chiama lughezza d'onda fondamentale, relativa all'antenna di 25 metri.

Sulla lunghezza d'onda fondamentale l'antenna irradia con la massima efficienza, ma è possibile far oscillare l'antenna, con rendimento inferiore, su altre lunghezze d'onda corrispondenti a 3/4, 5/4, 7/4, ecc. d'onda (anzichè 1/4 d'onda).

La lunghezza d'onda irradiata dall'antenna può anche essere modificata facendo variare le caratteristiche (capacità e induttanza) dell'antenna stessa, mediante l'aggiunta di condensatori e di bobine. In tal caso il rendimento di irradiazione diminuisce notevolmente.

Riferendoci al diagramma che rappresenta la distribuzione della corrente lungo l'antenna, se si considera il rettangolo di area equivalente (Fig. 107 - destra) l'altezza di tale rettangolo si definisce altezza efficace dell'antenna.

La potenza irradiata da un'antenna dipende dal prodotto dell'altezza efficace in metri (h) per l'intensità massima di corrente in ampere (I) misurata alla base dell'antenna. Questo prodotto si chiama momento elettromagnetico e si misura in metri-ampere.

Il valore della corrente I_e misurato alla base dell'antenna si chiama corrente efficace. Il prodotto di I_e² per un fattore R_i detto resistenza di irradiazione dà la potenza irradiata e caratterizza la efficienza irradiatrice dell'antenna. Si nota in proposito che il prodotto I_e² R (vedi Cap. 15) rappresenta in un conduttore percorso da comune corrente alternata l'energia perduta per il riscaldamento del conduttore stesso e dissipata nello spazio circostante sotto forma di calore irradiato.

Nel caso dell'antenna irradiante percorsa da corrente ad alta frequenza si tende a rendere massima detta particolare « resistenza », in quanto essa non comporta perdita in calore ma si traduce in potenza irradiante con la creazione del campo elettromagnetico nello spazio intorno all'antenna. (La Ri dipende principalmente dall'altezza dell'antenna, riferita alla lunghezza d'onda).

Si ricorda anche in proposito quanto accennato al Cap. 16, sullo effetto pelle che si verifica nei conduttori percorsi da corrente alternata ad alta frequenza, quando avviene — si può dire — una specie

di « centrifugazione » della corrente, la quale si addensa esclusivamente alla periferia del conduttore.

Questo ci porta a concludere che l'energia elettrica in gioco, mentre nel caso della corrente continua, o di corrente alternata a b.f., provoca un aumento della vibrazione elettronica e conseguentemente della vibrazione molecolare in tutta la massa del conduttore, con l'inevitabile rilevante sviluppo di calore, nel caso di corrente ad a.f. non potendo la massa molecolare seguire l'elevatissimo ritmo della vibrazione elettronica, l'energia stessa si trasforma, quasi completamente, in una vibrazione degli elettroni che interessa soltanto lo strato superficiale del conduttore e provoca intensi vortici elettronici in tutto lo spazio circostante.

(In un' antenna si verificano anche le solite perdite di energia per effetto Joule, ma in misura molto ridotta, inferiore al 5% della potenza irradiata).

Sarebbe così spiegato l'effetto di irradiamento cui danno luogo le antenne quando si alimentano con corrente ad a.f., che appunto si sfrutta per le radiocomunicazioni.

* * *

Le onde che si irradiano da un'antenna marconiana si dicono semilibere in quanto restano a contatto con la terra che si comporta come prima detto — quale superficie conduttrice a guisa dell'armatura di un condensatore.

Si possono rappresentare schematicamente come nella Fig. 108. Onde del genere si può dire che si appoggino alla terra e siano da essa guidate, come da un conduttore. Ciò spiega la facilità con la quale le onde stesse si propagano da un capo all'altro del globo terraqueo, senza essere ostacolate dai rilievi montuosi. (La propagazione è favorita dalla superficie del mare, essendo l'acqua un buon conduttore).

L'antenna marconiana si può anche considerare funzionante come un dipolo verticale, con una sola metà emergente dalla superficie della terra (Fig. 108).

Le linee del campo elettrico saranno sempre disposte secondo piani verticali irradiantisi dall'antenna, e le linee del campo magnetico giaceranno in piani orizzontali. Un'antenna marconiana come quella della Figura trasmette ugualmente in tutte le direzioni, con la stessa intensità (a parità di distanza) in vicinanza del suolo: in alto l'intensità del campo diminuisce, fino ad annullarsi sulla verticale dell'antenna. (S'intende che l'intensità diminuisce sempre con l'aumentare della distanza dall'antenna).

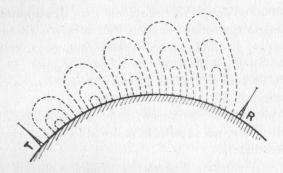


Fig. 108 — Rappresentazione schematica delle onde elettriche che si irradiano da una antenna marconiana T seguendo la superficie della Terra,

Implicitamente si è trattato fino a questo momento della irradiazione e della propagazione delle onde lunghe, di lunghezza compresa tra 3.000 metri e 600 metri, oppure di onde medie la cui lunghezza va da meno di 600 metri a 50 metri. Per le onde corte, di lunghezza minore, fino a 10 metri, oppure ultracorte, inferiore a 10 metri, ben si prestano le antenne tipo dipolo, già descritte al Cap. 21 (Fig. 95).

Piccole lunghezze d'onda equivalgono ad elevate frequenze, alle quali corrispondono valori sempre più piccoli della capacità e dell'induttanza.

Come già detto (Cap. 21) il dipolo oscilla liberamente sulla lunghezza d'onda corrispondente al doppio della lunghezza del dipolo stesso, cioè oscilla su mezza onda. Nel dipolo, come nell'antenna marconiana, la tensione è sfasata di 1/4 di periodo sulla corrente.

Il dipolo può anche oscillare su lunghezza d'onda corrispondente ai multipli della mezza onda.

Le antenne a dipolo (o hertziane) si dispongono in genere orizzontalmente. Così sono, per es., le antenne della TV: Fig. 108 bis. Un'antenna come quella della Fig. 108 bis, comunemente usata per ricezione in TV, risulta costituita da un sistema di conduttori « oscillanti »: il dipolo vero e proprio (del tipo ripiegato) è quello dal quale si dipartono i fili che scendono all'apparato ricevitore; i due conduttori rettilinei posti dalla parte da cui proviene l'emissione (a destra) sono detti direttori e servono a rinforzare i segnali in arrivo; la stessa funzione compie il conduttore situato dalla parte opposta e denominato riflettore.

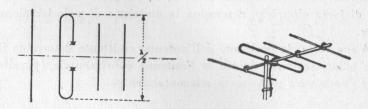


Fig. 108 - bis — Un'antenna ricevente a dipolo per TV tipo Yagi (Viste in pianta e in prospettiva).
 (λ = lunghezza d'onda da ricevere)

Anche le antenne marconiane possono essere disposte con un conduttore orizzontale parallelo alla terra e un altro conduttore (discesa d'aereo) verticale, che parte dal punto mediano del conduttore orizzontale (antenna a T) oppure da una sua estremità (antenna ad L rovesciata).

Quando il terreno sottostante all'antenna marconiana non è buon conduttore si dispone al disotto del conduttore orizzontale, vicino alla terra o sul terreno stesso, un secondo conduttore parallelo al primo detto contrappeso.

Nelle istallazioni radio a bordo di navi, veicoli terrestri oppure velivoli, fa da contrappeso la massa metallica stessa del mezzo semovente.

Le antenne suddette irradiano con maggiore intensità in certe direzioni rispetto a certe altre, secondo la loro forma: riportando i valori della intensità del campo misurati in tutte le direzioni si traccia il diagramma di emissione dell'antenna.

Disponendo due o più antenne in una determinata posizione relativa ed alimentandole con correnti opportunamente sfasate si ottiene come risultato una irradiazione particolare della forma desiderata (Fig. 111).

L'intensità del campo elettromagnetico si misura mediante il valore del potenziale indotto in un conduttore posto perpendicolarmente al piano del campo magnetico; si esprime in microvolt per metro di lunghezza del conduttore.

Come già sappiamo, le linee di forza elettriche risultano infatti normali al piano delle linee di forza magnetiche. La direzione delle linee di forza elettriche determina la direzione di polarizzazione dell'onda.

A sua volta, la posizione dell'antenna emittente determina il piano di polarizzazione: quindi se l'antenna è orizzontale (parallela al suolo) l'onda sarà polarizzata orizzontalmente.

* * *

In un'antenna (ricevente) immersa in un campo elettrico irradiato da una trasmittente viene « indotta » una f.e.m. (tensione) alternata, variabile con la stessa frequenza e forma dell'onda trasmessa. Tale tensione provoca naturalmente una corrente, ugualmente alternata, nell'antenna e nei circuiti con essa accoppiati.

Facendo riferimento al campo magnetico si può anche dire che nell'antenna ricevente la tensione viene indotta dalle linee di forza magnetiche — generate dalla trasmittente — che essa taglia.

Come prima accennato, le tensioni di cui trattasi hanno un valore molto piccolo, dell'ordine dei microvolt. Comunque, le correnti che ne derivano, opportunamente amplificate, sono sufficienti a permettere la ricezione acustica (Fig. 109) dei segnali trasmessi (Vedi Capp. 26 e 27). Si sono così potute realizzare le radiocomunicazioni, che hanno assunto all'inizio la forma e la denominazione di telegrafo senza fili.

A questo punto si rileva una importante particolarità nella propagazione del campo elettromagnetico quando aumenta la frequenza. Le onde e.m. soltanto in parte si propagano seguendo la curvatura della terra, subendo sempre inevitabilmente un'attenuazione con la distanza (onda di superficie): prevalentemente si propagano nello spa-

zio (onde spaziali) in linea retta, con diversi angoli di incidenza rispetto alla superficie terrestre, andando ad incontrare gli strati ionizzati esistenti nell'alta atmosfera, ad altezze di 100 - 200 - 300 Km ed anche oltre (strati di Kennelly - Heaviside) (Fig. 110).

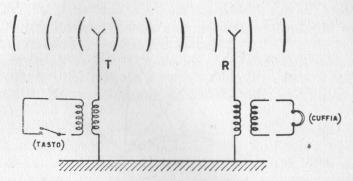


Fig. 109 — I segnali acustici prodotti all' origine nel circuito comprendente il tasto, vengono tradotti in oscillazioni elettriche e irradiate come onde elettromagnetiche dalla antenna trasmittente (T). Queste onde inducono correnti similmente alternate nell'antenna ricevente (R) successivamente ritradotte in segnali acustici nella cuffia.

Tali strati ionizzati sono prodotti dalla radiazione solare e variano di caratteristiche (densità, conduttività) secondo le ore del giorno e secondo le stagioni, e in genere secondo l'attività solare (tempeste magnetiche): essi hanno la proprietà di rifrangere e — in parte — di riflettere le onde elettromagnetiche.

Anche la terra riflette a sua volta le onde elettromagnetiche rinviandole verso gli strati ionizzati.

Le frequenze alle quali ora ci si è riferiti vanno fino a circa 500 Kilocicli (onda questa di 600 metri): siamo quindi nel campo delle onde medio-lunghe.

Aumentando ancora la frequenza, oltre 500 e fino a 1500 kilocicli (onda di 200 metri) l'attenuazione subita dall'onda di superficie diventa sempre più notevole: d'altra parte anche l'onda spaziale risulta attenuata durante il giorno, variando sensibilmente tale attenuazione con il variare delle condizioni della ionosfera.

Un fenomeno noto che si verifica abbastanza frequentemente nella ricezione delle emissioni radio, è il cosiddetto fading (evanescenza) consistente nella attenuazione improvvisa dei segnali ricevuti. Il fading è dovuto ad una temporanea variazione della « consistenza » e posizione degli strati ionizzati, tale che per esempio in un punto C (Figu-

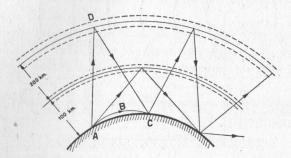


Fig. 110 Strati ionizzati esistenti nell'alta atmosfera (Kennelly-Heaviside) e riflessione delle onde e.m.

ra 110) le due onde in arrivo — l'una superficiale diretta ABC e l'altra spaziale riflessa ADC — vengono a risultare ad un certo momento in opposizione di fase, cosicchè l'intensità ne diminuisce, e al limite può diventare nulla.

Alle più alte frequenze (inglese VHF = Very High Frequencies) da 1.500 a 30.000 kilocicli = 30 Megacicli (onda questa di 10 metri) l'onda di superficie viene quasi completamente attenuata e la propagazione avviene praticamente soltanto mediante l'onda spaziale. Peraltro la terra non riflette tali onde così bene come riflette le onde medio-lunghe: perciò sono necessarie successive riflessioni tra la ionosfera e la terra per superare grandi distanze.

Alle frequenze elevatissime, alle cosiddette frequenze ultra alte (inglese UHF = Ultra High Frequencies) che vanno fino a 300.000 kilocicli = 300 Megacicli (onda di 1 metro), le onde passano normalmente attraverso la ionosfera senza essere rifratte.

Il che avviene di giorno per le frequenze maggiori di 25.000 kc, di notte per le frequenze da 10.000 a 20.000 kc.

Per le alte frequenze ora citate si deve normalmente contare soltanto sulla propagazione in linea retta, come se fossero raggi di luce: per la loro « portata » si parla quindi di distanza ottica, la quale perciò risulta influenzata dalla presenza di ostacoli (montagne) e dalla stessa curvatura della terra.

Le frequenze VHF e UHF sono utilizzate nei ponti radio, costituiti da complessi riceventi-trasmittenti dotati di antenne direttive « visibili » l'una dall'altra. Così con due ponti situati sul Monte Terminillo e sul Monte Cimone è stato possibile realizzare la congiunzione radiotelefonica tra Roma e Milano.

Negli ultimi tempi (1957) sono state realizzate delle comunicazioni a grande distanza con onde VHF di frequenza tra 20 e 50 Megahertz sfruttando il principio della « dispersione ionosferica » (inglese « scattering »).

Il principio della dispersione ionosferica (che potrebbe più appropriatamente definirsi diffusione ionosferica) è analogo a quello della diffusione della luce su uno strato di nubi. Infatti, se di notte un proiettore luminoso si rivolge verso uno strato di nubi, si rende luminosa, appunto per diffusione, una zona della nube colpita.

Sicchè anche da punti lontani, non investiti direttamente dal fascio, sarà possibile « vedere » tale zona luminosa ed eventualmente captarne la luce diffusa, mediante un cannocchiale direttovi, per farla agire concentrata — volendo — su una cellula fotoelettrica funzionante da ricevitore.

(E' da precisare che nel caso della diffusione elettromagnetica per captare una sufficiente quantità di energia le due semirette, assi dei fasci partenti dalle stazioni trasmittente e ricevente, devono essere contenute nello stesso piano verticale e incontrarsi con un angolo ottuso prossimo a 180°).

Il fenomeno ora descritto si verifica, per le onde di minor lunghezza, ossia per le UHF e per le onde centimetriche (SHF = Super High Frequencies), anche e a preferenza al limite superiore della troposfera (la parte inferiore dell'atmosfera) ad un'altezza di circa dieci Km.

Impiegando trasmettitori di elevata potenza (dell'ordine di diecine o centinaia di KW anzichè di qualche Watt), con antenne di grande direttività, che assumono notevoli dimensioni, e ricevitori molto sensibili con basso rapporto segnale/disturbo, si è riusciti a realizzare collegamenti oltre l'orizzonte su distanze dell'ordine dei 1200-1500 Km per frequenze comprese tra 20 e 50 MHz (attraverso la diffusione ionosferica), e collegamenti su distanze dell'ordine di 300-500Km per frequenze oltre i 100 MHz (attraverso la propagazione per diffusione troposferica).

* * *

Le onde di lunghezza inferiore a 1 metro sono denominate microonde (frequenza superiore a 300.000 kilocicli) e presentano caratteristiche che le rendono sempre più simili alle radiazioni luminose (ai fini della riflessione, ecc.)

Infatti — come è noto — le radiazioni luminose sono anch'esse di natura elettromagnetica, con frequenza dell'ordine del miliardo di Megacicli.

Un fenomeno del tutto analogo si verifica del resto nel campo molecolare, per quanto riguarda le vibrazioni sonore.

Mentre i normali suoni — dovuti, come già detto, a vibrazioni meccaniche di frequenza che vanno da circa 16 periodi al secondo a circa 16.000 al secondo — si propagano nell'aria in tutte le direzioni, gli ultrasuoni, dovuti a vibrazioni di frequenze superiori a 16.000 periodi, non più udibili, si propagano in linea retta, si riflettono, ecc., comportandosi in complesso in modo simile a fasci di luce.

Come le onde elettromagnetiche di alta frequenza, anche gli ultrasuoni riflessi danno luogo a *onde stazionarie* (Vedi Cap. 21) con « ventri » e « nodi » individuabili nell'aria nei punti dove l'agitazione molecolare è rispettivamente massima e nulla.

La lunghezza d'onda negli ultrasuoni, come nelle onde elettromagnetiche, è uguale alla velocità di propagazione del suono (che è di 340 metri/sec) diviso la frequenza: se questa è di 17.000 cicli al secondo, la lunghezza d'onda risulterà perciò di due centimetri.

* * *

Torniamo alle onde elettromagnetiche per dire che, tenendo conto sia della direttività delle antenne di determinata forma, sia del modo di propagazione delle onde di minore lunghezza, si può concentrare l'emissione in una certa direzione preferenziale (risparmiando la energia in gioco) e ugualmente si può allo stesso scopo orientare la antenna ricevente in modo da raccogliere il massimo dell'energia trasmessa. Ciò si fa spesso specialmente per le onde cortissime nelle comunicazioni tra punti fissi. (Fig. 111).

Inoltre la direttività delle antenne valendo anche per la ricezione — come ora ricordato — si trae profitto del fatto che, in relazione alla forma dell'antenna ricevente, esiste una direzione privilegiata secondo la quale l'antenna stessa capta il massimo di energia del campo elettromagnetico emesso da una certa antenna trasmittente. Si ren-

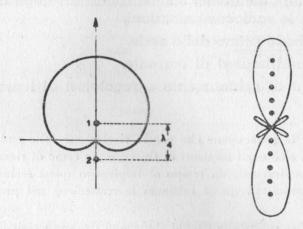


Fig. 111 — Diagrammi di irradiazione di sistemi di antenne direttive. (A sinistra): a cardioide. (A destra): a lobo allungato. (I circoletti rappresentano le antenne in pianta).

de allora possibile, mediante l'opportuno orientamento dell'antenna ricevente, individuare la direzione nella quale è situata la trasmittente.

Tale possibilità viene sfruttata dai radiogoniometri, apparati riceventi destinati a individuare, con grande precisione, direzione e senso da cui provengono i segnali radio-elettrici. E ciò allo scopo ultimo di determinare, attraverso l'intersezione di due semirette partenti da punti noti (stazioni trasmittenti) il « punto » della stazione ricevente anche mobile (aereo, nave), della quale proprio si vuol conoscere la posizione.

E' da precisare infine che ormai la quasi totalità dei moderni radiogoniometri sono di funzionamento automatico: sintonizzato il rdg sulla trasmittente da localizzare, compare direttamente su un quadrante l'indicazione della direzione cercata.

24 — I bulbi elettronici elementi basilari degli apparati per le radiocomunicazioni.

Il diodo primo della serie.

I raddrizzatori di corrente.

Filtri di spianamento e regolatori di tensione.

Sia per la generazione che per la rivelazione delle onde elettromagnetiche, cioè negli impianti di trasmissione come di ricezione delle radiocomunicazioni, da tempo si impiegano quasi esclusivamente bulbi elettronici. Di questi iniziamo la trattazione nel presente capitolo.

E' da dire subito che i bulbi elettronici trovano estesissima applicazione non soltanto negli impianti radio ma in tutte le innumerevoli apparecchiature realizzate dalla moderna tecnica elettronica.

Il bulbo elettronico (o tubo elettronico) è costituito — nella sua forma più semplice — da un bulbo generalmente di vetro, simile ad una lampadina, nel quale è praticato il vuoto per consentirvi il libero flusso di una corrente spaziale di elettroni.

Gli elementi essenziali del bulbo elettronico sono il càtodo (f) che emette gli elettroni, e l'ànodo (p) che li riceve (Fig. 112).

Inserendo il bulbo in un circuito elettrico a corrente continua, in modo che l'ànodo (p) sia collegato con il polo positivo del generatore (per es. una batteria B), gli elettroni emessi dal càtodo sono attratti dall'ànodo: si determina allora dentro il tubo un flusso elettronico tale da costituire un elemento di continuità nel deflusso della corrente nel circuito, non più interrotto dallo spazio vuoto del bulbo.

Un amperometro (a) inserito nel circuito indicherà quindi passaggio di corrente. (Si conferma quì quanto detto a suo tempo, e cioè che il flusso degli elettroni ha una direzione opposta a quella adottata convenzionalmente per la corrente). Il sistema generalmente usato per provocare l'emissione degli elettroni è il riscaldamento del càtodo, questo essendo costituito da un filamento di idoneo metallo (leghe di tungsteno, di torio, ecc.). Si parla allora di emissione termoionica, che trova una certa analogia, nel campo molecolare, nella evaporazione di un liquido, o nella sublimazione di una sostanza solida.

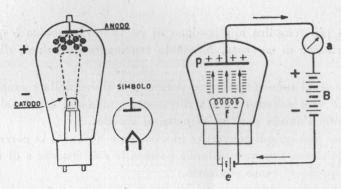


Fig. 112 — (A sinistra): Un bulbo elettronico nella sua forma più elementare. (E il simbolo con cui viene rappresentato). (A destra): Schema di funzionamento di un diodo con i circuiti relativi.
(p = placca; f = filamento; e = batteria di accensione del filamento; B = batteria anodica; a = amperometro).

In effetti, si è già detto in precedenza (Cap. e 3 Cap. 8) che aumento della temperatura in un conduttore vuol dire aumento dell'agitazione molecolare, alla quale è sempre connessa anche l'agitazione degli elettroni semiliberi e spaziali contenuti nel metallo. Quando questa agitazione ha raggiunto un determinato valore una parte degli elettroni viene espulsa dal conduttore e va a riempire lo spazio circostante.

La temperatura alla quale avviene la più conveniente emissione termoionica varia, secondo il metallo, da 2400 a 1900 a 1000 gradi centigradi.

Il riscaldamento del catodo può avvenire direttamente (batteria e) quando il catodo stesso è formato da un filamento (f), percorso da corrente (continua), che arroventandosi come quello di una lampadina emette elettroni. Può avvenire indirettamente facendo il catodo di

lamierino di forma cilindrica, nel cui interno, molto vicino, si pone il filamento riscaldatore percorso dalla corrente, che può essere in tal caso anche alternata.

Il riscaldamento indiretto si adotta quando si richiede un flusso elettronico costante, con bassa tensione anodica.

* * *

La più semplice applicazione di un tubo elettronico è quella di raddrizzatore di corrente, facendolo funzionare da valvola di non ritorno.

Infatti il tubo termoionico permette il fluire della corrente attraverso di esso soltanto in una direzione, quella dal catodo all'anodo, risultando l'anodo positivo rispetto al catodo.

Esso può quindi convertire una corrente alternata in corrente continua (pulsante) in quanto lascia passare le « alternanze » di un senso e non quelle di senso contrario.

Un tubo termoionico del tipo ora descritto si denomina dìodo, in quanto possiede due elementi attivi (elèttrodi): il càtodo e l'ànodo.

Il dìodo viene utilizzato soltanto per piccole correnti di frazioni di ampere, perchè in esso il flusso elettronico non può assumere una elevata intensità per causa della carica spaziale. Questa è dovuta alla nube molto densa di elettroni formantesi intorno al filamento che emette gli elettroni medesimi: trattandosi infatti di cariche tutte negative esse si respingono l'una l'altra ed ostacolano l'emissione di altri elettroni e quindi l'aumento del flusso di corrente.

Funzionando come raddrizzatore di correnti « modulate » (cioè già « incise » secondo la forma dei suoni o delle parole) il dìodo può servire anche da rivelatore delle medesime. Ma in tale impiego il diodo è stato talvolta sostituito da un semplice cristallo, naturale o artificiale, di particolari sostanze come il germanio, la galena (solfuro di piombo), il carborundum (carburo di silicio) ecc.

Un cristallo del genere, inserito in un circuito in modo che una punta metallica ne tocchi la superficie, presenta la caratteristica di far passare la corrente soltanto dalla punta verso il cristallo, e non nel senso opposto (in quanto la resistenza in tale senso risulta molto elevata).

Questi cristalli sono perciò denominati semiconduttori, o a conduzione dissimmetrica.

* * *

Per quanto prima detto, anche applicando tensioni elevate, nel diodo si ottiene presto la *saturazione*, e la corrente che l'attraversa resta bassa.

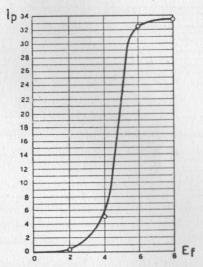


Fig. 113 — Diagramma della corrente di placca (Ip) in funzione della tensione del filamento (Ef) in un diodo.

La Fig. 113 mostra in diagramma i valori della corrente di placca al variare della tensione applicata al filamento.

Tale caratteristica del diodo lo rende peraltro idoneo a particolari usi, quando occorre appunto disporre di elevate tensioni con correnti di bassa intensità. Così è nei precipitatori di polvere o separatori elettrostatici, dove le piastre destinate ad elettrizzare le infinitesimali particelle (di carbone, cemento, catrame, ecc.) dei fumi o dei gas da depurare — per farle poi aderire per attrazione ad altre piastre elettrizzate di segno contrario — sono inserite in circuiti la cui corrente è opportunamente regolata da diodi raddrizzatori. In uno stesso bulbo si pongono anche due càtodi e due anodi: si ha allora il doppio diodo.

Per raddrizzare correnti molto intense si adottano normalmente diodi a vapore di mercurio contenenti appunto vapore di mercurio, molto rarefatto. In essi le molecole gassose, ionizzate dall'urto degli elettroni emessi dal càtodo, formano una nube di cariche positive le quali neutralizzano l'effetto della carica spaziale negativa, permetten-

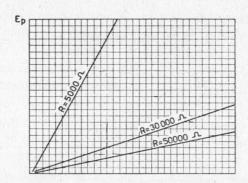


Fig. 114 — Variazione in un diodo della corrente di placca (da leggere sulle rette inclinate R, in corrispondenza delle ascisse) al variare della tensione di placca (Ep).

do così il passaggio di un più intenso flusso elettronico, al quale si aggiunge anche la corrente delle cariche positive trasportate dagli stessi ioni gassosi.

Ovviamente l'intensità di corrente nel dìodo dipende poi dalla tensione applicata alla placca (Ep).

(Il valore della tensione anodica viene sempre riferito alla tensione del catodo considerata zero).

In un diodo si può far variare la tensione della placca facendo variare in conseguenza — per una data resistenza R, per es. di 5000 ohm, inserita nel circuito — la corrente nel diodo, che crescerà linearmente secondo una retta come indicato nella Fig. 114.

Se la resistenza (carico) inserita nel circuito è maggiore, diventando per es. di 30.000 o di 50.000 ohm, le rette secondo le quali aumenta la corrente di placca si fanno meno inclinate, cioè la corrente cresce più lentamente.

In pratica, per utilizzare il dìodo come raddrizzatore di una corrente alternata si può adottare una disposizione che è rappresentata, nella sua forma più elementare, dalla Fig. 115.

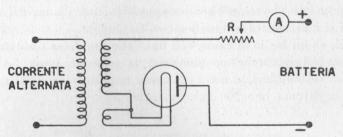


Fig. 115 — Utilizzazione di un diodo come raddrizzatore di una corrente alternata. (R = reostato; A = amperometro).

La corrente raccolta, da utilizzare per es. per la carica di una batteria di accumulatori, può assumere la forma pulsante ad una semionda (Fig. 116 a) oppure pulsante a due semionde (Fig. 116 b). Per ottenere una corrente del secondo tipo si adottano diodi provvisti di due placche.

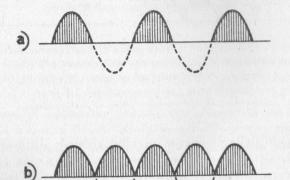


Fig. 116 — Corrente alternata dopo il raddrizzamento: ad una semionda (a); a due semionde (b).

Un tipo di circuito (*Tungar*) che permette di rettificare correnti molto forti, di oltre 100 *ampere*, comporta un diodo contenente una piccola quantità di gas inerte (argon).

Talvolta per rettificare la corrente alternata si adottano, invece dei tubi elettronici, dei raddrizzatori a contatto solido, per esempio a ossido di rame, sfruttando la proprietà di certi « contatti » di presentare una resistenza relativamente bassa al flusso di elettroni in un senso, e molto più elevata nel senso opposto (a somiglianza dei cristalli ai quali si è accennato in questo stesso Capitolo).

Così, se un foglio di rame, con una delle due facce ossidata, viene sottoposto ad una tensione alternata, la corrente passa facilmente nel senso ossido-rame, e non nel senso opposto secondo il quale la resistenza diventa ben 900 volte maggiore.

* * *

Abbiamo già detto che un diodo raddrizzatore dà luogo ad una corrente del tipo pulsante che risulta formata da una serie di alternanze susseguentisi, tutte del medesimo segno. Una tale corrente appare relativamente più « spianata » quando aumenta la frequenza della tensione applicata.

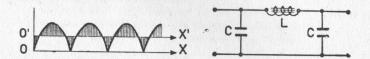


Fig. 117 — (A sinistra): Il diagramma di una corrente pulsante, riferito all'ascissa O' X', mostra che tale corrente può essere considerata composta di una corrente costante (di intensità OO') e di una corrente alternata (parte tratteggiata). (A destra): Schema elementare di un circuito filtro di spianamento.

L'aumento della frequenza peraltro richiede dispositivi complessi e costosi, sicchè normalmente per « spianare » una corrente pulsante si ricorre a circuiti filtro (detti appunto « di spianamento ») contenenti in genere condensatori e induttanze. (Fig. 84).

Filtri così fatti sfruttano la proprietà caratteristica del condensatore di tendere a mantenere una tensione costante attraverso sè stesso, immagazzinando carica elettrica quando la corrente è in fase crescente e restituendola quando la corrente è in fase decrescente. (La proprietà della induttanza è analoga, nei riguardi della corrente, funzionando essa — come detto a suo tempo — a guisa di un volano).

In realtà, considerando una corrente pulsante costituita da una componente continua e da una componente alternata, (Fig. 84) si può anche attribuire la funzione di filtraggio alla proprietà del condensatore di non lasciar passare la componente continua ma soltanto quella alternata, mentre all'opposto l'induttanza presenta una notevole reattanza al passaggio della componente alternata lasciando facilmente passare la continua.

Un circuito alimentatore raddrizzatore a diodo (con doppia placca) completo di filtro è rappresentato nella Fig. 118.

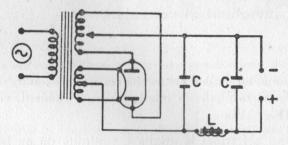


Fig. 118 — Schema di un circuito raddrizzatore completo di filtro. (Dalla sinistra entra corrente alternata; dalla destra esce corrente continua).

Notiamo infine che il diodo può essere utilizzato anche come regolatore o stabilizzatore di tensione. In tal caso il bulbo viene riempito di gas e il catodo resta « freddo », cioè non è arroventato. La emissione degli elettroni dal catodo avviene soltanto ad opera della tensione anodica applicata, quando essa raggiunge un determinato valore, e la corrente fluisce allora grazie alla massa degli elettroni espulsi dalle molecole gassose in seguito alle collisioni con gli elettroni emessi dal catodo.

* * *

Un tipo particolare di diodo a vapore di mercurio, denominato Ignitron, viene utilizzato per comandare l'immissione o l'interruzione di correnti elettriche anche elevatissime (dell'ordine di 600 ampere) senza manovrare parti mobili. Una delle applicazioni più importanti dell'Ignitron è nella saldatura elettrica, quale interruttore automatico del circuito di corrente delle macchine saldatrici.

25 — Il trìodo dagli svariati usi: valvola elettronica, amplificatore, oscillatore.

I transistor sostituti vantaggiosi dei trìodi. Comparsa del criotròne. Il solion.

Gli invertitori di corrente.

Il trìodo è un bulbo elettronico contenente, oltre al càtodo e all'ànodo, un terzo eléttrodo interposto tra i suddetti, costituito dala griglia. (Fig. 119).

In pratica nei trìodi la griglia è costituita da un filo a spirale che avvolge da vicino — senza toccarlo — il càtodo. (Fig. 119).

La funzione essenziale della griglia è di regolare, di controllare, mediante la variazione della propria tensione, l'intensità del flusso degli elettroni nel tubo elettronico. Infatti, data la maggiore vicinanza della griglia al filamento emittente, rispetto alla più lontana placca, gli effetti delle variazioni del potenziale di griglia si fanno sentire di più rispetto a quelli ottenuti nel dìodo dalla variazione della tensione di placca.

Precisamente, il rapporto tra il potenziale di placca che provoca una certa intensità della corrente di placca, e il potenziale di griglia che provoca la stessa intensità si denomina fattore di amplificazione (μ = lettera greca mu).

Poichè — come si è ora detto — con una piccola variazione del potenziale di griglia si è in grado di provocare una grande variazione di corrente nel circuito di placca, esercitando una funzione analoga a quella che si ottiene con l'azionamento di una valvola in un circuito idraulico, il trìodo è stato nel passato denominato anche valvola termoionica.

Il diagramma, che rappresenta la caratteristica di variazione della corrente di placca al variare della tensione di griglia, è quello della Fig. 120.

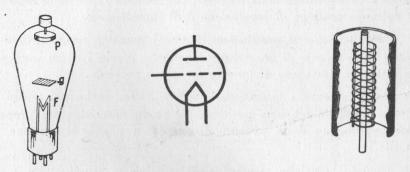


Fig. 119 — (A sinistra): Costituzione schematica di una valvola a tre elettrodi (triodo). (A destra): costituzione effettiva con la griglia disposta a spirale intorno al catodo. (In mezzo): come si raffigura un triodo simbolicamente.

(Si ripete che le tensioni vanno riferite alla tensione del catodo, considerata di valore zero).

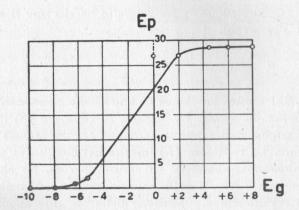


Fig. 120 — Diagramma della variazione della tensione e della corrente di placca (Ep) al variare della tensione di griglia (Eg) in un triodo.

Come si vede, i valori massimi della corrente di placca si hanno con valori positivi della tensione di griglia, ma le tensioni di griglia possono assumere anche valori negativi, nel qual caso gli elettroni emessi dal filamento vengono respinti fino al punto che si annulla completamente il flusso elettronico e quindi la corrente di placca o anòdica. Detto valore della tensione, che annulla la corrente anodica, si definisce tensione di preclusione o di interdizione.

Alla tensione di preclusione il trìodo funziona come quando si chiude una valvola di un circuito idraulico: perciò i trìodi sono pure utilizzati allo scopo di inserire e togliere corrente.

Analogamente a quanto avviene nel diodo, anche nel triodo la elevazione della tensione positiva dell'anodo determina un proporzionale aumento della corrente di placca, a parità di tensione di griglia.

Quando la griglia assume valori positivi, e quindi attrae e accelera gli elettroni emessi dal catodo, ne lascia passare attraverso i suoi vuoti la maggior parte che vanno a finire sulla placca, ma ne intercetta anche una minima parte, costituita dagli elettroni captati dal filo costituente la griglia stessa. Perciò nello stesso circuito di griglia viene a fluire una debole corrente.

(Il trìodo ad alto vuoto viene commercialmente denominato Pliotron. Il trìodo contenente gas rarefatto ha ricevuto il nome commerciale di Thyratron).

* * *

La Fig. 121 mostra lo schema di un circuito elementare completo nel quale opera un trìodo. La tensione di controllo (S) inserita nel circuito di griglia può rappresentare per es. un segnale in arrivo da amplificare. La resistenza (R) inserita nel circuito di placca rappresenta l'apparato utilizzatore (il carico), per es. un altoparlante, al quale l'energia è fornita dalla batteria anodica (B) nella quantità richiesta in seguito all'amplificazione della corrente anodica provocata dalle variazioni della tensione di griglia.

Abbiamo ora implicitamente definito uno dei principali impieghi del triodo, appunto quello di amplificatore di segnali.

(Dell'impiego del triodo come oscillatore e come rivelatore si tratterà nei Capitoli seguenti).

Il fattore di amplificazione (μ), definito all'inizio del Capitolo, nei comuni triodi assume valori che vanno da circa 3 fino a 100.

Quando il segnale di controllo (in entrata) è molto debole la amplificazione ottenuta nel triodo può non risultare sufficiente. Al-

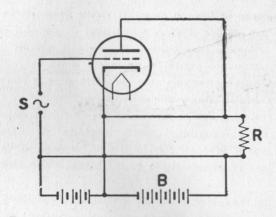


Fig. 121 — Schema di un complesso amplificatore a triodo: la tensione « di controllo »(S) è inserita nel circuito di griglia; la corrente amplificata risultante passa attraverso l'apparato utilizzatore (R); l'energia per il funzionamento dell'apparato è fornita dalla batteria (B).

lora si mettono insieme due o più triodi, e si fa in modo che la tensione di uscita (quella della corrente di placca) fornita dal primo triodo agisca come tensione di controllo nella griglia del secondo triodo, e così via.

* * *

Nell'impiego come amplificatore, ed anche come oscillatore, il triodo in molti casi può essere vantaggiosamente sostituito dai transistor, che sfruttano le proprietà di speciali cristalli (di germanio di silicio, ecc.).

Diciamo in breve in che cosa consiste un transistor.

Una lamina cristallina del genere, dello spessore di un mezzo millimetro, si assottiglia ulteriormente in un punto mediante due piccole cavità contrapposte, in modo che tra i fondi delle due cavità rimanga uno spessore dell'ordine di un decimo di millimetro. Se due punte metalliche toccano il fondo, ben levigato, delle due cavità, e da una fluisce corrente, l'altra punta — inserita nello stesso circuito — la raccoglie di intensità amplificata. Le due punte possono anche toccare la lamina in punti vicini della stessa faccia.

Il fenomeno sembra dovuto a squilibri di cariche esistenti nella struttura del cristallo, in seguito a cui — alle elevate temperature che si determinano nel punto di passaggio della corrente — si produce uno stato di eccitazione tale da estrarre e « convogliare » gli elettroni dal cristallo alla punta collettrice.

Il transistor presenta grandi vantaggi, costituiti dalle minime dimensioni, dalla infrangibilità, dalla rapidità di « transito » degli elettroni attraverso di esso. Perciò il suo impiego si va sempre più estendendo, specialmente nelle apparecchiature che sfruttano le alte frequenze.

Utilizzando transistor e minuscole batterie di pile (delle dimensioni di una penna stilografica) sono stati costruiti apparati radio-riceventi tascabili e perfino radiotrasmittenti contenibili dentro un cappello.

* * *

Negli ultimi tempi (1957) ha fatto la sua comparsa un altro semplicissimo e minuscolo dispositivo denominato « *criotrone* » desti nato ad impieghi analoghi a quelli del *transistor*.

E' costituito da un filo conduttore rettilineo, lungo meno di un centimetro, circondato nella parte mediana da una spiralina (solenoide) di filo sottilissimo.

Il suo funzionamento è basato sul principio della superconduttività che presentano i conduttori alle bassissime temperature (Cap. 3) Tale superconduttività cessa però immediatamente (cosa che non abbiamo detto allora) se il conduttore viene immerso in un campo magnetico quale è quello creato — nel caso in esame — dalla spiralina percorsa da corrente. (Il fenomeno confermerebbe l'ipotesi fatta al Cap. 9 di attribuire il campo magnetico ad un violento stato vorticoso degli elettroni spaziali, che in tale stato ostacolerebbero perciò il libero fluire degli elettroni semiliberi nel conduttore).

Allora si comprende come il criotrone (mantenuto sempre in ambiente a bassissima temperatura) possa funzionare da istantaneo interruttore della corrente, anche forte, fluente nel filo « superconduttore »: basterà far passare nella spiralina una minima corrente (quella che deve comandare l'interruzione) e la intensa corrente nel filo sarà immediatamente « strozzata ».

Ricerche recentissime (1957) hanno in effetti accertato che il fenomeno della *superconduttività* è da attribuire ad una vera e propria *superfluidità* degli elettroni nei metalli.

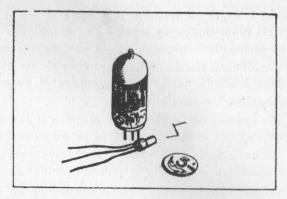


Fig. 122 — Dimensioni comparate di un bulbo termoionico « miniatura », di un transistor e di un criotrone equivalenti come lavoro (vicino una monetina).

Dalla Fig. 122 si può avere un'idea delle dimensioni comparate di un bulbo termoionico « miniatura », di un « transistor » e di un « criotrone », nel confronto con una monetina da 5 lire.

Ancora un nuovo ritrovato si annuncia nel campo dei dispositivi elettronici di alta sensibilità, basato su *ioni in soluzione* e denominato perciò abbreviativamente « solion ». Gli ioni del « solion » sono infatti quelli di una soluzione di iodio nella quale vengono immersi gli elèttrodi che raccolgono la corrente, variabile con il variare del flusso degli ioni.

Tale flusso può essere stimolato e modificato da minimi mutamenti dell'ambiente esterno, dovuti a variazioni di temperatura o pressione o accelerazione o suono o luce. Cosicchè il « solion » può trovare utilissimo impiego in tanti sistemi elettrici di controllo, come per es. congegni di guida dei missili, apparati di aeronavigazione, dispositivi di allarme, ecc.

Considerando il modo di funzionamento del bulbo elettronico, del transistor e del solion, si osserva che nel primo gli elettroni lavorano in ambiente « gassoso » (pressochè vuoto), nel secondo lavorano dentro la materia solida, nel terzo dentro quella liquida.

* * *

Esaminando ora più particolarmente in un triodo il circuito di placca (Fig. 121) nella sua forma schematica, si nota che la tensione complessiva fornita dalla batteria di placca subisce una caduta attraverso la resistenza dell'apparato utilizzatore (per es. un altoparlante). E' il resto della tensione quello che determina la corrente (flusso elettronico) che attraversa il bulbo.

Quando il consumo dell'apparato utilizzatore è elevato, quando cioè l'apparato richiede molta corrente, la prima caduta di tensione attraverso il carico è forte, e si abbassa in conseguenza la tensione nel bulbo. In definitiva si abbassa la tensione dell'anodo che perciò attrae meno elettroni determinando una diminuzione del flusso elettronico e di tutta la corrente anòdica, proprio quando ne occorrerebbe invece in maggior misura. L'opposto succede allorchè l'apparato utilizzatore richiede minore potenza.

Per rimediare al suddetto inconveniente si introduce nel bulbo un quarto elèttrodo, la griglia schermo, la quale è costituita da un filo a spirale, simile alla griglia di controllo, e viene posta tra questa e l'anodo. Un bulbo elettronico così fatto prende il nome di tedròdo.

La funzione della griglia schermo è di attrarre ed accelerare ulteriormente gli elettroni provenienti dal catodo, elettroni che poi vengono raccolti dall'anodo in quantità praticamente costante, non influenzata dalle variazioni di tensione dell'anodo stesso. Per ottenere ciò si dà alla griglia schermo una tensione positiva costante, collegandola ad una opportuna sorgente esterna.

Ma anche il tetròdo presenta qualche difetto, poichè gli elettroni veloci che colpiscono la placca provocano la fuoriuscita di altri elettroni dalla placca stessa (fenomeno definito emissione secondaria), e quando il potenziale della griglia schermo è superiore al po tenziale dell'anodo detti elettroni emessi dall'anodo vengono attratti dalla stessa griglia schermo, determinando una corrente che va dalla placca alla griglia, cioè in direzione opposta a quella principale fluente dal catodo verso la placca.

Per evitare tale inconveniente si interpone tra l'anodo e la griglia schermo un'altra griglia, che prende il nome di soppressore, in quanto ha la funzione di impedire agli elettroni emessi dall'anodo di andare a finire sulla griglia schermo.

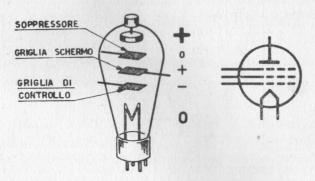


Fig. 123 — Costituzione di un bulbo a cinque elettrodi (pentòdo). (A destra il simbolo).

Il soppressore di solito si collega direttamente al catodo in modo da assumere esso stesso potenziale zero.

Un tubo elettronico così fatto si denomina pentòdo. (Fig. 123). Sono talvolta usati anche tubi elettronici detti exòdi, con sei elettrodi (di cui quattro griglie), e ancora con sette elèttrodi (di cui cinque griglie) denominati perciò ettòdi.

I tubi elettronici a più di tre elèttrodi sono denominati genericamente poliòdi.

* * *

Il trìodo è anche impiegato nei complessi invertitori per mutare una corrente continua in corrente alternata (funzione inversa a quella dei raddrizzatori di cui si è trattato nel Capitolo precedente). Un circuito invertitore del tipo auto-eccitato è rappresentato dalla Fig. 124: in una alternanza la corrente passa nel triodo 1 (alto) caricando il condensatore 2; nella successiva la corrente passa nel triodo 2 (basso), il condensatore 2 si scarica e il condensatore 1 si ca-

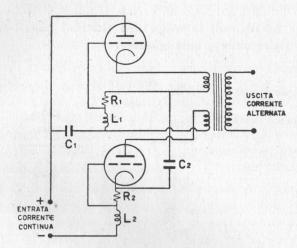


Fig. 124 — Schema di un complesso invertitore, dove il triodo viene utilizzato per trasformare una corrente continua in una corrente alternata.

rica determinando un potenziale negativo all'ànodo del trìodo 1 con interruzione della corrente relativa. Successivamente la frequenza si inverte e il triodo 1 diventa nuovamente conduttore. E così via.

Il tempo di inversione, e quindi la frequenza della corrente in uscita, è determinata dalle « costanti » C ed L dei condensatori e delle induttanze inserite nel circuito.

26 — La generazione delle onde persistenti.

La modulazione incide le onde secondo la forma particolare dei suoni da trasmettere.

Il microfono traduce un suono in una corrente.

La proprietà piezoelettrica di certi cristalli messa a profitto.

Vantaggi della modulazione di frequenza nelle radioaudizioni.

Si è visto nel Cap. 20 che le oscillazioni elettromagnetiche, che si producono « naturalmente » in un comune circuito oscillante, sono smorzate, cioè decrescono rapidamente come intensità fino a ridursi a zero.

Si è anche mostrato, con intento esemplificativo, un dispositivo di natura meccanica atto a rendere *persistenti* certe oscillazioni a bassa frequenza.

Ora diciamo che le oscillazioni elettromagnetiche (onde e.m.) da utilizzare per le radiocomunicazioni è necessario che siano persistenti e ad alta frequenza, per la primaria esigenza di « convogliare » con le « onde » sufficiente energia e poter così superare grandi distanze. Le onde persistenti costituiscono inoltre l'elemento base (onda di supporto) per la realizzazione delle comunicazioni radiofoniche.

Il sistema generalmente seguito per ottenere onde persistenti del genere consiste nell'inserimento di un trìodo nel circuito primario generatore delle oscillazioni.

Consideriamo il circuito schematizzato come nella Fig. 125 dove sono indicate con L le induttanze (bobine) con C le capacità (condensatori). (L e C, senza apice, sono la bobina e il condensatore del circuito oscillante vero e proprio).

(La freccia obliqua sul condensatore sta ad indicare che la capacità ne è variabile a comando). La bobina L, inserita nel circuito di griglia comprendente cioè la griglia del trìodo, è accoppiata induttivamente con la bobina L' in modo tale (reazione positiva) che quando la corrente in L' è in diminuzione si provoca in L una f.e.m. indotta che ne fa aumentare il potenziale con conseguente aumento della corrente anodica.

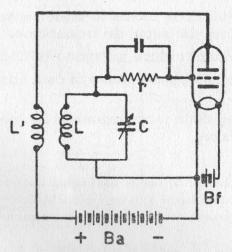


Fig. 125 — Schema di un oscillatore a triodo. L'accoppiamento « induttivo » tra griglia e placca è realizzato con le bobine L ed L'.

In definitiva, ad ogni alternanza vengono trasmessi al circuito oscillante LC, attraverso l'accoppiamento L L' (Fig. 126), degli impulsi di corrente costituenti rifornimenti di energia che evitano lo smorzamento delle oscillazioni rendendole di ampiezza costante, cioè persistenti, analogamente a quanto avviene meccanicamente in un orologio (Cap. 17 e Cap. 20).

La frequenza di queste oscillazioni sarà quella propria « di risonanza » del circuito oscillante L C.

L'energia per questi « rifornimenti » viene tratta dalla batteria anodica Ba.

Il condensatore derivato dalla resistenza r agevola il passaggio della corrente ad alta frequenza. La resistenza r (resistenza di fuga) serve a collegare la griglia con il circuito catodico, in modo che nelle

fasi in cui la griglia diventa positiva, e quindi raccoglie elettroni, possano questi elettroni ritrasferirsi nel circuito stesso: altrimenti il loro accumulo sulla griglia renderebbe questa negativa al punto da interrompere il flusso elettronico e quindi la corrente nel bulbo.

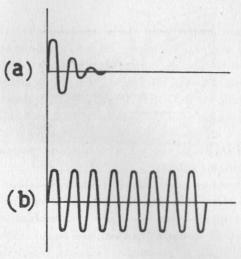


Fig. 126 — Le oscillazioni « smorzate » del tipo (a) generate naturalmente dal triodo vengono rese « persistenti » (b) mediante gli impulsi ricevuti attraverso l'accoppiamento L L' della Fig. 125.

Un circuito come quello ora sommariamente descritto prende il nome di circuito oscillante tipo Meissner.

In pratica i circuiti oscillanti assumono forme diverse e più complesse del *Meissner*.

Per irradiare le oscillazioni ad alta frequenza generate dal circuito oscillante si deve accoppiare, sempre induttivamente, la bobina del circuito oscillatore con un'altra bobina facente parte del circuito di antenna.

L'accoppiamento si fa piuttosto « lasco », cioè non stretto, per evitare che le oscillazioni dell'antenna a loro volta reagiscano induttivamente sul circuito oscillante, alterandone le caratteristiche.

L'antenna, la cui induttanza e la cui capacità sono tali da farla « risuonare » sulla frequenza dell'onda normalmente trasmessa, com-

prende anche una bobina e un condensatore variabile, in modo da potere sempre « accordare » la frequenza dell'antenna stessa con quella del circuito oscillante.

* * *

Ora trattiamo brevemente della modulazione, che consiste nel sovrapporre alla corrente oscillante ad a.f., costituente l'onda elettromagnetica vera e propria, irradiata dall'antenna (onda portante) una corrente oscillante a bassa frequenza, non necessariamente sinusoidale, che rappresenta in definitiva il segnale da trasmettere, sia questo una semplice ed unica nota che una complessa armonia oppure la parola.

La corrente oscillante ad a.f. si denomina portante: la corrente a b.f. si denomina modulante.

Possiamo renderci conto di che cosa rappresenti in sostanza la « modulazione » ricorrendo ad un paragone meccanico-acustico.

Quando si « incide » un disco per grammofono si appoggia una punta su un disco di sostanza plastica, non ancora indurita, e si fa in modo che, con il disco in rotazione, la punta tracci un regolare solco (a spirale) che si può considerare di raggio costante (per ogni piccolo tratto).

Questo solco regolare è paragonabile all'onda portante.

Se si vuole incidere musica o parole si collega opportunamente la punta incidente ad una membrana vibrante, in modo che le vibrazioni prodotte nella membrana dal suono o dalla voce si trasmettano alla punta stessa facendola oscillare nel senso del raggio del disco. Allora il solco non risulterà più regolare, ma subirà delle deviazioni, più o meno grandi, verso la periferia o verso il centro del disco, secondo che la membrana oscilli, più o meno ampiamente, in un senso o nell'altro (Fig. 127).

Il solco ripeterà fedelmente le vibrazioni (quelle del suono o della voce) scostandosi continuamente dalla linea a spirale ideale che seguirebbe se la membrana restasse in posizione neutra (come è durante il silenzio).

Sono questi « scostamenti » che costituiscono in sostanza la modulazione e riproducono, in tutti i particolari, le molteplici e caratteristiche variazioni di ogni suono. Nell'audizione del disco si ripeterà, all'inverso, il procedimento sopra descritto: mentre il disco gira la punta scorre dentro il solco, e le oscillazioni ad essa impresse dagli « scostamenti » si trasmettono alla membrana, che vibrando riproduce i suoni incisi.

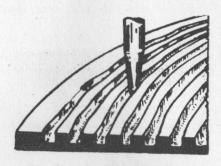


Fig. 127 — Vista parziale, ingrandita, di un disco nel quale è inciso un « solco » riproducente un suono.

Tornando alle oscillazioni e.m., consideriamo prima la modulazione di ampiezza, la più comune, che interessa appunto l'ampiezza, cioè l'intensità della corrente oscillante.

Se infatti sovrapponiamo (Fig. 128) ad una oscillazione ad a.f. (I), una oscillazione a b.f. (II), quale può essere un segnale acustico, la loro combinazione (III) è un'oscillazione « modulata », nel senso che l'ampiezza delle oscillazioni ad a.f. viene modificata dal segnale acustico con periodici aumenti e diminuzioni. La nuova « frequenza modulata » risulta di ordine « acustico », cioè di bassa frequenza come il segnale modulante.

Quando due onde di differente frequenza si sovrappongono, dando luogo ad un'onda risultante avente una terza frequenza, questa si definisce frequenza di *battimento*. (Vedi anche Fig. 137).

Nel caso della trasmissione radiotelegrafica le cose si svolgono effettivamente in modo molto semplice, come sopra descritto. Il segnale modulante è costituito da una vibrazione acustica sinusoidale, ossia è una « nota » provocata da una lamina vibrante detta « cicalina ». Quando alla stazione trasmittente si abbassa il tasto non si fa che azionare la cicalina, la cui vibrazione acustica, tradotta in oscil-

lazione elettrica, si sovrappone alla oscillazione ad a.f. del circuito oscillante, avendosi una frequenza risultante modulata a b.f. (di ordine acustico).

Abbassando il tasto viene dunque emesso un segnale, tradotto in oscillazioni e.m.

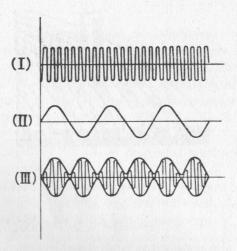


Fig. 128 — Ad una corrente ad alta frequenza (I) viene sovrapposta una corrente a bassa frequenza (II) ottenendosene una corrente modulata (III).

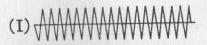
Segnali brevi costituiscono i punti, segnali lunghi costituiscono le linee: come è noto, con opportuni raggruppamenti di punti e di linee, secondo l'alfabeto *Morse*, si formano le lettere e le parole da trasmettere.

Alla ricezione ritraducendo l'oscillazione e.m. in suono, si udranno nella « cuffia » i segnali a frequenza acustica con lo stesso ritmo regolato dal tasto nella stazione trasmittente.

Nel caso della trasmissione radiotelefonica il principio è il medesimo, ma le cose diventano molto più complicate in quanto, invece di un segnale costituito da un'unica nota, si tratta di trasmettere la musica o la voce, comportanti un insieme di suoni di diversa frequenza, continuamente variabili, che abbracciano un campo molto ampio di circa 15.000 cicli al secondo.

Allora il « segnale modulante » non è più di forma sinusoidale di determinata frequenza, ma assume un andamento vario (Fig. 129 II) in relazione al susseguirsi e al sovrapporsi delle diverse note e delle diverse frequenze relative alla musica o alla parola.

In conseguenza, l'oscillazione modulata risultante assume anche essa un andamento vario (Fig. 129 III).



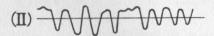




Fig. 129 — Quando la corrente modulante (II) ha un andamento vario la primitiva corrente portante ad alta frequenza (I) viene trasformata in una corrente modulata del tipo (III).

Se si indica con f_p la frequenza fondamentale dell'onda portante (radiofrequenza) e con f_m la frequenza (variabile) dell'onda modulante (audiofrequenza) l'oscillazione modulata (combinazione delle due frequenze) può assumere valori che vanno da $f_p + f_m$ a $f_p - f_m$. in quanto il segnale modulante a volte fa aumentare a volte fa diminuire la frequenza fondamentale. (Le frequenze f_m vengono chiamate bande laterali).

E siccome nel caso della modulazione fonica la frequenza f_m dei suoni o della parola abbraccia complessivamente — come prima detto — un campo di circa 15.000 cicli, il campo delle frequenze interessate da una trasmissione radiofonica dovrebbe comprendere comples sivamente uno « spettro » o « canale » di circa 30.000 cicli (da f_n — 15.000 a f_p + 15.000).

Sicchè le frequenze alle quali trasmettono contemporaneamente due stazioni dovrebbero differire di almeno 30.000 cicli, altrimenti le due stazioni potrebbero essere ricevute nello stesso istante entrambe, disturbandosi reciprocamente.

Nel campo delle onde medie (500-1500 Kc/sec) che comprende il maggior numero delle stazioni radiodiffusione, canali così larghi (30 Kc/sec) obbligherebbero a ridurre il numero delle stazioni in grado di trasmettere senza disturbarsi. In realtà si rende possibile una buona audizione anche limitando la frequenza acustica di modulazione a 4.500 cicli/sec (anzichè 15.000): allora sarà sufficiente che le frequenze portanti di due stazioni differiscano soltanto di 9.000 cicli/sec (anzichè 30.000).

Si osserva infine che dovendo la frequenza modulante essere superiore all'1 o al 2 per cento della frequenza dell'onda portante, per poter usare frequenze di modulazione relativamente elevate è necessario che le frequenze dell'onda portante siano sufficientemente alte.

Per quanto ora detto si conclude che quanto più elevate sono le frequenze portanti tanto più numerosi risultano i canali da assegnare alle varie stazioni radiofoniche, e quindi più numerose stazioni possono coesistere senza disturbarsi. Ecco perchè la quasi totalità delle stazioni di radio diffusione trasmettono su onde medie e corte.

* * *

I sistemi di modulazione sono diversi. Il più semplice consiste nell'inserire nel circuito di antenna lo stesso dispositivo modulante, che nel caso della trasmissione radiofonica è il microfono, de! quale si dirà nel seguito del presente Capitolo.

Con questo sistema la potenza messa in gioco risulta minima, essendo molto deboli le correnti microfoniche; esso interessa perciò soltanto nel caso di piccoli trasmettitori.

Con altri sistemi, più convenienti per trasmettitori anche di grande potenza, le correnti microfoniche, in genere mediante accoppiamenti induttivi, si fanno agire opportunamente sul circuito anodico, oppure sul circuito di griglia, dei bulbi elettronici facenti parte dei circuiti oscillanti.

(Per il modo di inserimento dei microfoni nei circuiti vedi in fondo al Cap. 27).

In pratica, la modulazione di placca, ossia sul circuito anodico, è la più estesamente adottata. Si realizza applicando alla placca di un bulbo amplificatore a radiofrequenza una tensione alternata a frequenza acustica (quella di modulazione) la quale si sovrappone alla normale tensione continua anodica. (Fig. 131).

Alla griglia dello stesso bulbo amplificatore viene applicata la radiofrequenza generata da un bulbo oscillatore (oscillatore pilota).

Allora la corrente anodica sarà sempre a radiofrequenza ma la sua ampiezza, oltre a risultare amplificata rispetto alla corrente di griglia, subirà degli aumenti e delle diminuzioni, in relazione al succedersi delle alternanze positive e negative della corrente acustica modulante.

In definitiva sull'antenna verrà trasferita una corrente a radiofrequenza modulata.

* * *

Il microfono è un dispositivo che converte un suono in corrente o tensione elettrica. Letteralmente significa « rivelatore mediante amplificazione di suoni debolissimi » (in analogia al microscopio che serve a vedere, ingranditi, oggetti invisibili ad occhio nudo): e ciò per la possibilità che esso dà di amplificare appunto le deboli correnti originate dai suoni ottenendosene poi, nella ritrasformazione in suoni, un « volume » molto maggiore.

Il tipo più antico, tuttora impiegato nei normali impianti telefonici, è il microfono a carbone, costituito da una membrana metallica (spessa qualche decimo di millimetro) che fa da coperchio ad una capsula metallica (scatola) contenente granuli di carbone (Fig. 130).

La lamina e la capsula sono inserite in un circuito elettrico alimentato da una pila (da circa 3 volt.). Producendo dei suoni, o parlando, davanti alla lamina, se ne determina la vibrazione, che avra la frequenza « modulata » delle onde sonore che la colpiscono.

Nella vibrazione la lamina si avvicina e si allontana dai granuli (minuscole palline) di carbone con i quali è a contatto, comprimendoli più o meno, sicchè varia molto sensibilmente la superficie di contatto (la sezione) complessiva tra la lamina e il carbone. In conseguenza varia in modo notevole la resistenza ohmica presentata dal dispositivo, e quindi varia l'intensità di corrente (per es. in un am-

bito da 50 a 100 milliampere) nel circuito dove il dispositivo stesso è inserito.

Tali variazioni di corrente risultano in definitiva esattamente proporzionali alle variazioni (cioè alla frequenza e alla intensità) delle onde sonore che fanno vibrare la lamina: così si riesce a tradurre un suono in corrente elettrica.

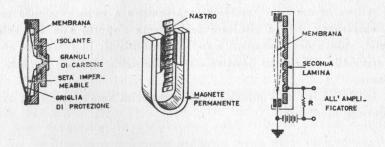


Fig. 130 — Microfono a carbone (a sinistra); microfono a nastro (al centro); microfono a condensatore (a destra).

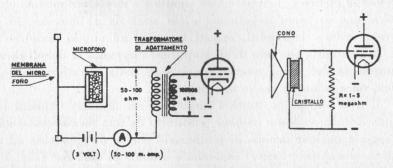


Fig. 131 — Schema di circuito con modulazione sulla griglia. (A sinistra): con microfono a carbone e trasformatore di adattamento; (A destra): con microfono a cristallo.

Il microfono a carbone offre una elevata sensibilità, ma comporta rumori di fondo e presenta distorsioni.

Quando si desidera una assoluta « fedeltà », cioè una perfetta riproduzione della voce senza distorsione, come negli impianti radio fonici, si possono impiegare microfoni elettromagnetici (a nastro, a bobina mobile) oppure microfoni a condensatore.

Nel microfono a nastro la membrana è costituita da un leggero nastro di alluminio ondulato sospeso tra i poli di un magnete permanente (Fig. 130). Quando si parla davanti alla membrana questa oscilla e viene a tagliare le linee di forza del campo magnetico, in un senso e nell'altro, determinandosi pertanto ai suoi capi una tensione variabile alternata.

Nel microfono a condensatore la membrana fa parte — anzichè di una « resistenza » come nel microfono a carbone — di un condensatore, cioè di una « capacità » inserita in un circuito alimentato da una pila.

La vibrazione della lamina davanti a cui si parla comporta variazione della distanza da una seconda lamina ad essa molto vicina, formante l'altra armatura del condensatore, e provoca in questo una variazione di capacità, con conseguente variazione della tensione nel circuito. Dette tensioni, amplificate e applicate alla griglia di un triodo, determinano poi variazioni di corrente della stessa frequenza dell'onda sonora che colpisce il microfono.

Esistono ancora altri tipi di microfono, come quelli piezoelettrici basati sull'effetto piezoelettrico al quale si è accennato nel Cap. 8. In essi le lamine cristalline (si impiegano, invece del quarzo, cristalli sintetici detti sali di Rochelle, molto più sensibili) sono poste ciascuna tra due piastrine metalliche (come un dielettrico di condensatore) venendo così a costituire delle « cellule » piezoelettriche, inserite nel solito circuito elettrico.

L'onda sonora colpendo la cellula determina una compressione maggiore o minore del cristallo (una vibrazione) che si trasforma in una oscillazione di tensione, per la nota proprietà posseduta dai cristalli piezoelettrici. Tali variazioni di tensione si fanno poi agire direttamente sulla griglia del trìodo, come sopra detto per il microfono a condensatore (Fig. 131 - destra).

Il microfono, in ambienti rumorosi, raccoglie oltre la voce che si desidera trasmettere anche i rumori estranei costituenti disturbo. Quando si vuole escludere tale disturbo si può usare il laringofono, costituito da un particolare microfono di piccole dimensioni che si applica sul collo, in corrispondenza della laringe, così da raccogliere per contatto direttamente e soltanto le vibrazioni della laringe stessa.

Avendo ora ricordato la proprietà piezoelettrica dei cristalli accenniamo anche ad un'altra interessante applicazione che se ne fa nella radiotelefonia, quella relativa alla stabilizzazione della frequenza.

Specialmente nella trasmissione e ricezione radiofonica con onde corte e cortissime si rende necessaria una frequenza perfettamente stabile, per assicurare la sintonia e per evitare distorsioni della voce e dei suoni.

Il cristallo piezoelettrico, di un determinato spessore, possiede una stabile frequenza propria di risonanza per la quale le oscillazioni assumono la massima ampiezza (per es. un cristallo di quarzo dello spessore di un millimetro oscilla su una frequenza di 3.000 kilocicli, corrispondenti ad una lunghezza d'onda di 100 metri).

Per rendere stabili le oscillazioni di un trasmettitore si collegano le « armature », entro le quali è racchiusa la lamina del cristallo, da una parte alla griglia e dall'altra al filamento del bulbo oscillatore, inserito attraverso la placca nel circuito oscillante accordato sulla stessa frequenza del cristallo.

In tal modo viene assicurata la stabilità di frequenza del circuito oscillante, risultando questo comandato, attraverso il circuito di griglia, dalla oscillazione propria del quarzo introdottovi, che è stato preventivamente scelto del desiderato valore.

* * *

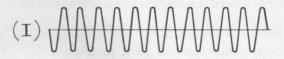
In alcuni moderni trasmettitori radiofonici si applica, anzichè la modulazione di ampiezza, la modulazione di frequenza.

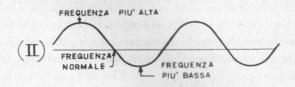
Questa consiste nel trasformare le variazioni di tensione (di ritmo ad audiofrequenza) create dal dispositivo modulatore — costituito per es. da un microfono a condensatore — in variazione della radiofrequenza dell'onda emessa, della quale si lascia inalterata l'ampiezza.

Alla ricezione l'onda risulta di ampiezza costante e le variazioni di frequenza determinate nell'emissione sono ritrasformate in *variazioni di corrente* ad audiofrequenza e quindi ancora nei corrispondenti suoni, uguali a quelli che hanno modulato l'onda emessa.

In effetti, parlando — per es. — davanti ad un microfono a condensatore, se ne viene a variare continuamente la capacità, perche le vibrazioni fanno variare istante per istante la distanza tra le lamine-armature, come già detto in precedenza.

Se detta capacità viene inserita, in parallelo, sul circuito oscillatore (provvisto di induttanza e di capacità date che determinano la radiofrequenza base dell'onda portante) viene ad essere continuamente modificata la capacità totale del circuito oscillatore, e in conseguenza risulta variata — istantaneamente e con il ritmo determinato dalla voce — la frequenza dell'onda modulata. (Fig. 132).





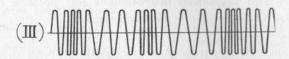


Fig. 132 — La modulazione di frequenza consiste nel variare la frequenza dell'onda portante (I) mediante l'onda modulante (II) per ottenere un'onda risultante di frequenza variabile (III) e di ampiezza costante.

La modulazione di frequenza presenta, rispetto alla modulazione di ampiezza, notevoli vantaggi quali la maggior potenza irradiata, il maggior rendimento in trasmissione, e soprattutto la quasi completa eliminazione dei disturbi dovuti a scariche atmosferiche o ad altre interferenze elettromagnetiche artificiali (disturbi che incidono sulla ampiezza).

In realtà i disturbi sono costituiti da suoni o rumori, non originati dalla trasmittente, che si aggiungono ai segnali in arrivo facendone variare irregolarmente l'ampiezza. Nei ricevitori a modulazione di frequenza è inserito uno stadio limitatore, che appunto limita ad un determinato valore costante l'ampiezza dell'onda ricevuta, cosicchè la variazione che il disturbo comporterebbe non viene risentita ulteriormente; nella demodulazione (della frequenza) emerge soltanto, netto e preciso, il segnale modulante trasmesso al microfono.

* * *

Riepilogando, un trasmettitore per radiocomunicazioni si compone generalmente delle seguenti parti principali:

- 1 uno stadio oscillatore, eventualmente controllato con dispositivo stabilizzatore a cristallo piezoelettrico, per generare l'onda portante;
- 2 uno stadio amplificatore destinato ad amplificare le oscillazioni prodotte dallo stadio oscillatore, per trasmetterle con maggior potenza;
- 3 uno stadio modulatore, per « incidere » l'onda portante, preceduto da uno stadio premodulatore destinato ad amplificare le deboli correnti modulanti microfoniche per portarle alla potenza richiesta dall'operazione di modulazione.

In quanto agli apparati generatori delle correnti di alimentazione, diciamo che le batterie di pile o di accumulatori — che figurano solitamente negli schermi — sono sufficienti soltanto per trasmettitori di piccola potenza. Per le medie e le grandi potenze la corrente continua necessaria viene fornita da generatori rotanti, oppure derivata dalle comuni reti industriali, impiegandola previo raddrizzamento.

27 — La captazione e la rivelazione delle onde elettromagnetiche.

> Il ricevitore telefonico ritraduce la corrente in suono. Cenni sulla costituzione e sul funzionamento di un apparato radioricevente.

Nei paragrafi precedenti si è visto in qual modo si riesca a trasformare dei « segnali » costituiti da vibrazioni sonore in vibrazioni elettromagnetiche ad audiofrequenza (Fig. 133 - A) che amplificate (Fig. 133 - B) vanno a modulare un'oscillazione e.m. a radiofrequenza (Fig. 133 - C) irradiata alfine nello spazio sotto forma di energia elettromagnetica (Fig. 133 - D).

L'intensità di tale energia diffondendosi diminuisce rapidamente con l'aumentare della distanza dalla stazione emittente, e si riduce a valori molto piccoli, dell'ordine — come corrente — di frazioni di microampere (Fig. 133 - E).

Per ricevere le originarie vibrazioni sonore occorrerà quindi prima di tutto amplificare (Fig. 133 - F) la debolissima corrente raccolta dall'antenna ricevente (oscillante in radiofrequenza modulata); poi rivelare la componente a frequenza acustica (Fig. 133 - G) separandola dalla componente portante a radiofrequenza (operazione questa inversa alla « modulazione », tanto che talvolta si definisce « demodulazione »); poi ancora eventualmente amplificare (Fig. 133 - H) tale corrente ad audiofrequenza ed infine ritrasformarla in vibrazione sonora, udibile alla cuffia telefonica oppure con altoparlante.

Intanto, è bene far si che l'antenna raccolga il massimo possibile dell'energia elettromagnetica esistente nel luogo di ricezione. Ciò si ottiene — oltre che mediante un opportuno orientamente dell'antenna dove ciò è possibile e conveniente, come detto nel Cap. 23 — accordando il circuito di antenna ricevente in modo da metterlo in risonanza con la frequenza che si desidera ricevere.

(Per la risonanza vedi il Cap. 20).

Una tale condizione di risonanza non soltanto migliora il rendimento dell'antenna ricevente al fine dell'energia captata, ma consente di escludere automaticamente le onde delle altre frequenze che sempre coesistono nello spazio con l'onda che si vuol ricevere.

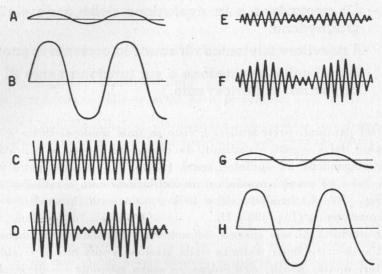


Fig. 133 — (A sinistra): Successione delle trasformazioni di corrente in una trasmittente, dalla corrente microfonica (A) all'energia irradiata (D). — (A destra): Successione inversa alla ricezione, dall'energia captata dall'antenna (E) alla corrente amplificata che aziona l'apparato acustico (H).

Per ottenère la risonanza si regolano opportunamente i fattori caratteristici (L e C) della frequenza del circuito d'antenna, normalmente facendo variare la sola capacità mediante un condensatore variabile.

E' questa infatti l'operazione che si effettua in un comune ricevitore radio quando si ricerca e si sintonizza l'apparato sulla frequenza che si desidera ricevere: sulla manopola che regola il condensatore variabile c'è scritto perciò SINTONIA.

In molti moderni apparati esiste un indicatore ottico di sintonia detto occhio magico: è costituito essenzialmente da un bulbo elettronico per mezzo del quale il flusso di elettroni crea una fluorescenza verde su un disco, simile ad un'iride, che assume la massima estensione quando il ricevitore è perfettamente sintonizzato.

Sugli apparati «plurionda», costruiti per ricevere onde di una gamma molto estesa — comprendente per esempio le lunghe, le medie, le corte — si sposta preventivamente un commutatore mediante il quale viene inserita nel circuito d'aereo una induttanza diversa, secondo il campo (onde lunghe, medie, corte) in cui è compresa la frequenza sulla quale ci si vuole sintonizzare.

* * *

La funzione amplificatrice nel ricevitore è affidata ad un trìodo, e costituisce uno dei più importanti impieghi dei bulbi elettronici (come si è già accennato al Cap. 25).

Semplificando, il diagramma di funzionamento di un trìodo amplificatore è riprodotto nella Fig. 134 - sin., dove sono riportati in ascissa i valori del potenziale nel circuito di griglia, in ordinata i valori della corrente nel circuito di placca.

Data la «pendenza », superiore a 45°, del diagramma caratteristico, si vede come una oscillazione di potenziale di piccola ampiezza che agisce sulla griglia determina una oscillazione di corrente, simile e di maggiore ampiezza, sulla placca.

Nello schema di circuito della Fig. 134 - des., dove è scritto (entrata » si applica la tensione alternata ricevuta dall'antenna: dove è scritto « uscita » si raccoglie una tensione alternata della stessa frequenza ma di valore molto più elevato. Le resistenze r e r' sono scelte opportunamente in relazione al desiderato rapporto di amplificazione.

Gli stadi di amplificazione possono essere più d'uno.

Nei moderni ricevitori si provvede, anzichè all'amplificazione diretta del segnale a radiofrequenza in arrivo, come ora indicato, all'amplificazione della media frequenza nella quale si trasforma l'alta frequenza per mezzo del battimento provocato da un'oscillatore locale (supereterodina).

Si fa funzionare l'oscillatore locale ad una frequenza tale che componendosi con la radiofrequenza in arrivo la trasformi in una oscillazione modulata di *frequenza fissa* (generalmente compresa tra 100 e 500 kilohertz), essendo la frequenza modulata risultante eguale alla differenza tra le due frequenze componenti.

Il segnale modulato a media frequenza così ottenuto viene poi amplificato attraverso uno o più stadi, ottenendosene come vantaggio un maggior rendimento, per essere i circuiti amplificatori appositamente studiati per quella unica determinata frequenza fissa. Inoltre

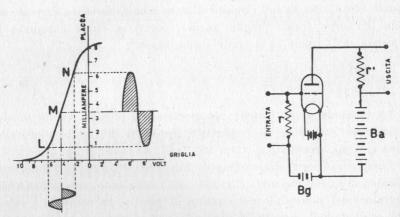


Fig. 134 — La funzione amplificatrice del triodo: diagramma (a sinistra) e schema di circuito (a destra).

i diversi stadi, accordati su una sola frequenza, funzionano anche da circuiti « filtro » e rendono quindi l'apparato particolarmente selettivo.

* * *

Ovviamente, le correnti ad alta frequenza raccolte dall'antenna, anche amplificate, non sono direttamente ricevibili in un apparato telefonico perchè nessuna membrana riesce a vibrare con frequenza così elevata. (D'altra parte, anche se questo si potesse ottenere non si produrrebbe alcun suono udibile, in quanto i suoni comportano vibrazioni di frequenze inferiori a 16.000 periodi al secondo).

E' perciò necessario separare da tali correnti a radio frequenza modulata la componente a frequenza acustica (audio frequenza), come prima detto, operazione questa che si denomina rivelazione (o demodulazione) e che generalmente si effettua utilizzando ugualmente un trìodo, in un altro punto della sua curva caratteristica.

Nella Fig. 135 si vede il diagramma della corrente di placca in funzione della tensione di griglia, come quello della Fig. 134. Qui però è messa in evidenza la zona corrispondente al « ginocchio » della caratteristica.

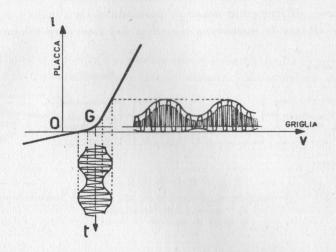


Fig. 135 — La rivelazione di una corrente modulata avviene facendo agire la corrente stessa sulla griglia del triodo, in corrispondenza del « ginocchio » G della « caratteristica ».

Applicando alla griglia una tensione oscillante modulata — rappresentata in basso nella Figura a destra e sinistra del punto G, non si ottiene più sulla placca una corrente oscillante « simile », come si otteneva nel caso della Fig. 134. Ciò perchè i due rami della curva che partono dal punto G hanno pendenza diversa e tale che nel ramo superiore si produce un'amplificazione con ingrandimento della alternanze di destra) mentre nel ramo inferiore si produce una riduzione (alternanze di sinistra).

(In sostanza non viene più rispettata la legge di Ohm sulla diretta proporzionalità tra la tensione e la corrente).

Si osservi che la corrente nel circuito anodico (di placca) si può considerare composta di una corrente ad alta frequenza, dove prevale

l'ampiezza delle alternanze positive, e di due correnti a bassa frequenza, costituite dalle sinusoidi (tangenti) che inviluppano le alternanze positive e negative della corrente ad a.f.

Anche nella corrente a bassa frequenza la parte negativa è di ampiezza minore della parte positiva; perciò la corrente a b.f. risultante sarà positiva, come indicato dalla linea tratteggiata. Questa corrente risultante, di frequenza acustica, passando nella « cuffia » è in grado di far vibrare la membrana metallica del ricevitore telefonico.

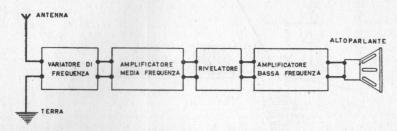


Fig. 136 — Composizione schematica di un apparato radioricevente, dall'antenna all'altoparlante.

Si mette in evidenza il fatto che la frequenza e la forma di quest'ultima corrente sono le medesime della corrente costituente l'inviluppo della radiofrequenza modulata ricevuta dall'antenna, la quale a sua volta è conforme — come detto in precedenza — a quella irradiata dalla stazione trasmittente.

In definitiva, dopo la rivelazione si riproduce la corrente a frequenza acustica che nell'apparato trasmittente è servita per modulare l'onda portante, corrente modulante che sappiamo essere la traduzione elettrica del suono che all'origine ha colpito il microfono.

Sicchè nella cuffia telefonica del ricevitore la membrana è portata a vibrare nell'identico modo di quella del microfono trasmittente e quindi riproduce lo *stesso suono* emesso all'origine, realizzando così la radioaudizione.

Si conclude che un apparato radioricevente, anche del tipo casalingo, in generale risulta così schematicamente composto (Fig. 136):

- Circuito d'antenna
- Variatore di frequenza

- Amplificatore della media frequenza (anche a più stadi)
- Rivelatore
- Amplificatore a bassa frequenza (anche a più stadi)
- Altoparlante.

* * *

Notiamo ora che in radiotelegrafia si possono molto semplicemente stabilire comunicazioni a grande distanza trasmettendo con onde

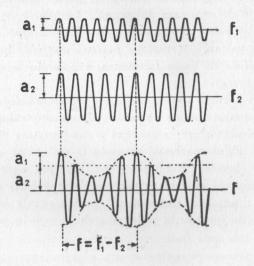


Fig. 137 — Il battimento consiste nel sommare ad un'onda di frequenza f_1 un'altra di frequenza f_2 in modo da ottenere come risultante un'onda di frequenza $f_1 - f_2$ (a = ampiezza).

persistenti, non modulate alla origine. Per rivelare tali onde è perb sempre necessario produrre nel ricevitore un'oscillazione elettromagnetica, pure ad a.f., che si sovrapponga a quella ricevuta dall'antenna provocando il battimento consistente, come già detto, in una nuova oscillazione la cui frequenza di modulazione è $f_1 - f_2$ (Fig. 137).

La frequenza f_2 si sceglie in modo che la frequenza di modulazione sopra definita (f_1-f_2) risulti una frequenza acustica, trasformabile cioè in vibrazione sonora, nel caso particolare in una nota musicale, bene udibile nella cuffia telefonica.

Così se l'onda in arrivo ha una frequenza $f_1=1000~Kc/sec$ e la frequenza prodotta in loco ha una frequenza $f_2=1001~Kc/sec$, l'onda modulata sarà tale che il suo « inviluppo » avrà una frequenza f=1~Kc/sec=1000~cicli/sec.

L'ampiezza dell'oscillazione modulata è variabile e risulta compresa tra i valori $a_1 + a_2$ e $a_1 - a_2$. Ciò consente anche di rinforzare, con l'apporto della corrente oscillante di ampiezza a_2 , il segnale in arrivo di ampiezza a_1 quando questo sia molto debole.

A proposito di ampiezza del segnale udibile, è noto che in tutti i ricevitori radio esiste il regolatore di volume. Esso è costituito da una resistenza variabile (reostato potenziometrico) inserita nel circuito amplificatore di bassa frequenza, regolando la quale si regola l'intensità di corrente.

I ricevitori portano spesso anche un regolatore di tono, consistente in una resistenza ohmica variabile, di elevato valore, disposta in serie con un condensatore: resistenza e condensatore risultano in parallelo rispetto all'altoparlante. Quando la resistenza è disinserita le frequenze più elevate (suoni acuti) passano più agevolmente attraverso il condensatore anzichè attraverso l'altoparlante che offre maggior resistenza: perciò si udranno di preferenza le note più basse. L'opposto succede quando la resistenza ohmica è inserita.

* * *

Come già detto, il *ricevitore telefonico* compie la funzione inversa di quella del microfono: trasforma cioè una corrente oscillante. modulata a frequenza acustica, in vibrazioni sonore.

Sostanzialmente un ricevitore telefonico è costituito da un magnete permanente le cui espansioni polari sono avvolte da due picco-le bobine di molte spire, nelle quali si fa passare la corrente modulata.

Davanti ai poli del magnete, a distanza di qualche millimetro, è posta la solita sottile lamina metallica (membrana vibrante).

La corrente modulata ricevuta, passando nelle bobine, fa aumentare o diminuire istantaneamente, con il ritmo stesso della modulazione, l'intensità del campo magnetico e determina una maggiore o minore attrazione della lamina, la quale in definitiva vibra a sua volta con il ritmo medesimo della corrente modulata (Fig.138 - a).

Due ricevitori telefonici da applicare agli orecchi, uniti insieme da un archetto metallico, formano la nota cuffia, normalmente usata dagli operatori telegrafisti e telefonisti.

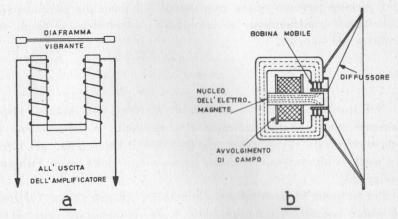


Fig. 138 — Schema di un ricevitore telefonico: semplice (a) e del tipo ad altoparlante elettrodinamico (b).

Per consentire l'ascolto collettivo delle ricezioni radiofoniche si utilizzano normalmente gli altoparlanti.

Ne esistono di diverso tipo: i più usati sono del tipo cosiddetto elettrodinamico, costituito da una calamita pemanente i cui poli sono avvolti da bobine nelle quali passa la corrente modulata ricevuta. Nel campo magnetico della calamita è posta una membrana vibrante alla quale è collegato un cono di cartone compresso (diffusore) che vibra solidalmente con la membrana, riproducendo i suoni corrispondenti alla predetta corrente modulata.

Negli altoparlanti elettrodinamici a bobina mobile il campo magnetico è determinato da elettromagneti a corrente continua, e presenta un intraferro anulare dentro cui viene disposta, assialmente, una piccola bobina mobile alla quale è collegato il diffusore. La corrente modulata si fa passare, come al solito, attraverso la bobina; ne nascono interazioni con il campo magnetico permanente in cui

la bobina è immersa, con le conseguenti attrazioni e repulsioni del diffusore, producenti le vibrazioni sonore (Fig. 138 - b).

I rivelatori fonografici (inglese pick-up) che servono per la rive lazione dei suoni grammofonici (o per l'incisione dei dischi) sono basati anch'essi sullo stesso principio ora citato: alla bobina in questo caso è applicata una punta, anzichè il diffusore, per seguire il solo inciso nel disco (o per inciderlo all'origine).

I pick-up possono essere pure basati sul principio piezoelettrico, e funzionano analogamente ai microfoni piezoelettrici ai quali si è accennato nel Cap. 26.

* * *

Nell'inserimento sia dei microfoni che degli altoparlanti, rispettivamente negli apparati trasmittenti e riceventi, e precisamente nel circuito d'entrata di un tubo amplificatore il microfono, nel circuito d'uscita l'altoparlante, bisogna tener conto della sotto richiamata esigenza.

Per ottenere il massimo rendimento da un generatore (al quale può essere assimilato un microfono) o da un apparato consumatore (quale è un altoparlante) si deve fare in modo che la resistenza (impedenza) del circuito consumatore (carico) sia uguale alla resistenza interna del generatore.

Ora si verifica che la resistenza interna dei microfoni varia con il tipo (è bassa per quelli a carbone o a nastro o a bobina, alta per quelli a condensatore e piezoelettrici); analoga cosa avviene per le cuffie e gli altoparlanti.

Pertanto dovendo inserire, per es., un microfono a carbone nel circuito di un tubo oscillatore, la cui resistenza è molto elevata (centinaia di migliaia di ohm), bisogna adottare come intermediario un trasformatore di adattamento con opportuno rapporto di trasformazione (vedi Fig. 131 - sinistra) tale che la impedenza presentata dal secondario risulti elevata a valori dello stesso ordine della impedenza del tubo oscillatore.

Il microfono a cristallo, che presenta di per sè una elevatissima resistenza, si può invece inserire direttamente nel circuito del tubo amplificatore (Fig. 131 - destra).

PARTE V ELETTRONICA

MOVINGRITH

28 — Il flusso elettronico si fa lavorare nel chiuso come il vapore.

> Il tubo a raggi catodici elemento fondamentale per la televisione e per molte altre apparecchiature elettroniche.

> Utilizzazione dei cavi coassiali in radio e in telefonia.

Con la voce elettronica si indica generalmente la scienza e la tecnica che si occupano dei fenomeni connessi con le correnti di elettroni liberi entro tubi a vuoto (o riempiti di gas inerti).

Ricordando l'analogia con i vari stati di aggregazione dell'acqua (Cap. 22) si osserva che anche il *vapore* si utilizza facendolo lavorare in ambiente chiuso.

Le applicazioni di elettronica sono ormai numerosissime e si moltiplicano ogni giorno di più: in particolare quelle destinate alle apparecchiature di controllo per la fabbricazione automatica in serie dei pezzi finiti stanno per essere introdotte estesamente nel campo industriale, allo scopo di realizzare nel prossimo futuro la produzione a massa con il nuovo sistema che va sotto il nome di automazione.

Un dispositivo che trova molte applicazioni in elettronica è il tubo a raggi catodici che passiamo a descrivere in breve.

Un tubo catodico è costituito essenzialmente da un recipiente di vetro, vuoto d'aria, a forma di grossa bottiglia conica con un lungo collo. (Fig. 139). In corrispondenza del « tappo » della bottiglia un catodo (elettrodo negativo), riscaldato da un filamento incandescente emette un fascetto di elettroni i quali, animati da alta velocità, prendono appunto il nome di raggi catodici.

La velocità viene agli elettroni impressa e incrementata da griglie e da anodi (elettrodi positivi).

Detti acceleratori sono disposti lungo il « collo » del tubo, e il loro potenziale si rende più elevato con l'aumentare della distanza dal catodo.

Alcuni elettrodi sono di forma tale da concentrare il fascetto elettronico così da ridurlo il più stretto possibile, come un sottile pennello luminoso: prendono essi il nome di focalizzatori (elettrostatici). Si può in tal modo ottenere, su uno schermo colpito dal pennello, un « punto » luminoso del diametro di circa mezzo millimetro.

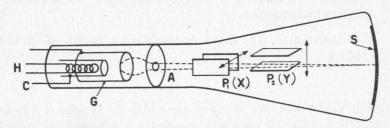


Fig. 139 — Vista schematica di un tubo a raggi catodici: C= catodo; H= filamento riscaldatore; G= griglia cilindrica concentratrice del fascio catodico; A= anodo acceleratore; $P_1=$ piastrine deflettrici (X); $P_2=$ piastrine deflettrici (Y); S= schemo.

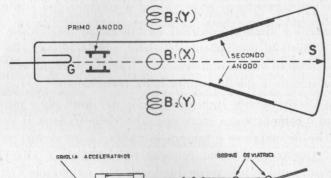
La focalizzazione può essere conseguita anche per mezzo di un forte campo magnetico in corrispondenza dell'asse del tubo, campo magnetico fornito da una bobina a corrente continua disposta intorno al collo del tubo stesso in prossimità del catodo.

Il fascetto elettronico successivamente può essere deflesso sia mediante un campo elettrostatico che mediante un campo magnetico.

La deflessione elettrostatica si realizza con due coppie di piastrine metalliche disposte parallelamente: due verticali (X) e due orizzontali (Y). Variando il potenziale delle piastrine verticali si « attira », e quindi si devia, il fascetto elettronico lateralmente verso destra o verso sinistra, variando quello delle piastrine orizzontali si devia in altezza verso il basso o verso l'alto.

La deflessione magnetica si realizza disponendo, anzichè piastrine metalliche, due coppie di bobine capaci di produrre due campi magnetici sempre perpendicolari tra di loro, che si comportano analogamente ai campi elettrostatici X e Y sopra visti (Fig. 140).

Facendo variare opportunamente la tensione o l'intensità di corrente nei sistemi di deflessione si può far compiere al raggio elettronico qualsiasi spostamento, che risulta istantaneo poichè il fascio elettronico non presenta alcuna inerzia.



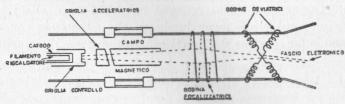


Fig. 140 — (Sopra): Altro tipo di tubo a raggi catodici, dove sono indicati schematicamente i deflettori magnetici B₁ (X) e B₂ (Y). (G = catodo e griglia; S = schermo). (Sotto): Particolare di tubo a raggi catodici per TV.

Infine il fascetto va a colpire la faccia interna dello schermo (la parte traslucida del tubo) resa fluorescente, sicchè nel punto in cui viene incontrata dal sottilissimo « pennello » elettronico diventa brillante, restando il punto stesso visibile durante una frazione di secondo. (Tale tempuscolo può essere più o meno durevole, secondo il grado di fluorescenza conferito per costruzione allo schermo).

* * *

Diciamo subito che l'apparato ricevente della televisione è costituito essenzialmente proprio da un tubo a raggi catodici, il cui « fondo » costituisce la parte visibile dall'esterno, cioè lo schermo vero e proprio sul quale si proiettano le immagini.

Normalmente lo schermo TV appare di forma pressochè rettangolare; se ne indicano le dimensioni con il numero che ne misura la lunghezza della diagonale in *pollici* (1 pollice = cm 2,54).

Il principio generale su cui si basa la televisione è analogo a quello già esposto per le radioaudizioni. Nelle radioaudizioni i suoni di varia intensità e timbro, costituiti da vibrazioni meccaniche udibili, vengono tradotti in oscillazioni elettriche, poi irradiate: alla ricezione tali oscillazioni vengono nuovamente tradotte in suoni, con un procedimento inverso a quello seguito nella trasmissione.

Nella televisione è la luce, nell'aspetto dei punti più o meno luminosi di cui è composta una immagine, che viene tradotta in oscillazioni elettriche di maggiore o minore intensità (come si dirà meglio al Cap. 30). Queste oscillazioni vengono poi irradiate e alla ricezione ritradotte in punti più o meno luminosi, che apparendo con rapida successione sullo schermo del televisore riproducono l'immagine trasmessa.

Per la televisione, data la rapidità grandissima della « modulazione », la cui frequenza non deve peraltro essere superiore all'1-2% della frequenza dell'onda portante, sono indispensabili frequenze portanti elevatissime, con lunghezze d'onda minime, dell'ordine di un metro o poco più. Queste onde si trasmettono in linea retta, quindi la « portata » delle emittenti TV è normalmente quella ottica, con qualche « prolungamento » dovuto a fenomeni di « diffrazione » (diffusione e parziale aggiramento di ostacoli).

Per rendersi conto di come avvenga la riproduzione dell'immagine per «punti » e per « linee » si tenga presente l'operazione materiale che si fa quando si vuole con una matita ricalcare la figura in rilievo di una moneta su di un foglio di carta sottile ad essa aderente. (Una « linea » è costituita da una rapida successione di « punti » che appaiono uno dopo l'altro).

La matita, tenera, si passa con leggera pressione ripetutamente sulla carta, coprendola con una fitta serie di linee: in corrispondenza dei punti in rilievo apparirà un segno più scuro, e quando sarà stata « coperta » tutta la superficie della moneta dalle righe si vedrà in complesso riprodotta l'immagine della moneta stessa.

Nel tubo a raggi catodici, invece della matita è un raggio elettronico a scorrere con continuità orizzontalmente da sinistra verso destra a cominciare dall'alto, in modo da « tracciare » sullo schermo una serie di righe luminose orizzontali, percorse in modo che, appena raggiunto l'estremo destro di una riga, il raggio si sposti istantaneamente a sinistra e tracci una seconda riga immediatamente al disotto della precedente, e così via fino a coprire tutto lo schermo. Dopodichè ricomincia da capo in alto, continuando sempre con lo stesso procedimento.

Questa copertura avviene in un tempo brevissimo, inferiore ad un trentesimo di secondo, in modo che l'occhio, per la persistenza delle immagini sulla retina, veda lo schermo tutto contemporaneamente illuminato. (Si pensi a ciò che avviene quando nell'oscurità con un tizzone infuocato si descrivono rapidamente dei piccoli cerchi: l'occhio vede un anello luminoso continuo).

Ancora, a parte il tempo impiegato, l'operazione sopra analizzata è simile a quella che si compie automaticamente quando si legge una pagina, scorrendo ciascun rigo da sinistra a destra, e quindi un rigo dopo l'altro dall'alto in basso. Così facendo in effetti si « scandisce » con l'occhio ciascuna lettera e ciascuna parola dello scritto, ritenendone in mente il significato complessivo.

Nella televisione italiana le linee descritte per coprire tutto il quadro sono 625, e il tempo complessivo è di 1/50 di secondo.

In realtà nei ricevitori per TV l'esplorazione dell'immagine procede, anzichè con il sistema dell'analisi progressiva sopra descritto, con quello della analisi interlacciata, consistente nella esplorazione fatta una prima volta sulle righe dispari (1., 3., ... 623., 625.), di seguito una seconda volta sulle righe pari (624., 622., ... 4., 2.).

In tal modo, nel tempo occorso per esplorare una volta l'intero quadro (1/25 di secondo) l'occhio ha ricevuto non una ma due impressioni di tutta l'immagine, con un effetto corrispondente ad una rapidità di esplorazione doppia di quella effettiva (1/50 anzichè 1/25 di secondo).

La nitidezza (definizione, risoluzione) dell'immagine migliora con l'aumentare del numero delle linee di analisi. Peraltro un tale aumento comporta per la modulazione bande di frequenza molto ampie, con la conseguenza di dover limitare il numero di stazioni televisive in grado di trasmettere contemporaneamente.

Per dare un'idea delle frequenze relative nella TV si dirà che nel sistema inglese a 405 linee la larghezza di banda totale da trasmettere (comprendente la parte video e la parte audio) e di 6 Mhz; nel sistema italiano a 625 linee è di 7 Mhz; nel sistema francese a 819 linee è di 14 Mhz.

Il dispositivo che nel tubo a raggi catodici realizza la « copertura » luminosa dello schermo come ora detto si denomina base dei tempi.

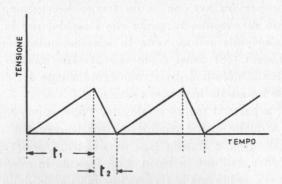


Fig. 141 — Variazione teorica della tensione nel dispositivo detto « base dei tempi » ($t_1 =$ tempo di percorrenza di una riga; $t_2 =$ tempo di ritorno indietro).

Per ottenere lo scopo si fa variare la tensione delle piastrine X verticali (quelle che nel deflettore elettrostatico provvedono a comandare lo spostamento orizzontale del raggio) in modo che la tensione della piastrina di sinistra (guardando lo schermo) si elevi da zero ad un massimo positivo (Fig. 141). Se con il potenziale zero il raggio cadeva all'estremo sinistro della riga, con il graduale aumento del potenziale della piastrina esso raggio viene respinto verso destra e percorre con velocità costante tutta la riga fino all'estremo destro.

In tale istante il potenziale della piastrina cade rapidamente a zero (ciò si ottiene mediante la scarica rapida di un condensatore) e il raggio si riporta all'estremo sinistro per ripercorrere un'altra riga, immediatamente al disotto della precedente. A spostare verso il basso il raggio elettronico provvede la coppia di piastrine Y, sempre mediante una opportuna variazione di potenziale al momento giusto.

Finora non abbiamo spiegato come avviene la variazione della intensità luminosa del raggio elettronico (corrispondente alla variazione di intensità del segno tracciato dalla matita nel ricalco). Tale variazione, in concordanza con la variazione di intensità della corrente in arrivo, « modulata » a sua volta in trasmissione dalle variazioni di luminosità del raggio che « analizza » per punti l'immagine da trasmettere, viene ottenuta facendo agire la corrente « modulata » sulla griglia del tubo, in modo da « controllare » la tensione di griglia.

Quando la tensione è maggiore vengono attratti più elettroni, che colpendo lo schermo in maggior quantità vi determinano un punto più brillante; quando la tensione è minore gli elettroni attratti sono di meno e il punto sullo schermo appare meno brillante.

La rapida successione di questi « punti », mediante la « fluttuazione » del raggio elettronico, ricostruisce in definitiva la immagine nei suoi chiaroscuri, luci e ombre, così come è stata «analizzata » in partenza dall'analogo dispositivo che compie in sincronia la funzione analoga inversa traducendo la luminosità dei punti in intensità di corrente (Cap. 30).

La trasmissione televisiva è normalmente accompagnata da una contemporanea trasmissione auditiva, la quale ha luogo secondo il procedimento visto al Cap. 26. La ricezione auditiva (parte audio) nell'apparecchio televisore viene usualmente abbinata alla ricezione visiva (parte video).

Schematicamente un'apparecchiatura per la ricezione audio e televisiva si compone come mostrato dalla Fig. 142.

क्षेत्र क्षेत्र क्षेत्र

Talvolta il collegamento fra trasmettitore e ricevitore televisivo. o tra due trasmettitori che diffondano uno stesso programma, è fatto, anzichè attraverso lo spazio, mediante conduttori speciali detti cavi coassiali.

Un cavo coassiale è formato essenzialmente da un filo buon conduttore intorno al quale è posto, distanziato, un secondo conduttore a tubo cilindrico (costituito talvolta da una « calza » metallica) aven-

te per asse materiale lo stesso filo. Lo spazio interposto contiene isolante di elevate caratteristiche (resine sintetiche del tipo politene). All'esterno si pone poi un altro rivestimento isolante resistente all'usura, per potere interrare il cavo quando si devono superare grandi distanze lungo le strade o su terreno vario (Fig. 149).

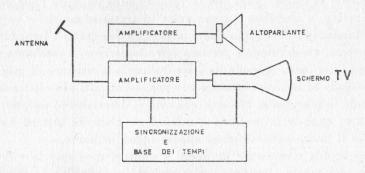


Fig. 142 — Composizione schematica di un apparato ricevente per TV, dall'antenna allo schermo e all'altoparlante.

Il cavo coassiale è adatto a trasmettere correnti ad alta frequenza (come quelle della TV, di lunghezza d'onda dell'ordine di circa 5 metri, corrispondente a 60 Megacicli/sec) le quali nei conduttori normali ,oltre alla maggiore perdita « ohmica » per l'effetto pelle (Cap. 16) subiscono perdite per irradiazione, trasformandosi la corrente per la maggior parte in energia elettromagnetica « spaziale » (Cap. 23).

Una tale trasformazione, mentre risulta opportuna, e viene quindi ricercata e agevolata, nelle antenne destinate appunto alla irradiazione, costituirebbe una perdita nociva nella trasmissione per filo di energia elettrica ad alta frequenza, della quale stiamo ora trattando.

Con il cavo coassiale questa energia resta tutta contenuta nello spazio tra i due conduttori, formando il conduttore esterno uno schermo (del tipo della « gabbia di Faraday ») che impedisce all'energia interna di uscire come impedisce all'energia esterna di entrare, evitando così anche disturbi occasionali dovuti ad eventuali sorgenti estranee (Cap. 8).

I cavi coassiali vengono estesamente utilizzati nelle linee telefoniche interurbane, oltrechè per i pregi ora citati, per il fatto che consentono la telefonia multipla, consistente nell'immettere in uno stesso cavo contemporaneamente numerosissime correnti di diversa frequenza, ognuna delle quali può sopportare una conversazione: all'arrivo le diverse correnti vengono poi nuovamente divise e selezionate
— con appositi dispositivi — in modo che ciascuna raggiunga l'apparecchio dell'utente al quale è destinata.

29 — Il radar basato sull'eco elettromagnetica.
 La tecnica della trasmissione ad impulsi.

 Ancora analogie con gli ultrasuoni.
 La guida d'onda come un tubo portavoce.

Una tra le più interessanti applicazioni del tubo a raggi catodici si è avuta nel radar. Il termine RADAR è stato formato con le iniziali delle parole « Radio Detection And Ranging », aventi il significato di « Scoperta e distanza (misurata) per mezzo della radio » oppure, con una sola parola, « Radiolocalizzazione ».

Il radar è un'apparecchiatura che sfrutta l'eco elettromagnetica nel senso che esso è in grado di misurare il tempo che intercorre tra l'istante in cui il segnale radio viene emesso e l'istante in cui si riceve l'eco rimandata dall'ostacolo (velivolo, nave, ecc.) investito dalla onda e. m..

(Come curiosità anagrammatica si osserva che la parola *radar* si legge *radar* anche all'inverso, quasi a ricordare il principio di andataritorno sul quale è basato l'apparato).

Il principio è molto semplice, e ce se ne può rendere conto pensando alla sua applicazione nel campo acustico.

Se una parete è capace di rimandare un'eco, noi possiamo — ponendoci nel punto dove si genera il suono — misurare la distanza interposta. Supponiamo di disporre di un cronometro graduato in decimi di secondo: schiacciamo il bottone di avvìo nel momento in cui spariamo un colpo di pistola, e arrestiamo la marcia del cronometro nell'istante in cui percepiamo l'eco del colpo.

Se il cronometro segna, per esempio, 6 decimi di secondo, essendo nota la velocità del suono (che è di 340 metri al secondo) possiamo senz' altro concludere che il suono ha percorso 204 metri (34×6) come viaggio totale di andata e ritorno: si desume allora che la parete è distante 102 metri (la metà).

Nel caso del radar si ha a che fare, anzichè con le onde sonore, con le onde elettromagnetiche, la cui velocità di propagazione sappiamo essere enormemente più alta (300.000.000 di metri al secondo). Necessita perciò lanciare un impulso di energia (corrispondente al colpo di pistola) di durata brevissima, di qualche milionesmo di secondo, per poterne percepire l'eco di ritorno, registrando tempi di percorso pure dell'ordine dei microsecondi. (In un microsecondo lo impulso elettromagnetico percorre 300 metri) (Fig. 143).

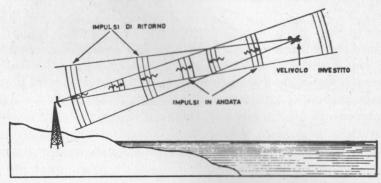


Fig. 143 — Visione schematica del fenomeno della eco elettromagnetica su cui è basato il radar.

Poichè gli ostacoli da rivelare (particolarmente gli aerei) hanno dimensioni limitate, talvolta di pochi metri quadrati, le onde elettromagnetiche del radar devono essere di adeguata piccola lunghezza d'onda (inferiore a dieci metri, normalmente intorno ad un metro, oppure di qualche decimetro, oppure di alcuni centimetri) per venire riflesse — come reirradiate — dall'ostacolo stesso. Se le onde fossero più lunghe finirebbero con il sorpassare, aggirare, l'ostacolo senza « urtarci » contro e quindi non verrebbero riflesse.

La piccola lunghezza d'onda si rende anche necessaria per potere « discriminare », cioè distinguere, due aerei che volino uno vicino all'altro; altrimenti se ne « vede » uno solo.

Per produrre oscillazioni di frequenza elevatissima, quali quelle richieste nel radar, che vanno fino a 3.000~Mc/s (10~cm) e anche a 10.000~Mc/s (3~cm) ed oltre, non sono idonei i normali bulbi elet-

tronici; in questi le pur piccole distanze tra gli elèttrodi risultano infatti eccessive, dati i minimi intervalli di tempo a disposizione degli elettroni per compiere i loro tragitti nell'interno dei bulbi stessi.

Date anche le elevate potenze in gioco è stato perciò necessario creare un dispositivo speciale come oscillatore, conosciuto con la denominazione di Magnetron.

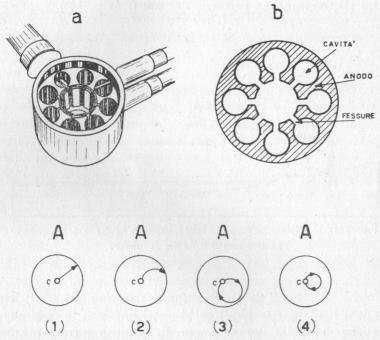


Fig. 144 — (Sopra): Vista grossolana di un magnetron: in elevazione (a); in sezione (b). (Sotto): Effetto dell'aumento progressivo della intensità del campo magnetico sulla traiettoria di un elettrone diretto dal catodo (c) verso l'anodo (A) in un magnetron.

Il Magnetron è formato essenzialmente da un catodo cilindrico di nichel con ossidi (a riscaldamento indiretto) contornato da un anodo di rame a blocco dotato di « cavità » (funzionanti da induttanze) della forma indicata in sezione dalla Fig. 144 - b.

Le cavità si aprono verso il catodo con delle fessure (funzionanti da condensatori).

Il tutto è immerso in un potente campo magnetico creato da una elettrocalamita. Gli elettroni emessi dal catodo ad alta tensione si dirigono verso l'anodo, ma la loro traiettoria, per effetto dell'intenso campo magnetico diretto in senso normale, viene deflessa e finisce con l'assumere un moto vorticoso nella intercapedine e nelle « cavità » risonanti, sicchè gli elettroni stessi, per azioni interdipendenti di attrazione e di repulsione, oscillano con grandissima rapidità raggiungendo la frequenza desiderata (dipendente dalle caratteristiche costruttive del magnetron) e sviluppando la elevatissima potenza richiesta, conseguente alla grande velocità e al grande « addensamento » delle cariche.

(Si rileva ancora una volta l'analogia con le oscillazioni sonore, ricordando quanto detto nel Cap. 20 sul risonatore di Helmholtz).

Inoltre, se si vuole con il radar operare a grandi distanze, data l'inevitabile attenuazione che subisce l'energia elettromagnetica irradiata — e naturalmente anche quella reirradiata — bisogna disporre in trasmissione di potenze rilevanti, con correnti di altissima tensione. E ancora, si deve ricorrere ad antenne direttive a riflettore che concentrino l'energia nella direzione dell'ostacolo da rilevare.

Con tutto questo, l'energia di ritorno, captata dal ricevitore dello stesso radar emittente, risulta sempre minima, e bisogna perciò sempre convenientemente amplificare il debolissimo segnale ricevuto, per renderlo percettibile su un pur sensibilissimo tubo a raggi catodici.

* * *

La percezione dell'eco nel radar si ottiene precisamente con un tubo a raggi catodici, del tipo che passiamo a descrivere in breve.

Nella sua più semplice espressione un tubo a r. c. per radar deve funzionare soltanto da ultra sensibile cronometro, o meglio da marcatempo elettronico.

Per ottenere ciò si fa comparire sullo schermo (circolare) una linea diametrale graduata in tempi (microsecondi) oppure direttamente in distanze, equivalendo 10 microsecondi a una distanza di 1.500 metri (percorsa in andata e ritorno) (Fig. 145). Esiste nel radar un generatore di cadenza o sincronizzatore il quale produce con continuità un piccolo impulso che fa da « base dei tempi » e si rende visibile come una piccola « traccia » puntiforme luminescente.

Questa traccia percorre da sinistra a destra tutto il diametro diventando una linea luminescente, e impiegandovi (per costruzione) il tempo corrispondente alla massima portata del radar. Supponendo che la portata sia di 300 Km, sarà 2.000 microsecondi il tempo di andata e ritorno dell'impulso. Lo spostamento della marca dei tempi si ottiene agendo elettrostaticamente sulle piastrine X del tubo a raggi catodici (vedi Cap. precedente).

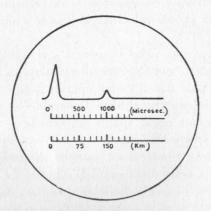


Fig. 145 — Indicatore di distanza (base dei tempi) in un radar. (Il « guizzo » indica una distanza di 150 Km).

Il sincronizzatore comanda anche il rifornimento di energia necessario per determinare l'impulso a intervalli, con una stabilita cadenza: l'impulso viene poi irradiato, previa trasformazione in oscillazione elettromagnetica ad altissima frequenza.

Ciascun impulso dura un tempo minimo, frazione dell'intervallo stesso, per consentire al « segnale interrogatore » emesso di raggiungere il bersaglio e tornare al radar prima che sia irradiato l'impulso successivo. Il radar infatti funziona come trasmettitore limitatamente al tempuscolo nel quale dura l'emissione dell'impulso; poi tace c « resta in ascolto » per tutta la durata dell'intervallo, pronto a ricevere il « segnale risposta » rimandato dal bersaglio.

Per esempio, in un radar di avvistamento lontano, l'impulso può durare 2 microsec; l'intervallo può essere invece di 2.000 microsec.

(Nell'esempio prima fatto del colpo di pistola, se intendiamo sparare più colpi dovremo separarli da un intervallo di tempo superiore a 6 secondi).

Quando, dopo aver emesso l'« impulso interrogatore », durante l'intervallo arriva la « risposta », cioè l'eco elettromagnetica, questo impulso di energia ricevuto viene amplificato e inviato alle piastrine Y del tubo, in modo che si sovrapponga alla traccia che sta percorrendo l'asse dei tempi (linea diametrale del radar). Allora la « traccia» viene «innalzata», e si rende ben visibile come un «guizzo» emer gente dalla preesistente linea luminosa, precisamente nel punto corrispondente alla durata in microsecondi del percorso andata e ritorno del segnale.

(Il « guizzo » indica la durata, analogamente a quanto fa la lancetta del cronometro nell'istante in cui se ne arresta la marcia, nello esempio dell'eco acustica prima considerata).

Nel caso, per es., che il bersaglio sia distante 150 Km, nel nostro radar il « guizzo » comparirà nel punto mediano del diametro (relativo al tempo di 1.000 microsec). Ed ecco come, misurando il tempo impiegato dal segnale elettromagnetico a compiere il suo viaggio, si viene a misurare la distanza del bersaglio « avvistato ».

Poichè il procedimento ora descritto si ripete con il ritmo prefissato, per esempio 500 volte al secondo, il « guizzo » luminescente resta visibile con continuità (per la solita permanenza delle immagini sulla retina). S'intende che se il bersaglio (per es. un velivolo) vola verso il radar, ossia è in avvicinamento, si vedrà la traccia spostarsi gradualmente verso sinistra, cioè verso l'estremità del diametro « origine » della base dei tempi, a mano a mano che la distanza del velivolo diminuisce.

Come nel trasmettitore radar è stato necessario impiegare un oscillatore speciale per altissime frequenze (il *Magnetron*), così anche nel ricevitore, per produrre i battimenti convenienti a rendere visibile il segnale in arrivo, è stato adottato un « oscillatore locale » di tipo particolare, denominato *Klystron*.

Il Klystron in sostanza è un tubo elettronico che porta, oltre ai normali elettrodi, una griglia conformata come un risuonatore a cavità, di forma toroidale, per mezzo della quale si consegue l'acceleramento e l'addensamento degli elettroni, ottenendo oscillazioni della frequenza necessaria (dell'ordine di 3.000 Mc/sec o superiore).

Il complesso del procedimento di trasmissione-ricezione seguito in un radar è mostrato schematicamente nella Fig. 146.

In sintesi esso consiste nella produzione cadenzata, ad intervalli determinati, di « impulsi » (o treni d'onda) aventi a loro volta una determinata durata.

L'impulso viene inviato contemporaneamente all'antenna, per essere irradiato, e all'indicatore dei tempi. L'eco elettromagnetica di ri-

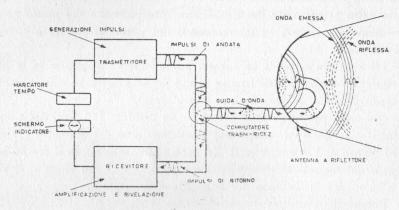


Fig. 146 — Complesso del procedimento di trasmissione-ricezione seguito in un radar.

torno captata dall'antenna, dopo essere stata convenientemente amplificata e rivelata, va anch'essa all'indicatore dei tempi per comparire infine sul tubo a raggi catodici, come prima detto.

Accenniamo infine alla possibilità che gli *impulsi* trasmessi, invece di essere « modulati » in ampiezza siano « modulati in frequenza », sempre con una determinata cadenza. Essendo ancora possibile misurare l'intervallo di tempo tra l'impulso emesso e l'impulso ricevuto (Fig. 147) il principio di funzionamento del radar viene ugualmente applicato per la misura della distanza.

In più si può trar profitto, nel caso della modulazione di frequenza, dal cosiddetto « effetto Doppler » — consistente nel cambiamento della frequenza ricevuta quando la sorgente è in moto rispetto al ricevitore o viceversa — per distinguere gli echi rimandati da sorgenti

mobili (velivoli) dagli echi rimandati da ostacoli fissi (montagne), e anche per misurare la velocità del « mobile » riflettente o emittente.

Un tale principio è stato pure applicato in qualche modernissimo apparato di bordo per la navigazione aerea.

* * *

Il tubo a raggi catodici del radar può essere conformato anche diversamente, in modo per es. che sullo schermo la « base dei tempi » parta dal centro (origine) e arrivi alla circonferenza (corrisponda

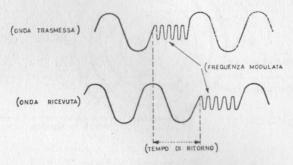


Fig. 147 — La radar-localizzazione può essere basata anche sulla modulazione di frequenza

cioè ad un raggio anzichè ad un diametro). In tal caso l'antenna direzionale del radar si rende ruotante in modo da orientarla in tutti i 360° con moto continuo (compiendo un giro per es. in 15 sec.). Il raggio luminescente « base dei tempi » ruota solidalmente con l'antenna, in modo da indicare in ogni istante (essendo il quadrante graduato) la direzione verso cui è orientata l'antenna stessa.

In un apparato del genere si fa agire il « segnale di risposta » sulla griglia del tubo a r.c., così da renderlo evidente per la maggiore luminosità del « punto traccia » che appare sul raggio luminescente dei tempi nell'istante in cui arriva l'eco. (Il « punto » sostituisce il « guizzo »).

Con questo tipo di « presentazione » la « traccia » luminescente che segnala il bersaglio apparirà allora su un punto del raggio (asse dei tempi) tanto più lontano dal centro (origine dei tempi) quanto più il bersaglio è distante. (Dei cerchi concentrici si fanno apparire contemporaneamente sullo schermo per indicare direttamente e con evidenza le distanze). (Fig. 148).

Il tipo di « presentazione» cui si è ora accennato prende il nome di *P.P.I.* (« Plan Position Indicator » ossia « Indicatore di Posizione Planimetrica ») in quanto praticamente viene riprodotto sullo schermo, con l'aspetto di macchie luminescenti, il panorama dei pun-

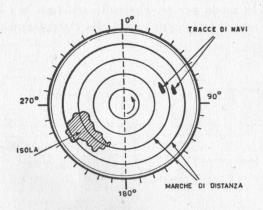


Fig. 148 — Presentazione del tipo P. P. I. (Plan Position Indicator) in un radar.

ti-ostacolo esistenti nel giro d'orizzonte (per es. montagne) ciascun punto ad una distanza, dal centro, proporzionale alla reale sua distanza dal luogo dove è situato il radar.

Quando il radar è installato su un aeroplano, e l'irradiazione viene diretta verso terra, sullo schermo del tipo P.P.I. appare una riproduzione del terreno sorvolato, consistente in macchie luminose di diversa intensità secondo il «potere riflettente» dei punti corrispondenti del terreno. In particolare si rende ben distinguibile la terra dell'acqua, e quindi si nota ben netto il profilo di una costa, di un porto, di navi, ecc. (Fig. 148).

* * *

Nelle trasmissioni di energia da un elemento all'altro di un « complesso » radar, essendo in gioco sempre correnti ad altissima frequenza, non possono essere adoperati comuni conduttori a linea bifilare ma sono necessari almeno dei *cavi coassiali* (dei quali si è parlato al Cap. precedente).

I cavi coassiali rispondono bene per le frequenze che vanno da 300 a 3.000 Mc/s (lunghezza d'onda da 10 metri a 1 metro); per le frequenze superiori è necessario ricorrere alle cosiddette guide d'onda.

Per le frequenze oltre i 20.000~Mc/s fin oltre i 60.000~Mc/s (onde millimetriche) la propagazione delle onde e. m. nello spazio è ostacolata dalla nebbia e dalle nuvole, e l'unica possibilità di trasmissione resta affidata alla guida d'onda.

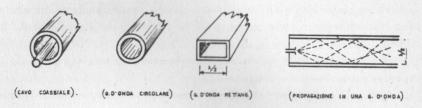


Fig. 149 —Vista schematica di un cavo coassiale (a sinistra) e di due guide d'onda (a destra).

Una guida d'onda è formata da un tubo, che può essere cilindrico a sezione circolare, meglio a sezione rettangolare (Fig. 149) simile in sostanza ad un cavo coassiale senza il filo interno. L'abolizione del filo interno è consigliato dalla costatazione che alle frequenze superiori a 3.000 Mc/s anche un filo sottile risente dell'effetto pelle (vedi Cap. 16) e le conseguenti perdite « ohmiche » si fanno perciò rilevanti.

Si è abolito allora il filo interno, e le oscillazioni ad altissima frequenza prodotte dall'oscillatore del radar vengono subito trasformate in oscillazioni elettromagnetiche spaziali mediante una piccola antenna a dipolo, dopodichè sono direttamente immesse nello spazio delimitato dal conduttore tubolare, che prende perciò il nome di « guida d'onda ».

Tale tubo-guida termina in corrispondenza dell'antenna irradiante costituita generalmente da un riflettore parabolico, dalla quale le onde vengono lanciate nel libero spazio (Fig. 146). Il lato maggiore del rettangolo della guida si fa di dimensione dell'ordine di metà lunghezza d'onda della oscillazione elettromagnetica convogliata, affinchè questa « risuoni » nello interno del tubo senza perdite di energia. In tali condizioni l'onda e.m. si propaga infatti dentro la guida attraverso successive riflessioni sulle pareti interne, che sono metalliche e ben levigate (speculari).

Le guide d'onda sono utilizzate anche nelle linee di trasmissione verso l'antenna dei ponti radio (Cap. 23) in cui molte comunicazioni telefoniche si trovano riunite in un unico « fascio ».

In questi ponti possono verificarsi fenomeni di diafonia (disturbi per interazione tra due o più canali) ai quali si ovvia inserendo nella guida d'onda un pezzo di ferrite, che ha la proprietà di lasciar passare l'energia soltanto in un senso, quando è sottoposta a un campo magnetico adeguato, eliminando così le riflessioni e i conseguenti disturbi.

(La funzione della guida d'onda è in sostanza analoga a quella di un tubo portavoce in acustica).

A questo proposito torna opportuno rilevare ancora altre analogie con le trasmissioni acustiche. In particolare, sempre nel radur, si nota la stretta somiglianza della irradiazione a radarfrequenza orientata con la irradiazione degli ultrasuoni.

Con un opportuno riflettore la forma del « lobo » di irradiazione appare in realtà identica.

Anche la tecnica di impiego è analoga nel caso dell'applicazione degli ultrasuoni all'esame di collaudo « introspettivo » di prodotti della siderurgia. Infatti gli ultrasuoni vengono proiettati « ad impulsi » nel pezzo da esaminare. se ne raccoglie poi l'eco, eventualmente prodotta da una discontinuità esistente nell'interno del pezzo, eco che viene rivelata da un tubo a raggi catodici: in base alla distanza della « traccia » in arrivo da quella di partenza si desume e si localizza nel pezzo quella crinatura, bolla, ecc. che ha costituito appunto una discontinuità e quindi un « ostacolo » alla normale propagazione delle onde ultrasoniche.

30 — L'effetto fotoelettrico conferma la stretta parentela tra elettroni e fotoni.

La cellula fotoelettrica e le sue applicazioni alla TV e al cinema sonoro.

Il magnetofono.

Nel Cap. 3 abbiamo accennato alle relazioni tra energia termica ed elettricità (termoelettricità). Si è anche visto, trattando dei tubi elettronici, che un filo metallico riscaldato (catodo) emette elettroni. Diciamo ora qualche parola degli effetti elettrici della energia luminosa, cioè della fotoelettricità, conseguente alla «estrazione» di elettroni da certe sostanze, provocata mediante radiazione luminosa anzichè mediante energia termica.

Ricordiamo a questo proposito che la *luce* è una manifestazione dell'energia elettromagnetica, differente dalle « onde radio » soltanto per la « lunghezza d'onda », la quale è molto più piccola (la frequenza quindi ne è molto più alta). (Fig. 150).

Infatti le radiazioni visibili hanno una frequenza dell'ordine di 10^{15} cicli al secondo (un miliardo di Mc/sec). Le lunghezze d'onda (λ) di tali radiazioni non si indicano normalmente in metri o centimetri, bensì in unità angstrom, equivalendo un angstrom, a un centimilionesimo di centimetro. (Anders Angstrom, fisico svedese, 1814-74). Così si dice che la luce gialla ha una λ di circa 6.000 angstrom.

Si osserva che lo spettro delle radiazioni visibili comprende una piccolissima parte dello spettro generale delle radiazioni elettromagnetiche. Inoltre si nota che la sensibilità dell'occhio umano non è direttamente proporzionale alla frequenza delle radiazioni, ma varia secondo i colori, come è indicato nel diagramma della Fig. 151

E' dimostrato che, come nelle radioonde, l'energia contenuta nelle radiazioni luminose è tanto maggiore quanto maggiore ne è la frequenza, e che l'energia posseduta dagli elettroni espulsi dalle sostanze colpite da radiazioni luminose è proporzionale a detta frequenza. Anche per altre vie si è desunto che la luce è dovuta a vibrazioni di corpuscoli infinitesimali denominati fotoni, analogamente a quan-

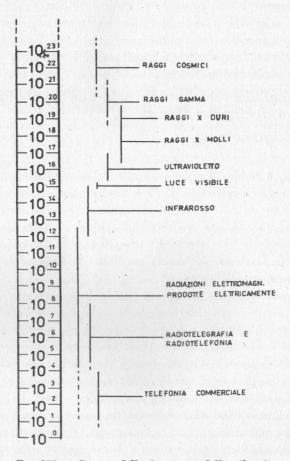


Fig. 150 — Spettro delle frequenze della vibrazione elettronica con l'indicazione, in corrispondenza del numero dei cicli al secondo, del tipo di energia emessa.

to si è nel presente testo ammesso (Cap. 22) per le radioonde considerate quali manifestazioni del moto oscillatorio degli elettroni.

Si può qui anche ammettere, per semplicità e unità di interpretazione della fenomenologia di cui trattasi, che i fotoni siano elettroni in un diverso « stato fisico », connesso essenzialmente alla loro diversa rapidità di vibrazione.

Nel prossimo Cap. 32 tratteremo di un'altra manifestazione della « radiazione », quella relativa ai raggi X. Anche tale manifestazione può attribuirsi all'elettrone vibrante con una frequenza superiore a quella dei fotoni.

Consideriamo dunque sempre l'elettrone in causa, e lo paragoniamo all'individuo uomo il quale come atleta può estrinsecare la sua energia muscolare in vari modi, ed essere di volta in volta denomina-

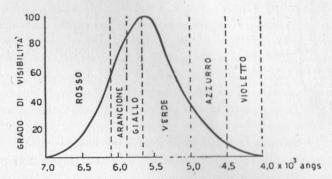


Fig. 151 — Lo spettro delle radiazioni visibili, con indicato sulle ascisse la lunghezza d'onda in « angstrom » e sulle ordinate il grado di sensibilità dell'occhio umano ai diversi colori.

to marciatore, corridore, nuotatore, pugilatore, ecc.: qualifiche tutte che, pur definendo attività diverse e distinte, si riferiscono sempre sostanzialmente ad un . . . uomo in agitazione.

In particolare parliamo ora del fenomeno che presentano certi metalli — per esempio alcuni metalli alcalini come il cesio — i quali sotto l'azione della luce visibile emettono elettroni in quantità proporzionale alla intensità della luce incidente: gli elettroni emessi, opportunamente convogliati possono costituire una corrente elettrica.

Così, mentre dalla frequenza della luce incidente — come abbiamo sopra detto — dipende l'energia, cioè la velocità, degli elettroni espulsi, dalla intensità luminosa (quantità di luce) che colpisce la sostanza fotoelettrica dipende la quantità degli elettroni espulsi, cioè l'intensità della corrente prodotta. E'come se si sparasse con una mitragliatrice contro un muro intonacato: la velocità dei calcinacci espulsi dipenderà dalla energia propria della pallottola singola, ma la quantità complessiva di materiale che si stacca dal muro sarà proporzionale alla quantità dei colpi sparati.

Mediante idonee apparecchiature si può trasformare direttamente anche la luce solare in energia elettrica. Con uno di tali apparec-

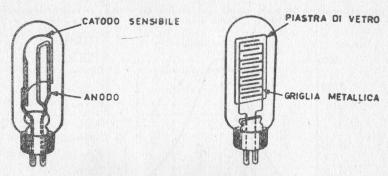


Fig. 152 — (A sinistra): Tipo di fotocellula da « emissione »; (A destra): Tipo di « ponte al selenio ».

chi sono stati infatti ricavati 100 watt per metro quadrato di superficie esposta al sole. Se ne sono costruiti anche alimentatori per ricevitori radio portatili.

* * *

Sul fenomeno della fotoelettricità è basata la cellula fotoelettrica che è un dispositivo capace di tradurre una variazione di intensità luminosa in una variazione di corrente elettrica.

Una cellula fotoelettrica è un bulbo a vuoto, simile a un diodo, nel quale il « catodo » è costituito da una lastra metallica curva ricoperta di materiale fotoemittente (ossido di cesio su argento), mentre lo anodo è un semplice filamento, generalmente ripiegato a rettangolo (Fig. 152 - sin.).

Quando il catodo è colpito dalla luce emette elettroni i quali sono captati dall'anodo (tenuto a potenziale positivo) in modo che nel circuito si determina una corrente, di pochi microampere. Se il raggio di luce che colpisce la cellula è costante la corrente resta costante, altrimenti la corrente varia con l'identica legge di fluttuazione della luce.

Tale corrente viene poi amplificata e utilizzata nel modo voluto.

In relazione alla frequenza della luce incidente che si utilizza (se dello spettro visibile, oppure ultravioletto, oppure infrarosso) varia la sostanza fotoelettrica attiva da applicare sul catodo.

In alcuni metalli — come il selenio o il germanio — la luce provoca un aumento della conduttività, forse per effetto di una variazione dell'orientazione dei cristalli della struttura interna del metallo, operata dalla radiazione luminosa. Anche questo fenomeno della fotoconduttività è sfruttato per la costruzione di particolari cellule fotoelettriche, propriamente detti « ponti » elettrici. (Fig. 152 - des). Essi presentano caratteristiche di maggiore sensibilità ma di minor prontezza rispetto alle cellule del primo tipo. Cellule al selenio sono, per esempio, usate per gli esposimetri da macchina fotografica.

Numerosissimi sono i dispositivi che sfruttano la cellula fotoelettrica, dalle diverse apparecchiature di controllo nell'industria, alle suonerie di allarme, all'apertura automatica delle porte.

Facciamo anche cenno di un recentissimo (1957) tentativo di applicare la cellula fotoelettrica per creare una specie di « occhio artificiale » destinato a permettere ai ciechi almeno di distinguere le luci dalle ombre, gli oggetti chiari dagli scuri.

In un tal dispositivo la luce che colpisce la cellula, dopo essere stata tradotta nei soliti impulsi di corrente, va ad eccitare — attraverso sottilissimi fili conduttori — i centri cerebrali che presiedono alla funzione visiva producendo una sensazione luminosa più o meno intensa.

* * *

Descriviamo ora qualche interessante dispositivo basato sullo effetto fotoelettrico, come per es., un apparecchio di *ripresa per TV* (telecamera) del tipo « Iconoscopio » (Fig. 153 - sinistra)

Si presenta similmente ad un tubo a raggi catodici (Vedi Cap. 28) nella parte funzionante da « proiettore elettronico », con il catodo emittente, la griglia, il focalizzatore, gli elementi deflettori.

Il raggio elettronico infine, invece di andare ad incidere sul fondo del tubo (schermo) va ad incidere su una speciale lastra, denominato « fotocatodo ». Questo è costituito da una piastra metallica di supporto (parte posteriore) alla quale aderisce una sottile lamina di mica, sulla cui faccia scoperta è sparsa uniformemente una polvere di sostanza fotoemittente (ossido di cesio). (Fig. 153 - destra).

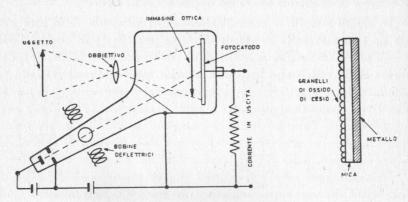


Fig. 153 — (A sinistra): Schema di iconoscopio tipo Zworykin. (A destra): Particolare della costituzione del fotocatodo.

In tal modo ciascun granellino di cesio, essendo separato dagli altri da una vernice isolante, si può considerare come un'armatura di un minuscolo condensatore (avente la mica come dielettrico) la cui seconda armatura è la piastra metallica di supporto: tutti questi « condensatori » formano nel complesso un mosaico di « punti » elettricamente sensibili alle variazioni di luminosità.

Su detta lastra che fa da fotocatodo si proietta, attraverso un obiettivo da macchina fotografica, la scena da trasmettere, la quale si forma in chiaroscuro come sul vetro smerigliato di una macchina fotografica.

L'immagine che si forma sul fotocatodo risulta allora sostanzialmente costituita da un insieme di « punti » più o meno chiari. In conseguenza, per l'effetto fotoelettrico, ciascun punto emetterà più o meno elettroni, e farà variare la capacità del « condensatore » di cui fa parte, e con essa anche il potenziale della piastra metallica che fa da seconda armatura comune. Intanto è da considerare che il raggio elettronico dell'Iconoscopio « scandisce », ossia esplora punto per punto lungo una linea, e una linea dopo l'altra, tutta la faccia del fotocatodo, in modo analogo a quanto fa il raggio elettronico nel tubo a r c. del ricevitore (Cap. 28).

In corrispondenza di ciascun punto colpito dal raggio pertanto viene « rilevata » istantaneamente la variazione di potenziale indotta nella seconda armatura del condensatore, di cui si è sopra detto, e in conseguenza varia la intensità di corrente nel circuito complessivo nel quale tutti i suddetti elementi sono incorporati, circuito che viene « chiuso » in ogni istante dallo stesso raggio. (Fig. 153 - sin.).

In definitiva si determina nel circuito una continua fluttuazione della intensità di corrente, corrispondente alla diversa luminosità dei punti successivamente colpiti dal raggio elettronico.

Tale fluttuazione di corrente è quella che, convenientemente amplificata, « modula » la trasmissione televisiva, ed è poi riprodotta alla ricezione dove viene ritrasformata in immagine visibile, mediante il tubo a raggi catodici, come già detto al Cap. 28.

I moderni apparati da ripresa per TV presentano molti perfezionamenti rispetto all'Iconoscopio ora sommariamente descritto. In particolare è da notare che in essi l'immagine ottica si forma non direttamente sulla lastra-mosaico bensì su un fotocatodo trasparente posto subito dopo l'obiettivo: gli elettroni emessi dal fotocatodo vengono poi accelerati e vanno a colpire la lastra-mosaico. Se ne ottiene quale vantaggio grande sensibilità con elevato rendimento.

Per realizzare la televisione a colori è necessario scomporre in partenza il soggetto colorato, mediante filtri, nei tre colori « primari »: rosso, verde, blu (azzurro-viola), ricavandone tre immagini in chiaroscuro. Queste devono essere separatamente e contemporaneamente « trasmesse », e alla ricezione ricomposte, su schermi a punti colorati, in modo da fare riapparire i colori originali del soggetto. Si comprende che procedimenti del genere, pur non presentando difficoltà insormontabili, comportano apparecchiature molto complesse e costose.

Da notare anche che la T V a colori esige una larghezza di banda massima, che è, per es. di 6 Megahertz se era 5 Mhz nella TV nor-

male. (Si ricorda che per la radiofonia musicale sono sufficienti 5 Kilohertz, per la normale telefonia 3 Khz; per una telescrivente bastano soltanto 120 hertz).

* * *

Accenniamo ad un'altra comune applicazione dell'effetto fotoelettrico: il cinema sonoro.

Nella ripresa si fa in modo da registrare sulla pellicola sensibile — contemporaneamente alle immagini, raccolte dall'obiettivo della macchina cinematografica — i suoni raccolti da un microfono.

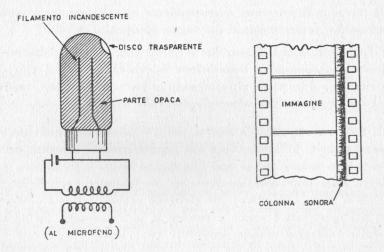


Fig. 154 — (A sinistra): Vista schematica di un modulatore luminoso. (A destra): Una pellicola cinematografica con impressa la colonna sonora ad area variabile.

Sappiamo (Cap. 26) che mediante il microfono le vibrazioni sonore vengono trasformate in fluttuazione di corrente elettrica.

Tale corrente elettrica fluttuante, amplificata, si fa agire su uno speciale bulbo elettronico, un *modulatore luminoso*, in grado di produrre una luce intensa che può pulsare anche ad alta frequenza.

Il bulbo è ricoperto da una sostanza opaca, salvo una piccola area attraverso cui passa un fascetto di luce. (Fig. 154).

Inviando la corrente modulata dal microfono al bulbo luminoso, si modula quindi l'intensità del raggio di luce emesso dal bulbo. Nel caso del film sonoro, per « registrare » il suono si fa colpire da tale raggio la stessa pellicola sensibile che reca le immagini, a lato dei fotogrammi, e se ne ottiene la cosiddetta « colonna sonora ».

Una volta stampata la pellicola, la colonna sonora si presenterà — secondo il processo particolare di registrazione — o di larghezza

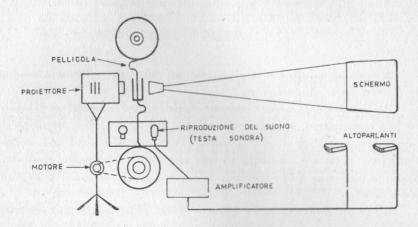


Fig. 155 — Schema generale delle apparecchiature per la proiezione di un film sonoro.

costante e di densità variabile, corrispondendo alle variazioni di « densità » (zone più o meno scure) le variazioni di suono; oppure ad area variabile, corrispondendo alle variazioni di « area » le variazioni di suono. (Fig. 154 - des.).

(Per produrre l'area variabile si fa oscillare il raggio luminoso per mezzo di uno specchio oscillante comandato dalla corrente modulata).

Nella proiezione del film si ripete all'inverso il procedimento sopra descritto. (Fig. 155). Si fa cioè attraversare la colonna sonora mentre la pellicola scorre per proiettare le immagini — da un raggio luminoso il quale verrà più o meno attenuato secondo le zone più o meno scure della « colonna » che attraversa. Detto raggio emergente al di là della pellicola va a colpire una cellula fotoelettrica, ritrasformando le fluttuazioni luminose in fluttuazioni di corrente. La corrente viene infine inviata ad un altoparlante che la ritraduce in suoni.

Sempre sullo stesso principio ora illustrato si basano le apparecchiature per la trasmissione delle *fotografie*, e in generale delle immagini stampate, che peraltro utilizzano anche i normali circuiti telefonici.

Analoghi sono pure i procedimenti per incidere dischi.

* * *

Accenniamo infine alla registrazione dei suoni effettuata mediante il ben noto magnetofono.

Per ottenere la ormai comune registrazione magnetica dei suoni su filo o su nastro, si fa in modo che il filo o il nastro, di materiale magnetico metallico o metallizzato, venga sottoposto ad una magnetizzazione variabile ad opera di una corrente microfonica, modulata, appunto mediante un microfono, dalla voce o dai suoni che si vogliono registrare.

All'uopo il nastro si fa scorrere (con moto uniforme) dentro il campo magnetico di un'elettrocalamita nelle cui bobine si fa passare la corrente medesima, che agisce da corrente modulatrice della magnetizzazione.

Quando, all'inverso, il nastro così magnetizzato si fa scorrere nel campo dell'elettrocalamita, la corrente delle bobine varia col variare della intensità di magnetizzazione del nastro stesso e riproduce — attraverso un altoparlante — i suoni registrati.

31 — Le onde elettromagnetiche di altissima frequenza sempre più affini alle onde luminose.

La possibilità di provocare la deflessione dei raggi elettronici permette di realizzare le lenti elettriche e il microscopio elettronico.

Si è già detto nel Capitolo precedente che onde elettromagnetiche invisibili e luce si possono considerare manifestazioni di uno stesso fenomeno, e che non c'è da meravigliarsi della loro diversa « apparenza » nè del differente comportamento poichè anche in altri campi — come quello dei suoni — si verificano analoghe difformità di manifestazioni, pur restando il fenomeno sostanzialmente invariabile.

Ora aggiungiamo che è soltanto la limitatezza dei sensi umani a impedirci la diretta constatazione di un tale stato di cose.

Infatti, riferendoci ancora agli ultrasuoni, si sa che molti animali — e il cane tra questi — odono le vibrazioni sonore ad altissima frequenza, e alcuni (come i pipistrelli) le sfruttano addirittura in funzione di « radar » acustico per rilevare ostacoli volando nell'oscurità.

Probabilmente qualcosa di simile avviene nel campo delle vibrazioni elettromagnetiche, le quali si manifestano in modo « visibile » per l'uomo, entro una ristrettissima gamma di frequenze, mentre saranno forse percettibili ad altri animali, e da essi utilizzate, nelle gamme superiori od inferiori.

* * *

Nel presente Capitolo intendiamo accennare alla possibilità di costruire lenti elettroniche e quindi un microscopio elettronico servendosi di raggi elettronici anzichè dei raggi luminosi.

Le lenti elettroniche possono essere elettrostatiche o elettromagnetiche.

Per renderci conto del principio delle lenti elettrostatiche cominciamo con il ricordare che tra le due armature di un condensatore (Cap. 7) si esercitano azioni elettriche, in quanto esse sono a differente potenziale. Come sappiamo, tali azioni elettriche si possono rappresentare con linee di forza, tra loro parallele e normali alle armature.

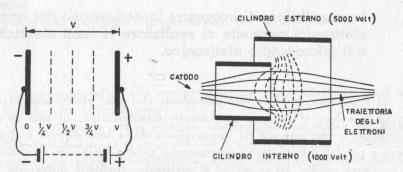


Fig. 156 — (A sinistra): Distribuzione del potenziale tra le due armature piane di un condensatore (le linee tratteggiate rappresentano superfici equipotenziali). — (A destra): Con armature di forma cilindrica (viste in sezione) le superfici equipotenziali assumono la forma indicata (in sezione) dalle linee tratteggiate.

Le linee di forza, a loro volta rappresentano le « traiettorie » che seguono gli elettroni soggetti al campo.

Ora supponiamo che l'armatura negativa del condensatore sia a potenziale zero e la positiva a potenziale V. Poichè il campo elettrico tra le due armature è da considerare uniforme, nei piani indicati con linee tratteggiate il potenziale sarà, procedendo da sinistra verso de-

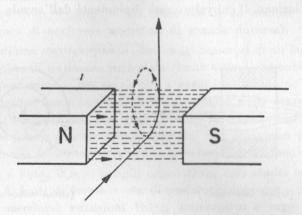
stra:
$$\frac{1}{4}$$
 V, $\frac{1}{2}$ V, $\frac{3}{4}$ V. (Fig. 156 - sin.).

Ciascuno di detti piani si definisce superficie equipotenziale (immaginaria) in quanto presenta uguale potenziale in ogni suo punto, e le linee di forza hanno andamento tale da risultare sempre normali alle superfici equipotenziali che attraversano.

Il caso ora esposto evidentemente è il più semplice. Se le « armature » cariche di elettricità hanno diversa forma e diversa disposizione le superfici equipotenziali assumeranno forme più complesse.

Così nella Fig. 156 - destra le armature sono di forma cilindrica, la più interna a potenziale minore (1.000 V), la più esterna a potenziale maggiore (5.000 V). Le superfici equipotenziali assumono allora la disposizione indicata in sezione dalle linee tratteggiate, e le linee di forza si presentano come le linee piene del fascio.

Passando a trattare del principio delle lenti elettromagnetiche, ripetiamo, nella Fig. 157, quanto detto per la prima volta nel Cap.



Fic. 157 — Curvatura della traiettoria di un raggio elettronico, provocata da un campo magnetico.

12 circa l'azione che subisce un fascetto (raggio) elettronico in un campo magnetico.

Avendo considerato a suo tempo ogni linea di forza magnetica come l'asse di un vortice elettronico orientato in senso antiorario (guardando la faccia Nord) gli elettroni del fascetto che entrano nel campo dalla sinistra (come in Figura) appena si imbattono in tali vortici ricevono un impulso che li fa deviare verso l'alto. La deviazione risulterà tanto maggiore quanto maggiore sarà il numero e l'energia rotatoria dei vortici, cioè l'intensità del campo magnetico, e tanto minore quanto maggiore sarà la energia degli elettroni (la loro velocità di moto).

Importante è anche considerare l'angolo secondo cui i raggi elettronici incontrano le linee di forza magnetiche: la forza deviante risulta massima quando tale angolo è di 90°. Se il campo è costituito da linee parallele, come nell'interno di un solenoide (Fig. 158) e un fascio divergente di raggi catodici è projettato secondo l'asse del solenoide, avverrà che gli elettroni del raggio «centrale» non incontreranno alcuna linea di forza (correndo parallelamente ad esse); le incontreranno invece gli elettroni degli altri raggi, e ne incontreranno in maggior numero quanto più saranno inclinati rispetto all'asse.

Gli elettroni dei raggi catodici distanti dall'asse subiranno perciò una deviazione, il cui valore sarà dipendente dall'angolo secondo il

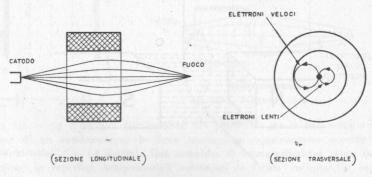


Fig. 158 — Un fascio divergente di raggi catodici proiettato secondo l'asse di un solenoide viene reso convergente.

quale incontrano le linee di forza magnetiche. Gli elettroni vengono in sostanza come investiti da una serie di vortici (elettronici) i quali, se il campo è intenso, li obbligheranno a restare dentro il campo, dove assumeranno essi stessi un moto vorticoso (elicoidale) tanto più ampio quanto più i raggi corrono alla periferia del fascio.

In altre parole, più gli elettroni del fascio catodico sono distanti dall'asse più grande sarà sia la forza deviatrice che la loro velocità sulla traiettoria elicoidale; ma gli elettroni più periferici si troveranno allora a dover compiere un maggiore percorso elicoidale, rispetto ai più interni.

All'opposto, per gli elettroni vicini all'asse, sarà minore sia la forza deviatrice che la velocità sulla traiettoria.

(Le rotazioni viste in proiezione, parallelamente alla faccia del solenoide, appaiono come nella Fig. 158).

In definitiva il tempo per compiere una rotazione intera risulterà uguale per tutti gli elettroni, e la deflessione che essi subiranno sarà tale da riportarli verso l'asse, dove vengono a ritrovarsi tutti nello stesso istante su uno stesso punto.

Così il fascio di raggi elettronici viene deflesso e concentrato in un punto dell'asse denominato fuoco, come in una lente ottica.

(Con lenti elettromagnetiche sarebbero state realizzate apparecchiature idonee a concentrare raggi elettronici dotati di elevata energia in fascetti strettissimi — del diametro di un decimo di millimetro — capaci di perforare materiali di grande durezza).

Ricordiamo a questo punto che i raggi luminosi di un fascio nell'attraversamento di un mezzo materiale (lente ottica) presentano un analogo comportamento, nel senso che i raggi che subiscono una deviazione maggiore compiono un percorso minore nella lente, in modo da ritrovarsi ancora sull'asse (nel «fuoco») insieme con gli altri raggi che hanno subito una deviazione minore ma compiono un percorso maggiore nella lente, entro la quale la velocità della luce diminuisce.

Come è noto, il microscopio ottico (Fig. 159) risulta costituito da una serie di lenti di forma e con disposizione opportuna per ottenere mediante successive rifrazioni (raggi convergenti e raggi divergenti) l'ingrandimento dell'immagine dell'oggetto da osservare.

In relazione a quanto sopra detto si comprende come, con analoga conveniente disposizione di *lenti elettriche* (sia di tipo elettrostatico che elettromagnetico) sostituendo ai raggi luminosi i raggi catodici, si possa costruire un *microscopio elettronico* (Fig. 159).

In esso l'oggetto da « védere » viene investito dai raggi catodici i quali, dopo aver attraversato il sistema di lenti elettriche, vanno a colpire uno schermo luminescente (tipo schermo del televisore) dove si produce l'immagine ingrandita dell'oggetto (che si può anche ottenere impressa fotograficamente su una lastra sensibile).

* * *

Ora diciamo perchè si è sentito il bisogno di realizzare un microscopio elettronico, di complessità e di costo di gran lunga superiore al microscopio ottico. Il fatto è che il microscopio ottico non consente di vedere oggetti le cui dimensioni siano inferiori alla lunghezza d'onda dei raggi luminosi.

In particolare è il « potere risolutivo » o « potere separatore »

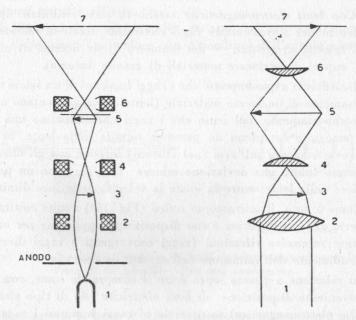


Fig. 159 — Composizione schematica di un microscopio elettronico (a sinistra) e analoga composizione di un microscopio ottico (a destra): 1: sorgente degli elettroni = sorgente di luce; 2: solenoide o condensatore convergente = lente convergente; 3: oggetto da « vedere »; 4: solenoide o condensatore obiettivo = lente obiettivo; 5: immagine dell'oggetto; 6: solenoide o condensatore divergente (proiettore) = lente divergente; 7: immagine finale.

della luce che subisce una limitazione, nel senso che non si riesce più a distinguere con la vista due punti la cui distanza sia inferiore alla lunghezza d'onda della luce (dell'ordine dei cinque centomilionesimi di millimetro)

(Per fare un grossolano paragone materiale, se si vogliono scegliere e separare delle palline di dimensioni medie di ½ millimetro bisogna adoperare le pinzette dell'orologiaio e non certo le molle del caminetto).

Restando nel campo elettromagnetico, succede qualcosa di analogo a quanto detto nel Cap. 29 per il radar, per il quale si è costretti ad usare lunghezze d'onda brevissime, inferiori ad un metro, quando si vuol « distinguere », cioè rilevare separatamente, uno dall'altro due velivoli che volino vicini.

Ora è importante notare che gli elettroni dei raggi catodici, oltre ad essere animati da una certa velocità di traslazione sulla traiettoria, sono anche in *vibrazione* con elevatissima frequenza (onda « associata »).

Avviene in certo modo come quando si trasmette un suono in seno ad una « colonna » di aria (o di acqua) che corre dentro una tubazione: le molecole di aria (o di acqua) si spostano materialmente da un punto all'altro, ma nello stesso tempo la corrente fluida vibra trasmettendo il suono, secondo le modalità e le caratteristiche connesse alla propagazione di una vibrazione.

Nel caso del fascio di raggi catodici, analogamente gli elettroni « vibrano », e si verifica che la frequenza di tali vibrazioni risulta tanto maggiore quanto maggiore è la velocità impressa dalla tensione dell'anodo agli elettroni del raggio catodico.

Si può pensare che già all'atto dell'emissione del fascio elettronico dal catodo — e in relazione alla differenza di tensione tra catodo e anodo — venga impressa agli elettroni, oltre che una velocità « traslatoria », una vibrazione, analogamente a quanto avviene per es. con le molecole dell'aria soffiate da un fischietto o da una sirena.

Ma si sa che maggior frequenza vuol dire minore lunghezza d'onda: perciò aumentando convenientemente la tensione acceleratrice dell'anodo (dell'ordine di 50.000 volt) si può conferire al fascio elettronico una elevatissima velocità vibratoria e di traslazione, in modo da rendere la lunghezza d'onda dei raggi catodici fino a cento volte più breve di quella dei raggi luminosi.

In conseguenza, il potere separatore del microscopio elettronico può risultare cento volte maggiore di quello del microscopio ottico e quindi anche l'ingrandimento ottenibile aumenterà nella stessa proporzione. In definitiva, il risultato è che mentre con il microscopio ottico si ottengono ingrandimenti di 1.500 - 2.000 diametri, con il microscopio elettronico si arriva ai 200.000 diametri.

Impiegando il microscopio elettronico si è potuto perciò investigare, con notevolissimi successi, nella struttura e negli elementi costitutivi più minuscoli della materia, come pure nel mondo dei microrganismi, conseguendo importantissimi progressi nella fisica, nella chimica, nella biologia, ecc.

32 — I raggi « X » noti a tutti ma tuttora misteriosi. Esteso uso in diagnostica e in terapia.

> Anche i raggi « X » sfruttati per il microscopio. I raggi canale e lo spettrografo di massa.

I raggi X, o raggi Rontgen, sono radiazioni invisibili emanate da una piastra metallica quando è investita — dentro un tubo a vuoto molto spinto — dai raggi catodici.

Si possono anche produrre in seguito ad una qualsiasi scarica elettrica, sempre in ambiente di alto vuoto.

Furono scoperti nel 1895 dal fisico tedesco Guglielmo RONTGEN (1845 - 1923) e da lui chiamati « raggi X » per la loro natura misteriosa: essi si diffondevano in linea retta come la luce ma erano invisibili; rendevano luminoso uno schermo fluorescente e impressiona vano lastre fotografiche poste a qualche metro di distanza, dentro una scatola opaca sia alla luce che ai raggi catodici; non erano deflessi da un campo elettrico o magnetico.

Per produrre raggi X si è ricorso in un primo tempo al cosiddetto tubo « focus », indicato nella Fig. 160. Si tratta di un tubo ad alto vuoto (pressione inferiore ad un decimo di millimetro) con tre elettrodi: un catodo di alluminio leggermente concavo, dal quale vengono emessi i raggi catodici; un anodo pure di alluminio posto lontano, dove è applicata l'alta tensione positiva destinata ad attrarre i raggi catodici; un anticatodo di tungsteno, interposto tra gli altri due e situato in posizione tale da raccogliere, concentrati, gli elettroni emessi dal catodo.

I raggi X hanno origine nel punto dell'anticatodo colpito dai raggi catodici, e si diffondono nello spazio come raggi di luce.

Il sistema più moderno di produzione dei raggi X è quello del tubo « Coolidge », nel quale gli elettrodi sono due: il catodo, di molibdeno che emette gli elettroni, riscaldato da un filamento (spiralina) di tungsteno reso incandescente, e l'anodo di tungsteno, contro il quale viene diretto il fascio di raggi catodici. (Fig. 161).

L'anodo colpito dai raggi catodici emette i raggi X.

Nei moderni apparati per la produzione dei raggi X l'anodo si fa rotante, per evitarne il surriscaldamento nel punto dove è colpito dai raggi catodici. All'uopo l'anodo si innesta in testa all'albero di un motorino elettrico, il cui rotore viene a trovarsi nell'interno dello stesso tubo a raggi catodici. (Fig. 162).

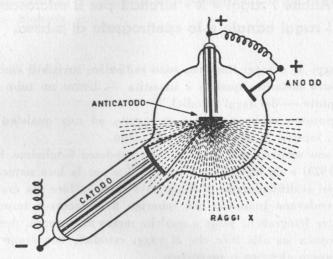


Fig. 160 — Costituzione schematica di un tubo « focus » per la produzione di raggi X.

Variando la temperatura del catodo (attraverso la corrente nella spiralina) si regola la quantità dei raggi catodici e quindi dei raggi X emessi; variando la tensione dell'anodo si regola la velocità dei raggi catodici e quindi la frequenza vibratoria (lunghezza d'onda) sia dei raggi catodici che dei raggi X.

Per spiegare la emissione dei raggi X si è fatta l'ipotesi che gli elettroni dei raggi catodici penetrino profondamente nel metallo provocando la « fuoriuscita » degli elettroni dei gusci interni degli atomi (Vedi Cap. 1): il posto di questi elettroni verrebbe preso dagli elettroni dei gusci esterni, e in questo scambio si produrrebbe l'emissione di fotoni di altissima frequenza.

Comunque, una tale emissione di radiazioni aventi la natura delle radiazioni luminose — senza essere visibili — porta a considerare il fenomeno strettamente connesso con quello fotoelettrico. Nel feno-

meno fotoelettrico (Cap. 30) sono le radiazioni luminose (fotoni) che provocano l'emissione di elettroni dalla materia; nel caso dei raggi X sono gli elettroni dotati di alta energia che provocano la fuoriuscita di fotoni, dotati a loro volta di alta energia.

(Si nota che parte dell'energia degli elettroni incidenti si trasforma sempre in calore, perciò è necessario provvedere ad un efficace raffreddamento dell'anodo, come già detto in precedenza).

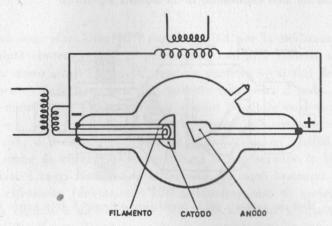


Fig. 161 — Costituzione schematica di un tubo « Coolidge » per la produzione di raggi X.

Per quanto non si conosca ancora la precisa natura del fenomeno che dà origine ai raggi X, sono ben note le caratteristiche di questo particolare tipo di radiazione, e di esse parleremo brevemente.

In effetti l'emissione X ha caratteristiche analoghe alla luce, pur essendo invisibile, invisibilità che non deve peraltro sorprendere, in quanto — si ripete — è questione soltanto di limitatezza dei sensi umani, come avviene per i raggi ultravioletti (e infrarossi). Del resto analogo fenomeno si verifica nel campo degli ultrasuoni, per il senso dell'udito, come già detto al Cap. 31.

Per indicazione delle alte frequenze in gioco diremo che applicando ad un tubo « Coolidge » una tensione di 20.000 volt gli elettroni dei raggi catodici assumono la velocità di oltre 80.000 Km/sec, e i raggi X emessi dall'anodo risultano di lunghezza d'onda di 0,6 angstrom

 $(\frac{1}{10,000}$ di quella della luce gialla).

A $50.000\ volt$ la velocità degli elettroni catodici è di $130.000\ Km/sec$ (oltre un terzo della velocità della luce) e i raggi X emessi hanno una lunghezza d'onda di $0,25\ angstrom$.

A 10 milioni di volt la velocità degli elettroni si approssima alla velocità della luce, e la λ dei raggi X diventa di un milionesimo di angstrom, dell'ordine cioè di quella dei raggi gamma. (I raggi gamma sono emessi spontaneamente dalle sostanze radioattive e si producono anche nell'esplosione della bomba atomica).

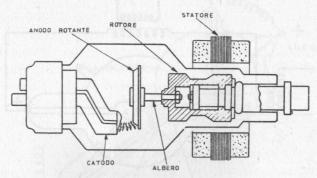


Fig. 162 — Moderno apparato per la produzione dei raggi X (con anodo rotante).

Tale caratteristica della minima lunghezza d'onda (e le altissime frequenze corrispondenti) rende i raggi X molto penetranti, cioè atti ad attraversare sostanze che risultano invece opache ai raggi luminosi.

La « trasparenza » ai raggi X dei muscoli e delle parti molli del corpo ne consente perciò le notissime applicazioni di radioscopia e di radiografia.

La radioscopia si esegue ponendo la parte da esaminare tra la sorgente di raggi X e uno schermo fluorescente (al platinocianuro di bario). Sullo schermo si proiettano scure, ben delineate, le ombre delle parti opache (ossa, oggetti estranei), mentre le altre parti del corpo più o meno trasparenti appaiono in chiaroscuro.

Per eseguire una radiografia non si fa altro che sostituire allo schermo una lastra fotografica.

E' pure noto che i raggi X, oltre che in diagnostica, sono impiegati anche in terapia (*Rontgen-terapia*) per la riduzione dei tumori, per la cura di certe malattie cutanee, ecc.

I raggi X di più corta lunghezza d'onda (detti duri, in contrappo-

sto ai molli che sono quelli di maggiore lunghezza) hanno più spinta capacità di penetrazione, e sono impiegati in apparecchi industriali per la prospezione dei materiali, allo scopo di rilevarne i difetti interni, per esaminarne l'intima struttura, ecc.

Mediante un'apparecchiatura industriale da raggi X, applicando una tensione di 250.000 *volt*, si può « penetrare » in uno spessore di acciaio di 8 centimetri.

* * *

Come sono stati sfruttati i raggi catodici per la realizzazione del microscopio elettronico (Cap. precedente) così si è riusciti ad utilizzare allo stesso scopo i raggi X, traendo profitto — ai fini del potere separatore — dalla loro ben più piccola lunghezza d'onda.

Ma mentre per i raggi catodici è stato possibile costruire « lenti elettriche », per i raggi X, che non subiscono influenze elettriche nè magnetiche, si è dovuto ricorrere ad altri particolari artifizi.

E' anche da rilevare che con i raggi X non servono le lenti ottiche. Infatti i raggi Rontgen, a differenza dei raggi luminosi, non subiscono rifrazione (deviazione) nell'attraversamento di mezzi materiali. La ragione è da attribuire alla loro altissima frequenza (piccolissima lunghezza d'onda) e alla conseguente elevatissima capacità di penetrazione, che consente ad essi di proseguire in linea retta nella materia senza subire le deviazioni provocate dalla presenza delle molecole, costituenti invece ostacolo alla libera propagazione dei raggi luminosi. (Il vetro — come le sostanze simili — risulta trasparente per la particolare disposizione che in esso assumono i cristalli nei quali si raggruppano le molecole. Tuttavia vi ha luogo la rifrazione, dovuta alla differente velocità di propagazione della luce nel vetro rispetto all'aria).

Comunque, basti qui dire che con il microscopio a raggi X si è riusciti a ricavare una immagine fotografica perfino delle molecole e degli atomi (resi visibili come ombre circolari più scure su un fondo più chiaro), conseguendo in definitiva un ingrandimento dell'ordine di un milione di diametri.

非常非

Trattiamo ora brevemente di uno strumento per ricerche, molto importante nella fisica moderna, denominato spettrografo di massa.

Lo spettrografo di massa utilizza i raggi canale i quali si producono in un tubo a raggi catodici contenente gas rarefatto, e sono costituiti da una corrente di ioni positivi diretti dall'anodo verso il catodo: se questo presenta dei fori i raggi passano oltre e cadendo su una parete di vetro la rendono fosforescente.

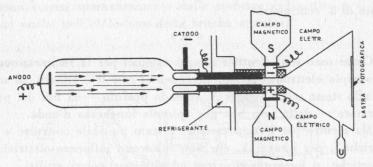


Fig. 163 — Vista schematica di uno spettrografo di massa.

I raggi « canale » impressionano anche una lastra fotografica. Data la loro natura (corpuscoli elettrizzati positivamente) i raggi « canale » possono essere deviati da campi magnetici od elettrici. E' appunto questa caratteristica che si sfrutta nello spettrografo di massa, costituito schematicamente come nella Fig. 163.

Gli ioni della sostanza da esaminare contenuta (allo stato gassoso) in un tubo a raggi catodici, proiettati dall'anodo sotto forma di raggi « canale » vengono, al di là del catodo, deviati per mezzo di un campo magnetico e di un campo elettrico ad esso perpendicolare: dopo di che vanno a colpire una lastra fotografica.

Gli ioni essendo costituiti da atomi privi di un elettrone avranno una velocità propria differente, dipendente dal rispettivo peso atomico: perciò saranno deviati in diversa misura, dai campi elettrico e magnetico, e andranno a colpire la lastra in punti differenti, impressionandola secondo curve paraboliche caratteristiche per ciascuna specie di ioni, curve che costituiscono precisamente gli spettri di massa di ciascuna sostanza.

In tal modo è stato possibile riconoscere i diversi isotopi (Capitolo 2) che spesso sono presenti in una medesima sostanza comportantesi come elemento unico sotto l'aspetto chimico. 33 — In vari modi dagli elettroni si può ricavare luce visibile: incandescenza, luminescenza, fluorescenza, dielettroluminescenza.

Potenti macchine elettroniche per l'investigazione intima della materia e dell'energia: dal ciclotrone al sincrofasotrone.

La radiazione all'origine del Creato.

Abbiamo più volte detto che le radiazioni luminose sono di natura elettromagnetica. Ci si può domandare allora se è possibile provocare oscillazioni elettromagnetiche di frequenza tale da apparire esse stesse come « luce visibile ».

A questo non si è ancora arrivati, in quanto le massime frequenze e.m. prodotte sono dell'ordine di 3,6 \times 10¹² cicli al secondo, mentre le frequenze delle radiazioni visibili vanno da 4,3 a 7,5 \times 10¹⁴ cicli al secondo.

Vediamo per quale via si riesce invece indirettamente, ad ottenere luce visibile dagli elettroni.

Come già accennato al Cap. 1, si ammette che le radiazioni lunoinose si producono quando gli elettroni che orbitano intorno al nucleo dell'atomo passano da un guscio più esterno ad un altro più interno.

Negli elementi solidi, e anche nei liquidi, la « eccitazione » dell'atomo, necessaria per provocare tali « scatti » degli elettroni, si provoca generalmente mediante calore, cioè elevando la loro temperatura. Su tale fenomeno sono basate le comuni lampade ad incandescenza.

Nei gas la « eccitazione » si provoca invece mediante la ionizzazione degli atomi o molecole, consistente — come detto nel Cap. 2 — nel distacco di elettroni dal guscio più esterno dell'atomo, in modo che l'atomo (o la molecola) risulti di carica positiva.

Gli elettroni liberati possono poi attaccarsi ad altri atomi (o molecole) rendendoli di carica negativa.

Sui fenomeni di ionizzazione è basata la illuminazione con i tubi luminescenti e fluorescenti.

E' da dire intanto che ancora oggi il sistema di illuminazione più diffuso, specialmente nelle abitazioni, è quello *ad incandescenza*, per la sua semplicità e praticità.

Nelle comuni lampade ad incandescenza mediante la corrente elettrica si porta ad elevata temperatura in modo da arroventarlo al bianco, un sottilissimo filamento di tungsteno, il cui diametro (in una

lampada da 60 watt) è di circa $\frac{5}{100}$ di millimetro. La lunghezza to-

tale del filamento è di una cinquantina di centimetri, ma il filo viene avvolto e riavvolto a spirale per renderlo molto compatto, in modo da tenerlo lontano dal bulbo di vetro. Ciò per ridurre le perdite di energia dovute alla propagazione del calore per conduzione e per convezione.

Si comprende come nelle lampade ad incandescenza gli elettroni non compaiano direttamente come generatori di luce, ma agiscano col provocare una intensissima agitazione molecolare nel metallo del filamento fino a farlo apparire arroventato al bianco.

Il fenomeno in sè della emissione di luce, o di radiazione in genere, viene spiegato nel seguente modo. Con l'aumentare della agitazione degli atomi aumenta la velocità di rotazione degli elettroni nelle loro orbite (Cap. 1); le orbite stesse si dilatano e gli elettroni possono « saltare » da un'orbita più interna ad una più esterna: in seguito a questi salti si provocano — come già accennato — delle vibrazioni negli elettroni spaziali, vibrazioni che costituiscono appunto la radiazione.

Quando il salto avviene tra le orbite più esterne, alla periferia del guscio, che sono tra loro più distanziate, la vibrazione risulta di maggiore lunghezza, cioè di minore frequenza: allora la radiazione sarà del tipo «raggi infrarossi », non ancora visibili. Quando avviene tra le orbite più interne, molto più vicine l'una all'altra, la vibrazio-

ne sarà di piccola lunghezza d'onda, cioè di maggiore frequenza: allora la radiazione emessa diventa visibile salendo nello spettro verso il violetto fino a raggiungere l'ultravioletto, che torna ad essere invisibile (Fig. 151).

Normalmente il bulbo delle lampade si riempie di gas inerte (miscela di argon con azoto) allo scopo di evitare la « evaporazione » del filamento, che sarebbe agevolata nel vuoto.

Le lampade elettriche ad incandescenza, di ogni dimensione, pur essendo le più estesamente impiegate nel mondo, hanno un rendimento sempre basso: dell'ordine del 7 per cento.

E' appunto per accrescere il rendimento degli apparecchi di illuminazione che si è fatto ricorso ai tubi luminescenti e ai tubi fluorescenti.

nt nt nt

Un tubo luminescente nella sua più semplice espressione è costituito da un tubo di vetro, contenente un gas (o un vapore) a bassa pressione, alle cui estremità sono posti due elettrodi. Facendo affluire agli elettrodi, senza portarli all'incandescenza (catodo freddo) corrente ad alta tensione (da 10.000 a 15.000 volt) le molecole del gas vengono ionizzate, diventano conduttrici di elettricità e irradiano energia di una determinata lunghezza d'onda dello spettro visibile, caratteristica per ciascun gas.

Così il vapore di sodio irradia luce gialla, il vapore di mercurio irradia luce azzurro-viola, il neon dà una luce rossastra, ecc.

I tubi luminescenti a conduzione, del tipo ora descritto, trovano generalmente impiego nelle scritte luminose per pubblicità, o in altri casi particolari. Per la illuminazione di ambienti, anche ad uso di abitazione ma specialmente di locali pubblici, vetrine, esterni, ecc., si impiegano invece, ormai estesamente, i tubi fluorescenti, che passiamo a descrivere.

E' da rilevare che nei tubi a conduzione la maggior parte della energia emessa dagli ioni gassosi ha una lunghezza d'onda compresa nel campo radiazioni ultraviolette, le quali, oltre a risultare invisibili, vengono schermate dal vetro che le assorbe.

Nei moderni tubi fluorescenti in sostanza si riesce a convertire le stesse radiazioni ultraviolette in luce visibile. (Fig. 164). Intanto viene incrementata l'emissione degli elettroni dal catodo, rivestendolo di sostanze idonee e rendendolo incandescente. Si può anche disporre un anodo in prossimità del catodo, per accelerare la emissione.

Gli elettroni collidendo con gli atomi del gas contenuto nel tubo (argon e vapore di mercurio) li ionizzano, con abbondante produzione di energia radiante, in maggior parte costituita da raggi ultravio-

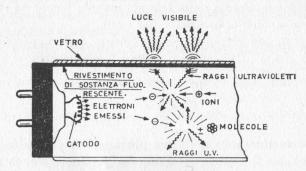


Fig. 164 — Illustrazione del principio di funzionamento di una lampada fluorescente.

letti. Questi vanno a colpire una sostanza fluorescente (silicato di zinco, cadmio borato, ecc. in varie proporzioni) che riveste all'interno il tubo di vetro.

Sostanze del genere hanno infatti la proprietà di diventare fluorescenti, emettendo luce «bianca», quando sono eccitate dai raggi ultravioletti attraverso un procedimento simile a quello della ionizzazione dei gas.

Il rendimento delle lampade fluorescenti supera di oltre il doppio quello delle comuni lampade ad incandescenza.

Citiamo ancora un altro modo, molto semplice, per ottenere luce dagli elettroni differente dai sistemi prima visti. Si potrebbe definire dielettroluminescenza o, abbreviatamente, dielux.

Consiste sostanzialmente nel rendere luminescente un condensatore costituito (Fig. 165) da un vetro trasparente, che fa da supporto, al disopra del quale è steso un sottile strato di materiale conduttore (trasparente): questo conduttore si può considerare una prima armatura del condensatore. L'altra armatura è formata da un foglio metallico speculare, e tra le due è contenuto come dielettrico un sottilissimo strato di materiale fosforescente (silicato di zinco, ecc).

Applicando una corrente alternata alle due armature (è sufficiente la comune corrente degli impianti domestici) parte della energia « oscillatoria » (Cap. 8) che si genera nel dielettrico eccita la sostanza fluorescente e viene irradiata come luce visibile.

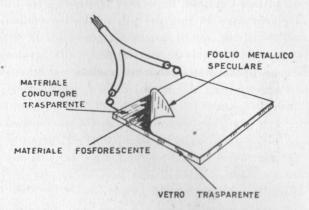


Fig. 165 — Schema di una sorgente di luce basata sul principio della dielettroluminescenza

Sorgenti di luce del tipo ora descritto non sono molto potenti, ma presentano il vantaggio della grande semplicità e del basso costo. Si prestano poi particolarmente per rendere luminose vaste superfici, come pareti, soffitti, ecc. Per esse si prevede un impiego sempre più esteso, quali fonti di luce razionali ed estetiche.

In tempi recenti (1956) sono stati eseguiti, con esito positivo, esperimenti per la generazione di luce in aria rarefatta (contenuta in globi di vetro) mediante eccitazione ad impulsi ad alta frequenza, prodotti anche a distanza. Si è così creato artificialmente un fenomeno del tipo delle aurore boreali, dovute queste — a quanto pare — alla messa in vibrazione, per effetto di risonanza, degli elettroni e degli ioni liberi esistenti nell'atmosfera delle altissime quote. In tutti e due i casi il fenomeno si produce per l'esistenza del campo magnetico terrestre che interagisce con gli elettroni suddetti.

E' possibile anche ottenere luce senza corrente di alimentazione

mediante « lampade » la cui superficie esterna viene spalmata con una mscela a base di stronzio radioattivo e solfuro di zinco: le radiazioni emesse dallo stronzio agiscono sul solfuro di zinco producendo una luce di notevole intensità.

La durata di tali lampade è di parecchi anni.

* * *

In questo ultimo Capitolo, dopo aver trattato — tra l'altro — degli elettroni «lavoranti » in uno dei più modesti e comuni impieghi domestici dell'elettricità, quelli appunto riguardanti la illuminazione delle nostre case, accenniamo in contrapposto alle favolose apparecchiature elettroniche dai nomi reboanti (ciclotrone, betatrone e simili) create nell'era moderna dai maghi della fisica nucleare.

Il ciclotrone (ideato dal fisico americano E. O. LAWRENCE) serve per impartire alle particelle subatomiche (protoni, deutoni, nuclei di elio, ecc) una elevatissima velocità senza dover ricorrere a potenziali eccessivamente alti, bensì mediante impulsi acceleratori successivi, opportunamente sincronizzati, che fanno percorrere alle particelle una traiettoria spiraliforme sempre più ampia.

Le velocissime particelle sono poi utilizzate per « bombardare » particolari sostanze allo scopo di ottenere la disintegrazione degli atomi e la produzione artificiale di elementi radioattivi.

Nella Fig. 166 è schematicamente rappresentato un ciclotrone, costituito da due grossi elèttrodi (1) a forma di «D», fatti a scatola, di 5 metri di diametro, affacciati l'uno vicino all'altro e separati da uno spazio di m. 1,50.

Gli elettrodi sono alimentati da corrente oscillante fornita da un circuito (4) attraverso un trasformatore (3). La corrente oscillante ha una frequenza dell'ordine di 12.000 *chilocicli/sec* e la potenza di circa 30 Kw.

Al centro del ciclotrone è posta una piccola quantità di deuterio o idrogeno pesante (avente il nucleo, detto deutone, costituito da un protone più un neutrone), il quale idrogeno viene « ionizzato », cioè privato dell'elettrone e trasformato in deutone (positivo). Al centro è posto anche un filamento incandescente (2) che fa da catodo ed emette elettroni.

Tutto l'insieme degli elettrodi (1) e del catodo (2) è contenuto in una camera dentro la quale si fa il vuoto spinto.

Un potente campo magnetico (6) agisce in direzione normale al piano degli elettrodi. (Il campo magnetico ha una intensità di 16.000 gauss).

Per effetto del campo magnetico e delle azioni di attrazione e repulsione esercitate dai due elettrodi, alternantisi con una frequenza opportunamente scelta, le particelle di carica positiva (i deutoni) prodotte al centro ricevono successivi impulsi e sono costrette a per-

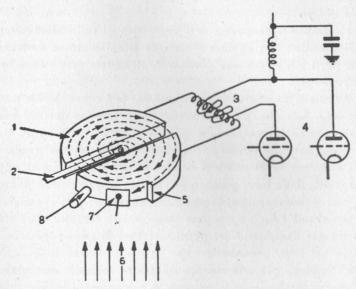


Fig. 166 - Costituzione schematica di un ciclotrone.

correre una traiettoria spiraliforme, venendo la loro velocità continuamente incrementata ad ogni semigiro, che si fa sempre più ampio a mano a mano che le particelle procedono dall'interno verso l'esterno.

Quando hanno raggiunto la periferia (5) le particelle si trovano ad aver acquisito una enorme energia, dovuta alla loro elevatissima velocità (dell'ordine di $50.000 \ Km/sec$). In tale punto vengono deflesse da un campo magnetico (7) e indirizzate nella « camera del bombardamento » (8) dove è posta la sostanza da disintegrare.

La unità di misura dell'energia delle particelle subatomiche animate da alta velocità è il volt-elettrone o <u>elettrone-volt</u>.

Se ne può avere un'idea se si immagina che un elettrone fluente

in una corrente continua di 120 volt colpisca il nucleo di un atomo: allora si può dire che lo elettrone ceda al nucleo una energia di 120 elettrone-volt.

Un multiplo di detta unità, usato per indicare le energie dei ciclotroni e simili, si denomina mega-elettrone-volt (abbreviato in mev) ed è un milione di volte più grande.

Un ciclotrone del tipo sopradescritto può « sparare » con l'energia di 200 mev. Esistono macchine del genere della potenza anche di migliaia di mev.

Per esempio il bevatrone dell'Università di California ha una potenza di seimila mev; il sincrofasotrone attualmente in costruzione a Doubna (U.R.S.S.) avrà una potenza di diecimila mev (dieci miliardi di elettroni-volt).

(In Italia è in costruzione a Frascati, per conto dell'Istituto Nazionale delle Ricerche, un sincrotrone della potenza di 1000 mev).

Un'apparecchiatura analoga al ciclotrone è il betatrone, il quale invece delle particelle positive (ioni) accelera gli elettroni (raggi beta).

Gli elettroni accelerati nel betatrone, a velocità che si approssimano a quella della luce, possono servire per la produzione di raggi X, se con essi si bombardano bersagli di tungsteno: tali raggi risultano molto penetranti (duri) e vengono impiegati in terapia, oltre che nell'industria per l'ispezione dei pezzi metallici di grosso spessore. come accennato nel Cap. precedente.

Ma l'impiego più affascinante di queste mirabili macchine è nel campo sperimentale, dove si tentano le più spinte e intime investigazioni della materia e dell'energia, per la scoperta e la comprensione dei misteriosi fenomeni che stanno all'origine della Creazione.

Gli scienziati ritengono ormai che dalla materia allo stato di « plasma » (Cap. 22) a temperature elevatissime dell'ordine di milioni di gradi centigradi (fino a cento milioni di gradi) con le particelle elementari dissociate in rapidissima vibrazione, sia possibile ricavare direttamente corrente elettrica sotto forma appunto di un flusso continuo di elettroni.

* * *

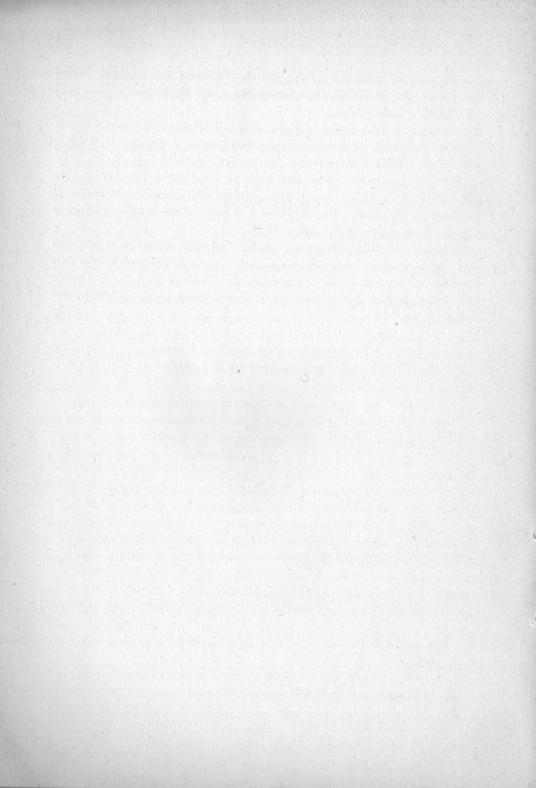
Invero, nei riguardi della energia è da considerare elemento costitutivo fondamentale l'elettrone vibrante manifestantesi direttamente nella forma di energia radiante. Si è anche ricordato (Cap. 22) che la stessa materia può essere dovuta ad una specie di « condensazione » del fluido elettronico spaziale primordiale (Ylem).

Dunque si può porre la *radiazione* all'origine del mondo fisico, venendo per essa ad assumere significato reale e preciso il fatidico « Fiat lux » della *Genesi*.

Inoltre la radiazione è alla base (e condiziona l'esistenza e la possibilità) della stessa vita vegetale (e quindi animale) attraverso il processo di fotosintesi. Per la Terra è il Sole infatti il vero e proprio « ministro maggior della natura ».

Perciò, volendo considerare anche l'energia vitale — la cui più alta estrinsecazione è rappresentata dalle forze spirituali governate dall'Amore — ad esprimere compiutamente l'essenza di tutto il Creato vale la magnifica sintesi ispirata al Poeta dalla contemplazione del Nono Cielo:

« In questo miro ed angelico Templo che solo Amore e Luce ha per confine ».



INDICE ANALITICO ALFABETICO

A

accoppiamento: 179 accumulatore: 38 e segg., 67 aereo: 204 ago magnetico: 78, 87 alternata (corrente): 64, 101, 125 e segg., 129 e segg., 145 e segg. alternatore: 126, 154, 161 altoparlante: 252, 255, 256 AMPÈRE: 26 ampère: 26, 30 108 amperòmetri: 26, 51, 108 ampiezza: 200 amplificazione: 226, 246 ANGSTROM: 279 angstrom: 279 ànodo: 34, 216 antenna: 204 e segg., 235, 271, 277 anticatodo: 297 arco voltaico: 102 asincrono (motore): 163 àtomo: 4 e segg. attrazione: 3, 56, 57, 88, 112 àudio: 264, 265 audio frequenza: 239, 250 autoinduzione: 94 e segg., 95, 98, 111, 137, 142, 179 automazione: 259 avviamento: 162, 169

B

banda (larghezza di): 264, 285 bande laterali: 239 base dei tempi: 264, 271 batteria: 34, 246 battimento: 249, 253 betatrone: 310 bevatrone: 310 bifase: 166 bobina: 83, 89, 95, 137, 255 browniano (moto): 15, 195 bulbi elettrònici: 216 e segg.

avvolgimenti: 83, 108, 129

C

calamita: 3, 71 calore: 19, 23 campo elettrico: 55, 190 campo elettromagnetico: 193, 197, 206, 210 campo magnetico: 76, 78, 102, 163 e segg., 192 campo rotante: 163 e segg. canale (raggi): 12, 302 candele: 133 capacità (del condensatore): 58 e segg., 149, 201 capacità (dell'accumulatore): 40 capacitanza: 148 capacitivi (circuiti): 129, 147 e segg. caratteristica (dei bulbi el.): 219, 225 caratteristica (del motore): 120 carica spaziale: 218 cariche elettriche: 3, 28, 38, 40, 54, 55 carico del generatore: 155, 159 carico del motore: 120 càtodo: 34, 216 cavatappi (regola del): 79 cavi: 157, 265, 277 cavità: 183, 270 cellula fotoelettrica: 282, 288 centrali elettriche: 161 cicalina: 237 ciclo: 128, 139, 189, 200 ciclotrone: 308 cinema sonoro: 286 circuiti: 41 e segg., 157 circuiti capacitivi: 129, 147 e segg. circuiti induttivi: 129, 139 e segg., 150 e segg. circuito oscillante: 175 e segg., 204 coefficiente di autoind.: 98 coefficiente d'induttanza: 84 coefficiente di mutua ind.: 100 colonna sonora: 287 commutatore: 107, 113 compound: 117, 122 condensatore: 57 e segg., 67, 145

condensatori rotanti: 163 conduttività: 18, 21 conduttori: 20, 86, 156 contrappeso: 209 controtensione: 119 Coolidge: 297 coppia motrice: 120 e segg., 169 coppia termoelettrica: 24 corrente alternata: 64, 101, 125 e segg., 129 e segg., 145 e segg. corrente di spostamento: 62, 66, 180, 191 corrente efficace: 127, 206 corrente elettrica: 15 e segg., 36, 109 e segg. correnti indotte: 95, 101, 111, 115, 125 correnti parassite: 115 corto circuito: 49 cos o: 140 costante dielettrica: 62 costante di tempo: 149 COULOMB: 26 coulomb: 26 criotrone: 228 cristalli: 63, 218, 227, 243 cuffia: 211, 238, 255

D

deflessione: 260, 292 DEMOCRITO: 4 demodulazione: 247 derivazione: 46, 48 diafonia: 278 dielettrico: 57, 60, 62, 64 dielettroluminescenza: 306 dielex: 306 diffrazione: 262 diffusione: 213 diffusore: 255 dinamo: 114, 116 e segg., 133 dìodo: 218 dipolo: 184 e segg., 207, 209 dispersione: 213 disturbi: 245

E

eccitazione: 116, 119 e segg., 155, 162 effetto Doppler: 274 effetto Joule: 22, 207 effetto pelle: 143, 206 effetto Peltier: 24 effetto termico: 22, 134 effetto termoelettrico: 23 effetto Volta: 24, 37 electron: 3

elementi: 4 e segg. elettricità: 3 e segg. elèttrodo: 36, 218, 224 elettrodomestici: 158, 172 elettròlisi: 35 elettròlito: 34, 36 elettromagnete: 85, 88, 92, 115 elettromagnetismo: 78 e segg. elettromotrice (forza): 37, 40, 41, 111, 125. elettrone: 3 e segg., 14 e segg., 36, 72, 196, 281. elettronegativi (elementi): 14, 34 elettrone-volt: 309 elettrònica: 259 elettropositivi (elementi): 12, 34 elettrostàtica: 55 emissione (diagramma): 209, 215 emissione termoiònica 217, 230 energia: 29, 31, 61 energia elettrom.: 84, 108, 113 esposimetri: 283 ètere cosmico: 196, 201 ettòdi: 231 evanescenza: 212 exòdi: 231 extra correnti: 97

F

fading: 212 farad: 60 FARADAY: 60, 66, 266 fase: 128, 137, 158, 162 fattore di amplif.: 224, 227 fattore di potenza: 140, 155, 160, 163, 170. fedeltà: 242 FERRARIS: 163 ferrite: 278 filamento: 217 filtro: 222, 250 flash: 63 fluido elettronico: 105, 196, 210 fluorescenza: 261, 304 flusso magnetico: 75, 89, 111, 135 focalizzatori: 260 focus: 297 fonografo: 256 forni a induzione: 134 forza coercitiva: 91 forza elettromotrice: 37, 40, 41, 111, 125, 137, 155. forzate (oscillazioni): 182 fotocàtodo: 284 fotoelèttrica (cellula): 282, 288 fotoelettricità: 279, 284, 298 fotoni: 280

Franklin: 4 frequenza: 128, 132, 141, 148, 152, 177, 189, 232, 244, 266, 279

FOUCAULT: 115 fulmini: 3, 54

G

gabbia di Faraday: 66, 266
gabbia (rotore a): 168
galvanòmetro: 23, 26, 108
generatori: 113 e segg., 125 e segg., 133
GILBERT: 3
gravità: 201
griglia: 224, 230
gruppo elettrogeno: 133
guida d'onda: 277

guizzo: 273

gusci elettronici: 11, 298, 303

H

HEAVISIDE: 211 HELMHOLTZ: 183 HENRY: 99 henry: 99 HERTZ: 193 hertz: 201

I

iconoscopio: 283 Ignitron: 203 illuminazione: 32, 303 e segg. impedenza: 139 e segg., 148 e segg. impulsi: 269, 272 incisione dischi: 288 indotto: 117, 154, 157, 159 industriale (corrente): 158 induttanza: 84, 97, 99, 129, 137, 201 induttivi (circuiti): 129, 139 e segg., 150 e segg. induttore: 154 induzione: 55, 57, 77, 101, 111, 115, 125, 130, 132, 134, 163, 169, 179. inerti (elementi): 14 inerzia: 201 intensità di corrente: 26 e segg., 41 e segg., 108, 125. interlacciata (analisi): 263 invertitori: 231 ioni: 12, 34, 53, 229 ionizzazione: 34 e segg., 53 ionosfera: 211 irradiazione: 206, 235 isolanti: 14, 57, 134 isòtopi: 9, 302 istèresi magnetica: 91

K

KENNELLY: 211 kilowatt: 31 Kirchhoff: 50 klystron: 273

J

Joule: 22, 23, 29, 134

L

lampade: 20, 33, 49, 131, 158, 303 e segg. lampo: 55, 63 laringofono: 243 LAWRENCE: 308 lenti elettriche: 289 e segg. LENZ: 96, 111, 113, 115, 119 linee di forza: 55, 75, 79, 88, 97, 103, 110, 117, 191, 198 luce (corrente): 158 luce visibile: 200, 214, 279, 299, 303 e segg. luminescenza: 304 e segg. lumghezza d'onda: 189, 201 206

M

magnetismo: 71 e segg., 86 magnetofono: 288 magnetron: 270 mano destra (regola): 79, 111 mano sinistra (regola): 103 marcatempo: 271 MARCONI: 204 massa: 6, 202 Meissner: 235 Mendelejeff: 9 mev: 310 microfono: 240 e segg., 246, 256 microscopio: 290 e segg. modulazione: 236 e segg., 274, 285 molecole: 5 e segg. momento elettromagnetico: 206 monofase: 155, 172 Morse: 92, 238 morsetti: 125, 155 motore el.: 105 e segg., 119, 158, 162, 163 mutua induzione: 100

N

negativa (elettricità): 3

neon: 305 neutro: 156

neutrone: 6 e segg. nucleare (energia): 161

nuclei metallici: 155, 132, 135, 144

nucleo: 5 e segg., 202

occhio magico: 248

OERSTED: 78 Онм: 20, 29 е segg., 33 ohm: 20 e segg.

onda portante: 236 onde: 187 e segg., 194 e segg., 208 e

oscillatore: 235, 246, 270 oscillazioni elettriche: 175 e segg.

P

PACINOTTI: 117

parafulmine: 66 parallelo: 46, 48, 51, 67, 160

PELTIER: 24 pendolino el.: 56 pennello elettronico: 261

pentòdo: 231

periodo: 128, 179, 185, 200

persistenti (oscillaz.): 180, 233, 253 permeabilità magn.: 77, 80, 82, 89, 144

picco: 136 pick-up: 256

piezoelettricità: 63, 243

pila: 36 e segg. piròmetro: 24 placca: 217 placcatura: 35 plasma: 197, 310 Pliotron: 226

polarità magnetica: 71 e segg., 87 polarizzazione (della pila): 38 polarizzazione (degli elettroni): 57

poliòdi: 231 ponti radio: 278 ponti elettrici: 283 positiva (elettricità): 3 positone: 8, 57

potenza dei motori: 170 e segg. potenza della c.a.: 127, 140, 160 potenziale: 27 e segg., 36, 38, 42, 54

potenziòmetro: 52, 143, 254

P.P.I.: 276

precipitatori di polveri: 219

prese: 158

primario: 130, 180 propagazione: 187, 189

protone: 5 e segg.

pulsante (corrente): 64, 113, 117, 132,

222.

pulsazione: 128

0

quarzo: 63

R

radar: 268 e segg. raddrizzatori: 133, 218, 221

radiazione: 4, 184 e segg., 190, 193

279, 310 radio: 193, 228

radiocomunicazioni: 207, 210

radiodiffusione: 240 radiofrequenza: 239, 250

radiogoniòmetri: 215 radiografia: 300

radioscopia: 300 raggi canale: 12, 302

raggi catòdici: 259, 291 e segg. raggi gamma: 200

raggi X: 200, 281, 297 e segg. reattanza: 139, 141 e segg. reattore saturabile: 146, 162

reciprocità: 35 reirradiazione: 269

rendimento motori: 170, 172

reòforo: 20, 83

reòstati: 52, 119, 121, 170, 254 repulsione: 3, 56, 57, 88, 112 resistenza di fuga: 234

resistenza di irradiazione: 206 resistenza elettrica: 19 e segg., 29 e

segg., 42 e segg. resistore: 52

reti di distribuzione: 157 e segg.

ricevitori: 191, 208, 211, 228, 247 e segg., 252.

rifasatori: 163 ripetitori: 172

risonanza: 149, 183, 191, 235, 247 rivelatori: 191, 247 e segg., 256

rocchetto: 132 RONTGEN: 297

rontgen-terapia: 300 rotore: 121, 154, 162, 168

RUHMKORFF: 132

ruttore: 132

S

saturazione: 91, 135 sbarre: 159 scarica: 29, 54, 177, 190 schermatura: 66 schermo (griglia): 230 SCHRAGE: 171 scintilla: 179 scorrimento: 169 scossa: 4 secondario 130, 180 semiliberi (elettroni): 14, 197 serie: 43, 48, 66 sfasamento: 129, 139 e segg., 147, 151, 156, 163. shunt: 51 sicurezza: 135 sincrofasotrone: 310 sincronismo: 159, 162 sincrono (motore): 162 sincrotrone: 300 sintonia: 248 sinusòide: 137, 200 slip: 169 slittamento: 169 smorzate (oscillazioni): 178, 235 solenoide: 83 solion: 229 soppressore: 231 spazzole: 107, 113 spettro magnetico: 75 spettrografo di massa: 302 spin: 72, 197 spinterogeno: 132 spinterometro: 179 spira 83, 89, 106, 117, 130, 134 stabilizzatori: 244 statore: 162, 168

T

tasto: 91, 211 telecamera: 283 telecomandi: 172 telefonia: 252, 254, 267 telegrafia: 92, 210, 253 televisione: 208, 261 e segg.

stazionarie (oscillazioni): 185

strumenti di misura: 108

stufe elettriche: 20, 33

suono: 195, 268, 286 superconduttività: 22, 229

supereterodina: 249

stella: 156

strofinio: 56

tensione: 23, 27 e segg., 43 e segg., 155, 158. tensione di controllo: 225 tensione di interdizione: 226 termico (effetto): 22 termoelettriche (centrali): 161 termoelettricità: 23, 24, 25 Terra: 87, 203, 208, 311 terra: 156 tetròdo: 213 Thyratron: 226 tono: 254 tracce: 271 e segg. transistor: 227 trasformatori: 129, 136 trasmettitori: 208, 211, 228, 237 e segg., trasporto di en. el.: 133 trazione elettrica: 119 triangolo: 156 trifase: 155, 167, 171 triodo: 181, 224 e segg., 249 tubi elettronici: 216 e segg., 283 e segg. tubo a r.c.: 259, 297 Tungar: 221 TV: 208, 261 e segg.

U

UHF: 212 ultrasuoni: 196, 214, 278, 289 utilizzatori: 131, 157, 158

V

valvola fusibile: 33, 49
valvola termoionica: 224
velocità di propagazione: 188
ventilatore: 114, 131
vibrazione elettronica: 65
video: 265
VHF: 212
volt: 24, 29, 30, 309
Volta: 24, 29, 36
vòltmetri: 29, 51
volume: 241, 254
vortici elettronici: 74, 76, 81, 86, 88, 93, 97, 102, 110, 132, 197, 291

W

WATT: 30 watt: 30

BIBLIOGRAFIA

- ALMSTEAD F. E. Radio
- Busher G. Elettrotecnica Figurata
- CAVERLY D. Primer of Electronics
- Cesari P. E. Principî di Elettrotecnica
- DAUNT J. G. Elettroni in azione
- FIAT Elementi di Elettronica
- GIULIANI G. Elementi di Radiotecnica
- GRIMES D. Meet the Electron
- Hudson R. G. An Introduction to Electronics
- Molloy E. Q. & A. on Electronics
- Pantaleone Golini G. Appunti di Impianti Radar
- PERUCCA E. Fisica
- Pierantoni A. Radiotecnica Generale
- Ронц R. W. Elettrofisica Moderna
- WINDRED G. —Elements of Electronics
- Enciclopedia Italiana
- Enciclopedia Moderna dell'I.E.I.
- Enciclopedia Scientifica Garzanti

La vignetta di copertina è tratta da «L'Europeo» nº 616 del 1957

ERRATA - CORRIGE

Pag.		invece di	leggere
))	21, prima riga dopo la figura:	mmq.	1 mmq.
»	55, nona riga:	10 joule	10^{10} joule
.))	147, settima riga:	S ₄ D ₅	S ₄ D ₄
»	222, quarta riga dopo la figura:	Fig. 84	Fig. 117
»	223, seconda riga:	Fig. 84	Fig. 117
))	246, quintultima riga:	schermi	schemi

Nota - L'autore sarà grato a chi vorrà indicargli errori e difetti rilevati nel libro.

