

46/122

247

OPERE

POLITECNICO DI TORINO

INVENTARIO N. 4. MC

BIBLIOTECA CENTRALE

GALILEO FERRARIS

FOTOCOPIA DELL'ORIGINALE

PER GENTILE CONCESSIONE DELLO

ISTITUTO ELETTROTECNICO NAZIONALE  
"GALILEO FERRARIS"

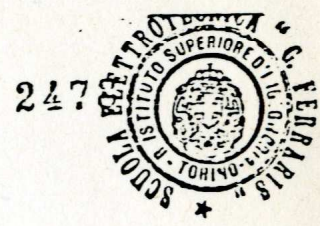
PRESSO LA CUI BIBLIOTECA

L'ORIGINALE È CONSERVATO

ULRICO HOEPLI

EDITORE-LIBRAIO DELLA REAL CASA

1903



# OPERE

DI

# GALILEO FERRARIS

PUBBLICATE PER CURA DELLA

ASSOCIAZIONE ELETTROTECNICA ITALIANA

VOL. I.

*con 52 incisioni, 4 tavole litog. ed il ritratto dell'autore*



R. Ist. Sup. Ingegneria-Torino

ULRICO HOEPLI

EDITORE-LIBRAIO DELLA REAL CASA

1902.



OPERE

GALILEO FERRARIS

PUBBLICATE PER CURA DELLA

ASSOCIAZIONE ELETTROTECNICA ITALIANA



Vol. I



ULRICO HOEPLI

EDITORE-LIBRAIO DELLA REAL CASA

Milano, Tip. Bernardoni di C. Rebeschini e C.





*Exc. Gibson - Chicago*

*Fotografia Pirelli*

*Giulio Ferrario*

Nato a Livorno Maremma Toscana il 30 Ottobre 1847  
morte in Torino il 7 Febbraio 1899.

Milano, Tip. Bazzani & C. Rebeschini & C.

# INDICE

---

CENNO SULLE OPERE DI GALILEO FERRARIS . . . . .	Pag. vii
SULL'IMPIEGO DELLE BUSSOLE ORDINARIE NELLE MISURE DELLE INTENSITÀ GALVANICHE . . . . .	I
SULLA TEORIA MATEMATICA DELLA PROPAGAZIONE DELL'ELETTRICITÀ NEI SOLIDI OMOGENEI:	
Prefazione . . . . .	13
I. Definizioni ed ipotesi fondamentali . . . . .	16
II. Equazioni generali . . . . .	19
III. Sull'elettricità contenuta nell'interno del conduttore . . . . .	23
IV. Applicazione ai conduttori lineari. Azione di un elemento cilindrico sopra un punto della sua sezione media . . . . .	26
V. Riduzione delle equazioni generali nel caso di un conduttore lineare . . . . .	32
VI. Integrazione . . . . .	37
VII. 1.° caso. $\frac{3^2 \gamma}{cr\sqrt{2}}$ è infinitamente grande . . . . .	41
VIII. Applicazione ad un conduttore formante da sé un circuito chiuso . . . . .	43
IX. Applicazione ad un conduttore, i cui due capi sono separati . . . . .	46
X. 2.° caso. $\frac{3^2 \gamma}{cr\sqrt{2}}$ è finito; $\lambda_1$ e $\lambda_2$ sono immaginari . . . . .	54
XI. 3.° caso. $\frac{3^2 \gamma}{cr\sqrt{2}}$ è finito; $\lambda_1$ e $\lambda_2$ sono reali . . . . .	61
XII. 4.° caso. $\frac{3^2 \lambda}{cr\sqrt{2}}$ è infinitamente piccolo. Applicazione ad un filo continuo . . . . .	64
XIII. Applicazione ad un conduttore i cui due capi sono separati . . . . .	66
XIV. Equazioni generali per un conduttore lineare di forma qualunque . . . . .	71
XV. Conclusione. . . . .	76
DI UNA DIMOSTRAZIONE DEL PRINCIPIO DI HELMHOLTZ SULLA TEMPERATURA DEI SUONI RICAVATA DA ALCUNI ESPERIMENTI FATTI COL TELEFONO . . . . .	81
SUL TELEFONO DI GRAHAM BELL . . . . .	91

SULLA INTENSITÀ DELLE CORRENTI ELETTRICHE E DELLE ESTRACORRENTI NEL TELEFONO . . . . .	Pag. 113
Parte I. Sulle correnti indotte dalle correnti telefoniche e sulle estracorrenti nel telefono . . . . .	114
Parte II. Sul valore assoluto dell'intensità delle correnti nel telefono . . . . .	140
TEOREMI SULLA DISTRIBUZIONE DELLE CORRENTI ELETTRICHE COSTANTI RICERCHE TEORICHE E SPERIMENTALI SUL GENERATORE SECONDARIO GAULARD E GIBBS . . . . .	149
Parte I. Ricerche teoriche . . . . .	163
Parte II. Ricerche sperimentali . . . . .	165
SUL METODO DEL DOTT. HOPKINSON PER LA DETERMINAZIONE DEL COEF- FICIENTE DI RENDIMENTO DEL GENERATORE SECONDARIO GAULARD E GIBBS . . . . .	201
SULLE DIFFERENZE DI FASE DELLE CORRENTI, SUL RITARDO DELL'INDU- ZIONE E SULLA DISSIPAZIONE DI ENERGIA NEI TRASFORMATORI . . . . .	255
RISULTATI DI ALCUNE ESPERIENZE SUL TRASFORMATORE ZIPERNOWSKY, DÉRI, BLÁTHY . . . . .	261
ROTAZIONI ELETTRODINAMICHE PRODOTTE PER MEZZO DI CORRENTI AL- TERNATE . . . . .	325
SUL METODO DEI TRE ELETTRODINAMOMETRI PER LA MISURA DELL'E- NERGIA DISSIPATA PER ISTERESI E PER CORRENTI DI FOUCAULT IN UN TRASFORMATORE . . . . .	333
UN METODO PER LA TRATTAZIONE DEI VETTORI ROTANTI OD ALTER- NATIVI ED UNA APPLICAZIONE DI ESSO AI MOTORI ELETTRICI A CORRENTI ALTERNATE:	
I. Vettori rotanti e vettori alternativi . . . . .	349
II. Applicazione ai campi magnetici ed ai motori elettrici a correnti alternate . . . . .	355
SOPRA UN MOTORE ELETTRICO SINCRONO A CORRENTE ALTERNATIVA . . . . .	369
TEORIA GEOMETRICA DEI CAMPI VETTORIALI COME INTRODUZIONE ALLO STUDIO DELLA ELETTRICITÀ, DEL MAGNETISMO, ECC.:	385
Capitolo I. Prime nozioni. Operazioni sui vettori.	
§ 1.° Definizioni e notazioni. Somma di vettori . . . . .	391
§ 2.° Prodotti di vettori . . . . .	394
Capitolo II. Campo di un vettore.	
§ 1.° Definizioni . . . . .	399
§ 2.° Integrale su di una superficie. Divergenza . . . . .	404
§ 3.° Integrale lungo una linea. Circuitazione . . . . .	415
§ 4.° Integrale lungo una linea aperta. Potenziale . . . . .	429
§ 5.° Distribuzioni non circuitali. Forze Newtoniane. Vettori Newtoniani . . . . .	440
§ 6.° Casi di discontinuità. Strati . . . . .	453
§ 7.° Distribuzioni circuitali . . . . .	471
§ 8.° Sui due modi di definire e di trattare il campo di un vettore . . . . .	486

---

---

CENNO

SULLE OPERE DI GALILEO FERRARIS

---

L'Associazione Elettrotecnica Italiana, ad onorare la memoria del suo fondatore Galileo Ferraris, deliberava che si facesse una pubblicazione delle sue opere complete. Nell'iniziare tale pubblicazione ci è sembrato conveniente raccogliere in questo primo volume le memorie originali su argomenti che hanno più stretta attinenza colla elettrotecnica, pensando che appunto in questo campo più profonda è rimasta l'impronta dell'opera di Galileo Ferraris, e che ad essa doveva rivolgersi più vivo il desiderio e l'interesse degli studiosi, e specialmente degli elettricisti.

Seguiranno altri due volumi, il primo dei quali conterrà tutti gli altri scritti su argomenti di elettrotecnica, cioè: le cinque *Conferenze sulla illuminazione elettrica*, le relazioni sulle *Esposizioni di elettrotecnica di Parigi* nel 1881 e nel 1889, quella sul *Congresso internazionale di elettricità a Chicago*, e il discorso sulla *Trasmissione elettrica dell'energia*, letta all'Accademia dei Lincei.

L'ultimo volume comprenderà i lavori d'ottica e di altri argomenti, cioè: *Le proprietà Cardinali degli strumenti diottrici*; le memorie *Sui cannocchiali con obiettivo composto di più lenti a distanza le une dalle altre*; *Sulle trasmissioni telodinamiche di Hirn*; *Su di un metodo per la misura dell'acqua trascinata dal vapore*, e altri scritti minori.



Se questa ripartizione si è mostrata come la più opportuna per dare un ordine alla pubblicazione, tuttavia al lettore non sarà discaro un cenno che vogliamo fare dell'opera di Galileo Ferraris, seguendo il suo naturale svolgimento.

Semplicissima è la storia degli studi e della vita scientifica di Galileo Ferraris. Nato a Livorno Vercellese il 30 ottobre 1847, studiò all'Università ed alla Scuola d'applicazione per gli ingegneri in Torino e vi ottenne il diploma di ingegnere civile alla fine del 1869, e in questa occasione fece stampare il suo primo scritto, che presentò come tesi di laurea, *Sulle trasmissioni telodinamiche di Hirn*. Ma non esercitò affatto la professione. Appena laureato riprese gli studi di fisica e matematica ed entrò subito nell'insegnamento, come assistente alla cattedra di fisica tecnica presso il Museo Industriale Italiano di Torino, cattedra occupata dal prof. Codazza.

Pubblicò allora la sua nota *Sull'impiego delle bussole ordinarie nelle misure delle intensità galvaniche* (V. pag. 1 di questo volume) e poco dopo la tesi, *Sulla teoria matematica della propagazione dell'elettricità nei solidi omogenei* (V. pag. 13, idem), presentata per conseguire il grado di Dottore aggregato alla facoltà di Scienze fisiche, matematiche e naturali nella Università di Torino. In questo scritto egli riproduceva in gran parte i lavori di Kirchhoff *Sul movimento dell'elettricità nei conduttori*, ma dall'applicazione ch'egli fa delle formole generali alla discussione di nuovi particolari, appare come si fosse già impadronito dei metodi analitici della fisica matematica e con quanto interesse aveva già rivolto il suo ingegno allo studio delle leggi più complesse dei fenomeni elettrici.

Eppure, conseguito il grado di Dottore aggregato, mentre esercitava il suo ufficio di assistente di fisica tecnica, lo vediamo ad un tratto rivolgere la sua attività scientifica a tutt'altro campo, cioè all'ottica geometrica, e propriamente alla teoria degli strumenti diottrici.

Egli aveva dovuto occuparsene seguendo il corso di fisica-matematica del prof. Chiò; ed è curioso ricordare

come lo stesso Ferraris, alla fine del 1872, commemorando il compianto professore, osservasse che quel ramo di fisica-matematica non era certamente il più interessante.

Però fu colpito dal fatto che, dopo la pubblicazione della memoria di Gauss *Sulla propagazione dei raggi luminosi attraverso i sistemi di mezzi rifrangenti*, che datava dal 1840, quella teoria, che pur segnava il più grande progresso nella dottrina degli strumenti ottici, era rimasta quasi dimenticata; tanto che i trattati più estesi e più diffusi di fisica e di geodesia o non ne facevano cenno o ne davano solo quel tanto che si applica direttamente all'occhio e alle lenti, togliendole così quel carattere di generalità che ne costituisce una delle doti più preziose.

Ed il Ferraris si accinse al difficile compito di vulgarizzare la nuova teoria, facendone una esposizione completa con metodo elementare e puramente geometrico. E raggiunse perfettamente lo scopo che si era prefisso. Il suo volume dal titolo *Le Proprietà Cardinali degli strumenti diottrici*, pubblicato nel 1876, ha il pregio di avere nello stesso tempo completati e semplificati i metodi geometrici nella esposizione della teoria generale, e di avere svolto, in relazione a questa, una speciale teoria elementare e rigorosa degli strumenti diottrici. E tali pregi furono così presto riconosciuti, che nella stessa Germania, dove la teoria era nata e dove non mancavano, sullo stesso argomento, scritti notevoli di eminenti scienziati, fu pubblicata nel 1879 una traduzione tedesca per cura del prof. Lippich dell'Università di Praga.

Il Ferraris ritornò una sola volta, pochi anni dopo, ad occuparsi di strumenti ottici, quando nel 1880 pubblicò la memoria *Sui cannocchiali con obiettivo di più lenti a distanza le une dalle altre*. In questo lavoro egli dà anzitutto le formole generali per determinare i punti cardinali di un sistema centrato di lenti collocate a distanza qualunque fra loro, e introduce per la trattazione di questo problema un determinante che, adottato poi da altri autori, fu detto *determinante interstiziale*. Studia quindi il cannocchiale anallatico di Porro, ne completa la teoria e ne

propone nuove disposizioni. Infine studia diverse nuove combinazioni di lenti, colle quali si può ottenere un canocchiale con ingrandimento maggiore di quello che si ha coll'ordinaria forma dello strumento.

Intanto il Ferraris era successo fin dal 1877 al Codazza nell'insegnamento della fisica tecnica. In quell'anno medesimo l'invenzione del telefono attrasse la sua attenzione. In questa applicazione della corrente elettrica egli vide subito un oggetto interessante di studio e di ricerche scientifiche.

Approfittò anzitutto del telefono per dare una *Dimostrazione sperimentale del principio di Helmholtz che la tempera dei suoni non dipende dalle fasi dei suoni componenti* (V. pag. 81 di questo volume). Perciò egli fece agire due uguali telefoni ricevitori posti l'uno direttamente nella linea di un telefono trasmettitore e l'altro su di un circuito indipendente, ma soggetto all'induzione della linea stessa. Applicando le formole delle correnti indotte egli trova che in questo circuito le fasi dei suoni componenti devono essere alterate; malgrado ciò nel secondo telefono si ricevono i suoni come nel primo senza alterazione nella tempera. Il Ferraris suppone in questo primo studio che siano trascurabili i fenomeni di selfinduzione. Avverte però che è suo intendimento di completare lo studio; e infatti nella memoria pubblicata pochi mesi dopo, nel giugno 1878, *Sulla intensità delle correnti elettriche e delle estracorrenti nel telefono* (V. pag. 113 di questo volume), analizza il fenomeno, occupandosi in particolar modo dell'influenza che la selfinduzione esercita sulla tempera del suono e giunge alla conclusione che le estracorrenti, prodotte nel telefono ricevitore, affievoliscono nella medesima proporzione tutti i suoni elementari e perciò quelle estracorrenti non alterano la tempera del suono. In questo lavoro sono messe in evidenza altre proprietà interessanti intorno alle relazioni che sussistono fra le correnti, l'intensità e il periodo dei suoni trasmessi dal telefono, e infine è data per la prima volta una misura assoluta dell'intensità delle correnti telefoniche.

Era l'epoca in cui si cominciava a parlare seriamente di applicazioni industriali della luce elettrica. Il Ferraris, che doveva occuparsene anche nel suo insegnamento, scelse l'argomento di attualità per farne oggetto di cinque conferenze, che egli tenne nell'aprile e maggio del 1879 al Museo industriale.

“ L'argomento mi fu suggerito, dice il Ferraris, dall'abbondanza degli scritti che vi si riferiscono e che da qualche tempo inondano i giornali tecnici ed anche i libri „ — ma egli non vuol seguire questa corrente. — “ Proviamo, soggiunge, ad allontanarci per un momento dal frastuono di tante voci diverse e discordanti, proviamo a portarci in una regione a cui non arrivi il rumore della lotta; poniamo, se ci è possibile, nella nostra mente la calma, la serenità dello studioso della scienza, riandiamo i principi scientifici che servono di base alle applicazioni. Chi sa che così non riusciamo a vederci molto più chiaro. „ E poco dopo, parlando della molteplicità delle invenzioni e della confusione dei giudizi, egli osserva: “ I particolari di un'invenzione sono spesso ciò che la rendono pratica, che la costituiscono; ma qualche volta eziandio fanno per l'invenzione ciò che fanno le ingegnose disposizioni di parole per i sofismi: ne mascherano l'insussistenza. „

Ho voluto citare queste parole, colle quali il Ferraris iniziava le sue conferenze, perchè in esse si rivela gran parte del suo carattere, si manifesta il criterio che guidava il suo ingegno nella trattazione delle questioni tecniche; egli ne investigava i più minuti particolari, ma nello stesso tempo sapeva guardarle dall'alto ed assoggettarle ad un esame sereno, unendo all'arte rigorosa dello scienziato, la perspicacia del profondo filosofo.

E in queste conferenze il Ferraris dimostra una grande abilità nell'espone in forma elementare, a tutti accessibile, l'argomento che allora tanto interessava il pubblico, ponendo bene in rilievo i principi scientifici sui quali si basa la produzione della luce elettrica, discutendo con straordinaria lucidezza la questione della sua applicabilità pratica. “ La luce elettrica, dice, subentrerà sulle pubbliche

strade a quella del gas. „ Egli intendeva però di parlare della luce ad arco. Poca fiducia egli manifesta per i sistemi a incandescenza, poichè necessariamente la luce a incandescenza costerà sempre più di quella a gas. Oggi si potrebbe dire che siamo allo stesso punto. Non potendo prevedere i perfezionamenti nelle lampade a filamento di carbone e nei mezzi di distribuire la energia elettrica, egli doveva in quell'epoca limitarsi a pronosticare l'adozione della *luce elettrica non suddivisa*. „ Ma la luce elettrica verrà, in un avvenire non lontano, egli dice; i nostri figli la vedranno applicata e quando vi saranno abituati non tollereranno più la luce del gas. Essi avranno un bisogno di più, che noi non abbiamo ancora — ma questa è la legge naturale del progresso. „

Con queste conferenze si può dire che il Ferraris si slanciò decisamente nel campo della elettrotecnica. Da questo momento tutta la sua attività è per la nuova scienza, per le sue applicazioni.

Nel giugno 1879 fece conoscere alcuni *Teoremi sulla distribuzione delle correnti elettriche costanti* (V. pag. 149 di questo volume). Sono essenzialmente due teoremi, il primo dei quali stabilisce che, fra tutte le distribuzioni di correnti costanti, in un conduttore qualunque, conciliabili col principio dell'equivalenza del calore e del lavoro, quella che nel fatto si verifica è quella che rende massimo il lavoro delle forze elettromotrici.

La seconda proposizione si riferisce al caso in cui sieno date le intensità delle correnti sulla superficie che limita il sistema conduttore, mentre in questo agiscono soltanto le forze elettromotrici dipendenti dall'elettricità libera. Allora le correnti nel sistema stesso si distribuiscono in modo da rendere minimo il calore svolto nel conduttore.

Negli anni seguenti il Ferraris ebbe più volte l'incarico ufficiale di rappresentare l'Italia in importanti congressi scientifici. Così lo troviamo delegato al Congresso internazionale di elettricità e membro della giuria all'Esposizione di elettricità a Parigi nel 1881, poi nel 1882 delegato alla

Conferenza internazionale di Parigi, e nel 1883 Commissario alla Esposizione di Vienna.

Notevolissima è la relazione che egli scrisse nel 1881 sulla esposizione di Parigi. È un piccolo trattato, nel quale in forma piana, chiara ed esatta pone, discute e risolve problemi importantissimi, e specialmente quelli che riguardano la distribuzione e trasmissione della energia elettrica, in quell'epoca appena abbozzati. Degne di nota e interessantissime sono poi le conclusioni sulle applicazioni degli accumulatori e delle lampade elettriche.

Ma il lavoro classico del Ferraris apparve quando nell'occasione della Esposizione di Torino del 1884 la sua attenzione fu richiamata dai nuovi apparecchi, presentati dal Gaulard, che allora si chiamavano *Generatori secondari* ed oggi diconsi *trasformatori*, a corrente alternata.

Il Ferraris era presidente della giuria internazionale, di cui facevano parte distinti scienziati italiani e stranieri. Il generatore secondario era già stato sperimentato da altri, e già si erano pronunciati giudizi sulle proprietà del nuovo apparecchio; ma il Ferraris non era soddisfatto. Eseguiti gli esperimenti trovò che la scienza non aveva ancora formulate le norme per discuterle. Egli, buon conoscitore di quanto le dottrine dell'elettricità potevano mettere a sua disposizione, intraprese lo studio del trasformatore e lo condusse a termine da maestro. Colla sua Memoria che s'intitola *Ricerche teoriche e sperimentali sul generatore secondario Gaulard e Gibbs* (V. pag. 163 di questo volume), e coll'altra *Sulle differenze di fase delle correnti, sul ritardo dell'induzione e sulla dissipazione di energia nei trasformatori* (V. pag. 261, idem), egli ha fondato la teoria dei trasformatori a correnti alternate.

Trovò il teorema che insegna a calcolare l'energia di una corrente alternata, dimostrò come varia l'energia assorbita dal trasformatore a seconda del lavoro che si richiede nel circuito secondario; provò come il rendimento dell'apparecchio fosse assai superiore a quello che si credeva; ideò il metodo dei tre elettrodinometri per misurare le differenze di fase e dedurne il lavoro delle

correnti alternate; mise in evidenza come l'isteresi e le correnti parassite influiscono a modificare il funzionamento e il rendimento del trasformatore.

Con questi lavori il Ferraris diede il più potente impulso al progresso di questo ramo dell'elettrotecnica, che comprende tutte le applicazioni delle correnti alternate.

A proposito del teorema sul lavoro di una corrente alternata, è interessante ricordare la corrispondenza che il Ferraris ebbe col Dott. Hopkinson, e che è riprodotta a pag. 255 e seg. di questo volume. Da essa risulta che il Dott. Hopkinson aveva applicato giustamente il metodo di Ayrton e Perry per misurare coll'elettrometro a quadranti il lavoro fatto nel circuito del trasformatore; ma resta confermato che si deve al Ferraris la formola esplicita che dà il lavoro di una corrente alternata, e che è la (32) della 1.<sup>a</sup> Memoria sul generatore Gaulard (V. pag. 189 di questo volume), spiegata e discussa poi alla fine del § 4.<sup>o</sup> (V. pag. 197-198, idem).

Un complemento di questi lavori è la breve nota che contiene i *Risultati di alcune esperienze sul trasformatore Ziperowsky, Déri, Bláthy* (V. pag. 325, idem), nella quale mette in evidenza la superiorità di questo tipo di trasformatore a circuito magnetico chiuso, anulare, rispetto al tipo primitivo a dischi di Gaulard.

Queste esperienze furono eseguite nel giugno 1885, e pare che il Ferraris avesse intenzione di intraprendere uno studio completo, non solo del trasformatore, ma di tutto il sistema di distribuzione proposto dai tre ingegneri ungheresi.

Ora sembra che giusto in quei giorni, nei quali egli scriveva questo suo proponimento, egli abbia avuto per la prima volta l'idea del *campo rotante*. Nella sua Memoria, che pubblicò nel marzo 1888, dopo aver esposto la teoria del campo rotante, ottenuto con due correnti in quadratura, nel cominciare la descrizione di *alcuni degli esperimenti coi quali aveva verificato ed utilizzato questo fatto*, aggiunge in nota a piè di pagina: "Le esperienze delle quali si fa cenno furono eseguite nell'autunno del 1885."

Ma pare certo che le prime prove rimontino alla fine del giugno 1885. Le esperienze dell'autunno erano probabilmente quelle che egli ripeteva già con apparecchi perfezionati e mostrava a colleghi ed amici.

Galileo Ferraris, dopo l'Esposizione del 1884, si era convinto dell'importanza straordinaria che dovevano avere le applicazioni delle correnti alternate, grazie al sussidio dei trasformatori. Al principio del 1885 comprese subito il gran passo segnato su questa via coi perfezionamenti proposti da Zipernowsky, Déri, Bláthy, sia nei trasformatori, sia nei sistemi di distribuzione. Nel giugno 1885 sperimentava il trasformatore e studiava quei sistemi; e, come appariva dai discorsi che egli teneva in quell'epoca su questo argomento, accarezzava continuamente l'idea di generare azioni rotative mediante correnti alternate.

Dagli studi e dagli esperimenti di cui s'occupava appunto in quel tempo, la sua mente era portata a considerare l'importanza di tener conto delle differenze di fase fra le correnti primarie e secondarie. Nello stesso tempo la sua mente correva all'analogia fra la legge di variazione di una corrente sinusoidale e quella che regola le vibrazioni dell'etere, a cui si attribuiscono i fenomeni della luce; leggi che gli erano tanto famigliari, poichè ne aveva fatto oggetto di lungo studio fin dai primi anni della sua vita scientifica. E come le combinazioni di vibrazioni eterie spostate di fase danno luogo a vibrazioni ellittiche o circolari, così egli venne all'idea di combinare fra loro due flussi magnetici spostati di fase e scoprì il *flusso* o *campo magnetico rotante*.

La soluzione di cui andava in cerca gli balenò alla mente una sera, mentre passeggiava per le vie di Torino. La mattina seguente era al Museo, e, chiamato il meccanico, gli fece costruire in fretta una rozza bobina di legno, di forma rettangolare, nella quale si potesse introdurre ad angolo retto un'altra bobina tonda, che già possedeva. Poi da un tubo di rame gli fece ricavare un cilindretto con un gancio su una delle basi. Messa in moto il piccolo alternatore Siemens del laboratorio, preparò egli



stesso i circuiti, inserendo un trasformatore Gaulard. Al meccanico, che gli domandò a che cosa doveva servire tutto quell'apparecchio, rispose che il cilindro avrebbe dovuto girare. Lo attaccò ad un filo e lo tenne sospeso egli stesso colla mano, e, appena chiuso il circuito, il cilindretto di rame cominciò infatti a girare.

Ripeté gli esperimenti in svariate forme nell'autunno; ma soltanto nella primavera del 1886 fece costruire dallo stesso meccanico il motorino con nuclei di ferro, a quattro poli.

Sempre modesto, desideroso di perfezionare e condurre a termine le sue indagini, per l'intimo sodisfacimento de' suoi ideali scientifici, anzichè bramoso di far note le sue scoperte per menarne vanto, o farne speculazione, curò nel 1887 la pubblicazione dell'altro lavoro *Sulle differenze di fase*, ecc., che completava i suoi studi sul trasformatore, e solo al principio del 1888 si decise di riassumere i risultati fin allora ottenuti co' suoi esperimenti sul campo rotante, ed a pubblicarli nella breve Memoria che presentò all'Accademia delle Scienze di Torino nel marzo di quell'anno.

In questo scritto non solo accenna alla costruzione del motore a campo rotante, ma stabilisce una delle relazioni fondamentali, mostrando come il rendimento teorico del motore sia eguale al rapporto fra la velocità angolare della parte mobile e quella del campo rotante.

Ma il Ferraris non si occupò allora di perfezionare l'apparecchio come motore. Cogli scarsi mezzi di cui disponeva, obbligato a servirsi di grandi reattanze per produrre le due correnti in quadratura, osservava giustamente che il suo apparecchio non poteva avere importanza come motore industriale. Comprendeva benissimo che era *possibile*, come egli scrive, *studiarne le dimensioni in modo da aumentarne notevolmente la potenza e migliorarne moltissimo il rendimento*; ma trovava inutile in quel momento di intrattenere l'Accademia su tale problema. E concludeva mostrando come disposizioni simili a quelle da lui adoperate potevano già avere importanza per esperienze di-

mostrative e per misurare l'energia distribuita mediante correnti alternate.

Non deve recar meraviglia che il Ferraris lasciasse ad altri sfruttare il principio di cui egli aveva pure riconosciuto l'importanza. Anzitutto è da considerare l'assoluto disinteresse materiale e lo spirito altamente scientifico della sua mente. Nessun desiderio di guadagno lo spingeva a sollecitare questo a preferenza di altri studi pure già avviati; egli non avrebbe mai pensato a ricavar profitto dalla sua scoperta; non aspirava a private, non aveva premura. E che ritenesse lo studio ancora assai incompleto lo prova il fatto, che solo dietro istanze di colleghi ed amici si indusse a pubblicare la Nota del marzo 1888; e pochi giorni dopo se ne mostrava quasi scontento e pentito.

La sua intenzione non era di uscire con una pubblicazione preventiva, per prender data, come si dice. Ciò non era nelle sue abitudini. Dopo le prove del 1885, ripetute negli anni successivi a larghi intervalli, modificando gli apparecchi, egli ne parlò sovente ai colleghi; amava mostrare le sue esperienze a persone competenti che lo visitavano, e alieno da qualunque idea di speculazione industriale attendeva con calma di avere il tempo e i mezzi per continuare lo studio iniziato.

Ne' suoi primi esperimenti egli si limitò a verificare il principio e a dimostrare la possibilità di applicarlo alla costruzione di contatori e di altri strumenti di misura.

Sull'applicabilità alla costruzione di motori industriali egli si espresse invece con molta riserva.

Ma la sua opinione in proposito collima e si spiega con ciò che egli scriveva due anni più tardi, quando già si era cominciato a perfezionare la costruzione dei primi motori asincroni, e precisamente nella bellissima relazione che egli pubblicò *Sulla Elettrotecnica all'Esposizione Universale del 1889 a Parigi*.

Egli trova un primo inconveniente, che limita l'applicabilità dei motori a campo rotante, nella necessità di costruire l'intera rete di distribuzione con almeno tre fili.

Questo inconveniente è proprio del sistema, perchè non si può pensare ad attivare grossi motori con due correnti ricavate da un unico circuito, ricorrendo a reattanze per ottenere la necessaria differenza di fase; ciò produrrebbe uno spreco grandissimo di energia. Bisogna mandare le correnti in quadratura direttamente dalla stazione generatrice. A questo inconveniente si sovrappone l'altro, che è comune a tutti i motori asincroni ed è dovuto alla forte auto-induzione delle spirali, che fa diminuire l'*efficacia* (ora si direbbe il *fattore di potenza*) dell'impianto.

Egli nota quindi come il motore a campo rotante troverà un'utile applicazione come apparecchio ausiliare per la messa in moto dei motori sincroni. Ma in tal caso, soggiunge, è il motore sincrónico il motore principale e non v'ha dubbio che *per esso è serbato un grandissimo avvenire*. E nel 1894, nel suo discorso all'Accademia dei Lincei, ritroviamo queste ultime parole ripetute letteralmente, coll'osservazione che gli esperimenti di Francoforte-Lauffen del 1891 avevano ricondotto il pensiero dei tecnici ai motori sincroni, il difetto dei quali, di non potersi avviare da sè, *era stato stranamente esagerato*.

Non occorre dire che il Ferraris fu pronto e lietissimo di riconoscere i pregi dei motori a campo rotante; ma chi ben riflette troverà che molto di vero è pur contenuto in quel suo primo giudizio.

Fu nel 1891, all'Esposizione internazionale di Elettrotecnica a Francoforte, che l'applicazione del campo rotante cominciò ad assumere importanza industriale; ed ivi il Ferraris fu acclamato dagli elettrotecnici di tutte le nazioni come lo scopritore del principio che aveva reso possibile la costruzione dei motori asincroni a campo rotante. L'esposizione stessa ne presentava interessanti applicazioni e fra l'altre quella per la trasmissione di energia da Lauffen a Francoforte ad una distanza di 175 chilometri.

Le correnti alternate costituivano omai l'argomento di studio prediletto di Galileo Ferraris. Nel 1893 egli pubblicò la Memoria su di *Un metodo per la trattazione dei vettori rotanti od alternativi, ed una applicazione di*

esso ai motori elettrici a correnti alternate; e poco dopo la Nota *Sopra un motore elettrico sincrono a corrente alternativa* (V. pag. 355 e 385 di questo volume).

Non va dimenticato che nel 1896 egli faceva conoscere un nuovo sistema di distribuzione elettrica dell'energia mediante correnti alternate, che aveva ideato e studiato insieme coll'ing. Arnò, suo assistente,<sup>1</sup> e che permette di ricavare da un circuito alimentato da una corrente alternata semplice un circuito polifasico, per alimentare motori a campo rotante o per avviare motori monofasi. Si ottiene ciò per mezzo di un trasformatore di fase, il quale non è altro che un motore asincrono monofase, tipo Brown, munito di circuiti d'avviamento, dai quali, una volta avviato il motore, si può ricavare un sistema di correnti che presentano determinate differenze di fase rispetto alla corrente della linea principale, cioè di quella stessa corrente che alimenta il motore.

Ma la mente di Galileo Ferraris non si manifesta completa a chi si limita ad esaminare quelle opere che contengono i risultati di sue ricerche originali. Già abbiamo ricordato le sue conferenze sul telefono e sulla illuminazione elettrica e le relazioni su congressi ed esposizioni. A queste devonsi aggiungere: il discorso sulla *Trasmisione elettrica dell'energia*, letto all'Accademia dei Lincei nella solenne adunanza del 3 giugno 1894, e infine il lavoro sulla *Teoria geometrica dei campi vettoriali*, che fu pubblicato dopo la sua morte, ed è riprodotto alla fine (pag. 389) di questo 1.º volume.

Da questi scritti appare come all'eminente scienziato andasse congiunto il maestro esimio. L'arte di esporre con singolare chiarezza, qualunque argomento egli si accinga a trattare, nasce spontanea in lui dalla sicura conoscenza della materia unita al vivo desiderio di rendersi utile agli altri, insegnando i nuovi trovati della scienza

---

<sup>1</sup> Fu pubblicato in un opuscolo dal titolo: GALILEO FERRARIS e RICCARDO ARNÒ. *Un nuovo sistema di distribuzione elettrica dell'energia mediante correnti alternative*. Torino. Camilla e Bertolero. 1896.

prediletta; si direbbe ch'egli si compiace di chiamare gli altri a parte del suo godimento, che ne senta quasi un bisogno.

Le cinque conferenze sulla illuminazione elettrica sono un modello del genere. Ma anche negli scritti che non hanno un carattere didattico egli ha una cura estrema di presentare chiaramente le questioni, di segnare esattamente la cornice del quadro, distinguere il certo dall'ipotesico, e condurre il lettore con metodo rigoroso a conclusioni nette, sicure.

Con quanto studio e interesse egli si occupasse del suo insegnamento lo sanno i numerosi scolari che affollavano la scuola, dove egli dettava le sue lezioni di fisica tecnica e di elettrotecnica. L'opera postuma sui *campi vettoriali* dimostra come il Ferraris intendesse la sua missione di insegnante. Egli non era pago di aver creato una scuola di elettrotecnica, la prima in Italia, sorta per sua iniziativa, e di aver raccolto nelle sue lezioni la nuova scienza, procurando di darle un ordine didattico, lavoro già difficile, ove si consideri l'evoluzione subita dall'elettrotecnica nel primo periodo di sua formazione. Il Ferraris vedeva molto più in là; egli comprendeva che non era possibile dare all'elettrotecnica uno svolgimento razionale, continuando, per così dire, ad appiccicare i nuovi concetti ai metodi antichi; la nuova scienza aveva bisogno di una forma più organica, meglio coordinata ai principi generali della scienza. E quale fosse la via da lui scelta appare appunto da questo scritto, che egli destinava a formare il primo capitolo di un trattato d'elettrotecnica.

Questo scritto, per rigore, ordine e chiarezza d'esposizione è uno stupendo corso di lezioni, che si potrebbe ripetere parola per parola davanti agli scolari. Ma ciò che deve richiamare principalmente la nostra attenzione è il concetto a cui s'informa l'autore in quest'opera, concetto altamente istruttivo e che deve costituire oggetto di riflessione profonda a chiunque si trovi a lavorare in questo campo dell'insegnamento. L'opera iniziata da Galileo Ferraris segna un passo importantissimo nella di-

dattica elettrotecnica. Forse non tutti saranno oggi d'accordo nel ritenere che convenga senz'altro adottare il metodo da lui proposto; ma, qualunque sia la conclusione a cui si giungerà, è certo che giova tenere ben presente l'avvertimento che un tale maestro ha voluto lasciarci.

E quale fosse l'importanza ch'egli dava a questo argomento risulta dal fatto, che il manoscritto trovato fra le sue carte era già una seconda redazione, preparata per le stampe, di un manoscritto più antico. Ciò dimostra come il Ferraris già da tempo fosse entrato in quest'ordine di idee, e come lo studio e la riflessione, anzichè indurlo ad abbandonare l'idea prima, lo abbiano fatto decidere a metterla in atto.

E di saggi avvertimenti ne troviamo sparsi in tutte le opere del Ferraris. Abbiamo già ricordate le parole serene ed assennate colle quali egli iniziava le sue conferenze sulla illuminazione elettrica. Ma è bello spigolare qua e là ne' diversi scritti quelle espressioni che, cogli intendimenti dello scienziato, rivelano il carattere dell'artista e del filosofo.

Interessante è leggere, nella chiusa della conferenza sul telefono, come egli si esprime per rispondere alla domanda, ch'egli stesso si rivolge, se il telefono sostituirà i telegrafi. Dopo aver detto che ciò non si può asserire, s'affretta a soggiungere: "Ma qualunque siano per essere i perfezionamenti futuri, qualunque abbiano ad essere le applicazioni della invenzione, sulla quale noi ci siamo intrattenuti, pare a me che queste questioni siano adesso *non solo oziose, ma indecorose.*" E per la prima volta nei suoi scritti egli espone qui ben chiaro il suo concetto, manifesta l'animo di scienziato e di artista della scienza, che nel trovato scientifico riconosce i caratteri che lo fanno apprezzare, che dimostrano la sua importanza, la sua bellezza, indipendenti dalla utilità pratica che quel trovato può avere.

Egli più volte e in molte occasioni ritorna a questo concetto, vorremmo quasi dire a questa professione di fede; e vi ritorna tutte le volte che l'argomento lo porta

a studiare qualche nuova invenzione, che prometta o abbia anche già avuto importanza e utilità pratica. Così nello stupendo discorso ch'egli tenne all'Accademia dei Lincei, dopo aver fatto una magistrale pittura degli ultimi sistemi di trasmissione elettrica della energia, dopo aver innalzato un inno d'ammirazione a questo trionfo dell'industria moderna, egli, che aveva cominciato dichiarando: "La scienza ha ideali più alti di quello dell'utile materiale diretto", non può a meno di esclamare: "Prima dell'importanza industriale io sento l'importanza scientifica, prima dell'utile materiale, l'utile intellettuale."

Ma già in quella prima conferenza sul telefono, la prima volta ch'egli si presentava al pubblico per mostrare una grande invenzione, egli insisteva per far comprender bene al pubblico qual'era il suo modo di pensare. E caratteristica soprattutto è la frase colla quale egli completa il suo pensiero. Non solo l'opera scientifica ha in sé il carattere di importanza e di bellezza che le conferisce il diritto alla nostra considerazione, indipendentemente dalla sua utilità pratica, ma *"chi nelle ricerche scientifiche avesse sempre in mira le applicazioni non troverebbe mai nulla"*.

Poco più d'un anno dopo egli stava per finire la seconda conferenza sull'illuminazione elettrica, nella quale, esposte le proprietà fondamentali della corrente elettrica, aveva stabilito le condizioni necessarie per risolvere economicamente il problema della illuminazione. A questo punto egli si sente trascinato ad osservare: "Abbiamo fatto questo nuovo passo mediante l'esame paziente di una legge fisica; or questa è il frutto del lavoro perseverante di uomini, che alle loro fatiche non posero mai per meta la ricerca di qualche cosa capace di applicazioni pratiche immediate, ma che cercarono il vero in sé e per sé, quel vero, che, se non arricchisce chi lo cerca e anzi spesso ne consuma le sostanze e la salute, può fare col tempo la ricchezza e la gloria di intere nazioni. Quegli uomini non pensarono alle applicazioni, *ed è per questo appunto che trovarono*; ma fecero per le applicazioni la parte più importante: somministrarono le cose applicabili. Le inven-

zioni sono il più delle volte dovute più a chi non vi pensò mai, che a chi diede loro il proprio nome. »

Galileo Ferraris, dopo diciotto anni, nei quali aveva lavorato con mirabile successo, in un campo dove le invenzioni e le applicazioni si succedevano con rapidità febbrile, ripeteva quelle parole, invariabilmente, mostrando che tutte le vicende della sua vita di studio, de' suoi lavori, delle sue scoperte, non avevano fatto che confermarlo pienamente nella sua opinione. E quelle parole, che egli pronunciava con tanto entusiasmo, con sì profonda convinzione, per glorificare i grandi benemeriti della scienza, possiamo oggi ripetere noi per ricordare il carattere e l'importanza scientifica dell'opera di Galileo Ferraris.

Torino, 22 luglio 1902.

GUIDO GRASSI.

«Dacché la corrente elettrica, passando dal laboratorio del fisico all'opificio dell'industriale, preso posto tra i mezzi di produzione, il misurarne l'intensità ha cessato di essere problema puramente scientifico ed è diventato problema di tecnologia. Sono note le svariate soluzioni che per gli usi scientifici ne diedero i fisici. De la Rive e Feshaer, che proporzionavano i loro apparecchi in modo da servire per correnti molto intense, facevano oscillare a grande distanza da un conduttore rettilineo e verticale un ago magnetizzato e dalla durata delle oscillazioni deducevano l'intensità della corrente; Pouillet\* costruiva e usava il suo galvanometro; Gauss, Gaussin, Poggendorf\* perfezionavano le nebulose bussole delle tangenti e dei seni; Gauss e Weber\* eseguivano delicatissime misure col magnetometro e coll'elettrodinometro, ne quali le variazioni delle azioni elettromagnetiche erano rese insensibili dalla piccolezza delle deviazioni; la bilancia di torsione di Coulomb veniva convertita

\* Comptes-rendus de l'Académie des sciences, t. 20, p. 1811.

\* Annales der Chemie und Physik, 85, 1 (1822).

\* Annales de chimie et de physique, 25, 136.

\* Comptes-rendus, 1822.

\* Poggendorfs Annalen, pag. 304, 1824.

\* Elektrische Messungen, 2. Aufl., pag. 214.

G. Ferraris, Opere, Vol. I.





---

---

SULL'IMPIEGO  
DELLE  
BUSSOLE ORDINARIE  
NELLE MISURE  
DELLE INTENSITÀ GALVANICHE

(Pubblicato negli *Annali del R. Museo Industriale Italiano* di Torino,  
per l'anno 1871.)

---

Dacchè la corrente elettrica, passando dal laboratorio del fisico all'opificio dell'industriale, prese posto fra i mezzi di produzione, il misurarne l'intensità ha cessato di essere problema puramente scientifico ed è diventato problema di tecnologia. Sono note le svariate soluzioni che per gli usi scientifici ne diedero i fisici. De la Rive e Fechner, che proporzionavano i loro apparecchi in modo da servire per correnti molto intense, facevano oscillare a grande distanza da un conduttore rettilineo e verticale un ago magnetizzato e dalla durata delle oscillazioni deducevano l'intensità della corrente; Pouillet<sup>1</sup> costruiva e Buff,<sup>2</sup> Nervander,<sup>3</sup> Gaugain,<sup>4</sup> Poggendorff<sup>5</sup> modificavano e perfezionavano le notissime bussole delle tangenti e dei seni; Gauss e Weber,<sup>6</sup> eseguivano delicatissime misure col magnetometro e coll'elettrodinometro, ne' quali le variazioni delle azioni elettromagnetiche erano rese insensibili dalla piccolezza delle deviazioni; la bilancia di torsione di Coulomb veniva convertita

---

<sup>1</sup> *Comptes-rendus de l'Académie des sciences*, 4, 267 (1837).

<sup>2</sup> *Annalen der Chemie von Liebig*, 86, 1 (1853).

<sup>3</sup> *Annales de chimie et de physique*, 55, 156.

<sup>4</sup> *Comptes-rendus*, 1853.

<sup>5</sup> *Poggendorffs Annalen*, pag. 504 (1840).

<sup>6</sup> *Electrodynamische Maassbestimmungen*, 1° abl., pag. 218.

in reometro, <sup>1</sup> e Bequerel <sup>2</sup> proponeva la sua delicata bilancia elettromagnetica. Ma tutti questi apparecchi erano destinati ad essere mezzi di delicate misure per scopi scientifici, e non potranno mai essere che strumenti di laboratorio.

Ora modificando questi apparecchi, ora partendo da altri principi, si cercò di costruire strumenti, quali le arti li richiedono, più robusti e di più facile impiego. Si propose così agli industriali una bussola de' seni ridotta a minime proporzioni, <sup>3</sup> la quale fu usata in qualche linea telegrafica ma che non riuscì ad avere altre applicazioni. Non meno infelice successo ebbero il galvanometro di Fabre e Cunemann, <sup>4</sup> in cui deducesi l'intensità della corrente dalla distanza, resa variabile, del moltiplicatore dall'ago e la *bilancia reometrica* di Régnard, <sup>5</sup> ove l'ago sospeso verticalmente al centro di un quadro verticale riducevasi in ogni esperienza alla stessa posizione verticale con pesi posti ad una estremità di un leggiero giogo da bilancia ad esso solidario, ed altri congegni di simile natura, numerosissimi e che non potremmo qui enumerare.

Il solo strumento di misura, che, almeno oggidi, sia posseduto dalla maggior parte di quelli che applicano alle arti i fenomeni elettrici, è una *bussola ordinaria*. Quindi l'utilità di *potersi servire delle bussole ordinarie come di reometri*. De' metodi che possono condurre a questo risultato tacciono, o quasi, gli ordinari manuali di fisica, ed è perciò, che non credo inopportuno, scrivendo in un periodico industriale, accennare ad alcuni, indicando come, e con quali modificazioni si possa, a mio avviso, trarre partito dai principi, che li suggerirono, nelle pratiche applicazioni dell'elettrologia.

Qualunque sia la disposizione di una bussola, quando, fatta passare per le spire del suo moltiplicatore una corrente costante, l'ago si tenga inclinato, rispetto ad un piano parallelo alle spire, di un angolo  $n$ , il momento dell'azione elettromagnetica esercitata dalla corrente sul magnete è uguale all'intensità  $i$  della corrente moltiplicata per una funzione  $f(n)$  di quest'angolo. L'ago si pone in equilibrio quando il valore di

<sup>1</sup>	Du MONCEL,	<i>Exposé des applications de l'électricité</i> ,	I,	pag. 425.
<sup>2</sup>	"	"	"	I, " 428.
<sup>3</sup>	"	"	"	I, " 433.
<sup>4</sup>	"	"	"	IV, " 160.
<sup>5</sup>	"	"	"	IV, " 162.

questo prodotto è uguale al momento, con cui il magnetismo terrestre tende a ricondurlo nel meridiano magnetico. Dicesi  $N$  l'angolo, che l'ago fa col meridiano magnetico nella sua posizione di equilibrio,  $T$  l'intensità del magnetismo terrestre,  $\mu$  il momento magnetico dell'ago,  $k$  una costante, il cui valore dipende dall'unità scelta per misurare le intensità, e si avrà nell'equilibrio:

$$i f(n) = k \mu T \operatorname{sen} N, \quad (1)$$

oppure

$$i = k \mu T \frac{\operatorname{sen} N}{f(n)}, \quad (2)$$

la quale formola diventa, quando la bussola sia stata posta inizialmente a zero, per cui  $n = N$ ;

$$i = k \mu T \frac{\operatorname{sen} n}{f(n)} = k \mu T F(n). \quad (3)$$

La forma della funzione  $f(n)$  e quindi della  $F(n)$  non è nota *a priori*, che pei casi semplici della bussola delle tangenti e della bussola dei seni, pella prima delle quali si ha

$$f(n) = \cos n, \quad F(n) = \operatorname{tang} n,$$

e per la seconda:

$$f(n) = \text{costante}, \quad F(n) = \text{costante} \cdot \operatorname{sen} n.$$

In tutti gli altri casi l'unica cosa, che si possa fare, è determinare con esperienze dirette una serie di valori dell'una di queste funzioni corrispondenti ad una serie di valori dati ad  $n$ .

Sia che si consideri la funzione  $f$ , sia che si consideri, come usasi più spesso, la  $F$ , la tabella dei valori misurati di questa funzione, dai quali si possono per interpolazione dedurre gli intermedi, oppure la curva, che la rappresenta, dicesi la *scala* della bussola. Avuta una volta la scala, la bussola servirà senza altro come un vero reometro finchè non saranno avvenute variazioni nella distribuzione del magnetismo sull'ago, ed un'unica esperienza fatta una volta per sempre darà la *costante*  $k \mu T$  della bussola, e servirà a ridurre le misure fatte colla medesima all'unità *elettrolittica* od a quale si voglia altra unità determinata.

Se si avesse oltre alla bussola da studiarsi anche una bussola già graduata od una bussola delle tangenti o dei seni, non si

avrebbe che da porla colla prima in un circuito, e trasmettere in questo circuito una corrente, di cui si farà variare l'intensità con resistenze aggiunte. Basterà allora leggere ad ogni esperienza le deviazioni date dalla bussola e dal reometro per poter costruire la scala.

Ma noi vogliamo supporre di non possedere reometri nè bussole già graduate, ed a questo metodo troppo ovvio ci basterà avere accennato. All'impiego di reometri si può sostituire quello del voltmetro, ed un voltmetro può sempre facilmente improvvisarsi. Ma noi vogliamo anche supporre che si voglia evitare la noia ed anche la difficoltà di effettuare con un processo sì lento la misura di una serie di intensità numerose quale la richiederebbe la formazione di una scala.

Invece di misurare con un reometro elettromagnetico o con un voltmetro l'intensità della corrente di mano in mano che questa si fa variare coll'aggiungere al circuito gradatamente nuove resistenze, si può approfittare della legge di Ohm per calcolare le stesse intensità in funzione di queste resistenze. Se perciò si ha a propria disposizione un reostato od un apparecchio a rocchetti di resistenza, si potranno sopra questo principio fondare svariatisimi processi per la formazione delle scale graduate delle bussole.

Un metodo di questa natura è per esempio il seguente, stato suggerito recentemente dal professore Codazza. Abbiasi un elemento voltaico del quale si conoscano per esperienze preventive le costanti  $E =$  forza elettromotrice ed  $R =$  resistenza. Se ne congiungano i poli con un circuito, nel quale sia interposta la bussola, di cui si vuol fare la scala, e sia nota pure per esperienze preventive la resistenza  $r$  di questo circuito, la bussola compresa. L'intensità della corrente trasmessa sarà:

$$I = \frac{E}{R + r}.$$

Si aggiunga al circuito una resistenza  $x = (I - \mathbf{1})(R + r)$ , e sarà:

$$\frac{E}{R + r + x} = \frac{\mathbf{1}}{I} \frac{E}{R + r} = \mathbf{1}$$

la nuova intensità. La deviazione  $\omega$  dell'ago della bussola corrisponderà adunque all'intensità  $\mathbf{1}$ . Allora sarà facile ottenere delle intensità determinate; detta difatti  $\mathbf{z}$  la resistenza  $R + r + x$ ,

non si avrà che da aggiungere ancora al circuito una resistenza  $\gamma$  calcolata mediante la formola :

$$\gamma = \frac{n}{m} E - \rho$$

e l'intensità della corrente diventerà :

$$\frac{E}{\rho + \gamma} = \frac{m}{n}.$$

Si potranno con ciò ottenere tutti i multipli e submultipli dell'unità di intensità, e determinando per ciascun valore di  $\gamma$ , ossia del rapporto  $\frac{n}{m}$  l'angolo di deviazione, si otterrà la scala graduata delle intensità corrispondente alla scala delle deviazioni. Il metodo è evidentemente anche applicabile ai galvanometri ad aghi astatici.

Un tale processo semplice ed elegante richiede però l'uso del voltmetro, di cui si sia misurata la resistenza, per misurare le costanti  $E$  ed  $R$ . In altra occasione mostrerò come, applicando le proprietà dei circuiti derivati, si possono ottenere le dette costanti senza ricorrere al voltmetro. Sarà però sempre necessario l'uso di un reostato capace di misurare le più piccole resistenze, apparecchio, che non è alla mano di tutti. Simile inconveniente hanno i numerosissimi altri sistemi, di cui si è tratto partito nelle scienze, fra i quali citeremo i metodi stati proposti da Bequerel, Nobili, Melloni, Petrina, Jacobi, Wheatstone, i quali per altro presentano per noi poco interesse.

Per l'incontro gli studi di *Poggendorff*<sup>1</sup> sull'impiego del galvanometro nella misura delle intensità non solo presentano un vero interesse scientifico, ma si fondano sopra un principio, del quale si possono, a mio avviso, fare applicazioni utilissime anche nelle ricerche di natura essenzialmente tecnica.

Coll'esattezza, che richiedesi nelle ricerche scientifiche, questo metodo non è applicabile che a quegli apparecchi delicati, che sono così foggiate da potersi la tavoletta, su cui è fissato il quadro colle spire, far ruotare attorno ad un asse verticale perfettamente coincidente coll'asse di rotazione dell'ago, in modo che con apposita graduazione si possa misurare l'angolo di cui il tutto si è fatto girare; ma, con leggiere modificazioni, esso si può, a

<sup>1</sup> POGGENDORFF, *Annalen*, LXII, 499. — FEILITZSCH, *Die Lehre von den Fernwirkungen des galvanischen Stromes*, pag. 69.

mio avviso, applicare con tutta facilità ad un gran numero di bussole ordinarie, non certamente con uguale esattezza, ma con quel grado di precisione che basta d'ordinario ai bisogni della pratica.

Ecco intanto in che cosa consiste il metodo di Poggendorff. Dalla formula (1) si ha :

$$f(n) = \frac{k \mu T}{i} \text{sen } N,$$

e se si fa passare pel moltiplicatore una corrente di intensità  $i_0$ , costante, se ne deduce, dicendo  $K$  una costante :

$$f(n) = K \text{sen } N. \quad (7)$$

Basta adunque trovar modo di misurare per una serie di valori di  $n$ , ossia dell'inclinazione dell'ago rispetto ad un piano parallelo alle spire del moltiplicatore, la serie de' valori corrispondenti di  $N$ , ossia dell'angolo, che, nello stato d'equilibrio, l'ago stesso fa col meridiano magnetico. Ed è ciò che fece Poggendorff.

Il galvanometro, la cui tavola era girevole attorno ad un asse verticale esattamente coincidente coll'asse di rotazione dell'ago, veniva munito di un circolo graduato reso solidario alla tavola stessa e disposto in modo, che quando le spire erano parallele al meridiano magnetico, lo zero della graduazione si trovasse di fronte ad un indice fisso. Quest'indice poteva così notare gli angoli, che il piano delle spire (diremo così un piano qualunque parallelo a queste) faceva in ogni esperienza col meridiano magnetico. Verificato, che, quando per le spire non era trasmessa alcuna corrente, l'ago e l'indice segnavano entrambi zero, facevasi passare pel moltiplicatore una corrente costante, la cui intensità assumevasi come unità. Poggendorff si serviva di una corrente termo-elettrica data da una coppia rame-platino scaldata da una parte in un bagno di sabbia. Le cose erano disposte in modo, che sotto l'influenza di questa corrente l'ago prendesse una posizione media fra lo zero e quella estrema a cui volevasi estendere la scala. Facendo allora ruotare tutto l'apparecchio attorno al suo asse si arrivava a ricondurre lo zero della graduazione della bussola a coincidere coll'estremità dell'ago. L'indice fisso segnava in questa posizione del galvanometro un certo angolo. Diminuendo quest'angolo arrivavasi ad un punto in cui l'ago segnava un piccolo numero di gradi, p. e. 5°. Leggevasi il nuovo angolo segnato dall'indice fisso e si ricominciava a far diminuire quest'angolo finchè l'ago segnasse 10°. Leggevasi di nuovo l'angolo segnato dall'indice

fisso, e così si procedeva finchè l'angolo segnato dall'ago fosse l'estremo a cui si voleva spingere la scala. Se ora noi diciamo  $n$  gli angoli successivamente dati dall'ago, ed  $m$  quelli corrispondenti dati dall'indice fisso, e se prendiamo  $m$  positivo o negativo secondochè il moltiplicatore si è fatto girare nel senso stesso in cui è deviato l'ago, oppure nel senso contrario, sarà  $n$  l'angolo, che per ogni esperienza l'ago fa col piano del moltiplicatore, e la somma algebrica:

$$N = n + m$$

sarà l'angolo che nella stessa esperienza e nella posizione di equilibrio esso fa col meridiano magnetico. Mettendo questo valore nella (7):

$$f(n) = K \operatorname{sen}(n + m) = \frac{k \mu T}{i_0} \operatorname{sen}(n + m),$$

essendo, come si è detto,  $i_0$  l'intensità scelta per unità; e sostituendo nella (3) ad  $f(n)$  questo suo valore, si ottiene:

$$\frac{i}{i_0} = \frac{\operatorname{sen} n}{\operatorname{sen}(n + m)}. \quad (8)$$

Si calcolino adunque per mezzo dei valori di  $m$  misurati i corrispondenti valori di  $\frac{\operatorname{sen} n}{\operatorname{sen}(n + m)}$  e si pongano in una tabella accanto ai corrispondenti valori di  $n$  e sarà questa tabella la *scala* della bussola.

Ho detto che lo stesso principio potevasi applicare ad un grande numero di bussole ordinarie con un'esattezza, che, sebbene non rigorosa come col procedimento descritto, convenga ai bisogni della pratica. Basta a questo scopo, che la bussola sia orizzontale e che non sia fissa sul tavolo o su altri apparecchi, ma che sia invece facile a spostarsi colla mano in modo da cambiarne a volontà l'orientazione. In queste circostanze si inserirà nel circuito un interruttore, e si faranno, per ogni coppia di valori di  $n$  ed  $m$  da determinarsi, ordinatamente queste operazioni:

1.° Chiuso il circuito si farà girare la bussola colla mano finchè l'ago segni l'angolo  $n$  prestabilito, la qual cosa si otterrà facilmente dopo alcuni tentativi.

2.° Aperto il circuito si lasci che l'ago si ponga in riposo nel meridiano magnetico, e si legga allora l'angolo che esso segna sulla graduazione. Evidentemente quest'angolo sarà  $m$  preso col segno contrario.

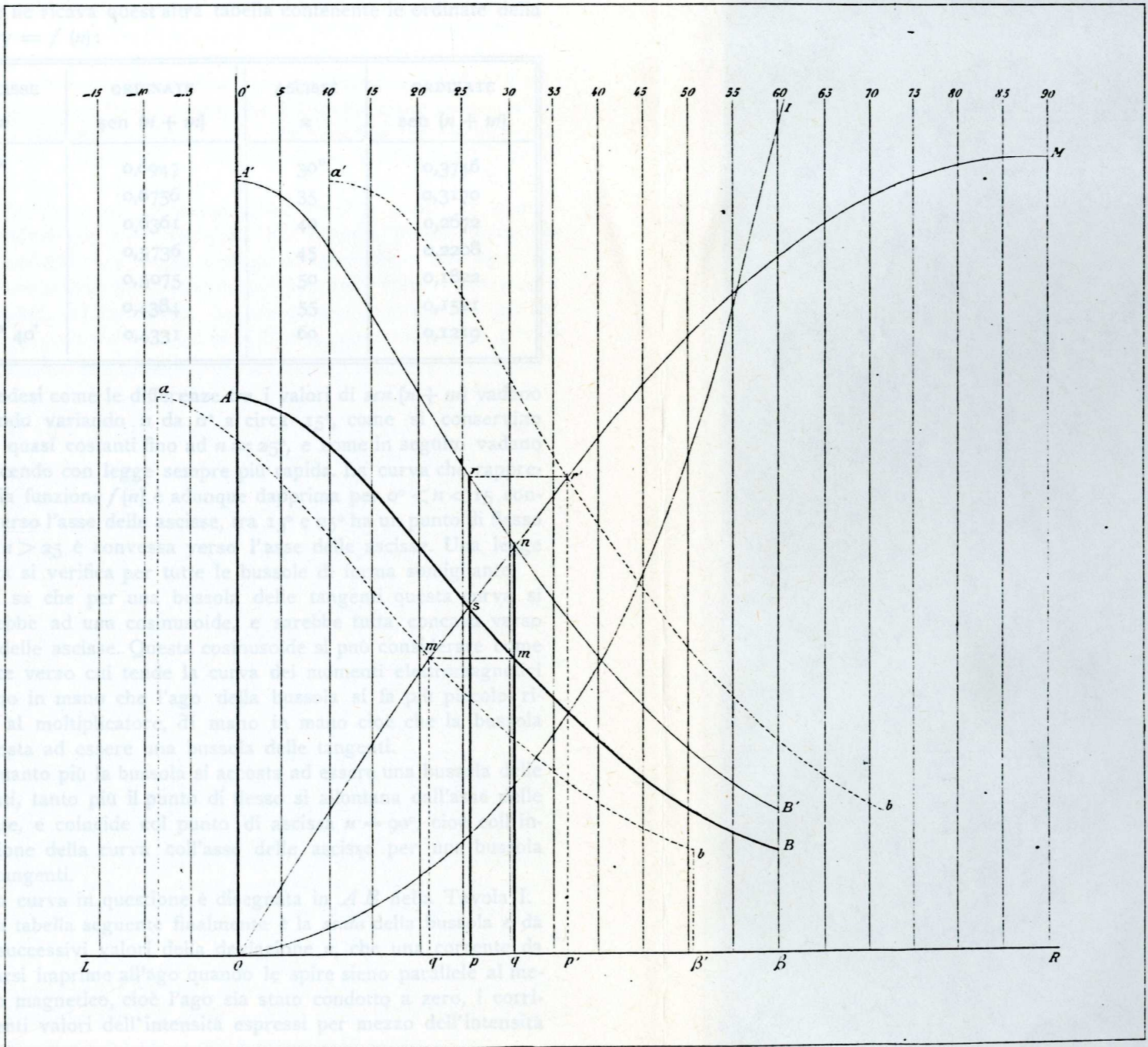


3.° Per accertarsi che l'intensità della corrente non ha variato durante l'esperienza, si torni a chiudere il circuito e si veda se l'ago torni a segnare l'angolo  $n$ . Allora facendo girare lentamente la bussola, si conduca sotto all'ago la divisione  $n'$  e si ripetano le stesse operazioni tante volte quanti sono gli angoli  $n$  per cui vuoi determinare l' $m$  corrispondente.

A provare l'attuabilità di questo procedimento, piacemi riportare qui i risultati ottenuti da me applicandolo ad una delle bussole possedute dal gabinetto di fisica del Museo Industriale. La bussola è costruita da Ruhmkorff, ha per lunghezza esterna delle spire  $139^{\text{mm}},00$ , per altezza esterna delle medesime  $51^{\text{mm}},00$  e per larghezza orizzontale  $36^{\text{mm}},00$ . Queste spire si appoggiano internamente sopra un astuccio rettangolare di rame grosso  $5^{\text{mm}},00$ , servente da *spegnitore* ed avente una sezione retta interna delle dimensioni di  $97^{\text{mm}},00$  per  $14^{\text{mm}},00$ . L'ago che si muove al centro di quest'astuccio ha una lunghezza inferiore solo di  $2^{\text{mm}}$  alla lunghezza interna del medesimo, cioè la lunghezza di  $95^{\text{mm}},00$ . Le spire sono fatte con un filo di rame coperto di seta avente il diametro di  $1^{\text{mm}},5$ , e sono costituite da due fili che si possono usare separatamente ovvero congiungere in tensione od in quantità. La resistenza totale de' due fili uniti in tensione, si è trovata di  $0,31$  unità Siemens, epperò sarà  $0,155$  unità Siemens la resistenza di ciascun filo. La scala è stata fatta facendo passare la corrente per l'uno soltanto de' due fili, ed ecco il quadro dei valori di  $m$  trovati per la serie degli angoli  $n$  procedente di  $5^\circ$  in  $5^\circ$ , da  $0^\circ$  fino a  $60^\circ$ . Non si potè procedere oltre al  $60^\circ$  grado perchè il quadro impedisce all'indice unito all'ago ad angolo retto di deviare oltre a  $64^\circ$  circa.

ANGOLI OSSERVATI		$N$ $=n+m$	ANGOLI OSSERVATI		$N$ $=n+m$
$n$	$m$		$n$	$m$	
$0^\circ$	+ $44^\circ 00'$	$44^\circ 00'$	$30^\circ$	- $8^\circ 00'$	$22^\circ 00'$
5	+ $37 30$	$42 30$	35	- $16 30$	$18 30$
10	+ $29 30$	$39 30$	40	- $24 30$	$15 30$
15	+ $20 30$	$35 00$	45	- $32 15$	$12 45$
20	+ $10 30$	$30 30$	50	- $39 30$	$10 30$
25	+ $1 00$	$26 00$	55	- $46 15$	$8 45$
$25^\circ 40'$	0 00	$25 40$	60	- $53 00$	$7 00$

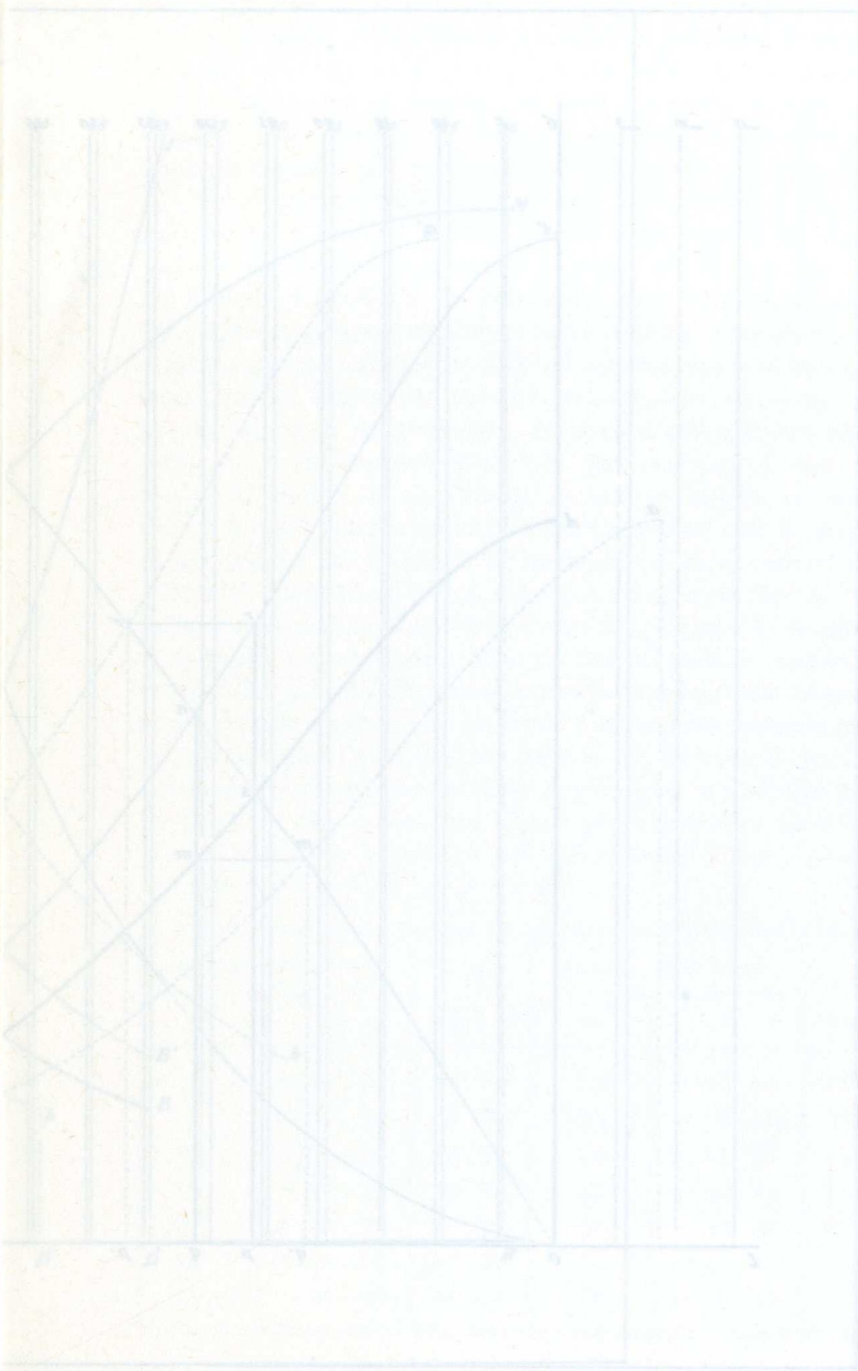
*nelle misure delle intensità galvaniche.*



Galileo Ferraris Opere

Ulrico Hoepli Editore-Milano

*Sull' impiego delle bussole ordinarie nelle misure delle intensità galvaniche*



10  
 20  
 30  
 40  
 50  
 60  
 70  
 80  
 90  
 100  
 110  
 120  
 130  
 140  
 150  
 160  
 170  
 180  
 190  
 200  
 210  
 220  
 230  
 240  
 250  
 260  
 270  
 280  
 290  
 300  
 310  
 320  
 330  
 340  
 350  
 360  
 370  
 380  
 390  
 400  
 410  
 420  
 430  
 440  
 450  
 460  
 470  
 480  
 490  
 500  
 510  
 520  
 530  
 540  
 550  
 560  
 570  
 580  
 590  
 600  
 610  
 620  
 630  
 640  
 650  
 660  
 670  
 680  
 690  
 700  
 710  
 720  
 730  
 740  
 750  
 760  
 770  
 780  
 790  
 800  
 810  
 820  
 830  
 840  
 850  
 860  
 870  
 880  
 890  
 900  
 910  
 920  
 930  
 940  
 950  
 960  
 970  
 980  
 990  
 1000

2.1. 2.2. 2.3. 2.4. 2.5. 2.6. 2.7. 2.8. 2.9. 3.0. 3.1. 3.2. 3.3. 3.4. 3.5. 3.6. 3.7. 3.8. 3.9. 4.0. 4.1. 4.2. 4.3. 4.4. 4.5. 4.6. 4.7. 4.8. 4.9. 5.0. 5.1. 5.2. 5.3. 5.4. 5.5. 5.6. 5.7. 5.8. 5.9. 6.0. 6.1. 6.2. 6.3. 6.4. 6.5. 6.6. 6.7. 6.8. 6.9. 7.0. 7.1. 7.2. 7.3. 7.4. 7.5. 7.6. 7.7. 7.8. 7.9. 8.0. 8.1. 8.2. 8.3. 8.4. 8.5. 8.6. 8.7. 8.8. 8.9. 9.0. 9.1. 9.2. 9.3. 9.4. 9.5. 9.6. 9.7. 9.8. 9.9. 10.0.

Se ne ricava quest'altra tabella contenente le ordinate della curva  $y = f(n)$ :

ASCISSE	ORDINATE	ASCISSE	ORDINATE
$n$	$\text{sen}(n + m)$	$n$	$\text{sen}(n + m)$
0°	0,6947	30°	0,3746
5	0,6756	35	0,3170
10	0,6361	40	0,2672
15	0,5736	45	0,2208
20	0,5075	50	0,1822
25	0,4384	55	0,1521
25° 40'	0,4331	60	0,1219

Vedesi come le differenze tra i valori di  $\text{sen}(n + m)$  vadano crescendo variando  $n$  da 0° a circa 15°, come si conservino poscia quasi costanti fino ad  $n = 25^\circ$ , e come in seguito vadano decrescendo con legge sempre più rapida. La curva che rappresenta la funzione  $f(n)$  è adunque dapprima per  $0^\circ < n < 15^\circ$  concava verso l'asse delle ascisse, tra  $15^\circ$  e  $25^\circ$  ha un punto di flesso e per  $n > 25^\circ$  è convessa verso l'asse delle ascisse. Una legge analoga si verifica per tutte le bussole di forma somigliante.

Si sa che per una bussola delle tangenti questa curva si ridurrebbe ad una cosinusoide, e sarebbe tutta concava verso l'asse delle ascisse. Questa cosinusoide si può considerare come il limite verso cui tende la curva dei momenti elettromagnetici di mano in mano che l'ago della bussola si fa più piccolo rispetto al moltiplicatore, di mano in mano cioè che la bussola si accosta ad essere una bussola delle tangenti.

Quanto più la bussola si accosta ad essere una bussola delle tangenti, tanto più il punto di flesso si allontana dall'asse delle ordinate, e coincide col punto di ascissa  $n = 90^\circ$ , cioè coll'intersezione della curva coll'asse delle ascisse per una bussola delle tangenti.

La curva in questione è disegnata in  $AB$  nella Tavola I.

La tabella seguente finalmente è la *scala* della bussola e dà per i successivi valori della deviazione  $n$ , che una corrente da misurarsi imprime all'ago quando le spire sieno parallele al meridiano magnetico, cioè l'ago sia stato condotto a zero, i corrispondenti valori dell'intensità espressi per mezzo dell'intensità

della corrente usata nelle esperienze (quella data da un elemento *Leclanché*), presa come unità.

DEVIAZIONE <i>n</i>	INTENSITÀ $\frac{\text{sen } n}{\text{sen } (n + m)}$	DEVIAZIONE <i>n</i>	INTENSITÀ $\frac{\text{sen } n}{\text{sen } (n + m)}$
0°	0,000	30°	1,335
5	0,129	35	1,808
10	0,273	40	2,405
15	0,451	45	3,204
20	0,674	50	4,204
25	0,964	55	5,385
25° 40'	1,000	60	7,107

La curva delle intensità è stata mediante questo quadro disegnata in *O I*, prendendo per rappresentare l'unità di intensità la lunghezza di due centimetri.

Un tale procedimento modificato leggermente nel modo che si è detto, e reso con ciò applicabile a molti di quei casi in cui non richiedasi che l'approssimazione voluta dai bisogni delle arti, ha sopra tutti gli altri l'incalcolabile vantaggio di non richiedere altri strumenti che la bussola stessa che si vuol graduare. E siccome sono mille le maniere con cui per mezzo di un reometro e senza il sussidio di reostati si possono paragonare tra loro due resistenze, così chi abbia a sua disposizione una bussola ordinaria a cui il processo precedente possa essere applicato, potrà con quella sola effettuare la maggior parte delle misure sia di intensità, sia di resistenza, che gli potranno occorrere.

Al metodo di Poggendorff ci possono condurre anche considerazioni geometriche. Portiamo sopra un asse delle ascisse *L O R* (Tav. I) dall'origine *O* le deviazioni *n* dell'ago dal meridiano magnetico, e tracciamo una curva avente per ordinate i momenti, con cui il magnetismo terrestre tende a ricondurre l'ago nel meridiano medesimo. Questa, che noi diremo *curva magnetica*, è, come sappiamo, una senoide *O M*. D'altra parte, se supponiamo che il piano delle spire coincida col meridiano magnetico, che cioè la bussola sia stata condotta a zero, e se facciamo percorrere le spire da una corrente costante  $i_0$ , che noi vogliamo prendere come unità, l'azione esercitata da questa sul-

l'ago avrà per momento il prodotto dell'intensità  $i_0$  per una funzione di  $n$  rappresentabile con una curva  $AB$ . La ricerca di questa è il primo problema che noi ci proponiamo.

Perciò osserviamo che la curva *elettro-magnetica*  $AB$  non dipende, riguardo alla forma, che dall'inclinazione reciproca dell'ago e del piano delle spire, e non varia variando la posizione di queste rispetto al meridiano. Se le ascisse fossero prese proporzionali all'angolo del piano delle spire coll'ago la curva  $AB$  adunque non si cambierebbe facendo girare la bussola attorno al suo asse verticale. Ma essendo invece le ascisse proporzionali agli angoli dell'ago col meridiano, che è evidentemente la somma dell'angolo dell'ago colle spire e dell'angolo di queste col meridiano, facendo girare lo strumento sul suo asse, le ordinate della curva  $AB$  non cambieranno, ma tutte le ascisse dovranno essere accresciute dell'angolo per cui l'apparecchio si è fatto ruotare. Far ruotare la bussola a destra od a sinistra equivale quindi per noi a spostare di un'ugual quantità e nello stesso senso la curva *elettro-magnetica*  $AB$ . Durante questo movimento la curva  $AB$  sarà tagliata dalla curva *magnetica*  $OM$  in punti sempre diversi, ed è possibile mediante un tale trasporto far coincidere il punto di intersezione con qualsivoglia punto della curva  $AB$ . E se fosse possibile trovare con un'esperienza l'ordinata di ciascuno di questi punti d'intersezione, basterebbe accrescerne l'ascissa della quantità di cui, per ottenerlo, la curva si è dovuta spostare per avere così un punto della curva. Se per esempio la curva  $AB$  è stata spostata fino in  $ab$  di una quantità  $\beta\beta'$ , e se questa curva non fosse conosciuta, basterebbe sapere che essa nella sua nuova posizione taglia la curva magnetica  $OM$  in  $m'$ , per poterne subito trovare un punto  $m$ . Basterebbe prendere  $q'q = \beta'\beta$  e  $qm = q'm'$ . Ma i punti d'intersezione della curva magnetica colla curva *elettro-magnetica* nelle sue posizioni successive sono facili a determinarsi. Se infatti la corrente ed il magnetismo terrestre agiscono insieme, l'ago si porrà in una posizione di equilibrio per cui i due momenti dell'azione *elettro-magnetica* e di quella del magnetismo terrestre siano eguali. Cossicchè se si misura la deviazione  $oq'$  dell'ago, in questo caso questa sarà l'ascissa del punto d'intersezione delle due curve, e l'ordinata  $q'm'$  corrispondente della senoide  $OM$  sarà il valore comune ai due momenti. Accrescendo l'ascissa  $oq'$  dell'angolo  $q'q$ , di cui la bussola trovavasi girata nell'esperienza, e prendendo  $qm = q'm'$  si avrà un punto della curva. E come si è avuto un punto, si potrà ottenere la curva intiera.

Dicendo  $oq = n$ ,  $qq' = -m$ , sarà:

$$qm = q'm' = \text{sen } oq' = \text{sen } (oq - qq') = \text{sen } (n + m)$$

come avevamo trovato per altra via.

Suppongasi ora, che, le spire trovandosi nel meridiano magnetico, agisca sull'ago una corrente di intensità  $i$  diversa da  $i_0$ , e sia per esempio  $i > i_0$ . Per una medesima deviazione dell'ago il momento dell'azione elettro-magnetica mentre prima era:

$$i_0 f(n) \quad \text{sarà} \quad if(n),$$

epperò la curva  $A'B'$ , di cui esso è l'ordinata, si otterrà aumentando tutte le ordinate della curva  $AB$  nel rapporto  $i:i_0$ .

Per trovare adunque il rapporto  $\frac{i}{i_0}$  basterà saper trovare il rapporto di una sola ordinata della curva  $A'B'$  all'ordinata della curva  $AB$  corrispondente alla medesima ascissa.

Se ora, stando le spire nel piano del meridiano, sotto l'azione della corrente  $i$  l'ago prende la deviazione  $oq$ , siccome l'ago è in equilibrio, sarà  $qn$  l'ordinata corrispondente della curva  $A'B'$ , e per trovare l'intensità della corrente, cioè il rapporto  $\frac{i}{i_0}$  basterà saper trovare l'ordinata  $qm$  della curva normale  $AB$  corrispondente alla stessa ascissa. A questo scopo basterà sapere di che angolo  $qq' = -m$  la bussola debba essere fatta girare a sinistra perchè sotto l'azione della corrente minore  $i_0$  e del magnetismo terrestre l'ago si mantenga deviato dello stesso angolo  $n = oq$  sul piano delle spire, giacchè, secondo quello che si è detto, sarà allora  $qm = q'm'$ . L'intensità  $i$  starà adunque ad  $i_0$  nel rapporto:

$$\frac{i}{i_0} = \frac{qn}{q'm'} = \frac{\text{sen } oq}{\text{sen } oq'} = \frac{\text{sen } oq}{\text{sen } (oq - qq')} = \frac{\text{sen } n}{\text{sen } (n + m)},$$

come volevamo trovare.

In modo analogo si ragionerebbe quando fosse  $A'B'$  la curva corrispondente alla corrente normale, e la corrente da misurarsi fosse minore e corrispondente p. e. alla curva  $AB$ . In questo caso si immaginerebbe la curva  $A'B'$  trasportata verso la destra in  $a'b'$ , e si avrebbe:

$$\frac{i_0}{i} = \frac{ps}{p'r} = \frac{ps}{p'r} = \frac{\text{sen } op}{\text{sen } (op + p'p')} = \frac{\text{sen } n'}{\text{sen } (n' + m)}$$

Vedesi come la bussola dei seni non sia che una applicazione particolare del metodo descritto.