

Giuseppe Sartori

Adriano Paolo Morando¹

Evidenziata la profonda influenza esercitata su di lui da Galileo Ferraris, si propone l'opera dell'ingegnere elettrotecnico italiano Giuseppe Sartori. Ne emerge innanzitutto, direttamente associabile al pensiero del fisico matematico Luigi Donati, una ricerca fondazionale di assoluto rigore teorico e di ampio respiro applicativo. E, di pari importanza, un capillare ed innovativo lavoro progettuale, il cui livello, colto nel panorama italiano del tempo, vale senz'altro a collocare Sartori in una assoluta posizione di primissimo piano. Di particolare significato, al riguardo, è il suo motore autocompensato. La sua genesi, legata ad una più evoluta rilettura delle originarie nozioni ferrarisiane di fattore di potenza e di campo magnetico rotante, consente infatti di porre il Sartori addirittura tra i cultori di una "power - quality ante litteram".

Uno sguardo, anche sommario, alla sua biografia consente di focalizzare le ragioni particolari di questa sua "positiva atipicità" rispetto al panorama scientifico - tecnico italiano proprio di quegli anni. Laureato presso l'Istituzione Elettrotecnica Italiana Carlo Erba del Politecnico di Milano, in seguito Sartori si formò professionalmente a Trieste. In territorio asburgico, dunque; lontano cioè da quel "ristagno" culturale e soprattutto imprenditoriale che, in modo anche diffuso, caratterizzò invece l'Italia di fine Ottocento. Il suo successivo sodalizio, a Bologna, con Luigi Donati integrò infine, completandola, la concreta esperienza da lui maturata sul territorio con i fondamenti di quella Dynamical Theory maxwelliana con la quale, non senza difficoltà, la nascente ingegneria elettromagnetica iniziava a confrontarsi.

L'esito fu, negli anni '30, da lui redatto in collaborazione con il Donati stesso, il suo Trattato di Elettrotecnica. Con esso, per la prima volta in Italia, prendendo direttamente esempio dalla General Electric di Steinmetz e Berg, la fisica matematica postmaxwelliana veniva concretamente posta al servizio di un'ingegneria elettrotecnica collocabile nel momento della sua massima espansione metodologica ed applicativa. Con un risultato che, in termini di contenuti e di sensibilità didattica, può dirsi ancora attuale e del tutto fruibile. E certo, per la feconda e rara fusione tra scienza e tecnica di cui è espressione, adottabile a tutt'oggi come esempio.

«L'elettricità non soltanto è ovunque nella natura che ci circonda:
essa è in noi stessi, si potrebbe quasi affermare che essa è noi stessi.

Per millenni, tuttavia, l'abbiamo ignorata
e appena da un secolo e mezzo ne sospettiamo l'importanza».

(L. de Broglie)

Giuseppe Sartori nello scenario dell'Elettrotecnica italiana del suo tempo

G. Sartori [1] (fig.1) rientra a pieno titolo in quella Scuola Italiana di Elettrotecnica che, riferibile in particolare all'opera di R. Arnò [2], E. Jona [3], M. Ascoli [4] e G. Giorgi [5], ebbe in G. Ferraris (fig.2) la sua massima espressione [6]. Fu dunque uno di quegli ingegneri italiani che, interiorizzando l'insegnamento del Grande Piemontese, contribuirono, all'indomani della rivoluzione maxwelliana, a collocare su basi scientificamente rigorose l'evoluzione della nascente ingegneria elettromagnetica [7]. Sia in senso fondazionale che, successivamente, applicativo. Nel primo ambito recando preziosi perfezionamenti metodologici al processo di transizione che, in atto proprio in quegli anni, dall'elettromagnetismo teorico stava conducendo a quello tecnico. Nel secondo occupandosi invece, ad un più concreto livello progettuale, di conversione elettromeccanica e di trasmissione del lavoro elettrico.

Sotto quest'ultimo aspetto il suo motore asincrono autocompensato, oltre a collocarlo tra i più diretti ed autorevoli continuatori dell'opera di Ferraris, fa addirittura del Sartori, per la particolare attenzione progettuale che egli riservò al fattore di potenza del suo motore, uno degli "anticipatori" della moderna power - quality [8].

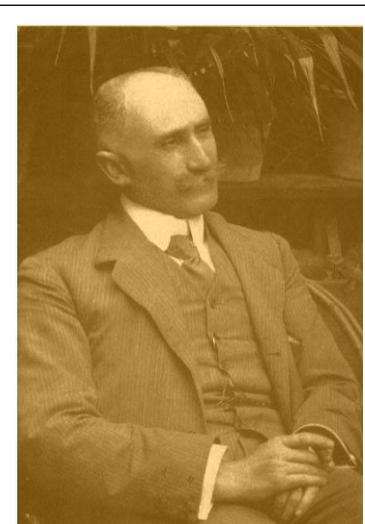


Fig.1. Giuseppe Sartori. Laureato presso l'Istituzione Elettrotecnica Carlo Erba del Politecnico di Milano, fu tra i più illustri continuatori dell'opera di Galileo Ferraris.

¹ Adriano Paolo Morando, Dipartimento di Elettrotecnica, Politecnico di Milano

In sostanza, espressione di una non comune formazione scientifica di base, Sartori seppe, in anni in cui - in Italia - risultò non del tutto inusuale un atteggiamento di “aristocratico distacco” del concepimento dell’idea dalla sua successiva realizzazione²,

tradurre tali conoscenze in un senso concretamente applicativo. Secondo un preciso modello metodologico che, superate ormai le incerte esperienze teoriche ed applicative proprie di un’esordiente ingegneria elettrica, già guardava con Steinmetz (fig.3) [12], a Schenectady, al centro di ricerca della General Electric³. In tale ottica, l’esemplare e non comune coerenza che, in Sartori, caratterizza la transizione dal suo originario testo “applicativo” sulle correnti alternate al successivo Grande Trattato da lui scritto in collaborazione con il fisico matematico Luigi Donati ne costituisce la conferma più ampia. Steinmetz coniugò il rigore del Politecnico Federale di Zurigo, dove si formò scientificamente, con la concretezza applicativa propria, negli Stati Uniti, di una nascente ingegneria elettrica da lui stesso sviluppata coniugando la scienza inglese di lord Kelvin⁴ e di O. Heaviside⁵ con l’inventiva americana di Edison. Gli fu in tal modo possibile esprimere appieno entrambe le sensibilità. Ma, escludendo il caso di alcuni discepoli della sua stessa scuola⁶, il suo caso restò però comunque quasi unico. E tale eccezionalità, a maggior ragione, risultò particolarmente riscontrabile nei riguardi del “caso italiano”, dove, per anni, le due distinte sensibilità, la scientifica e la tecnica, furono volutamente vissute – ed accuratamente mantenute – tra loro separate. E dove, con L. Donati [17,18] stesso, vi fu innegabilmente una classe di valenti fisici matematici che, “prestati” alla tecnica per esigenze essenzialmente accademiche⁷, non decisero mai di tramutarsi – con una “metamorfose” che riuscì invece ai matematici Steinmetz, J. Slepian e G.Kron⁸ - in ingegneri⁹.



Fig.2. Galileo Ferraris. Fisico matematico di formazione, fu lo scienziato - inventore che esprime la transizione da Maxwell – il filosofo – naturale e fisico teorico a Steinmetz, lo scienziato-ingegnere.

² È questo, ad esempio, il caso di G. Ferraris e di A. Righi [9-10]. Studiosi entrambi di altissima statura, nessuno dei due si preoccupò di dare seguito applicativo concreto agli esiti delle proprie scoperte scientifiche. Nel caso di Ferraris, in particolare, ciò accadde benché la teoria scientifica da lui elaborata per il trasformatore e per la macchina asincrona [11], del tutto estranea ad una “ricerca teorica fine a se stessa”, rientrasse consapevolmente in una ben più ampia strategia riconducibile alla rivoluzione industriale in atto. Secondo la visione di questi scienziati, compito dello studioso era, in modo quasi esclusivo, quello “elitario” di concepire l’idea generatrice. La successiva concreta attuazione del disegno teorico che vi era sotteso, del tutto estranea ai compiti del fisico matematico, andava vista come un momento successivo che, nettamente separato dal precedente, spettava invece ad altre competenze. Solo in seguito, con C.P. Steinmetz, a conferma di come, nel frattempo, la figura dell’ingegnere elettromagnetico, partendo proprio da Ferraris, avesse interamente compiuto la propria parabola evolutiva, i due successivi momenti si sarebbero invece integrati. Fino a fondersi, in modo definitivo, in un’unica figura professionale: quella del moderno ingegnere scientifico.

³ A Schenectady, il Centro di Ricerca della General Electric, di cui Steinmetz sarebbe stato l’artefice ed il *leader*, divenne, nella sua successiva integrazione con l’Union College, la fucina stessa della moderna ingegneria elettrica scientifica.

⁴ L’ingegneria per l’impianto idroelettrico di *Niagara Falls* fu infatti affidata a Steinmetz sotto la supervisione scientifica di Kelvin (fig.4). Era questa, sul finire dell’Ottocento, la conferma di come scienza e tecnica elettromagnetiche si stessero ormai finalmente integrando.

⁵ Il calcolo operatoriale di Heaviside (fig.5 - a) [13], cui successivamente Giorgi (fig.5-b) diede tutto il necessario rigore scientifico [14-15], divenne ben presto, per gli enormi vantaggi di algebrizzazione delle equazioni differenziali che esso offriva, uno dei temi di punta della ricerca applicata del gruppo di Steinmetz. Il suo *alter ego*, E.J. Berg (fig.5-c), affrontò in senso direttamente applicativo il problema e, nel farlo, oltre ad ispirarsi (per sua esplicita dichiarazione) agli studi dello stesso Giorgi, compì numerosi viaggi a Londra proprio per scambiare, in modo diretto, idee scientifiche con Heaviside su tale tema. Grazie al lungimirante impegno di Berg, a soli tre anni dalla Fisica Matematica di Giorgi (fig.5-d), la General Electric fu in grado di pubblicare, già nel ’29, con una concretezza ed una modernità ancora del tutto attuali, il primo trattato applicativo sulle L-traformate (fig.5-e) [16].

⁶ Risulta veramente difficile, per quanti e quali furono i contributi che essi lasciarono, indicare in modo esaustivo i Discepoli - Maestri di quella Scuola. Giusto per fissare le idee, basterà ricordare, tra i molti altri, R. Doherty, P. Alger, L. Bewley, E. Clarke e, con una particolare evidenza, G. Kron.

⁷ Luigi Donati insegnò a Bologna Fisica Matematica e tenne, per incarico, l’insegnamento di un’Elettrotecnica che, in quegli incerti anni di transizione, veniva ancora semplicisticamente vista come l’erede, in ambito elettrico, della vecchia

L'esempio offerto da Giuseppe Sartori – certo non del tutto inusuale a Schenectady, ma comunque quasi unico in Italia - assume dunque un suo particolare rilievo. Sul quale, riproponendone nel seguito una schematica biografia scientifica, non si potrà che riflettere attentamente. Sottolineando comunque fin d'ora, in particolare, come un ruolo non secondario, nella singolarità di tale evoluzione, sia stato giocato dal suo non usuale percorso formativo. Laureatosi nel “teresiano” Politecnico di Milano¹⁰, egli compì la sua successiva formazione professionale a Trieste. In un territorio che, pur politicamente e socialmente travagliato dall'irredentismo, fu comunque, in termini di decollo industriale, ben altrimenti aperto e dinamico¹¹. E non lontano, in particolare, da quella prestigiosa Ditta Ganz di Budapest con la quale aveva collaborato lo stesso Ferraris. Fino ad inviarvi, in alternativa all'Istituto Montefiore di Liegi, molti dei suoi più promettenti neo - laureati perché vi seguissero i corsi di perfezionamento nella neonata Elettrotecnica [3]. Ebbe dunque il Sartori, culturalmente e tecnicamente parlando, ciò che forse, all'indomani della scomparsa di Ferraris, mancò invece ad Arnò, a Jona, ad Ascoli. E certo, ancor di più, a Giorgi.



Fig.3. La cosiddetta “golden age” dell'ingegneria elettrotecnica fu inizialmente contrassegnata dal sodalizio, alla General Electric, tra Edison, l'inventore, e Steinmetz, lo scienziato. In seguito Steinmetz, soprannominato “the wizard” per i suoi “prodigi elettrici”, avrebbe riunito in sé entrambi i ruoli. Dalla sua fisica matematica, di rigorosa matrice tedesca, messa al servizio della tecnologia elettrica americana, sarebbe allora nata la moderna ingegneria elettrotecnica scientifica.

Fisica Tecnologica. In lui, come del resto nella maggior parte dei teorici italiani della sua generazione, non vi fu dunque mai, a differenza di quanto accadde invece a Schenectady, un'interazione diretta - e realmente feconda sul piano direttamente applicativo - tra una formazione scientifica di alto profilo e la quotidianità della concreta progettazione industriale.

⁸ Forse non del tutto a caso, tutti e tre questi “ingegneri”, ma si potrebbero citare anche altri esempi, venivano dalla laurea in matematica e si erano in seguito dedicati - addirittura, nel caso di Slepian, con una laurea alla *Sorbonne* - anche a filosofia. Del resto, laureato in ingegneria civile, lo stesso Ferraris, per la sua docenza, passò attraverso un'idoneità in matematica con la quale approfondì - in P. Tait, Kelvin ed H.L.F. von Helmholtz, i fenomeni diffusivi e successivamente, con A.J. Fresnel, l'ottica matematica. In seguito, teorizzando il trasformatore, saranno proprio le specifiche conoscenze teoriche da lui acquisite relativamente ai fenomeni ondulatori a consentirgli di elaborare la formula della potenza attiva $P=VI\cos\phi$. Questa, oltre a risultare di per sé essenziale per l'energetica dei circuiti in regime sinusoidale, consentì al Ferraris stesso di certificare come il rendimento dei trasformatori assumesse, nell'ottica preliminare della necessaria fattibilità energetica elettrica industriale, valori più che accettabili.

⁹ A Zurigo, Steinmetz ebbe una rigorosa preparazione fisico matematica. In seguito, entrato alla General Electric, finalizzò in modo diretto tali conoscenze alla sua ingegneria. Del resto proprio per questo, oggi, egli viene testualmente definito, soprattutto negli USA, come “il fisico matematico che decise di diventare ingegnere” [12]. A rendere possibile tale metamorfosi, oltre alle sue indubbie e peculiari doti, fu una diversa concezione trasversale della cultura scientifico-tecnica. E certo una realtà industriale ed imprenditoriale di ben altra potenzialità. Ferraris, altrettanto ferrato in fisica matematica, che pure ebbe con l'estero - si pensi alla Ditta Ganz di Budapest - contatti di collaborazione di primaria importanza, rimase invece sempre del tutto separato dal mondo produttivo. Né, nell'Italia del suo tempo, egli avrebbe forse potuto far diversamente. Solo nei suoi successivi viaggi di lavoro a Parigi, Francoforte e Boston, egli si mostrò particolarmente “attento” all'aspetto tecnico - applicativo. Ma ciò, non per caso, accadeva all'interno di ben altre dimensioni imprenditoriali ed applicative.

Occorre nel contempo osservare come, in una seconda fase della loro carriera, molti di questi tecnici - tra i quali si possono ricordare G. Kapp, E. Arnold, R. Doherty e gli stessi E.J. Berg e C.P. Steinmetz - abbiano lasciato l'industria per passare all'università. Ciò accadde nei successivi anni della loro piena maturità professionale, quando l'esperienza acquisita sul territorio aveva ormai del tutto forgiato la loro ingegneria ed era dunque tempo per loro, entrando nelle accademie, di trasferire le preziose conoscenze di cui erano portatori ai giovani.

¹⁰ Il Politecnico di Milano nacque, con legge Casati, nel giugno del 1863 [19], a quattro anni soltanto dall'uscita di scena, in Lombardia, degli Austriaci. Iniziò a svolgere le sue lezioni già nel settembre dello stesso anno. A costituire il personale docente, a pochi mesi dalla sua fondazione, concorse in larga misura la teresiana Società di Incoraggiamento Arti e Mestieri. Esso fu dunque espressione diretta di quell'*humus* culturale che, all'indomani del Congresso di Vienna, venne a costituirsi nella Milano asburgica.

¹¹ Franz Joseph, ad esempio, arrivò addirittura a conferire un'onorificenza a Ernst Mach per aver creato una cattedra di filosofia della scienza.

In questo senso, pensando ai viaggi di istruzione che, con grande beneficio, molti studiosi italiani del tempo andavano a compiere in territorio straniero, non è forse azzardato affermare che ciò avvenne, seppur in modo non del tutto canonico, anche per il Sartori stesso. Per le nozioni che, operando in ambito applicativo, egli apprese e perfezionò, tale può essere infatti considerata, in una forma alternativa rispetto ai viaggi di studio di G. Semenza, G. Reborà, C. Morelli e Jona, la sua iniziale, e certo non breve, permanenza in territorio asburgico.

Una breve riflessione preliminare: la scuola postferrariana

Comprendere appieno il percorso formativo compiuto, in ambito scientifico - tecnico, da Giuseppe Sartori implica dunque calarne preliminarmente l'opera in quei complessi e difficili anni che, in Italia, fecero seguito alla prematura scomparsa di Galileo Ferraris. Tale operazione, immediata solo in apparenza, cela in realtà non poche "insidie" che conviene siano tenute ben presenti. Del tutto sottovalutate in passato, esse derivano dal fatto che, a tutt'oggi, quel lontano periodo storico non può dirsi ancora sufficientemente indagato e chiarito. E questo non tanto in quelli che potrebbero anche definirsi i suoi limiti socio-culturali e scientifici, di per sé oggettivi ed ormai ben consolidati [20], quanto invece in quelli che, almeno in una seconda lettura, potrebbero invece essere anche considerati i suoi "inaspettati" pregi.

In passato l'analisi del contributo degli scienziati elettrici, risentendo la cultura italiana del primato umanistico, è risultata in larga misura frettolosa e, come tale, non sempre priva di lacune. Inoltre, privilegiando esplicitamente, in ragione di una dominante valenza nazionalistica, il "primato del genio italico", lo studio è stato esplicitamente agiografico. Con il risultato che, piuttosto riflettere, riguardandola come la causa della "fuga all'estero di invenzioni"¹²,



Fig.4. L'ingegneria della centrale di Niagara Falls, la prima grande sfida lanciata dalle nascenti tecnologie elettriche, fu affidata all'ingegner Steinmetz. La supervisione spettò però al fisico Kelvin.

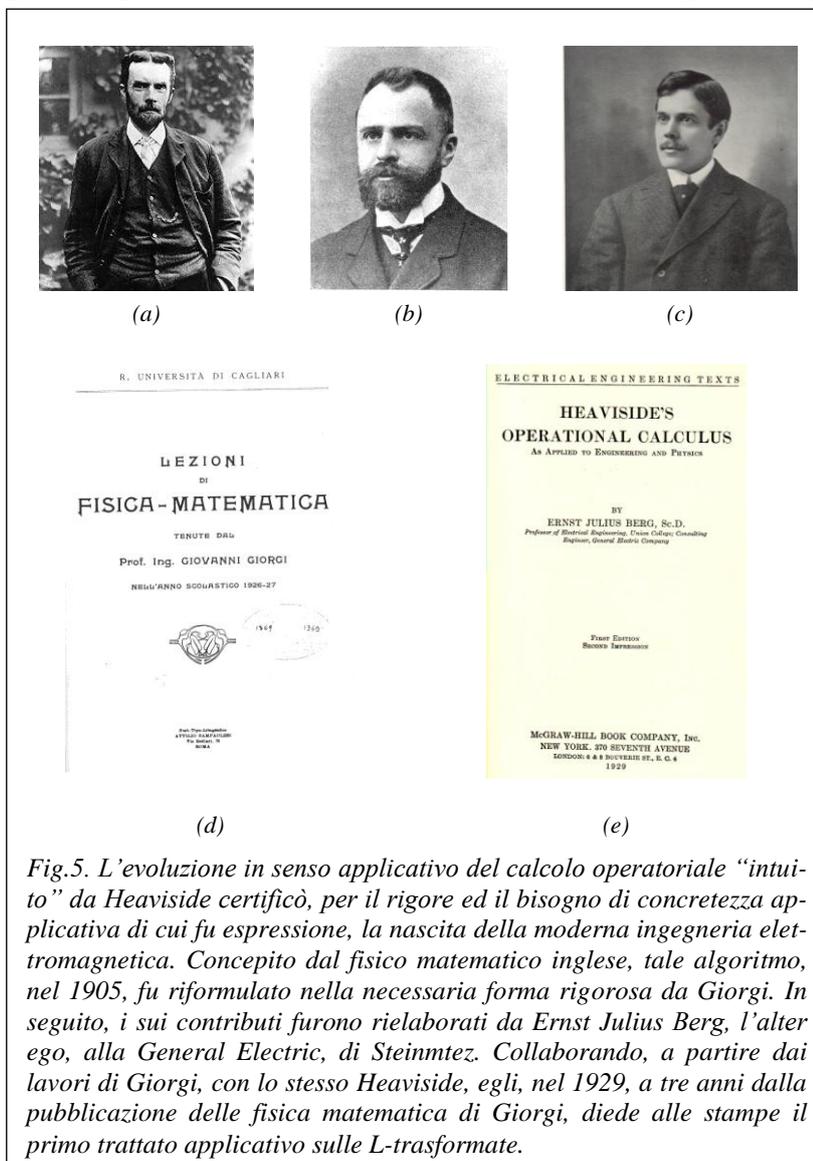


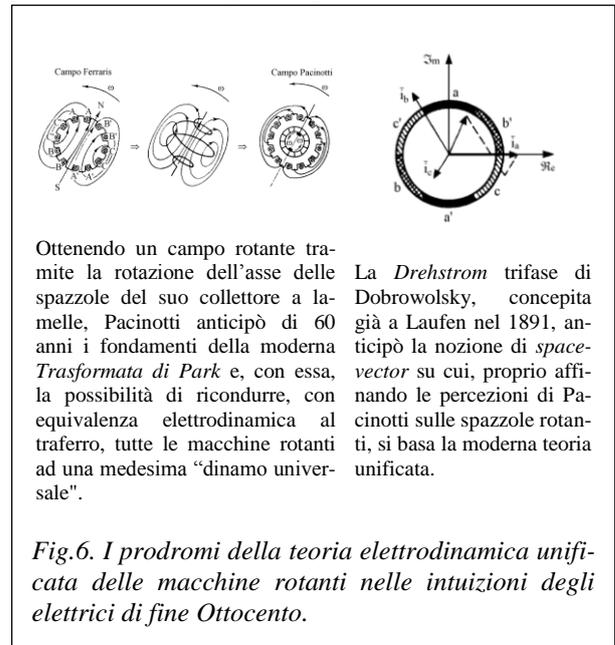
Fig.5. L'evoluzione in senso applicativo del calcolo operatoriale "intuito" da Heaviside certificato, per il rigore ed il bisogno di concretezza applicativa di cui fu espressione, la nascita della moderna ingegneria elettromagnetica. Concepito dal fisico matematico inglese, tale algoritmo, nel 1905, fu riformulato nella necessaria forma rigorosa da Giorgi. In seguito, i suoi contributi furono rielaborati da Ernst Julius Berg, l'alter ego, alla General Electric, di Steinmetz. Collaborando, a partire dai lavori di Giorgi, con lo stesso Heaviside, egli, nel 1929, a tre anni dalla pubblicazione della fisica matematica di Giorgi, diede alle stampe il primo trattato applicativo sulle L-trasformate.

¹² Fu questo, in particolare, il caso della dinamo di Pacinotti, del telefono di Meucci e della macchina asincrona del Ferraris.

sull'inadeguatezza dello scenario culturale, scientifico ed imprenditoriale del tempo, ci si è soffermati invece sulle immancabili trame dei "soliti stranieri cattivi", sempre pronti a "carpire genio e buona fede italici". Nel contempo, per quanto riguarda i singoli scienziati, sono state sbrigativamente archiviate come "semplici scoperte inattese" quelle che in realtà, quale meta voluta al termine di un preciso e coerente percorso concettuale, furono invece delle più che consapevoli, e tenacemente perseguite, invenzioni. Valga per tutte, a valle di un trasformatore atto a consentire l'impiego della corrente alternata, il caso esemplare della macchina a campo rotante. In tal modo, l'*humus* culturale nel quale, con ben precise implicazioni scientifiche, queste idee sono germogliate e si sono evolute è andato completamente ignorato. Il che, oltre a risultare di per sé causa di inevitabili inesattezze storiche, ha finito con il porre del tutto in ombra l'esistenza di una ben altrimenti feconda scuola italiana di elettromagnetismo teorico ed applicato.

Di A. Pacinotti [21], ad esempio, è stato frettolosamente - ed erroneamente¹³ - enfatizzato il collettore a lamelle (fig.6), mentre il suo effettivo, e ben altrimenti significativo, contributo alla "macchinetta dinamo-elettrica" associata a tale collettore è stato invece pressoché non compreso o taciuto. Oltre ai requisiti di reversibilità, in termini di un suo possibile funzionamento sia da generatore che da motore, della dinamo, dei contributi del fisico pisano sono stati infatti lasciati del tutto in ombra sia lo studio della dipendenza dell'ondulazione della tensione ai morsetti dal numero di lame del collettore, che le sue geniali intuizioni sulla forma più conveniente da assegnare all'indotto a tamburo¹⁴. In modo analogo, è passata del tutto sotto silenzio la possibilità, da lui esplicitamente evidenziata [22], di rendere rotante il campo magnetico al traferro della dinamo ponendone in rotazione l'asse delle spazzole ad esso solidale. Era il 1865; in seguito, nel 1929, su tale nozione sarebbe stata basata l'interpretazione fisica della Trasformata di Park, l'algoritmo su cui è fondata la moderna teoria unificata delle macchine elettriche [23-24]. In modo analogo, è corrispettivamente passato sotto silenzio il carattere, in qualche misura anche "lacunoso", proprio della teoria elettrodinamica della macchinetta elaborata dal fisico pisano¹⁵.

Analoghe considerazioni, con anche maggiore evidenza, valgono poi per Galileo Ferraris. La sua *Opera Omnia* [28], non più ristampata dal lontano 1902, attende a tutt'oggi una curatela capillare, che, estranea ad un'aneddotica di maniera, ne sappia finalmente evidenziare, in un'ottica strettamente fisico-matematica, quella molteplicità di contenuti che, di fatto presenti nella sua produzione scientifica, sono a tutt'oggi ancora lasciati in ombra. Sconosciuto ai più, ancor oggi Ferraris vie-



¹³ In realtà, seppur in una sua forma rudimentale a due sole lame, tale apparecchio era già stato interamente concepito e realizzato da Ampère.

¹⁴ Per la verità, anche la dinamo di Bartolomeo Cabella, costruita al Tecnomasio di Milano come versione perfezionata di quella precedente di Hopkinson ed Edison, non ha avuto, tra gli storici della scienza italiani, quell'attenzione che le geniali innovazioni (riconosciute esplicitamente dallo stesso Siemens) apportate al circuito magnetico le avrebbero invece fatto meritare.

¹⁵ Qualora, in una forma finalmente immune da tentazioni agiografiche e tale da privilegiare invece l'analisi fisico-matematica in senso stretto, l'indagine dell'opera pacinottiana fosse stata compiuta con la dovuta completezza, essa avrebbe utilmente mostrato come, in quegli incerti anni in cui l'Elettrotecnica stava compiendo i suoi primi passi, l'"immediatamente sensibile", implicito nella *Théorie Analytique de la Chaleur* di J.B. Fourier e fatto proprio dalla fisica tecnologica pisana, avesse ormai fatto il suo tempo. E come, una volta superato Fourier, agli effetti del progetto delle linee e degli apparecchi elettrici, lo studio rigoroso di Maxwell [25-26], ed ancor più di Heaviside [27], ormai non fosse più rinviabile.

ne infatti distrattamente ricordato solo per una non meglio identificata “scoperta” – mentre a pieno titolo si trattò invece di un’invenzione consapevolmente perseguita - del campo magnetico rotante.

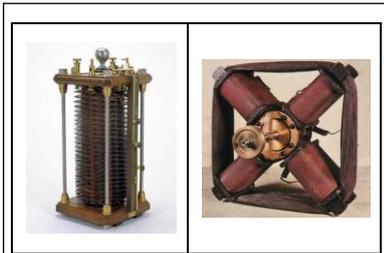


Fig.7. Finalizzati alla trasmissione della potenza elettrica e strettamente connessi tra loro, i contributi di Ferraris, cruciali per il decollo industriale, furono due: la teoria scientifica del trasformatore e, a seguire, l'invenzione del campo rotante.

coerente strategia energetica, due - ed altrettanto importanti - furono i contributi di Ferraris (fig.7): l’elaborazione della teoria del trasformatore e, a valle di questo, l’invenzione della macchina asincrona. La messa a punto cioè delle due macchine che, dando un preciso senso concreto alla trasmissione a distanza della potenza elettrica¹⁷, resero di fatto possibile la seconda rivoluzione industriale. Al riguardo andrebbe inoltre sottolineato come, in entrambi i casi, superando in questo la vecchia fisica tecnologica, Ferraris sia stato un maxwelliano di stretto rigore.

E come, proprio su tale rigorosa impostazione scientifica, egli abbia basato, divenendone in tal modo il vero fondatore, la moderna ingegneria elettrotecnica. Nel caso del trasformatore, egli respinse le teorie fin a quel momento abborraciate dai sedicenti tecnici del tempo e, da fisico matematico di rigorosa formazione, adottò invece, in modo diretto ed esplicito, il modello del mutuo induttore già elaborato da Maxwell nel 1864 nella sua *Dynamical Theory* [26-29] (fig.8). In modo analogo, nel caso del campo rotante (Fig.9), ben lontano in questo dalle semplici “percezioni” del Tesla, egli, a partire da una precisa conoscenza dell’ottica matematica di Fresnel, si basò in modo determinato sull’unificazione maxwelliana tra elettricità, magnetismo ed ottica implicita nelle sue equazioni del campo elettromagnetico. Del resto, anche la sua formula $P=VI\cos\varphi$ della potenza attiva

Della quale però, a conferma di come alla sua figura non sia stata ancora riservata la giusta attenzione, sono lasciate del tutto in ombra, oltre che le motivazioni tecniche preliminari, le metodologie scientifiche adottate. Con il risultato che, piuttosto considerarlo, nella storia dell’ingegneria elettrica, quale scienziato-inventore, come la figura intermedia tra Maxwell - il fisico matematico - e Steinmetz - il fisico matematico che diventa ingegnere - lo si è banalmente “contrapposto” ad un Tesla. Ignorando così come, formatosi su Maxwell, Helmholtz ed Heaviside, egli, per la sua attenzione ad una strategia energetica vista, all’interno del decollo industriale in atto in quegli anni, come fattore di sviluppo¹⁶, vada invece “maxwellianamente” collocato tra Cavour e Cattaneo. Neppure è stato posto nella dovuta evidenza il fatto che, legati tra loro da una comune e

A DYNAMICAL THEORY OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD. 539

Electromagnetic Relations of two Conducting Circuits.

(28) In the case of two conducting circuits, *A* and *B*, we shall assume that the electromagnetic momentum belonging to *A* is

$$Lx + My,$$

and that belonging to *B*, $Mx + Ny,$

where *L*, *M*, *N* correspond to the same quantities in the dynamical illustration, except that they are supposed to be capable of variation when the conductors *A* or *B* are moved.

Then the equation of the current *x* in *A* will be

$$\xi - Rx + \frac{d}{dt}(Lx + My) \dots \dots \dots (4),$$

and that of *y* in *B*. $\eta - Sy + \frac{d}{dt}(Mx + Ny) \dots \dots \dots (5),$

where ξ and η are the electromotive forces, *x* and *y* the currents, and *R* and *S* the resistances in *A* and *B* respectively.

E = f. elettromotrice della macchina magnetizzata
I, R, L. Prodotto delle correnti, la resistenza ed il coeff. d'induzione propria
il coeff. d'induzione reciproca
i', R', L' " " " " " " " " " " " "
M = coeff. d'induzione reciproca tra i due circuiti:

$$(1) \quad \begin{cases} RI + M \frac{dI}{dt} + L \frac{dI}{dt} = E \\ R'I' + M \frac{dI}{dt} + L' \frac{dI'}{dt} = 0 \end{cases}$$

Le pot. e l'ind. L, il coeff. d'induzione reciproca M sono delle macchine, e si riconoscono che le due grandezze dell'equazione (1) sono distribuite, per cui si ha:

$$(2) \quad L = L' + L_0$$

Fig.8. 1885: Ferraris formalizza le equazioni del trasformatore rifacendosi esplicitamente alle equazioni che, già vent’anni prima, Maxwell aveva elaborato nella sua *Dynamical Theory*. Dopo un lungo periodo di “latenza”, in cui, con risultati non di rado “incerti”, gli elettricisti avevano velleitariamente rivendicato una loro presunta autonomia rispetto al lascito maxwelliano, era questa la prima volta che uno scienziato-ingegnere, consapevolmente, si avvaleva della sua rigorosa formazione scientifica per applicare in senso tecnico i concetti, da tempo già consolidati, dell’elettromagnetismo.

¹⁶ Tale scelta è del resto già certificata dalla sua tesi di laurea, dedicata per l’appunto alle trasmissioni telodinamiche.
¹⁷ Il trasformatore, implicito nella legge di Faraday del 1831, consentì di elevare le tensioni generate dagli alternatori fino ai livelli necessari per effettuare, con un adeguato contenimento delle perdite, una trasmissione della potenza elettrica coprendo le grandi distanze che separavano i bacini di generazione dai centri di utilizzazione. Il motore asincrono rese possibile, all’arrivo della linea, la produzione in corrente alternata di quella stessa coppia meccanica all’albero che prima, in corrente continua, era invece affidata alle dinamo.

[28] era stata da lui direttamente dedotta dai lavori di Fresnel. Una fisica matematica, dunque, la sua, di alto e sicuro profilo, precisa nelle premesse e determinata nei chiari obiettivi energetici. E senza della quale, nel 1891, a Laufen (fig.10), il primo esperimento di trasmissione e conversione basato sulla tecnologia polifase non sarebbe risultato possibile.

Su questo preciso percorso concettuale, pur criticamente sorretto dalla chiara consapevolezza che in Ferraris, a differenza di quanto accadde invece con Pacinotti e con Marconi, ci fu separazione tra l'idea e la sua successiva attuazione, deve essere oggi riletto, e riscritto, quel periodo. Così da individuare, in quell'*humus* culturale, il filo conduttore postmaxwelliano che rese tra loro non isolate, ma addirittura consapevolmente ed intenzionalmente conseguenti, quella successione di conquiste.

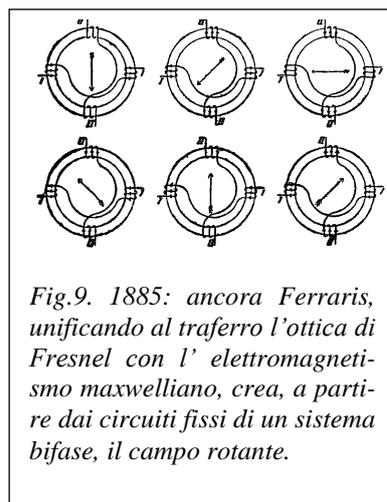


Fig.9. 1885: ancora Ferraris, unificando al traferro l'ottica di Fresnel con l'elettromagnetismo maxwelliano, crea, a partire dai circuiti fissi di un sistema bifase, il campo rotante.

L'attenta rilettura dei manoscritti inediti di Ferraris pone in luce, in una misura quasi inaspettata all'interno di un'elettrotecnica con buona sostanza ancora ai suoi primi passi, l'indole ed il rigore fisico matematico dell'opera del Piemontese. Evidenzia inoltre una modernità metodologica che solo la fisica matematica, enfatizzandola a tutto campo, è oggi concretamente in grado di elaborare e

di approfondire. Il suo teorema sui vettori controrotanti [28], ad esempio, derivato dall'ottica di Fresnel, anticipa già, lagrangianamente, le componenti simmetriche di C.L. Fortescue [30], su cui, dal 1918, si basa la moderna matematica trifase. E, in modo analogo, nell'analisi della conversione elettromeccanica, il suo utilizzo sistematico del teorema di equivalenza di A.M. Ampère consente già di trattare in un moderno modo unificato la genesi della coppia elettrodinamica al traferro del macchinario rotante avvalendosi del Teorema dell'Allineamento già espresso nella forma usata attualmente [31].

Le sue riflessioni sull'energetica, del tutto in linea con l'attualità del suo uso consolidato del teorema di J.H. Poynting [32], adombrano già quelle che, in parte anticipate dallo stesso Heaviside, sarebbero

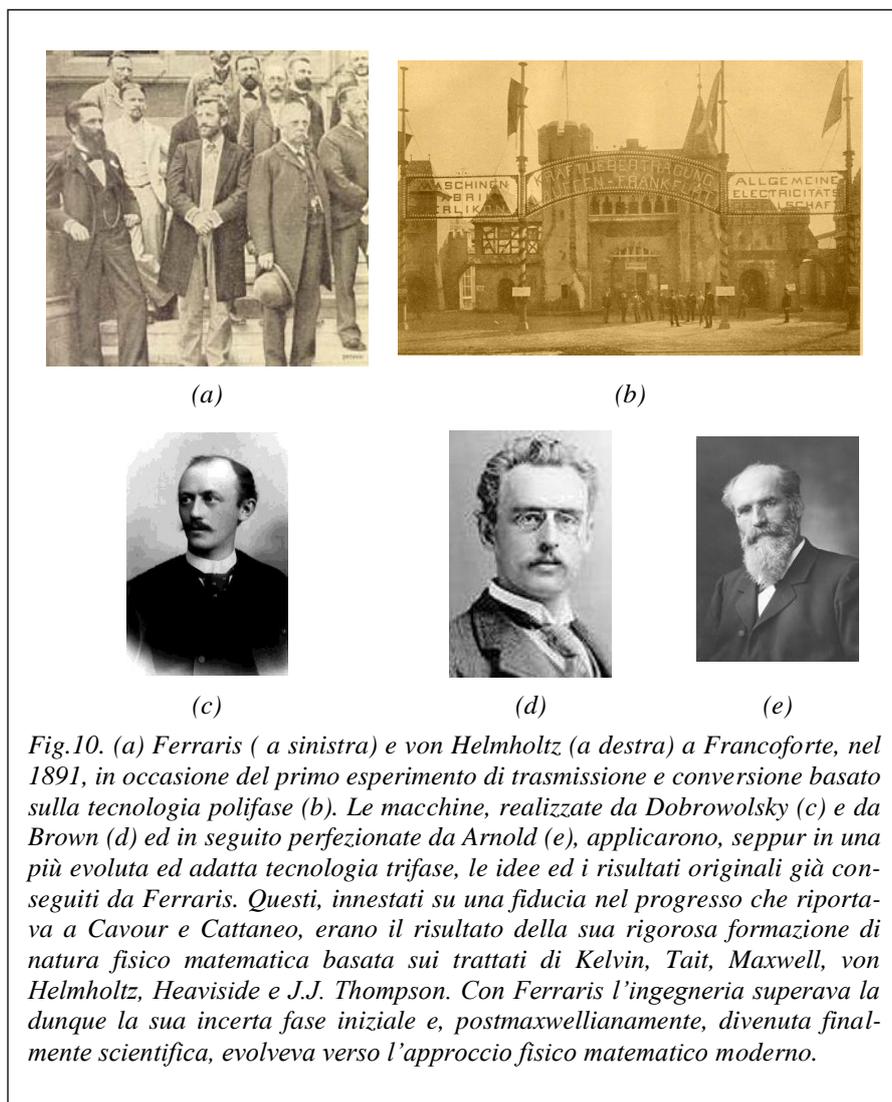


Fig.10. (a) Ferraris (a sinistra) e von Helmholtz (a destra) a Francoforte, nel 1891, in occasione del primo esperimento di trasmissione e conversione basato sulla tecnologia polifase (b). Le macchine, realizzate da Dobrowolsky (c) e da Brown (d) ed in seguito perfezionate da Arnold (e), applicarono, seppur in una più evoluta ed adatta tecnologia trifase, le idee ed i risultati originali già conseguiti da Ferraris. Questi, innestati su una fiducia nel progresso che riportava a Cavour e Cattaneo, erano il risultato della sua rigorosa formazione di natura fisico matematica basata sui trattati di Kelvin, Tait, Maxwell, von Helmholtz, Heaviside e J.J. Thompson. Con Ferraris l'ingegneria superava la dunque la sua incerta fase iniziale e, postmaxwellianamente, divenuta finalmente scientifica, evolveva verso l'approccio fisico matematico moderno.

state in seguito le moderne riflessioni sui lavori elettrici virtuali [33]. Per contro, le numerose minute scritte nel corso della stesura preliminare del trattato di elettrotecnica che aveva in animo di scrivere rivelano tutte le incertezze fondazionali e pedagogiche che egli visse e che, come risulta dai suoi stessi appunti, di fatto non superò mai. Per l'elettrotecnica il problema non era infatti reinventare un elettromagnetismo già esistente. Né, come alcuni orecchianti avevano fatto fino a quel momento, negarlo o mistificarlo. Era invece decidere, ed alla svelta, come usarlo. Magari aggiungendovi, laddove risultava necessario, qualche ulteriore sviluppo in senso applicativo.

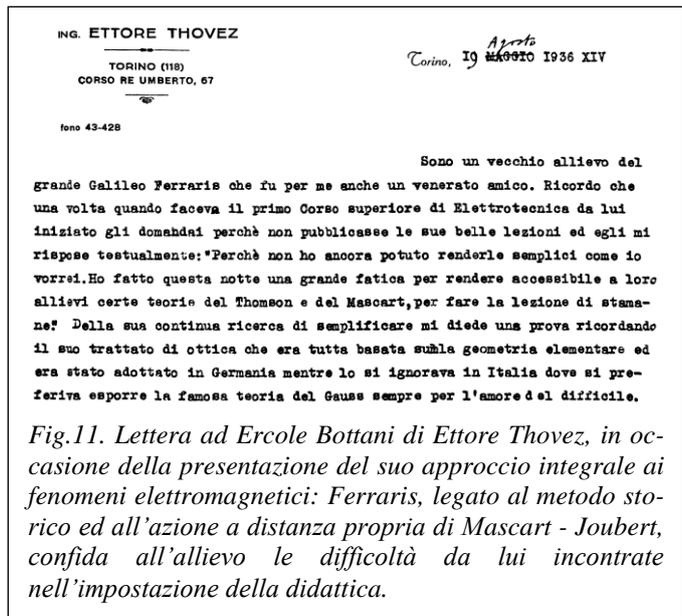
Più volte, e con comprensibile compiacimento, è stato sottolineato come Maxwell abbia deciso di imparare l'italiano per venire a parlare di elettromagnetismo con Matteucci. Tutto questo, però, oggi non basta più. Per comprendere appieno il contributo italiano all'elettrotecnica occorre nel contempo indagare su altri e paralleli aspetti. Innanzitutto sul fatto che esiste una scuola di pensiero che, attraverso F.O. Mossotti, il quale influenzò gli stessi Faraday e Maxwell, passa per G. Codazza fino a giungere a Ferraris. E da questo, attraverso Ascoli che ne fu allievo, a Giorgi. E dunque, più modernamente, ad E. Bottani e a G. Someda, i due capostipiti, rispettivamente, dei due possibili approcci, circuitistico e campistico, ai fenomeni elettromagnetici.

Seguendo quelle tracce seminascoste, si scopre allora che, se Pacinotti, anticipando le spazzole rotanti di Park, adombra una prima teoria unificata delle macchine elettriche rotanti, è Giorgi che, nel 1905 [34], introduce, con gli stessi scopi, la cosiddetta "dinamo ricorsiva" cui ogni altra macchina, anticipando in tal modo l'approccio di Kron, è concettualmente riconducibile. E che, se Ferraris non supera le difficoltà fondazionali incontrate nell'impostazione della sua elettrotecnica scientifica (fig.11), è ancora Giorgi, suo discepolo attraverso l'insegnamento di Ascoli, a risolvere in seguito, ed una volta per tutte [35], il problema.

Riscrivere la storia delle tecnologie elettriche di quel periodo significa riesaminare criticamente e con attenzione proprio questi aspetti. Così da collocarli internazionalmente, ed in modo definitivo, nella nascita di quella elettrotecnica scientifica di cui Ferraris va visto a pieno titolo come il fondatore.

Il 10 - marzo - 1925, nella sede di Milano dell'Associazione Elettrotecnica Italiana, Riccardo Arnò, discepolo e collaboratore di Ferraris tenne una conferenza dal titolo il "Funzionamento dei motori elettrici dimostrato col tubo di Braun" [36]. La sua esposizione si concluse osservando testualmente che « Pacinotti ha trovato il modo di mantenere fisso nello spazio un magnete ideale, pur essendone in rotazione il rispettivo supporto elettromagnetico materiale. Galileo Ferraris ha scoperto di mantenere in rotazione un magnete ideale, pur essendone fissi i supporti elettromagnetici materiali componenti. Su questi due principii riposano tutti i motori a corrente continua ed alternativa oggi funzionanti nella pratica industriale».

Era la sintesi di tutto quanto detto sopra. Mancano solo quattro anni alla trasformata di Park [37], con la quale, mediante funzioni del tempo espresse nel campo complesso, i modelli matematici di tutte le macchine rotanti assumeranno definitivamente una stessa, comune, forma. La conferenza di Arnò, sintetizzando un Ferraris formatosi su Maxwell e su Heaviside, già adombra tali risultati. Oggi, rileggere l'elettrotecnica italiana di quegli anni significa partire proprio da questa con-



sapevolezza. Chiunque sia, da A. Bartoli a G.A. Maggi, l'autore studiato. Giuseppe Sartori compreso.

Le origini

Figlio del cavalier Angelo e di Marianna Trosti, Giuseppe Sartori nasce a Lonigo, in provincia di Vicenza, il I – novembre - 1868¹⁸.

La predilezione per gli studi tecnici appare in lui giovanissimo. Anche per questo motivo, non essendoci comunque a Lonigo il Ginnasio, “attratto dai giochi nei quali c’era da sperimentare qualcosa”, frequenta le scuole tecniche. Si iscrive poi alla Scuola Tecnica Rossi di Vicenza che percorre brillantemente. Qui ha modo di imparare anche il lavoro manuale, cosa che, nel suo futuro ruolo di dirigente industriale, gli risulterà di grande vantaggio per dirigere e saper controllare il lavoro dei suoi collaboratori. Come in seguito lo stesso E. Bottani, il miglior diploma dell’Istituto Tecnico Feltrinelli di Milano, vivrà comunque sempre il rammarico, negli anni successivi, di non conoscere il latino.

La laurea in Elettrotecnica alla Carlo Erba ed i primi passi nella professione

Da Vicenza passa poi a Milano, in casa della sorella e del cognato. Qui si iscrive al Politecnico, negli anni in cui ne è ancora direttore il suo fondatore, Francesco Brioschi. Allievo diligentissimo della neonata Istituzione Elettrotecnica Italiana Carlo Erba (fig.12), ne frequenta con impegno sempre tutte le lezioni.



Fig.12. L’Istituzione Elettrotecnica Italiana Carlo Erba del Politecnico di Milano, nella sua prima sede “ai Boschetti”, presso via Palestro, a Milano, dove Sartori si laureò in Elettrotecnica.

Le prime ore della notte lo vedono infatti al tavolo di lavoro a riordinare i suoi appunti, redatti in modo così perfetto da sembrare, anche formalmente, libri di testo (figg.13-14). Non a caso, a quelle sue sudate pagine giovanili, in quegli anni di corso, avrebbero attinto non pochi colleghi.

Conseguita brillantemente nel 1890, a soli 22 anni, la laurea, sentendo una forte vocazione all’insegnamento, avrebbe voluto diventare assistente di elettrotecnica. Voleva però poter bastare a se stesso e, sapendo che il padre aveva già venduto della terra per mantenerlo agli studi, opta senz’altro per la professione (fig.15). Entra pertanto, a Milano, nello studio dell’Ing. E. Conti, dove si occupa del progetto di alcuni impianti elettrici per il Veneto. Suoi saranno infatti, su un arco professionale di cinque anni, gli impianti di Adria, Recoaro, Este, Montagnana e Legnago.

Il grand tour: la permanenza a Trieste

Quando il Direttore della Scuola Industriale di Trieste si rivolge al Senatore Colombo per chiedergli un giovane che potesse coprire la neoistituita cattedra di Elettrotecnica Industriale, Colombo, ben conoscendo l’ingegno e la serietà di Sartori, lo indica senz’altro con entusiasmo.

Con un atto senza precedenti nella storia di quello Stato, il Governo Austriaco permette allora che tale assunzione avvenga sollevando il Sartori dall’obbligo della rinuncia alla nazionalità italiana¹⁹. Nel 1900 gli viene affidato anche l’insegnamento del Corso di Elettrotecnica nella Scuola Su-

¹⁸ Il padre, cittadino integerrimo, per lunghi anni presidente del Comitato Agrario e Vicepresidente della Banca Popolare, si dedica all’agricoltura. Arrestato, in seguito a delazione, dalla polizia austriaca come carbonaro sospetto di intesa col Mazzini, viene incarcerato. Nel ’66, quando Garibaldi entra in Lonigo, viene portato in trionfo e scortato dalla Guardia Nazionale di cui è capitano

¹⁹ Benché, istituzionalmente, gli insegnanti italiani operanti nelle scuole di Trieste dovessero, entro tre anni dalla nomina, cambiare nazionalità, nel caso del Sartori, in considerazione del suo prezioso contributo didattico, il Governo Austriaco, attraverso il suo Ministero di Culto e della Istruzione, aveva tollerato la sua condizione irregolare. Non sempre

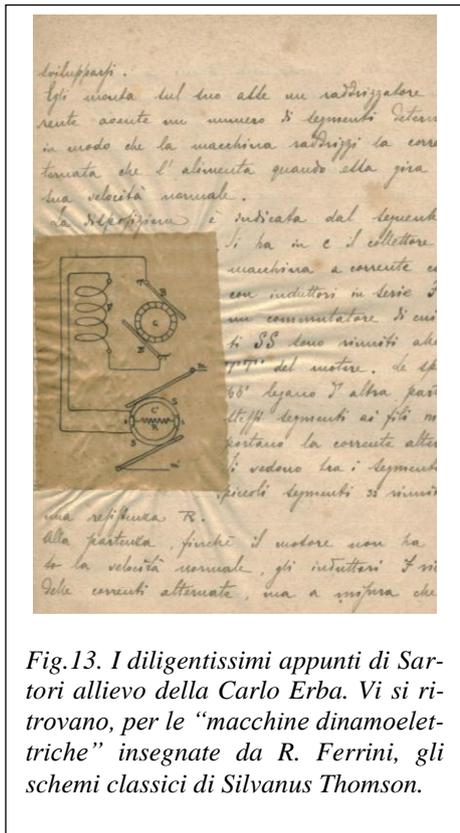


Fig.13. I diligentissimi appunti di Sartori allievo della Carlo Erba. Vi si ritrovano, per le “macchine dinamoelettriche” insegnate da R. Ferrini, gli schemi classici di Silvanus Thomson.

periore di Costruzione Navale, in quel tempo equiparata dall’Impero Asburgico ad una Scuola di Ingegneria. Nel 1896 sposa Ada de Faveri. Ne avrà tre figli: Eletta, Gustavo ed Annie.

Sono quelli, a cavallo tra i due secoli, gli anni in cui Trieste, guardando innovativamente al futuro, prepara, in un clima culturalmente ed imprenditorialmente dinamico, l’avvento dell’energia elettrica. In quell’ambiente Sartori ha modo così di svolgere concretamente la sua duplice attività di docente, nella quale può già riversare una ricca esperienza professionale nell’impiantistica, e di tecnico progettista.

È già di questi anni il suo fortunatissimo libro dal titolo *Tecnica delle correnti alternate* [38] (fig.16). Rispetto al clima culturale italiano del tempo, il libro costituisce una grande innovazione. Finalizzato alle applicazioni di un’alternata ormai affermata, il testo costituisce una felice fusione tra gli sviluppi più recenti di Schenectady e l’esperienza personale

maturata sul territorio dallo stesso ing. Sartori. E, in questa veste, ha il merito di presentare per la prima volta in Italia le *complex quantities* di Steinmetz. Quel particolare calcolo simbolico, cioè, mediante il quale, in regime sinusoidale, le equazioni differenziali ordinarie potevano essere vantaggiosamente trasformate in equazioni algebriche complesse agevolmente fruibili sia per l’analisi che per la sintesi progettuale²⁰. Vi compaiono i fondamenti di tale algebra e, per loro tramite, la formalizzazione completa, sul piano complesso, dell’energetica in regime sinusoidale. Compare inoltre, secondo l’approccio elaborato da Steinmetz e Berg, l’uso innovativo della serie di Fourier nel calcolo delle potenze istantanee, medie ed apparenti in regime periodico deformato. Particolare attenzione viene riservata, sempre sulla scia delle ricerche condotte in quegli anni a Schenectady, ai circuiti fer-

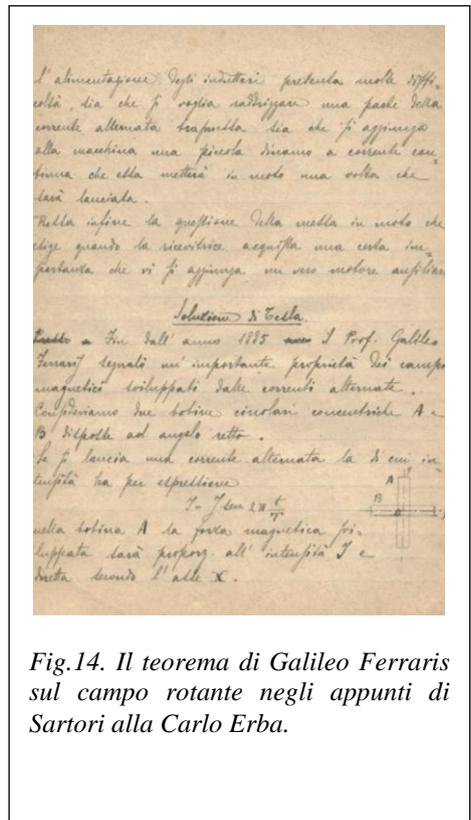


Fig.14. Il teorema di Galileo Ferraris sul campo rotante negli appunti di Sartori alla Carlo Erba.

le autorità austriache furono dunque così ferocemente antiitaliane come la mitologia della Grande Guerra ha in seguito lasciato credere.

²⁰ Le *complex quantities* si svilupparono negli USA in conseguenza del fatto che, con l’avvento dell’AC System, si richiedeva agli ingegneri la conoscenza del calcolo differenziale. Non essendo tale disciplina oggetto di insegnamento in quelle università, risultò indispensabile trovare un algoritmo in grado di “rendere algebriche le equazioni differenziali”. In tale ottica, il metodo degli esponenziali complessi, già concepito da von Helmholtz, venne formalizzato da Steinmetz per gli scopi dell’elettrotecnica. Karapetoff, uno dei successori di Steinmetz, parlerà al riguardo di “generazione di corrente alternata resa possibile dall’uso della radice quadrata di -1”.

Ampiamente accettato e diffuso negli USA, il calcolo simbolico venne successivamente accolto in Europa, quasi a voler certificare il fatto che da questa parte dell’oceano il calcolo differenziale si studiava seriamente anche in ingegneria, con una qualche sufficienza. Lo stesso Ferraris, che pure ne era a conoscenza, non ne fece mai particolare uso.

Tale atteggiamento non fu però produttivo ed ebbe come unico risultato quello di ritardare sensibilmente l’aggiornamento europeo rispetto agli USA. In Italia se ne occupò, sul piano teorico, Giovanni Giorgi. In seguito, fu proprio il Sartori, anche alla luce della sua concreta esperienza professionale sul territorio, a presentare per la prima volta in Italia un trattato applicativo su tale argomento.

romagnetici, alle distorsioni da essi prodotte sulle forme d'onda delle correnti ed alle conseguenti perdite per isteresi dinamica. Il macchinario sincrono ed asincrono vi è indagato con estrema mo-

dernità.

Al punto tale che, riservando un'attenzione non usuale ai problemi progettuali incontrati dai tecnici proprio in quegli anni, vi si trattano già in modo ampio ed organico le questioni legate alle "pendolazioni autogene" degli alternatori²¹. A conferma ulteriore del ruolo giocato dall'esperienza professionale acquisita da Sartori, il libro tratta già, a meno di dieci anni dall'esperimento di Laufen, le linee in regime sinusoidale sotto l'aspetto progettuale²². Assolutamente cruciale in Italia, dove riempie il vuoto lasciato dalla ormai obsoleta Fisica Tecnologica del Ferrini, il testo, in attesa della successiva pubblicazione dei due tomi dell'*Electrical Engineering* di Berg [44-45], si colloca tra le opere importanti di quel periodo. E proprio in ragione del suo valore, ad esso arride addirittura un'edizione francese, usata, in parallelo ai classici volumi di E. Gerard, dall'Istituto Montefiore di Liegi, in quegli anni una tra le più prestigiose scuole di elet-

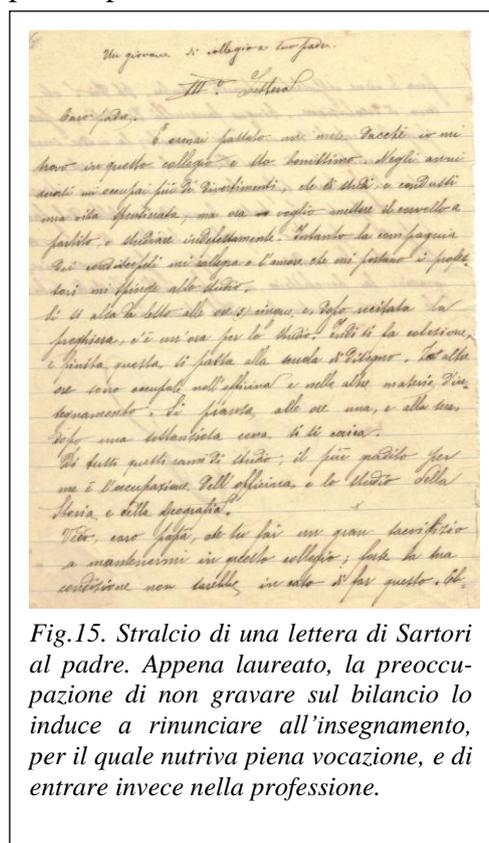


Fig.15. Stralcio di una lettera di Sartori al padre. Appena laureato, la preoccupazione di non gravare sul bilancio lo induce a rinunciare all'insegnamento, per il quale nutriva piena vocazione, e di entrare invece nella professione.

trotecnica del mondo. A testimonianza della "permanenza asburgica" dell'autore, il testo esce per i tipi di due distinti editori: Hoepli di Milano e Vram di Trieste.

Dato l'uditorio cui si rivolge, costituito per lo più dal personale proveniente dalle officine, Sartori si mostra quanto mai intenzionato ad essere divulgativo²³. In tal modo gli risulta però impossibile presentare le nozioni che insegna con tutto quel rigore matematico che, da lui posseduto, vorrebbe in realtà trasmettere.

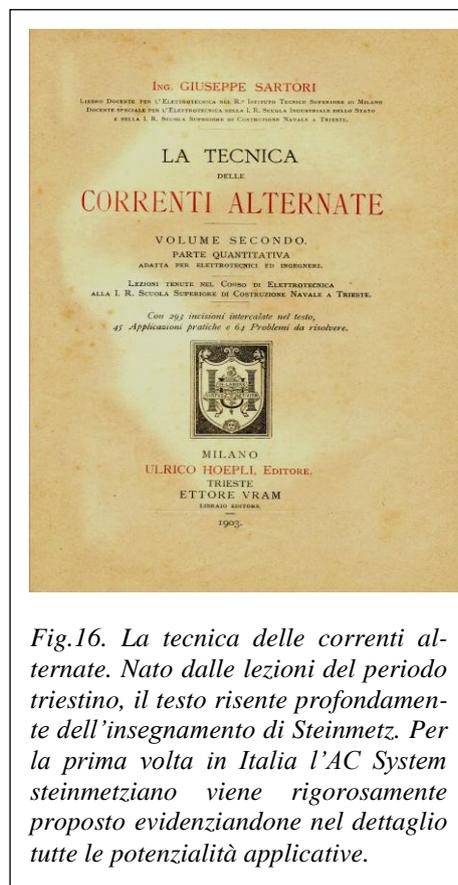


Fig.16. La tecnica delle correnti alternate. Nato dalle lezioni del periodo triestino, il testo risente profondamente dell'insegnamento di Steinmetz. Per la prima volta in Italia l'AC System steinmetziano viene rigorosamente proposto evidenziandone nel dettaglio tutte le potenzialità applicative.

²¹ Così Gino Rebola, docente al Politecnico di Milano, relativamente al moto perturbato degli alternatori della centrale di Robbiate.

²² La teoria delle linee era stata svolta con la messa a punto, compiuta a partire dai primi approcci di G.R. Kirchhoff [39] e di lord Kelvin [40], del modello a costanti distribuite da parte di Heaviside [27], di Mie [41] ed in seguito di R.E. Carson [42]. Formalizzata sul piano teorico già con gli inizi del Novecento [43], essa dovette però superare tutti i problemi legati ad una tecnologia di settore che, non ancora aggiornata, si trovava del tutto inadeguata rispetto a tutti risultati scientifici conseguiti. Già a partire da Laufen, quando i risultati teorici conseguiti da Heaviside potevano comunque già dirsi del tutto risolutivi, il progetto e la messa in servizio delle linee costituì pertanto per anni un problema non privo di incognite.

²³ Per soddisfare alle esigenze di speciali dimostrazioni scolastiche, egli costruì un oscillografo doppio che utilizzò come isteresigrafo. Con apposito concorso, nel 1909, a Sartori fu conferita, dalla Società Italiana di Fisica, la medaglia d'argento.

“Ci scrivono da Lonigo. La sera del 20 corrente si fece qui a Lonigo un nuovo esperimento di illuminazione stradale con una nuova lampada americana denominata *Wanzer*. L’esperimento di limitò ad un fanale, quello che è situato all’angolo del torrione di Piazza Cavalli, e l’effetto luminoso di detta lampada, posta a 4 metri e più di altezza, era veramente sorprendente, poiché a più di 40 metri le ombre dei passanti si proiettavano bene delineate sul terreno. Ho riflettuto che quattro sole di queste lampade illuminerebbero bene la vasta Piazza Cavalli. Il bello poi si è che una tale potenza luminosa porta un consumo di soli 2 centesimi e mezzo l’ora” (Dal giornale vicentino “La Provincia” del mese di dicembre 1890). Ci fu forse tra la folla che assistette a questo avvenimento, il giovane Giuseppe Sartori, uscito proprio in quell’anno dall’Università? Lo stupore e l’entusiasmo per le grandi scoperte di fine ‘800, dovute all’avvento dell’energia elettrica, devono avere certamente concorso alle scelte che hanno reso illustre il nostro concittadino.

Fig.17. Realizzatore dell’impianto di illuminazione pubblica del suo paese natale, Lonigo, Sartori godette presso i suoi concittadini di tutta la meritata fama ed il prestigio che gli erano dovuti.

Nell’ambito industriale, sono di questi “quindici anni asburgici”, favorito e sorretto in questo dalle opportunità offerte dalla dinamica imprenditoriale di quel Paese, i suoi progetti di maggiore importanza. Si va dall’illuminazione pubblica e privata di Vicenza e di Lonigo (fig.17) all’impianto per l’utilizzazione delle forze idrauliche del Kerka in Dalmazia. In quegli anni, immediatamente successivi all’esperimento di Laufen, esistono in Europa solo due impianti di rilievo: quelli di Paderno d’Adda e di Lione. Il suo progetto sul fiume Kerka costituisce dunque un formidabile passo in avanti. Realizza inoltre la centrale della Società Elettrica dell’Isonzo. Gestisce poi, a livello progettuale, l’ampliamento della Centrale Elettrica di Zara e della rete di distribuzione di Selenico. Si occupa infine del progetto per l’utilizzazione delle forze idrauliche del Jadro per il comune di Spalato e di quelle dell’Isonzo e del Reno per i comuni di Trieste, Serpenizza e Caporetto.

Cultore di storia della scienza, nel vivace ed intelligente ambiente austroungarico nel quale vive ed opera ha anche modo di allargare in questa direzione la propria attività, segnalandosi come eccellente conferenziere presso la Società degli Ingegneri, la Società Adriatica delle Scienze, la Società Minerva e l’Università popolare. Oltre che a Trieste, alcune delle sue conferenze sono tenute direttamente a Vienna. In anni successivi, a conferma dei benefici effetti del suo “*tour*”, molti di questi temi saranno da lui ripresi e pubblicati a stampa in Italia (fig.18).

Nei sedici anni della sua permanenza a Trieste, egli, non solo mantiene la nazionalità italiana, ma nemmeno pone mai velo al suo dichiarato patriottismo, addirittura frequentando, manifestamente, i capi stessi dell’irredentismo²⁴.

Nel 1912, per prevenire l’applicazione di un decreto che avrebbe inesorabilmente condotto al suo licenziamento, e della cui gestazione egli era venuto a conoscenza, dà però le dimissioni e lascia Trieste²⁵. Il dover abbandonare la professione, nella quale così tanto si era espresso, e, in egual misura, quegli Allievi di Trieste cui così tanto aveva dato, sarà per lui un’esperienza dolorosa e, anche in seguito, mai del tutto superata. Se ne troverà infatti traccia in suo discorso del 1919 all’Associazione Elettrotecnica Italiana. Nel lasciare – forzatamente – l’amata terra triestina, egli fa dono alla Società Alpina delle Giulie della Grotta dei Serpenti, presso Divaccia, da lui espressamente comprata per condurvi l’acqua dell’alto Timavo e, con essa, la potenza motrice contenuta nelle cadute di oltre 200 metri realizzabili all’ingresso...

Il “*grand tour*”, sedici anni di feconda esperienza professionale e didattica si conclude qui, con il suo patrimonio di esperienza tecnica ed umana. Lasciata Trieste, Sartori fa, forzatamente, ritorno in Italia.

Il traferimento a Modena

Il traferimento a Modena

Prende dimora a Modena. Qui, nel ruolo di direttore dell’azienda elettrica municipale, resterà dal 1912 al 1918, completandone l’impianto e organizzandone il servizio.

²⁴ Il padre di Sartori era stato arrestato, con l’accusa di intelligenza con il Mazzini ai tempi delle forche austriache di Belfiore. Tale esperienza, aggravata dal carcere duro cui il padre viene condannato, lascerà nel Sartori un profondo segno e mai, negli anni della sua permanenza a Trieste, egli farà mistero delle sua posizione.

²⁵ La comparsa sulla scena politica del Luogotenente Principe Hohenlohe che, per far cosa grata all’Arciduca ereditario, adotta una politica di inasprimento dello spirito anti italiano, porta in modo inevitabile al decreto dell’agosto 1913, in base al quale ai docenti è preventivamente imposta la rinuncia della cittadinanza italiana.

Riunione di Brescia: « Avremo qui a Brescia nelle visite che faremo a parecchi stabilimenti la sensazione precisa dello strettissimo connubio che esiste tra la tecnica applicata e la scienza pura, la prima trasformando in prodotti industriali utili all'uomo le materie che la natura ci offre, secondo processi che la seconda è venuta mano mano disvelando come i più adatti allo scopo. Talchè si sarebbe indotti a concludere che dalla scienza pura tutto procede e ciò non sarebbe neppure inesatto, se non fosse ancora altrettanto vero che la tecnica offre alla scienza pura, e di continuo, nuovi campi di indagine talvolta insospettati, dandole così un perenne alimento a ricerche. Scienza pura e scienza applicata si penetrano così talmente che uno spirito chiaroveggente, universale, un Leonardo dei tempi nostri, per esempio, troverebbe molto artificiosa questa distinzione e sarebbe piuttosto tratto a considerare come facce di una identica attività lo studio nel laboratorio e il lavoro nell'officina ».

« Ho voluto spendere qualche parola

per mostrare come io non intenda fare della elettricità una specie di volgarizzazione, la quale sorvolando sulle leggi e sui principi non arriva che ad una descrizione insufficiente od a delle nozioni vaghe, la cui utilità è pressochè nulla se non negativa. Purtroppo è comune il vezzo di non dare pregio se non a quello di cui si vede l'utilità immediata e di chiedersi quando si tratta di scienza pura: a che serve poi? Ma io che ancor giovinetto ho subita l'insidia di volere subito arrivare, alla fine mi sono ravveduto a tempo; ed anche a chi sarà chiamato a spiegare la sua attività nel solo campo della pratica sento ora di potere dire che senza cognizioni teoriche ben poca strada gli resterà da fare; si aggirerà in quell'ambito di conoscenze che la pratica gli avrà suggerito, ma non ne uscirà di certo; ed ogni qualvolta vorrà elevarsi un pò gli sarà forza cadere perchè per il volo gli mancheranno le penne ». Parole

Fig.18. Apprezzato, soprattutto nel clima culturale viennese, ed appassionato conferenziere, in seguito, ritornato in Italia, il Sartori riprese, rielaborò e pubblicò gran parte dei temi storico-scientifici da lui presentati in terra asburgica.

Nel frattempo, il suo innato e mai sopito amore per l'insegnamento lo induce a trasferire a Bologna la libera docenza a suo tempo già conseguita a Milano. E in questa veste tiene per incarico, dal 1919 al 1922, sia il corso di Impianti Elettrici a Padova che, contemporaneamente, l'insegnamento di Elettrotecnica Generale a Bologna. Di questo ottiene poi la nomina a professore straordinario e successivamente, a seguito alla cessazione del Prof. Donati (fig.19) [17-18], quella di professore ordinario. A questo punto, lascia definitivamente Modena e si trasferisce a Bologna. Questa, con Trieste, diverrà la sua seconda città d'elezione.

Il periodo a Bologna

All'organizzazione del laboratorio di Elettrotecnica, fornito sino ad allora di mezzi inadeguati, consacra gran parte della sua attività. E ne ottiene, dalla Fondazione Esterle e dal Governo stesso, che si impegnano, in particolare, a finanziare gli studi sul suo motore autocompensato, adeguati e lusinghieri riconoscimenti.

Gli viene in seguito affidata anche la direzione della Scuola e, con l'aggregazione della stessa alla Università, viene infine nominato Preside di Facoltà. Si occupa nel frattempo anche della realizzazione dell'istituto di Elettrotecnica.

Pur di restare a Bologna declina - come già in precedenza, a Torino, aveva fatto lo stesso Ferraris - l'offerta di trasferimento alla

scuola di Roma. Diviene Presidente della Commissione Amministrativa dell'Azienda Tranviaria ed insegna anche Organizzazione Scientifica del Lavoro. L'Accademia delle Scienze di Bologna lo elegge socio e lo promuove in breve Accademico Bendettino.

Prosegue nel frattempo, in questi anni italiani, nella sua attività professionale. Suoi sono il progetto esecutivo e l'organizzazione tecnica ed amministrativa dell'impianto di Modena avente per oggetto la pubblica e la privata illuminazione di quella città e la distribuzione della energia elettrica per trazione. Passa poi allo studio degli impianti dell'alta valle del Panaro e del basso Secchia per il Consorzio Idroelettrico Modenese, di quelli del lago di Ledro e del Ponale per il consorzio dei comuni di Riva e di Rovereto ed infine del bacino del Boita per il comune di Venezia. L'ultimo per importanza, ma particolarmente suggestivo per la sua natura, è il progetto di illuminazione delle famose grotte di Postumia, eseguito, sotto la sua direzione, da una ditta milanese con una procedura senza precedenti nella storia degli impianti. Come consulente della officina di costruzioni Calzoni & Parenti di Bologna collabora infine alla risoluzione del comando automatico delle centrali asincrone.

Nel 1925, a Grenoble, propone un selettore di sincronismo a tempo regolabile basato sui campi rotanti del Ferraris, grazie al quale, in modo automatico, il sincronismo viene stabilito pro-

prio quando la velocità raggiunta dal rotore è quella per la quale la fem coincide esattamente con la tensione di rete.



(a) (b)
Fig.19. Luigi Donati. Fisico matematico della scuola pisana, creò a Bologna, trasferendovi tutta la sua rigorosa dottrina scientifica, l'insegnamento di Elettrotecnica. Il suo sodalizio con Sartori, un ingegnere, quanto mai raro nell'Italia del tempo, fu oltremodo fecondo: per la prima volta in Italia, sulla scia dell'esempio di Steinmetz, la fisica matematica si integrava, in ambito didattico ed applicativo, con l'ingegneria.

Con immutata passione per la storia delle scienze elettriche, si occupa, in occasione delle Celebrazioni Voltiane, di trasporti di energia elettrica e, nell'ambito del commemorazioni di Ferraris, della diffusione del motore a campo rotante. Rilevanti sono nel contempo i suoi contributi storici su Faraday, Edison, Pacinotti e Marconi.

La riflessione teorica dell'età matura: il Grande Trattato con Luigi Donati

Lavorando con Luigi Donati e raccogliendone progressivamente l'eredità scientifica, Sartori ha modo di affinare progressivamente la propria visione della didattica. Giunge così alla convinzione che, in ultima analisi, il problema della formazione degli ingegni, più che un problema di cultura in senso stretto, debba considerarsi invece, *a priori*, un problema di formazione intellettuale di base. In altri termini, più che preoccuparsi di insegnare particolari dottrine, il docente, secondo la visione da lui progressivamente maturata, dovrebbe cercare di forgiare le intelligenze.

Si trattava, per quei tempi e per di più in una facoltà di ingegneria, di una concezione quanto mai innovativa. E tale visione risultava tanto più degna di nota non appena si osservava come, in una persona di minor levatura intellettuale e spirituale, un lungo periodo di insegnamento, quale aveva maturato il Sartori, vissuto in una scuola industriale avrebbe addirittura potuto condurre ad un indirizzo opposto.

Inteso in questa forma inusuale ed evoluta, l' insegnamento, per essere veramente efficace, richiedeva però qualità che, valicando quelle intellettuali in senso stretto, dovevano essere, in un certo senso, anche per quelle proprie dell'animatore e del trascinatore. Nel caso di Sartori questo requisito non costituiva però in alcun modo un possibile problema. Grazie alle sue particolari doti di eloquenza, legate sia alla sua cultura ed alla sua vita emotiva che alla grande esperienza professionale da lui acquisita, quei requisiti egli li possedeva infatti più che ampiamente; e in una forma, parrebbe anche di poter dire, quasi innata.

Nel 1931 sviluppa la teoria del teleindicatore adottato dalla Calzoni & Riva per il comando delle valvole a farfalla negli impianti con turbine in camera forzata per sezionamento di quello già realizzato dalla Siemens. Nel '34 realizza, sempre per la Riva & Calzoni, un avviatore automatico per motori polifase

Realizza poi, per via stroboscopica, un misuratore di scarti di velocità per motori a momento di inerzia variabile.

Altrettanto importanti sono i suoi contributi teorici, quali il riempimento dei diagrammi di carico per la trazione elettrica mono e polifase, la raccolta delle piccole potenze idrauliche e termiche, il principio di reciprocità applicato alle reti complesse, la teoria delle linee elettriche.

A confermarlo pienamente, nei suoi anni della maturità a Bologna, furono i risultati da lui raggiunti. Sia sul piano scientifico che su quello umano. Fu largamente stimato dai colleghi, presso i quali, senza riserve, godette sempre di grandissimo prestigio. E, in particolare misura, fu amato dai suoi allievi (fig.20), che sempre ne conservarono il ricordo e ne cercarono la guida.

In quest'ottica il suo grande Trattato, espressione delle consapevolezze scientifiche e pedagogiche che il Sartori andava ormai da tempo maturando, fu il naturale - e forse quasi inevitabile - risultato finale del percorso interiore e professionale da lui compiuto durante un'intera vita di ingegnere e di docente. Esso costituì la feconda integrazione tra le competenze di un fisico matematico di eccezione, il Donati, e quelle di un tecnico di ampia ed illuminata esperienza, il Sartori per l'appunto. In questo senso, il loro contributo costituì la prima concreta risposta italiana ad una linea di tendenza che, quale risposta tecnologica alla scienza di Ferraris, era andata definitivamente consolidandosi negli USA: l'affermazione di una tecnologia elettrica scientifica vista come conseguenza diretta di una rigorosa fisica matematica di base. Alla General Electric, il tedesco Steinmetz, per la sua capacità di esprimere appieno in sé entrambe le sensibilità teorica e tecnologica, ne era stato l'esempio più probante. In Italia, grazie alla indubbia trasversalità della loro formazione scientifica, tale esperienza era risultata possibile anche a Ferraris ed al suo "discepolo" Giorgi. Ma solo nominalmente. Di fatto l'assenza di un mercato sufficientemente vivace e di una corrispondente imprenditoria illuminata aveva finito col privare i due scienziati italiani proprio di quel prezioso stimolo alla produzione industriale di cui poté invece vantaggiosamente giovarsi Steinmetz.

La cosa risultò invece possibile, anche se con almeno vent'anni di ritardo rispetto a Steinmetz, proprio a Donati e Sartori. Il primo perché, oltre che fisico matematico, fu comunque, proprio nel solco di Ferraris, tra i primi in Italia a tenere un corso ufficiale di Elettrotecnica scientifica. Il secondo perché, operando nell'Impero Asburgico, poté contare su una realtà imprenditoriale ben diversa di quella di Ferraris a Torino e di Giorgi a Roma.

Il fatto poi che tale sodalizio si concretizzasse a Bologna e non invece in altre città italiane non fu per nulla occasionale. Sotto l'aspetto della conoscenza dell'Elettromagnetismo maxwelliano Bologna, come lo stesso Marconi del resto stava pienamente a confermare, era pur sempre la "Bologna delle Radiazioni", la città nella quale, in un certo senso come continuatore di Hertz, aveva studiato ed insegnato Augusto Righi (fig.21-a). Ed in cui, quale visione moderna ed innovativa di una trasversalità della cultura, già nel lontano 1907, il matematico e filosofo della scienza Federigo Enriques (fig.21-b) e l'ingegnere - filosofo e psicologo Eugenio Rignano (fig.21-c) avevano dato vita alla rivista *Scientia* (fig.21-d) [46-47].

Rigidamente suddivisa in due tomi, quasi a voler stigmatizzare con questa sua visibile partizione l'esistenza stessa, nel Trattato, di due sensibilità distinte eppur tuttavia complementari²⁶, l'opera si rivolge dichiaratamente - come precisa il suo stesso frontespizio - ad ingegneri, tecnici e studenti. Con un approccio che, ancora una volta, si rifà a quello già adottato da Steinmetz: il ricco repertorio di esemplificazioni numeriche, inizialmente presentate al lettore con intendimenti eminentemente didattici, si integra con quello successivo, altrettanto ampio, relativo alle applicazioni industriali in senso stretto, mediante le quali, in una fase più avanzata della formazione, si supporta



Fig.20. A Bologna, Sartori, con la cessazione di Luigi Donati, divenne ordinario di Elettrotecnica. Furono quelli gli anni del suo massimo impegno didattico e teorico. Il risultato, documentato dal suo trattato, fu l'amore incondizionato ed il prestigio di cui godette presso gli allievi.

²⁶ In effetti il Trattato nasceva come fusione ed integrazione del trattato di Sartori (fig.16), espressione di una rara professionalità industriale, e da quello di Donati (fig.19-b), espressione a sua volta del prestigio della fisica matematica della Normale.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig.21. La Bologna di Donati e Sartori: Augusto Righi, (fig.a) docente nell'ateneo bolognese, fu tra i massimi studiosi di onde elettromagnetiche del suo tempo; Federigo Enriques, (fig.b), con Einstein al Congresso di Filosofia tenutosi a Bologna nel 1911; Eugenio Rignano (fig.c); il primo numero di *Scientia* (fig.d).

invece il tecnico nella sua attività di progetto. A misura della completezza dell'opera, l' addestramento tecnico finale è visto come parte integrante della formazione didattica iniziale.

L'opera tratta preventivamente dei fondamenti maxwelliani dell'elettromagnetismo classico e solo in seguito, quando ormai risulta possibile poggiare la didattica dell'elettrotecnica su tutto il rigore analitico e concettuale necessario, presenta in successione la teoria dei circuiti, le macchine ed infine la trasmissione di potenza elettrica. Sorprendono a tutt'oggi, esaminando quelle pagine, l'ampiezza dei temi trattati e la loro simultanea profondità. Basti pensare al riguardo, in un settore campistico del trattato nel quale la presenza di Donati risulta più percettibile, al dettaglio con cui viene presentata l'analisi dei circuiti magnetici. E, in ambito circuitale elettrico, con un approccio non sempre presente neppure nei testi più attuali, allo studio del regime transitorio dei mutui induttori. Colpisce, inoltre, l'assoluta modernità dell'impostazione. Agli effetti dell'analisi dei regimi transitori, ad esempio, le induttanze sono già messe in conto esprimendo concretamente in forma chiusa, seppur in termini necessariamente approssimati, i legami costitutivi non lineari corrispondenti. Il tutto con una lettura che, non estranea ai contributi dello stesso Berg [45], risulta nel contempo molto affine a quella attuale. Anche il calcolo simbolico, giovandosi delle concrete esperienze maturate dal Sartori stesso [38], è qui, per la prima volta dopo le iniziali riflessioni teoriche di Giorgi [14], trattato in tutta la sua ampiezza concettuale ed applicativa.

Ampio spazio, nel secondo volume, è dato alla teoria delle macchine elettriche. L'analisi del trasformatore, nella quale è facile riconoscere la presenza di una "scuola italiana" espressa proprio dagli studi del Ferraris per la Ditta Ganz di Budapest, risente modernamente di tutti i perfezionamenti metodologici nel frattempo apportati da G. Kapp e dallo stesso Steinmetz. Grande attenzione, con una presentazione senz'altro in grado di poter essere affiancata a quella straniera di quegli stessi anni, è riservata poi al macchinario rotante. Con un approccio di ampio respiro che riporta all'insegnamento di Silvanus Thompson, sono trattate sia le macchine principali che quelle cosiddette speciali. L'attenzione per il dettaglio costruttivo, che richiama la scuola tedesca dell'Arnold, si integra con l'esigenza, assolutamente innovativa per quei tempi, di un approccio unificato di matrice anglosassone. Vi si ritrovano così le dinamo ricorsive del Giorgi e l'uso ferrarisiano del principio dei lavori virtuali nel calcolo unificato della coppie magnetoelettriche al traferro associate al processo di conversione elettromeccanica. Ampio spazio è dato infine allo studio delle linee elettriche e, in una forma per quei tempi innovativa, alla teoria dei sistemi trifase²⁷.

²⁷ La matematica trifase del Fortescue [30], presentata nel 1918, trovò inizialmente spazio in trattati appositi dedicati in modo esclusivo a tale approccio oppure, in una forma strettamente applicativa, nei testi di Impianti Elettrici. Solo in se-

Per il taglio dei temi trattati l'opera può senz'altro collocarsi a fianco del Trattato di Fisica Matematica dei circuiti [15] con il quale, proprio in quegli anni, Giorgi aveva sviluppato la sua revisione dell'analisi fondazionale dell'Elettromagnetismo [35]. Di questo costituisce anzi la lettura alternativa. Mentre il Giorgi, ed in seguito, su tale solco, Ercole Bottani, seguendo la scuola inglese di J. Perry, adottarono il metodo logico che presentava *ab initio* le grandezze circuitali e da queste giungeva ai campi, Donati e Sartori confermarono invece il metodo storico della scuola francese di Mascart e Joubert (ed in seguito dello stesso Ferraris): partendo dalla bilancia di torsione e dalla legge di Coulomb, è possibile giungere, quale esito delle formulazione integrale quasi - stazionaria delle leggi dei campi, ai circuiti. Questo dualismo, come è ben noto e come le differenti scelte compiute dalle varie Università stanno a confermare, sussiste a tutt'oggi e, assimilato dai fisici matematici ad un "letto di procuste", può anzi dirsi ben lungi dall'essere risolto [48].

In ogni caso, riletto con tutta l'attenzione che gli è dovuta, il Trattato, oltre ad essere ancora godibilissimo di per sé, si conferma a tutt'oggi estremamente utile sia nella didattica che nelle applicazioni di base. Espressione di una scuola illuminata di pensiero scientifico - tecnico di cui vanno tenuti ben presenti sia l'insegnamento che l'esempio derivante dal costante impegno didattico, tale trattato influenzò non poco molte delle successive opere e scuole di pensiero italiane. Il Donati - Sartori ebbe inoltre anche un altro e non certo secondario merito. Nella bibliografia dei testi consultati, accanto alle opere di Steinmetz e Berg, esso compare anche nell'Olivieri Ravelli, il testo sul quale, già a partire dagli anni '30, si formò la quasi totalità dei periti elettrotecnici italiani. E che ancor oggi, in larga parte, assolve positivamente a tale funzione.

La macchina asincrona compensata

L'argomento nel quale Sartori consacrò maggiormente le sue energie fu quello del fattore di potenza nelle reti e nei motori polifase, cui, con grande lungimiranza per quelli che in seguito sarebbero stati i problemi propri della moderna *power quality*, dedicò addirittura una quindicina d'anni della sua ricerca. La sua indagine iniziò nel 1913, a Bologna, con una comunicazione all'Associazione Elettrotecnica Italiana, nella quale veniva compiuta, in termini di pregi e difetti, una ben precisa analisi della macchina di Kapp vista nel suo funzionamento come compensatore di potenza reattiva.

Notava al riguardo il Sartori come, accanto a tutti i suoi indubbi pregi, l'asincrono di Ferraris avesse il limite oggettivo di un fattore di potenza molto basso. Una certa incuria che conduceva talvolta all'impiego di macchine di potenza esuberante, e dunque di funzionamento a carico ridotto, portava tale fattore addirittura da 0,75 - 0,8 a 0,5. La sua esperienza professionale gli aveva mostrato come una tale condizione, oltre a declassare comunque le prestazioni del motore, determinasse, a parità di potenza elettrica convertita in meccanica, un sensibile incremento delle perdite e delle variazioni di tensione nella linea di alimentazione. Il problema, data la molteplicità delle variabili in gioco sia nella macchina che nella rete di alimentazione, si presentava oltremodo complesso e, in particolare, non suscettibile di una soluzione unica.

In una nutrita serie di poderose memorie pubblicate tra il '13 ed il '18, Sartori approfondì il problema ed indicò tutta una serie di accorgimenti possibili per rimediarvi: sincroni a vuoto (condensatori rotanti), condensatori statici, motori asincroni con eccitatrici Scherbius e Kapp, macchine a collettore, motori autosincroni Danielson.

Quest'ultimo tipo di motore attirò in modo particolare la sua attenzione. E' questo un motore asincrono nel quale [49], a velocità quasi - sincrona, l'avvolgimento rotorico viene chiuso su un'eccitatrice a corrente continua nella quale un polo viene collegato all'estremità di una fase ed il secondo alle altre due fasi messe in parallelo. In tal modo il motore si mette a funzionare come sin-

guito, a fronte della rilettura tensoriale della teoria delle reti elettriche presentata sul finire degli anni '30 da Gabriel Kron, essa trovò spazio ed attenzione adeguati sui trattati di Elettrotecnica.

crono con il vantaggio che, agendo sull'eccitazione, risulta possibile regolare il cosφ fino all'unità, se non addirittura fornire reattivo ad altri asincroni.

In seguito, in una memoria del '17, Sartori impiegò il diagramma fasoriale degli asincroni proposto a suo tempo dal Donati stesso e, per suo tramite, analizzò nel dettaglio il momento critico della transizione da asincrono ad sincrono. Ancora una volta, in un problema che già anticipava in modo diretto la futura *power quality*, la teoria di un fisico matematico, il Donati, integrandosi con la tecnologia elettrica scientifica di un ingegnere, il Sartori, dava i suoi risultati concreti: il motore Sartori (fig.22) era in grado, lasciando immutati i vantaggi propri della macchina a campo Ferraris, di controllare il fattore di potenza. La moderna ingegneria elettrotecnica scientifica, nata postmaxwellianamente da Ferraris e sviluppatasi con Steinmetz, si diffondeva autorevolmente anche in Italia.

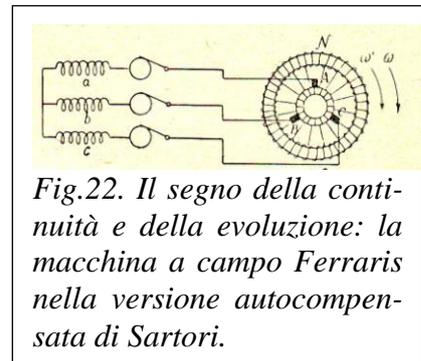


Fig.22. Il segno della continuità e della evoluzione: la macchina a campo Ferraris nella versione autocompensata di Sartori.

Conclusioni

In seguito la salute iniziò inesorabilmente a declinare. Sartori continuò tuttavia, instancabile, a prodigarsi come Direttore di quella "sua" Scuola di Ingegneria di Bologna cui tanto aveva dato. Ebbe sempre in questi ultimi anni, immutato, il conforto che gli derivava dalla stima dei colleghi e dall'amore dei discepoli. Morì a Bologna nel 1936. Le sue spoglie riposano nel cimitero della sua Lonigo, la città che, sui colli di Vicenza, gli aveva dato i natali.

Riferimenti bibliografici

- [1] Luigi Lombardi, *In memoria di Giuseppe Sartori*, l'Elettrotecnica, Milano, 1937, Vol. XXIV, pp. 414 - 420 (in tale rievocazione è riportata nel dettaglio l'intera produzione scientifica, costituita da una sessantina di articoli, di Giuseppe Sartori);
- [2] AA.VV., *In memoria del Prof. Ing. Comm. Riccardo Arnò*, l'Elettrotecnica, Milano, 1928, Vol. XV, pp. 504 - 507;
- [3] A.P. Morando, *Emanuele Jona e la nascita della tecnologia italiana dei cavi sottomarini*, Quaderni di Storia della Fisica, N°14, Società Italiana di Fisica, Bologna, 2007, pp. 27 - 48;
- [4] AA. VV., *Moisè Ascoli*, l'Elettrotecnica, Milano, 1922, Vol. X, pp. 468 - 474;
- [5] A.P. Morando, *Giovanni Giorgi*, Quaderni di Storia della Fisica, N°19, Società Italiana di Fisica, Bologna, 2001, pp. 3 - 15;
- [6] A.P. Morando, *Galileo Ferraris e la nascita dell'ingegneria elettrica moderna*, Physis, Vol. XXXV, Nuova Serie, Fasc. 2, Leo S. Olschky Editore, Firenze, 1998, pp.291 - 339;
- [7] A. P. Morando, *Post-Maxwellian Developments of Electromagnetism Until The First Decades of the XXth Century*, Electrical Engineering Research Report, University of Naples 'Federico II', Number 7, October 1999, pp. 7 - 14;
- [8] A.P. Morando, S. Leva, *Elettrotecnica – Reti in regime permanente*, Progetto Leonardo, Esculapio, Bologna, 2002, pp.1-118;
- [9] A. Righi, *L'Ottica delle oscillazioni elettriche*, Bologna, Zanichelli, 1897;
- [10] A.M. Angelini, *Rievocazione di Augusto Righi*, l'Elettrotecnica, Milano, 1971, Vol. LVIII, pp. 57 - 75;
- [11] L. Firpo, *Galileo Ferraris*, in "Gente di Piemonte", Mursia, Novara, 1983, pp. 217 - 249;
- [12] R.R. Kline, *Steinmetz*, The Johns Hopkins University Press, London, 1992;
- [13] P.J. Nahin, *Oliver Heaviside*, IEEE Press, 1987;
- [14] G. Giorgi, *Regimi variabili nei sistemi lineari*, Monografia AEI N°18, Stucchi, Milano, 1971;
- [15] G. Giorgi, *Lezioni di Fisica Matematica*, Spoerri, Roma, 1926;
- [16] E.J. Berg, *Heaviside's Operational Calculus*, McGraw-Hill, New York, 1929;
- [17] L. Donati, *Memorie e note scientifiche*, Zanichelli, Bologna, 1925;

- [18] G. Dragoni, B. Brunelli, *Luigi Donati*, Dizionario Biografico degli Italiani, Vol. 41, Enciclopedia Italiana, Roma 1992, pp.45 - 47;
- [19] F. Lori, *Storia del Regio Politecnico di Milano*, Cardani, Milano, 1941;
- [20] R. Maiocchi, *Il ruolo delle scienze nello sviluppo industriale italiano*, Storia d'Italia, Annali 3, Einaudi, Torino, 1980, pp.865 - 999;
- [21] G. Polvani, *Antonio Pacinotti*, 2 Voll., Lischi, Pisa, 1933;
- [22] A. Pacinotti, *Sulla elettrocalamita trasversale ruotante adoprata come elettromotore*, il Nuovo Cimento, Bologna, 1873, serie 2, tomo X, pp. 5 - 11;
- [23] P. Vas, *Electrical Machines and Drives*, Clarendon Press, Oxford, 1992;
- [24] A.P. Morando, *Dalla teoria classica alla teoria unificata nello studio delle macchine elettriche*, Nuova Civiltà delle Macchine, Anno XX, N° 3 - 4, Rai - Eri, Bologna, 2002, pp.173 - 176;
- [25] J.C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 2 Voll., Dover, New York, 1954;
- [26] J.C. Maxwell, *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, Dover Phoenix Editions, New York, 2003;
- [27] O. Heaviside, *Electromagnetic Theory*, Dover, New York, 1950;
- [28] G. Ferraris, *Opere*, 3 voll., Hoepli, Milano, 1902
- [29] J.C. Maxwell, *Una teoria dinamica del campo elettromagnetico*, con un contributo di Salvo D'Agostino, Teknos, Roma, 1996;
- [30] C.L. Fortescue, *Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks*, Trans. A.I.E.E., Vol.37, Pt. II, 1918, pp.1027 - 1140;
- [31] J. Meisel, *Principles of Electromechanical Energy Conversion*, McGraw-Hill, New York, 1966;
- [32] J.H. Poynting, *On the transfer of energy in electromagnetic field*, Collected Scientific Papers, Cambridge University Press, 1920, pp. 175 - 193;
- [33] D. Capecchi, *Storia del Principio dei Lavori Virtuali*, Helvetius Edizioni, Benevento, 2002;
- [34] G. Giorgi, *Metodo unitario per lo studio ed il calcolo del macchinario elettrico*, in "Verso l'Elettrotecnica Moderna", Tamburini, Milano, 1949, pp. 39 - 46;
- [35] G. Giorgi, *The foundations of electrical science*, The Electrician, London, 1896, Vol. 34, 1895, pp.741 - 742;
- [36] R. Arnò, *Il funzionamento dei motori elettrici dimostrato col tubo di Braun*, l'Elettrotecnica, Vol. XII, Milano, 1925, pp. 338 - 343;
- [37] R. Park, *Two reaction theory of Synchronous Machines. Generalized Method of Analysis. Part I*, AIEE Trans., Vol.48, 1929, pp.716 - 729;
- [38] G. Sartori, *La tecnica delle correnti alternate*, 2 Voll., Hoepli, Milano, 1902;
- [39] W. Thomson, *On the Theory of the Electric Telegraph*, Phil. Mag. (4), **11**, London, 1856, pp. 146 - 160;
- [40] G. Kirchhoff, *On the Motion of Electricity in Wires*, Pogg. Ann., **100**, Berlin, 1857, pp.193-217;
- [41] G. Mie, *Electric Waves on Two Parallel Wires*, Ann. Physik, **2**, Berlin, 1900, pp. 201 - 249;
- [42] J.R. Carson, *Wire Transmission Theory*, Bell System Tech. J., **7**, New York, 1928, pp. 268 - 280;
- [43] E. Weber, *Historical notes on microwaves*, in "Modern Advances in Microwaves Techniques", Polytechnic Institute of Brooklin, New York, 1954, pp.1 - 23;
- [44] E.J. Berg, *Electrical Engineering, First Course*, McGraw-Hill, New York, 1916;
- [45] E.J. Berg, *Electrical Engineering, Advanced Course*, McGraw-Hill, New York, 1916;
- [46] AA.VV., *Scientia, l'immagine e il mondo*, Comune di Milano, Milano, 1987;
- [47] S. Linguerri, *La grande festa della scienza*, Franco Angeli, Milano, 2005;
- [48] P. Moon, D. Spencer, *Foundations of Electrodynamics*, Van Nostrand, Princeton, 1960;
- [49] E. Santuari, *Alcune considerazioni sui sincroni e sugli asincroni*, Quaderni dell'AEI, Stucchi, Milano, 1932.