

## GIOVANNI GIORGI E LA TRADIZIONE DELL'ELETTROTECNICA ITALIANA

ARCANGELO ROSSI,\* SALVO D'AGOSTINO,  
ADRIANO PAOLO MORANDO\*\*

\* Dipartimento di Fisica, Università di Lecce

\*\* Dipartimento di Elettrotecnica, Politecnico di Milano.

La presente ricerca ha come obiettivo lo studio dell'opera degli *elettromagnetici italiani* da Galileo Ferraris fino a Ercole Bottani ed è inquadrabile nella più ampia tematica relativa alla nascita in senso post-maxwelliano della moderna ingegneria elettrotecnica.

La nostra ricerca si articola nelle seguenti fasi :

Un'analisi preliminare della transizione dall'elettromagnetismo teorico a quello tecnico e viceversa e della corrispondente nascita della moderna ingegneria elettrotecnica. Tale studio è stato iniziato e sarà condotto in termini comparativi: ravvisato nel sodalizio C.P. Steinmetz – E.J. Berg, e quindi nella General Electric di Edison, il momento della consapevole e voluta transizione dalla fisica matematica all'ingegneria elettrica, si approfondiscono, sottolineandone il legame con l'approccio strettamente operativo della scuola di fisica tecnologica pisana (Pacinotti), le figure italiane di quel tempo.

Ne fa parte essenziale un approfondimento della figura di Galileo Ferraris, rivisitata nel suo “anomalo” percorso formativo (Maxwell, Kelvin, Tait, Heaviside) e riguardata come primo esempio di fisico matematico-ingegnere elettrico italiano.<sup>1</sup>

Seguirà un'analisi della “mancata” evoluzione italiana, colta nei suoi rapporti con l'economia, la cultura, la scienza e la tecnica dell'Italia umbertina. Nel dopo Ferraris, con Ascoli, Arnò, Donati, Grassi, Sartori, l'ingegneria elettrica italiana, chiusa nel suo *particolare*, torna ad essere fisica matematica che non accetta di diventare ingegneria.

E' qui che si inserisce la figura centrale di Giovanni Giorgi: discepolo, attraverso l'Ascoli che ne fu allievo, di Ferraris. La sua opera costituisce, in modo non occasionale, la continuazione diretta dell'indirizzo impresso da Ferraris alla scuola italiana, sia come formazione ed attenzione al retroterra fisico matematico, sia come legami con la tecnica. Con una differenza rispetto a Steinmetz, che ancora di più sottolinea la continuità fra Giorgi e

---

<sup>1</sup>Per un inquadramento generale del ruolo di Galileo Ferraris nella formazione della moderna ingegneria elettrotecnica italiana tra scienza e tecnologia cfr. [24].

l'"Italietta" di Ferraris: la sua attività non entrò mai, né le fu possibile, nella quotidianità della realtà industriale. A differenza di quanto accadeva con Steinmetz a Schenectady, dove il sodalizio con l'Union College fu parte integrante di una precisa valenza scientifica dell'ingegneria, in Italia l'industria non fu mai in grado di colloquiare in modo sistematico e fecondo con i Politecnici.

Dopo Giorgi l'unificazione inevitabile e conclusiva di due distinti approcci avvenne attraverso l'opera del suo compagno di corso Lori, e del discepolo Bottani. Le due scuole, la campistica sostenuta da Lori e Someda, e la circuitistica ad opera di Bottani e Sartori si fondono in un corso ingegneristico ad ampia valenza fisico matematica, attraverso la creazione bottaniana (1960) del corso di *Circuiti e campi elettromagnetici* e l'omologazione ministeriale alternativa del corso di *Campi elettromagnetici e circuiti*. Si realizza così finalmente la completa sintesi dei due tomi dell'*Elettrodinamica* giorgiana.

Giovanni Giorgi nasce nel 1871 a Lucca da famiglia tradizionalmente dedicata alle professioni legali ed amministrative. Dopo aver frequentato il Ginnasio a Palermo ed il Liceo Umberto I nella capitale, a sedici anni entra all'Università di Roma. Ne esce nel 1893, laureato in ingegneria civile con il massimo dei voti, avendo svolto una tesi di laurea sul progetto di una ferrovia elettrica.

Da questa data ha inizio la sua attività tecnico scientifica, costituita, su un arco di tempo di 57 anni, da 368 lavori, tra libri, dispense, corsi di insegnamento, monografie, arbitrati, memorie originali e di divulgazione.

La figura di Giorgi, nota ai più per i suoi contributi alla metrologia, è nel nostro programma di ricerca complessivo indagata ed approfondita nei suoi contributi cruciali all'elettrotecnica, all'elettromagnetismo, alla teoria delle reti (di cui, a livello fondazionale, fu il vero artefice), all'approccio unificato alle macchine elettriche, al calcolo operatoriale, alla relatività; facendo luce nel contempo su una sua biografia non ancora sufficientemente nota. Infatti è solo sullo sfondo della sua opera complessiva che si riesce a inquadrare il significato storico del suo stesso più noto contributo.

In questa sede ci soffermeremo su un'analisi dei suoi contributi all'elettrotecnica che non possono essere scissi dalla sua rinnovata concezione dei fondamenti e della teoria dell'elettromagnetismo.

## **1. Dall'Elettrotecnica all'Elettromagnetismo: il contributo fondazionale di Giorgi**

In elettromagnetismo ed in metrologia Giorgi fu post-maxwelliano in senso stretto. Come tale portò avanti, chiarendone alcuni aspetti fino a quel

momento giudicati "insoluti", il contributo del fisico scozzese e del suo "successore" Heaviside [22].

Nell'ambito della definizione fondazionale dell'elettrotecnica il suo contributo, riconducibile agli studi della scuola inglese di Heaviside e di Perry, fu cruciale. Con la sua adozione del metodo logico-assiomatico e dell'uso degli strumenti integratori<sup>2</sup>, egli elaborò, in senso postmaxwelliano,<sup>3</sup> l'assetto epistemologico dell'elettrotecnica moderna. E giunse in tal modo a superare difficoltà che erano rimaste invece del tutto insolte per Ferraris.

Negli anni immediatamente postmaxwelliani l'analisi fondazionale della elettrotecnica, risentendo delle problematiche relative al passaggio da un contesto di teoria fisica, nel quale si era formato l'elettromagnetismo maxwelliano, a una scienza dell'elettrotecnica, era andata radicalizzandosi su due posizioni separate e, per molti aspetti, antitetiche. Da un lato prevaleva l'impostazione dei fisici matematici, non lontana da Pupin e dunque maxwellianamente legata alla priorità concettuale dell'approccio campistico, dall'altro, influenzata dalle esigenze proprie di una "conoscenza efficace" perseguita da Steinmetz, si andava affermando sempre di più quella di natura tecnica, legata invece ad una lettura circuitale basata su un approccio sperimentale.

In questa situazione la didattica dell'elettrotecnica imponeva in via preliminare la scelta del percorso concettuale da seguire. Si doveva partire dai campi e procedere verso le reti, oppure andare in senso opposto? Inoltre, conveniva adottare il metodo storico, secondo il quale l'impostazione dei fondamenti di una scienza deve necessariamente ricalcare il percorso seguito dalla sua stessa evoluzione, oppure quello logico-assiomatico, basato invece su un'opportuna successione di postulati preliminari di definizione?

---

<sup>2</sup> Il voltmetro e l'ampmetro integratore forniscono rispettivamente l'integrale temporale della tensione  $v(t)$  (flusso magnetico  $\varphi(t)$ ) e della corrente  $i(t)$  (carica elettrica  $q(t)$ ). Seguendo il processo logico della Meccanica Razionale, la quale dalla legge  $f=ma$  risale, nella forma  $I = \int f dt = \int m dv = Q$ , all'impulso ed alla quantità di moto, l'Elettrotecnica, in base alle leggi  $v=d\varphi/dt$  e  $i=dq/dt$ , deduce rispettivamente l'impulso di tensione  $\varphi = \int v dt$  e quello di corrente  $q = \int i dt$ . Sempre in analogia formale con la lettura meccanica, la quale in tal caso si avvale del pendolo balistico, si parla al riguardo di voltmetri ed amperometri balistici.

<sup>3</sup> La terminologia "maxwelliano" e "post-maxwelliano" qui introdotta va considerata come un'espressione sintetica di una problematica, quella del rapporto fra la teoria elettromagnetica di Maxwell e gli sviluppi post-maxwelliani, che ha già ricevuto importanti contributi storici [23] e che gli autori del presente saggio hanno sviluppato a parte [1] e si ripromettono di approfondire.

In questa non soddisfacente situazione anche la letteratura disponibile rifletteva e confermava i disagi legati alle difficoltà del momento. Da un lato si aveva il Mascart-Joubert [2], con la sua impostazione preliminarmente basata sull'azione a distanza e da questa orientata verso le onde e, solo in subordine, ai circuiti, lungo un percorso non sempre strettamente indispensabile agli elettrotecnici. Dall'altro, si aveva invece una letteratura tecnica nei cui testi principali, estranei al rigore di una qualunque riflessione fondazionale, si avvertiva l'incertezza di un approccio circuitale empirico, sorretto solo dalla complicità di un'autoevidenza puramente apparente.

In Italia, Ferraris aveva aderito alla lettura di Mascart-Joubert. Tutto ciò risulta esplicitamente documentato dalle sue *Lezioni di Elettrotecnica* (postume). Le difficoltà metodologiche incontrate dallo scienziato piemontese con l'adozione di un'impostazione di tale tipo risultarono però più ardue ed insormontabili del previsto. Una conferma al riguardo è costituita dal grande numero di tentativi di impostazione didattica abbozzati dal Ferraris e riapparsi tra i suoi manoscritti inediti<sup>4</sup>.

Queste difficoltà vengono si ritrovano poi nei tentativi di molti autori della sua scuola, da Lombardi a Vallauri, da Ascoli allo stesso Lori<sup>5</sup>.

L'esigenza di una nuova sensibilità didattica e fondazionale, ampiamente diffusa in quegli anni in cui l'elettrotecnica andava rivendicando una propria autonomia metodologica, appare dunque chiaramente documentabile già nello stesso Ferraris e nella sua scuola. In seguito tale disagio avrebbe pesantemente condizionato l'analisi fondazionale dei primi decenni del secolo.

Pur con le oggettive difficoltà legate alle diverse scelte possibili, una cosa appariva tuttavia ben chiara: non era più accettabile che da una parte vi fosse un modo di "impostare l'elettricità" proprio dei fisici ed ignorato dai tecnici e che dall'altra vi fosse una procedura tecnica che si sviluppava pressoché autonomamente rispetto al modo di vedere classico. Occorreva dunque pervenire ad una sistemazione più organica ed unificata. Ed in ogni caso, per i Politecnici, soprattutto "a misura di ingegnere".

---

<sup>4</sup> Racconta in proposito un suo allievo, Ettore Thovez, come un giorno, chiedendo al Maestro come mai non avesse ancora deciso di pubblicare le sue lezioni, questi gli abbia risposto: "Perché non ho ancora potuto renderle semplici come vorrei. Ho fatto questa notte una grande fatica per rendere accessibile a loro allievi certe teorie del Thomson e del Mascart per fare la lezione di stamane" [3].

<sup>5</sup> La scelta, da parte del Ferraris, di un orientamento metodologico basato sul metodo storico risulta confermata dall'intenzione non smentita (come testimoniato dal Perucca [4]), anzi da lui più volte manifestata, di scrivere un grande trattato di Elettrotecnica Generale di "impostazione classica".

Tale disagio, all'indomani della rivoluzione scientifica provocata dalla *Electromagnetic Theory* di Heaviside, era sentito dall'intera comunità degli "elettrici". Nel 1895 il francese Cornu prendeva posizione, dalle pagine di *The Electrician*, contro il Perry [5]<sup>6</sup>, il quale, fautore di una didattica più moderna, in grado di liberarsi dell'antico fardello costituito dall'approccio classico proprio del Mascart, proponeva "addirittura" di impostare l'elettromagnetismo partendo direttamente dal voltmetro e dall'amperometro. Il Cornu bollava questi metodi come assolutamente antiscientifici ed affermava che nessun approccio con misure elettriche poteva insegnarsi fino a quando, partendo dagli esperimenti basati sulle palline di sambuco, gli allievi non avessero seguito l'intera trafila della fisica classica. Si trattava dunque, nel momento stesso in cui l'ingegneria elettrica andava prendendo coscienza di sé, della contrapposizione tra la bilancia di torsione di Coulomb e gli strumenti integrali.

In tale discussione intervenne Giovanni Giorgi, il quale, il 12 aprile 1896, sempre dalle pagine di *The Electrician*, nell'articolo "The foundations of electrical science" [6], prese posizione a favore di Perry, affermando che non solo qualunque gruppo appropriato di fenomeni e di grandezze elettriche poteva essere assunto come fondamentale, ma che vi era nel contempo tutto l'interesse a semplificare l'esposizione introducendo dapprima il circuito elettrico e da qui progredendo verso i campi e le onde. L'articolo di Giorgi, una pietra miliare con la quale epistemologicamente si evidenziava la transizione in elettrotecnica dal metodo storico a quello logico-assiomatico, segnava in modo irreversibile il passaggio dall'indirizzo antico a quello moderno.

## **2. La metrologia di Giorgi come sintesi delle idee di un ingegnere elettrotecnico e di un teorico dell'elettromagnetismo moderno**

Nel 1901 Giorgi portò a conclusione la sofferta questione relativa alle unità fisiche, introducendo le sue unità razionali di elettromagnetismo. Con la sua innovazione metrologica egli si proponeva i seguenti obiettivi [7]:

- razionalizzare le unità elettriche nel senso di Heaviside, cioè riformularle in modo da liberarle da un inopportuno fattore  $4\pi$  e far comparire nel contempo in piena evidenza, nel modo voluto dalla teoria, le costanti dell'etere;

---

<sup>6</sup> In [5], una miscellanea dell'opera giorgiana, l'Autore riassume nel dettaglio la vicenda.

- sostituire i molteplici sistemi allora in uso con un sistema di misura unico, di validità generale, adatto cioè tanto agli scopi scientifici quanto a quelli pratici;
- mettere in evidenza le due costanti dell'etere (per lui: sinonimo del vuoto), sottolineando come esse, essendo molto minori dell'unità, confermino come al vuoto di materia ponderabile debba attribuirsi una "ricettività" energetica estremamente piccola.

Secondo J. A. Stratton, già Maxwell aveva accennato all'impossibilità di una corretta teoria dell'elettricità e del magnetismo senza il ricorso a quattro unità fondamentali [8]. Spetta però a Giorgi il merito di aver dimostrato come una scelta razionale al riguardo non poteva che essere quella di associare alle tre unità meccaniche, il metro, il kg-massa ed il secondo, una unità elettromagnetica. Grazie a tale impostazione, tutte le unità pratiche adottate dagli elettrotecnici vengono a costituire un sistema razionalizzato.<sup>7</sup>

Per quanto non senza iniziali contrasti, il contributo di Giorgi non tardò ad avere riconoscimenti: in Germania. Fritz Emde, direttore dell'Istituto Elettrotecnico di Stuttgart, pubblicava nel 1903 il suo primo lavoro sull'argomento intitolandolo espressamente "Das Giorgische Mässsystem"; grazie alla sua diffusione, Giorgi poté essere conosciuto ed apprezzato da tutti gli autori tedeschi. In seguito, al Congresso Internazionale di Elettricità di St. Louis del 1904, Giorgi avrebbe avuto l'incondizionato appoggio di S. Thompson, in quel momento il decano degli elettricisti; questi discusse una comunicazione al Convegno da parte dello scienziato italiano e poco dopo, a Londra, tenne una conferenza nella quale testualmente disse: "I desire to state as strongly as I can, what an extremely great advance has been made by the proposal of Mr. Giorgi" [9]. Nel 1916 il Governo Americano riprese la questione sottolineando, in un volume ufficiale dedicato alle unità elettriche e redatto dal Bureau of Standards, la completezza e la consistenza del sistema Giorgi. In modo analogo, nel 1924, Campbell avrebbe riproposto al Congresso Internazionale di Toronto lo schema di Giorgi presentandolo come un sistema universale.

In realtà, l'edificio logico elaborato era stato costruito assai rapidamente dallo scienziato italiano e comunque molto prima che tecnici e scienziati fossero in qualche modo preparati. Al punto tale che occorsero ben 34 anni di discussione prima che il sistema proposto, definito da J.A. Stratton la "sortita di un gruppo di ingegneri sovversivi" [10], potesse essere

---

<sup>7</sup> Sul problema della scelta delle unità elettriche e magnetiche e sul connesso problema dei sistemi di misura in elettricità e magnetismo al tempo di Maxwell cfr. [26].

definitivamente adottato. Ciò accadde infatti solo nel 1935, a Scheveningen, con votazione unanime dei delegati della IEC .

Queste difficoltà per l'accettazione della sua metrologia provano che il contributo del post-maxwelliano Giorgi va riguardato come uno dei momenti più significativi della travagliata evoluzione che portò gli elettrotecnici a definire il loro ruolo ed i loro metodi di analisi nei confronti della "Dynamical Theory" di Maxwell. Al di là delle pur decisive ricadute pratiche che gli sono proprie, l'importanza metodologica di tale contributo va ricercata nell'influenza che sulla sua elaborazione ebbe l'analisi fondazionale che, già dal 1895, Giorgi andava impostando relativamente alle scienze elettriche ed alla loro definizione postmaxwelliana.

### 3. Elettrotecnica e rinnovamento delle teorie dell'elettromagnetismo

Ci sembra dunque storiograficamente interessante rilevare che il contributo di Giorgi alla fondazione di una moderna elettrotecnica fu strettamente connesso alla sua opera teorica di rinnovamento di alcuni capitoli dell'elettromagnetismo maxwelliano, appoggiandosi alla forma che questo aveva assunto nella formulazione di Heaviside. Alcuni suoi lavori su questo argomento contribuirono al superamento di alcune possibili incertezze, si pensi alla nozione stessa di forza elettromotrice<sup>8</sup> [11], che ancora figurava

---

<sup>8</sup> In presenza di un campo elettromotore  $\mathbf{E}^*$ , tenuto conto del simultaneo contributo del campo elettrico  $\mathbf{E}$ , la legge di Ohm è così esprimibile:

$$\mathbf{E}_{\text{tot}} = \mathbf{E}^* + \mathbf{E} = \rho \mathbf{J}$$

La parte elettrica può essere scomposta in una componente irrotazionale, legata al potenziale scalare  $V$ , ed in una solenoidale, legata invece, in regime quasi stazionario, al potenziale vettore  $\mathbf{A}$ . Ne segue:

$$\mathbf{E}_{\text{tot}} = \mathbf{E}^* + \mathbf{E} = \mathbf{E}^* - \text{grad}V - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \rho \mathbf{J}$$

Tensione è l'integrale di linea del campo totale, fem è l'integrale lungo lo stesso percorso della somma del componente non elettrico e di quello elettrico solenoidale; differenza di potenziale, infine, è il corrispondente salto  $\Delta V$  associato alla circuitazione della parte elettrica conservativa. Tale partizione, implicita nelle equazioni classiche della dinamica e nel teorema di Clebsch, non era assolutamente chiara ai tempi di Maxwell (Treatise, II Ed., Vol.I. art.24) e dei suoi contemporanei, i quali, assai spesso, confondevano la differenza di potenziale con la fem. Heaviside diede il primo contributo sostanziale, esplicitando il campo elettromotore. Giorgi, dopo aver esaminato criticamente, nel dettaglio, i contributi dei vari autori, esplicitò il significato di fem come sinonimo di lavoro della parte non conservativa, elettrica e non, del campo totale. Inoltre, anticipando il suo approccio per grandezze integrali, intro-

come non interamente rimossa dall'opera di Maxwell ed Heaviside. Inoltre, le voci da lui compilate dal '34 al '36 per l'Enciclopedia Italiana, tra cui si possono ricordare quelle di Magnetismo, Poynting, Riluttanza, Skin-effect, etc., contribuirono a consolidare e a definire concetti fino a quel momento non sempre sufficientemente consolidati ed accessibili.

Ad esempio, per quanto riguarda la sistemazione e l'aggiornamento delle leggi della magnetofisica, si deve notare che essa era stata vincolata in Maxwell alla distinzione fondamentale fra forze e flussi<sup>9</sup>. Heaviside si era fermato a tale distinzione, ma non aveva indicato una corrispondente configurazione operativa, né aveva ammesso, come in seguito fece Giorgi, la possibilità di scegliere in modo autonomo le unità di **B** ed **H**, così da

---

dotta la potenza  $P^*$  scambiata attraverso la frontiera elettromagnetica del componente con i sistemi non elettrici, dedusse la fem mediante il seguente rapporto:

$$\frac{P^*}{i} = fem$$

Tale approccio, semplicissimo ed immediato, è strettamente lagrangiano: in tal modo definita, la fem infatti è forza, in quanto costituisce il fattore che, associato alla velocità (la derivata della carica), dà la potenza. Nel seguito il contributo giorgiano, oggi usuale in elettrotecnica, sarebbe stato perfezionato da Bottani.

<sup>9</sup> Facendosi assertore delle idee di Heaviside, Giorgi concepì una nozione di **b** direttamente legata a quella di flusso magnetico e alla corrispondente misura balistica della fem indotta ad esso associabile. Con tali premesse, osservato che:

$$\psi(t) = N\phi(t) = N \int_{\Sigma} \mathbf{b}(\mathbf{r}, t) \times \mathbf{n} \cdot d\mathbf{S} = \int_{t_0}^t e(\xi) d\xi \quad (\bullet)$$

risultava possibile pervenire al valore di **b** con le medesime operazioni con le quali, nel caso di un fluido, si passerebbe dalla portata in una generica area alla velocità in un punto. In modo analogo, per la nozione di forza magnetomotrice, risultarono adottabili due relazioni. La prima, di natura campistica, legata all'integrale di linea di **h**:

$$m(t) = \int_A^B \mathbf{h}(\mathbf{r}, t) \times \mathbf{t} \cdot d\mathbf{s} \quad (\bullet\bullet)$$

La seconda, di tipo energetico, correlata invece al differenziale esatto:

$$dW_{\mu} = m d\phi \quad (\bullet\bullet\bullet)$$

In conclusione **b** e  $\phi$  misurano, rispettivamente in forma specifica e globale, scostamenti dallo stato neutro, mentre **h** ed  $m$  misurano, con lo stesso distinguimento tra significato locale ed integrale, le cause. Tale formalizzazione consentì successivamente a Giorgi di definire in modo conseguente le unità di misura. L'unità di fem, dedotta dal watt e dall'ohm campione, restava il volt. Dalla  $(\bullet)$  derivava in tal modo l'unità di flusso, espressa come voltsecondo=weber, e da questa quella di **B** in weber/m<sup>2</sup>. Risultavano a questo punto deducibili, tramite la relazione  $(\bullet\bullet\bullet)$ , l'unità di fmm in amperespire e da questa, in base alla  $(\bullet\bullet)$ , quella di **H** in amperespire/m.

svincolarle dalla necessità di attribuire valore unitario alla permeabilità del vuoto.<sup>10</sup>

Inspirandosi peraltro alle idee di Heaviside, Giorgi concepì una nozione di  $B$  direttamente legata a quella di flusso magnetico e alla corrispondente misura balistica della fem indotta ad esso associabile, cosicchè risultava possibile pervenire al valore di  $B$  con le medesime operazioni con le quali, nel caso di un fluido, si passerebbe dalla portata in una generica area alla velocità in un punto.

E' importante infine osservare che la costante opera di chiarificazione metodologica compiuta da Giorgi nel senso della moderna ingegneria elettrica scientifica, riverberandosi sull'elaborazione delle sue "Lezioni di Fisica Matematica" [13], ebbe un'inevitabile influenza anche sul suo lavoro di impostazione fondazionale dell'elettromagnetismo. Vi è inoltre una stretta connessione tra tali riflessioni, di indole fisico matematica, ed il parallelo inquadramento storico ed epistemologico da lui compiuto nel corso del loro svolgimento. Come già accadde con Maxwell, egli visse sempre tale integrazione come un passaggio indispensabile a chi si accinga ad intraprendere un'opera di rigoroso chiarimento<sup>11</sup>, un caso peraltro abbastanza isolato nella cultura italiana del suo tempo.

In seguito, su *Energia Elettrica* del 38 [14], enfatizzando la parallela lettura storica ed epistemologica, Giorgi ripartì la formulazione dell'elettromagnetismo nelle fasi classica, di transizione ed odierna. La prima, espressione dell'azione a distanza, riportava ad Oersted, Biot, Savart, Laplace, Ampere, Neumann e Weber. La seconda, riconducibile invece all'azione mediata, risaliva alle idee di Faraday e Maxwell.

Quest'ultimo, non ancora del tutto liberato, a giudizio di Giorgi, dalle "affezioni meccanicistiche", si serviva in modo eccessivo del potenziale vettore, di un'entità matematica, cioè, molto utile per l'integrazione delle equazioni, ma del tutto inadatta, secondo Giorgi, per esprimere le leggi fondamentali per l'elettrotecnica.<sup>12</sup> Il passaggio successivo, verso la

---

<sup>10</sup> L'assegnazione di valore unitario alla costanti dell'etere era in Maxwell necessitata dal suo procedimento per dimostrare l'uguaglianza fra la velocità delle onde em e la velocità della luce [12].

<sup>11</sup> E' evidente tuttavia che considerare l'opera di un post-maxwelliano come Giorgi come chiarificatrice dell'opera elettromagnetica di Maxwell implica una particolare tesi storiografica, l'accettazione di un linearismo del progresso scientifico, che ci proponiamo di approfondire nel seguito della ricerca e che sembra già non sostenibile per quanto riguarda il delicato problema del passaggio alla quarta unità elettromagnetica considerato in precedenza.

<sup>12</sup> L'espressione delle equazioni di campo mediante il potenziale vettore era legata in Maxwell alla sua derivazione delle equazioni da una "meccanica dell'etere".

formulazione odierna, si ebbe con Heaviside ed Hertz e con le loro leggi operatoriali dei campi E ed H, per sistemi in quiete e in moto (Hertz).

#### 4. Giorgi sulla teoria unificata delle macchine elettriche

Le commemorazioni italiane su Giorgi ignorano quasi completamente questa parte del contributo di Giorgi all'elettrotecnica. E' significativo che a parlarne sia invece Abetti, in quella *General Electric* [15] nella quale il problema della "Unified Theory of Rotating Machines" era stato avvertito già sul finire dell'ottocento. Dopo aver illustrato i contributi di Giorgi al calcolo dimensionale ed all'impostazione fondazionale dell'elettrotecnica, Abetti osserva infatti che "Another important work of Professor Giorgi, published in 1905, was concerned with a *Unified Method for the Study and Computation of Electrical Machinery*. At the early date, it was very important to show how the same basis concepts applied to the various electric machines, which were regarded then as entirely different from each other".

In realtà, pur ignorato e sottovalutato, il contributo di Giorgi si inseriva in modo preciso e del tutto naturale in una "scuola italiana" di macchine elettriche che, proprio in termini di approccio unificato, aveva avuto i suoi precursori proprio in Pacinotti e Ferraris. E che, negli anni successivi, avrebbe dato, forse altrettanto dimenticati o non colti, ulteriori contributi.

Pacinotti, ponendo in rotazione l'asse delle spazzole, aveva "anticipato" la lettura fisica della futura "trasformata di Park"<sup>13</sup>. Ferraris, elaborando i suoi teoremi sui vettori rotanti, aveva posto le premesse sul futuro approccio vettoriale unificato al macchinario rotante. E, sempre in tale ricerca, avvalendosi del teorema di equivalenza di Ampere per calcolare il contributo magnetico di un avvolgimento, era giunto, senza l'attuale ricorso al principio dei lavori virtuali, al principio dell'allineamento<sup>14</sup>. Quanto a Giorgi stesso,

---

Hertz e Heaviside espressero le equazioni nella forma rotazionale oggi accettata [25].

<sup>13</sup> La trasformata di Park conduce, con equivalenza energetica e magnetica al traferro, una macchina polifase a campo Ferraris ad una macchina a collettore di Pacinotti ad asse delle spazzole rotante. Tale identità, espressione formale di una diagonalizzazione della matrice impedenza della macchina asincrona, fu presentita per via puramente fisica dal Pacinotti stesso: in una dinamo, essendo il campo rotorico solidale con l'asse delle spazzole, bastava porre in rotazione quest'ultimo per avere un campo magnetico rotante. Il campo Ferraris ed il campo Pacinotti diventavano dunque, non per caso, due manifestazioni distinte di una stessa realtà fisica.

<sup>14</sup> Il principio dell'allineamento è l'espressione fenomenologia dell'applicazione del Principio dei Lavori Virtuali al campo magnetico al traferro: la coppia elettrodina-

nell'illustrare il passaggio di potenza da statore a rotore nella sua dinamo ricorsiva del 1905, aveva fatto riferimento a Poynting [16].

Nel 1927, in occasione delle *Celebrazioni Voltiane*, Riccardo Arnò, il discepolo più vicino a Ferraris, avrebbe ulteriormente sviluppato i risultati del maestro e, per via vettoriale, in termini di allineamento, avrebbe presentato in forma unificata la teoria dei motori in alternata<sup>15</sup>

## 5. Considerazioni conclusive: uno sguardo sull'opera complessiva di Giorgi in elettrotecnica e in elettromagnetismo

Si può quindi affermare che il primo a proporre in forma compiuta una strategia fondazionale della scienza elettrica alternativa a quella allora prevalentemente accettata nell'elettrotecnica e nell'insegnamento fu proprio Giovanni Giorgi. E non solo dalle pagine di una rivista ma anche con la pubblicazione delle sue "Lezioni di Fisica Matematica". Con la loro comparsa, già nel 1928, nel panorama didattico, l'impostazione di questa scienza imboccava per la prima volta concretamente la strada nuova, di tipo lagrangiano, da lui stesso indicata. Questa si sarebbe basata infatti innanzitutto sulla sostituzione del metodo storico con quello logico-assiomatico. Quanto alla scelta del percorso concettuale poi, essa avrebbe dapprima formalizzato la lettura circuitale, propria dell'azione a distanza, e solo in seguito, per generalizzazione di questa, avrebbe dedotto quella campistica, riguardata invece come espressione dell'azione per contatto.

Non restava a questo punto che estenderne i contenuti al caso di indeterminazione [18]<sup>16</sup> costituito dai sistemi in moto. Ritornando in tal

---

mica nasce perché i due distinti campi di statore e di rotore tendono a sovrapporsi spazialmente, ad allinearsi. In realtà al medesimo risultato si può pervenire riguardando, con Ampere, la macchina come l'esito dell'interazione tra il momento magnetico di statore con il campo di corrente di rotore.

<sup>15</sup> In questo senso non fu certo casuale la presentazione di uno schema generale di macchina monofase con cui, in assoluto anticipo sui tempi, Barbagelata e De Pol presentavano nella parte finale del loro libro [17] un possibile approccio ricorsivo alle macchine rotanti.

<sup>16</sup> La formulazione integrale, con Neumann, della legge di Faraday, espressa dalla relazione  $e = -d\phi/dt$ , implica che sia nota a priori la frontiera  $\Gamma_\Sigma$  della superficie  $\Sigma_r$ , per il resto a priori arbitraria, rispetto alla quale va calcolato il flusso. Richiede inoltre che  $\Gamma_\Sigma$ , deformandosi, non subisca lacerazioni e compenetrazioni, mantenga cioè la propria identità geometrica. Vi sono casi in cui tali condizioni, sembrando non verificate, possono dar luogo ad apparenti paradossi. Analoghe considerazioni valgono per la partizione, secondo Helmholtz, della fem nei due contributi trasformatore e mozionale:

modo alla parte insoluta di alcuni quesiti (che, fra l'altro, già gli erano stati posti da Lombardi), Giorgi esaminò questi casi di incertezza. In realtà tali nozioni, proprio a seguito dell'esperienza del 1925 di H. Hering [19], erano già state formalmente sviluppate in precedenza dallo scienziato italiano per la voce "Elettromagnetismo" dell'*Enciclopedia Italiana*. Ora, a conclusione della sua ricerca, "tenendo maggiormente in vista l'elettrotecnica", Giorgi ne riprese i contenuti per l'"Energia Elettrica" [20]. Ne emergevano in tal modo, con chiarezza esemplare ed in una forma a tutt'oggi fruibile per lo studioso, le espressioni della legge per i sistemi mobili, nonché l'analisi della nozione di fem in un circuito non chiuso, quei casi di indeterminazione cioè che, in anni successivi, con Bewley e, in Italia, con Vallauri, sarebbero stati oggetto di ampie riflessioni e ricerche.

Tale proposta didattica, del tutto rivoluzionaria, rivelava appieno la precisa continuità scientifica e storica tra Ferraris e Giorgi. Entrambi cultori rigorosi di fisica matematica, essi esprimevano l'evoluzione metodologica che fu propria di quegli anni. Se Ferraris fu espressione del disagio fondazionale degli elettrici della seconda generazione, il suo "discepolo" Giorgi fu colui che, con le sue "Lezioni di Fisica Matematica", risolvendo i "dubbi" dello scienziato piemontese, seppe portare a compimento l'evoluzione didattica e metodologica da lui iniziata.

In seguito tale impostazione avrebbe avuto numerosi seguaci, da K. Kupfmüller nel 1932 a B. Rossi nel 1936, da V.V. Petrovic nel 1941 a J.A. Stratton ancora nel 1941. Nel 1936, al Politecnico di Milano, con anche più ampia aderenza all'aspetto ingegneristico, sotto l'influenza dello stesso Giorgi e con l'esortazione di G. Vallauri, un giovane Bottani avrebbe magistralmente condotto a compimento tale rivoluzione riassumendone i contenuti e gli obiettivi in una fondamentale memoria, dal titolo "L'insegnamento dell'Elettromagnetismo secondo moderni criteri (saggio di organizzazione movendo da grandezze "concrete" e da nozioni integrali)" [21], da lui denominata "il coranino". In essa, osservato preliminarmente che "ha importanza la conoscenza delle cose, lo sviluppo dell'intuito prima di ogni sistemazione a priori", Bottani propose giorgianamente un nuovo schema fondazionale basato su:

- l'abbandono definitivo del metodo storico, perché giudicato non idoneo didatticamente,
- il passaggio al metodo logico-assiomatico basato su postulati di definizione e su esperimenti concettuali opportuni,

---


$$e = - \int_{\Sigma_t} \overset{\text{trasformatrice}}{\frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t}} \times \mathbf{n} dS + \oint_{\Gamma_t} \overset{\text{morzionale}}{\mathbf{u}} \wedge \mathbf{b} \times \mathbf{t} ds$$

- l'adozione delle grandezze globali e la successiva progressione verso quelle locali,
- l'interpretazione delle equazioni fisiche in termini esclusivi di relazioni matematiche tra grandezze misurate.

Al termine dell'esposizione Bottani, quasi a sottolineare la continuità metodologica con l'insegnamento del maestro, ringraziò Giorgi con le seguenti parole: "mi accorgo di essere più giorgiano di te".

Sul piano epistemologico tale impostazione, caratterizzata sia da un forte impatto di generalità e di immediatezza applicativa che da un radicale risparmio di conoscenze fisico-matematiche preliminari, si basava sull'identità concetto-operazioni propria dell'operazionismo di P.W. Bridgman. Ne emergeva una didattica determinata nell'intenzione di fornire risposte generali e subito. Per essa l'allievo, superando a piè pari una lunga fase preliminare di iniziazione, era subito condotto a familiarizzare con i concetti ed i metodi di analisi propri di una disciplina direttamente finalizzata ad applicazioni concrete. Quanto al bagaglio delle nozioni preliminari necessarie per l'accesso, esso veniva a ridursi al minimo possibile: analisi matematica, con l'uso estensivo dei nuovi sviluppi generalizzanti dell'analisi funzionale e, come si conviene ad una disciplina comunque nata dalla "fisica tecnologica", "quel poco" di termodinamica necessaria per i bilanci energetici.

Occorre purtroppo constatare che nella storia e nella filosofia della scienza il contributo di Giorgi, frutto di un lavoro capillare ed appassionato, restò quello di un isolato. Del resto tale area di ricerca risultava largamente estranea alla cultura italiana del tempo, la quale negava ogni valenza culturale alle scienze, dal momento che ad esse, colte esclusivamente nel loro "tecnicismo applicativo", era addirittura negata una fisionomia metodologica e conoscitiva unitaria.

Per di più la modesta diffusione delle opere a stampa di Giorgi in questo settore non consentì il giusto apprezzamento e l'utilizzo dei suoi contributi. Resta il fatto che con queste sue autonome aperture alla dimensione storico-critica delle teorie scientifiche, del tutto usuali, ad esempio, in Maxwell, egli si contraddistinse nel panorama scientifico del suo tempo.

Anche nella didattica Giorgi mostrò tutta la sua peculiarità: egli si preoccupò infatti di pubblicare trattati di alto profilo ma, caso non poi così frequente, con la stessa energia e con lo stesso impegno pubblicò anche testi di più generale interesse didattico e di elevata divulgazione, tra cui in particolare le voci per l'Enciclopedia Italiana già ricordate in precedenza [27].

## **Bibliografia**

- [1] A.P. Morando, *Galileo Ferraris e la nascita dell'ingegneria elettrica moderna*, Physis, XXXV (1999), 2 (Atti del Convegno su Ferraris organizzato dall'Istituto dell'Enciclopedia Italiana, Roma, 1997), pp. 291-339.
- [2] E. Mascart, J. Joubert, *Leçons sur l'électricité et le magnétisme*, Vol. I, 1882, Vol. II, 1886, G. Masson Editeur, Paris.
- [3] R. Manigrasso, A.P. Morando, *Ercole Bottani*, ATM, Milano, 1994.
- [4] E. Perucca, *Galileo Ferraris nel quadro del suo tempo*, Atti e rassegna tecnica della Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino, Nuova Serie, Anno I, Torino, 1947.
- [5] G. Giorgi, *Verso l'Elettrotecnica Moderna*, Libreria Editrice Politecnica Tamburini, Milano, 1949.
- [6] G. Giorgi, *The foundations of electrical science*, The Electrician, London, April 12, 1896.
- [7] G. Giorgi, *Unità razionali di Elettromagnetismo*, Atti AEI, 1901.
- [8] J.A. Stratton, *Electromagnetic Theory*, Mc Graw Hill, New York, 1941, p.47.
- [9] S.P. Thomson, *On the system of units proposed by Mr. Giorgi*, Journ. Inst. El. Engineers, Vol.35, 1904-1905, fasc. 11, pp.29-32.
- [10] J. A. Stratton, *Trattato di Elettromagnetismo*, Boringhieri, Torino, 1965, nella prefazione, p.20.
- [11] G. Giorgi, *Che cosa è la fem?*, Bollettino Tecnico dell'Istituto Militare delle Trasmissioni, 1939, in [5], pp.300-308.
- [12] S. D'Agostino, *Maxwell's Dimensional Approach to the Velocity of Light*, Centaurus, Vol.29, 1985, pp.178-204.
- [13] G. Giorgi, *Lezioni di Fisica Matematica*, Litografia A. Sampaolesi, Roma, 1928.
- [14] G. Giorgi, *Come devono essere aggiornate le leggi dell'elettromagnetismo*, l'Energia Elettrica, 1938, pp.301-306.
- [15] P.A. Abetti, *Giovanni Giorgi*, Electrical Engineering, July 1951, pp. 587-588.
- [16] G. Giorgi, *Il metodo unitario nello studio e nel calcolo delle dinamo*, AEI, Firenze, 1905.
- [17] A. Barbagelata, P. De Pol, *Macchine ed apparecchi elettrici*, Tamburini, Milano, 1955, pp.251-260.
- [18] G. Giorgi, *Casi d'indeterminazione*, in [5], pp.151-154.
- [19] G. Giorgi, *A proposito di una recente polemica sulle leggi dell'elettrodinamica*, l'Elettrotecnica, 1925, pp.887-888.
- [20] G. Giorgi, *Schemi antichi e punti di vista nuovi per la teoria del magnetismo*, l'Energia Elettrica, 1938, pp.623-626.
- [21] E. Bottani, *L'insegnamento dell'Elettromagnetismo secondo moderni criteri (saggio di organizzazione movendo da grandezze concrete e da nozioni integrali)*, l'Elettrotecnica 1936, pp.3-56.
- [22] B. J. Hunt, *The Maxwellians*, Cornell University Press. 1981.
- [23] J. Z. Buchwald, *From Maxwell to Microphysics (Aspects of the Electromagnetic Theory in the Last Quarter of the Nineteenth Century)*, The University of Chicago Press, 1985; Id., *The Creation of Scientific Effects (Heinrich Hertz and the Electric Waves)*, The University of Chicago Press, 1994.
- [24] A. Rossi, *Galileo Ferraris (1848-1897) tra scienza e tecnologia*, Nuncius, XIV (1999), I, pp. 121-132.
- [25] S. D'Agostino, *Hertz's Researches on Electromagnetic Waves*, Historical Studies in the Physical Sciences, Princeton University Press, 6 (1975), pp. 261-323.
- [26] S. D'Agostino, *Absolute Systems of Units and Dimensions of Physical Quantities: A Link Between Weber's Electrodynamics and Maxwell's Electromagnetic Theory of Light*, Physis, XXXIII (1996), 1-3, pp. 5-54.

- [27] A. Rossi, *Le scienze nell'Enciclopedia Italiana*, in A. Casella, A. Ferraresi, G. Giuliani, E. Signori (a cura di), *Una difficile modernità. Tradizioni di ricerca e comunità scientifiche in Italia -1890-1940*, Università degli Studi di Pavia, 2000, pp. 91-104.