

La nascita dell'elettrotecnica scientifica: l'ingegnere elettrico come figura postmaxwelliana

Adriano Paolo Morando

Dipartimento di Elettrotecnica - Politecnico di Milano

Gli anni che vanno dal 1846 al 1864, in attesa che l'alternata risulti trasportabile e possa alimentare un motore capace di autoavviarsi, la dinamo viene studiata con grande impegno da scienziati e tecnici.

Tra i lavori più importanti di quegli anni si segnalano quelli di Weber, Neumann, Jacobi, Poggendorf e Lenz. Nel '67 tali indagini sarebbero culminate, su *The Electrician*, in un'analisi teorica dello stesso Maxwell. Giudicata esemplare dagli storici della scienza, essa avrebbe fatto il punto sull'autoeccitazione nelle macchine a collettore. Ne sarebbe seguito, per un decennio circa, un periodo di latenza al termine del quale, con la maggior richiesta di potenza da parte di un'illuminazione in via di sviluppo, ci sarebbe stata una nuova e più intensa fase di studio. Questa si sarebbe infine conclusa nell'84 con la pubblicazione, da parte di Clausius, di una teoria evoluta e di più ampio respiro nella quale, per via termodinamica, venivano messi in equazione anche aspetti fenomenologici fino a quel momento giudicati secondari.

Le aspettative e le scelte di base di quel periodo avrebbero dato vita negli anni successivi a quella fase eroica della futura ingegneria elettrica che Galileo Ferraris definirà leggendaria. Iniziata con la costruzione di dinamo destinate all'alimentazione di una sola lampada e che si meritavano l'appellativo di "grandi" se solo erogavano qualche cavallo di potenza, essa poté dirsi conclusa nel '91, quando, su una distanza di 170 km, tra le cascate di Lauffen e la città di Francoforte, un elettrodoto trifase trasportò una potenza di 200 cavalli. In quell'anno il problema della trasmissione a grande distanza delle "correnti forti", da poco delineato maxwellianamente da Poynting e da Heaviside, avrebbe trovato la sua prima soluzione concreta. Con essa, seppur ancora circoscritta al ruolo di semplice capitolo della fisica tecnologica, sarebbe apparsa l'elettricità colta nei suoi rapporti con la tecnica, cioè, con Ferraris stesso, l'elettrotecnica.

Sul versante tecnologico la situazione non appariva altrettanto promettente: vi regnava infatti, in attesa della comparsa di un contributo chiarificatore di pari efficacia, la più completa confusione progettuale. Delegato ufficiale del governo italiano all'esposizione di Parigi dell'81, Ferraris, osservando la dinamo Edison esposta, annota al riguardo che «forse non tutte le sue parti hanno le disposizioni più razionali». In effetti, con la progressiva crescita della potenza in gioco, andavano sempre più evidenziandosi le difficoltà dovute all'assenza di una teoria dei circuiti magnetici capace di correlare in termini di dimensionamento magneto-elettrico la geometria della macchina con il campo in essa racchiuso. Tutto questo accadeva benché, almeno in linea di principio, le conoscenze necessarie allo scopo fossero già interamente racchiuse nella *Dynamical Theory* da poco formalizzata. Per superare tali difficoltà sarebbe bastato solamente conferire forma stazionaria alle equazioni di Maxwell e successivamente integrarle lungo percorsi ferromagnetici filiformi concatenati con le correnti di statore e rotore. Per approdarvi, la Tecnica, sottraendosi in tal modo consapevolmente alla guida della Scienza, avrebbe invece adottato un percorso metodologico del tutto autonomo, non di rado più empirico del lecito ed assai spesso sofferto e contraddittorio. Ne avrebbero risentito, in particolare, l'analisi fondazionale implicita nella transizione campi-reti e, in misura non minore, la teoria delle macchine elettriche. Tra queste il trasformatore, il primo ad essere incontrato dagli elettricisti lungo il cammino che doveva portarli all'alternata, per le errate interpretazioni di cui fu oggetto, sarebbe stato la vittima più illustre.

Nel 1833, a due anni dalla legge di Faraday, negli Stati Uniti, un certo Sig. Bernstein, presentando un "trasformatore", si vide negare il brevetto perché l'esaminatore ritenne impossibile la realizzazione di un apparecchio che, stando all'inventore, fosse in grado di erogare una corrente secondaria maggiore di quella primaria. Lo stesso Gaulard, d'altra parte, accarezzò per un certo tempo l'idea che il suo generatore secondario creasse energia. Egli

inoltre, impressionato dal riscaldamento del nucleo ferromagnetico sottoposto a magnetizzazione variabile, pensò seriamente di risolvere il problema proponendo l'impiego sostitutivo di un nucleo di legno...

Solo in una fase successiva, connotata da un simultaneo allargamento della base fisico-matematica dell'approccio, l'esigenza di un ripensamento concettuale e di una unificazione metodologica avrebbero condotto ad un più ampio e proficuo raccordo tra le due sensibilità. Nell'immediato, queste difficoltà si attenuarono allorché fu dato da Rowland il primo incerto fondamento sulla teoria dei circuiti magnetici e fu in seguito introdotta, con Heaviside, la nozione di riluttanza. La successiva diffusione di tale teoria, soprattutto grazie ad Hopkinson e Kapp, fece poi il resto.

Nel frattempo, con la rapida crescita sia delle potenze in gioco che delle distanze da superare, la corrente alternata andò assumendo, seppur con non poche controversie iniziali, il progressivo sopravvento sulla continua. Il suo impiego era risolutivo perché, consentendo l'elevazione trasformatorica della tensione a monte, rendeva prospettabile la trasmissione di potenze elevate su lunghe distanze. Tale impostazione portò però con sé, immediatamente a valle del trasformatore stesso, l'arduo problema legato alla realizzazione del motore in alternata. Questo infatti doveva essere in grado di sostituire la macchina Pacinotti e pertanto, a differenza di quanto accadeva per un sincro in qualche modo già disponibile, doveva essere a coppia spontanea.

Il conseguimento di questi due risultati cruciali, merito indiscusso ed esclusivo di Galileo Ferraris, nell'indicare la strada maestra della futura energetica elettrica, impose alla elettrologia una severa revisione formale ed analitica della sua metodologia. Tale rilettura avrebbe in seguito condotto ad un affinamento che, iniziando proprio dallo studio della corrente alternata, si sarebbe ben presto tradotto in un ampliamento della base fisico-matematica delle scienze elettriche. Ne sarebbe in tal modo derivata, grazie ad una più ravvicinata integrazione tra le due sensibilità, la teorica e la applicativa, la moderna elettrotecnica scientifica.

Dallo scienziato inventore al fisico matematico che diventa ingegnere

Espressione di un'evoluzione complessa, l'Elettrotecnica non ebbe un esordio facile: le mancò in questo senso l'osmosi iniziale con una *scienza elettromagnetica* consolidata, capace in quanto tale di precisarne con chiarezza metodi ed obiettivi. Ciò comportò divergenze metodologiche che videro assai spesso elettrici di diversa formazione arroccati su schieramenti avversi. Ne è significativa testimonianza la seguente affermazione di M. Pupin: « *Attempts of ordinary mortals to do better than Maxwell did must discouraged. Let us follow Maxwell as long as we can, then, when someone is born who is more profound than Maxwell, we will bow him* ».

Comune a molti fisici matematici dell'epoca, tale convinzione, nel momento in cui essa veniva estesa alla tecnologia, evidenziava però un falso problema, perché in realtà i *comuni mortali* in questione, nello studiare e nel progettare le loro apparecchiature, non cercavano in alcun modo di agire meglio del fisico scozzese. Né, tanto meno, intendevano modificare quella sua teoria che essi, al pari degli stessi fisici matematici, consideravano la base comune dell'Elettromagnetismo sia teorico che tecnico. Il loro obiettivo, una volta constatato che tale approccio generale non era abbastanza accurato per il lavoro pratico, era invece un più circoscritto approdo progettuale che potesse rappresentare ingegneristicamente quegli effetti di saturazione, isteresi, flussi dispersi e tempo-varianza che risultavano sempre meno trascurabili nelle macchine e negli apparecchi elettrici. Nulla di meglio dunque rispetto a Maxwell, ma, al più, qualcosa di diverso e, se possibile, di "ambiziosamente complementare".

Assimilata la *Dynamical Theory*, gli *elettrici*, "galileianamente", rinunciavano dunque a «*tentar l'essenza per cercar solo di alcune affezioni*». L'evoluzione ed il chiarimento non sarebbero stati tuttavia immediati: l'affermazione di Pupin risale infatti al 1918, ma la definizione finale dei ruoli e dei complessi rapporti tra Elettromagnetismo ed Elettrotecnica sarebbe giunta, con

l'Ingegneria delle equazioni di Maxwell, solo molto tempo dopo. E la sua riformalizzazione metodologica può dirsi a tutt'oggi in atto.

La figura più emblematica in questa transizione, probabilmente il primo ingegnere elettrico nel senso moderno, fu C.P. Steinmetz, *a mathematical physic who began to be an engineer*, come assai efficacemente fu definito dagli americani. Integrando la sua rigorosa formazione teorica di base, acquisita a Breslau ed al Politecnico Federale di Zurigo, con la concretezza applicativa della grande industria, egli portò a compimento l'evoluzione già iniziata dai postmaxwelliani come Heaviside e dagli "scienziati-inventori" come Hopkinson, Fleming e Kapp, approdando in tal modo all'Elettrotecnica attuale, quella che egli stesso definì *the most mathematical of all engineering disciplines*. Sono significative a questo riguardo le sue risposte da tecnologo alla critica maxwelliana del fisico Pupin, perchè esse ben esprimono, con l'intricato rapporto tra scienza e tecnica di cui sono espressione, il travaglio metodologico che portò alla tecnologia elettrica attuale. Tra queste vanno ricordate le sue riflessioni sullo studio del trasformatore, da lui stesso, maxwellianamente, già modellizzato come *ironless induction coils*, per le quali «*the maxwellian theory of the transformer described a device that does not exist in practise, but merely haunts as a phantom transformers the text-books and mathematical treatise on transformers*». Ed in modo analogo quelle sull'asincrono, secondo cui «*most theories of the induction motor were written only by theorist who never constructed a motor themselves and who have never seen a motor taken apart*».

Il risultato, ben sintetizzato dal rapporto simbiotico tra teoria e pratica presente nei suoi trattati¹, sarebbe stato, dopo il perfezionamento nel trasformatore dei modelli ibridi di Hopkinson[92-93] e di Kapp [94], la macchina asincrona, per la quale, già nel '97, egli avrebbe impostato la teoria moderna, compendiosa dell'approccio fasoriale, del doppio bipolo a T riferito ai dati di statore, del diagramma circolare [175].

In seguito, ed in tal caso la sua formazione di teorico sarebbe stata essenziale, egli si sarebbe rivolto, studiandone i guasti, alla teoria delle linee a costanti distribuite che, già trentanni prima, Heaviside aveva teorizzato [96]. In tale circostanza, scontrandosi da fisico matematico con le realtà applicative, egli avrebbe portato alle estreme conseguenze le sue critiche metodologiche, osservando che «*phantom transmission lines circuit of uniformly distributed capacity and inductance was very different from the circuit existenting in practis*». L'esito sarebbe stato il suo magnum opus: "*Theory and calculation of transient phenomena and oscillation*" (1909), espressione evoluta della sua "filosofia ingegneristica", nella quale la fusione applicativa tra equazioni a derivate parziali e calcolo operatoriale formalizzavano in modo ormai definitivo quelle che egli definì le *connecting links between pure science and practical work*.

Mutui induttori, perdite nel ferro e numeri complessi...

Nel 1864, a conclusione dei suoi studi sul pensiero faradiano, J.C. Maxwell pubblicava la *Dynamical Theory*. Esplicitamente rivolta ai fisici di professione, tale opera non celava tuttavia la possibile presenza di alcuni risvolti applicativi riguardanti l'elettrotecnica. Vi compariva in particolare, già svolta in una forma completa riconducibile all'odierno approccio lineare e temporale, un'inattesa teoria dei mutui induttori.

In ambito elettrico tali contributi erano cruciali perché venivano proposti alle nascenti "tecnologie elettriche" proprio nello stesso momento in cui l'analisi delle macchine dinamo elettriche, passando ad una prima fase produttiva, poneva ipoteche sempre più onerose alla teoria dei fenomeni magnetoelettrici.

Gli elettricisti di quegli anni, totalmente digiuni di fisica matematica, non colsero in alcun modo l'importanza applicativa di quei risultati. Attratti dalla sola "evidenza apparente" dei fenomeni, essi rimasero per il resto, anche in ragione di una formazione scientifica quanto meno dubbia, sospettosi di tutto quanto non fosse immediatamente osservabile. Finirono pertanto con il rivendicare, con loro

¹ Oltre a 150 articoli, C.P. Steinmetz è autore dei seguenti trattati [101]: "*AC Phenomena*" (1894), "*Theory and calculation of Alternating Current Phenomena*" (1897), "*Theoretical Elements of Electrical Engineering*" (1900), "*General lectures on Electrical Engineering*" (1908), "*Radiation, light and illumination*" (1909), "*Theory and calculation of transient phenomena and oscillation*" (1909), "*Engineering Mathematics*" (1911), "*Theory and calculation of electric circuits*" (1917).

grave danno, una completa autonomia nei confronti del lascito maxwelliano, di cui non seppero e non vollero giovare.

Una misura degli effetti di tale voluta scissione si ebbe con G.Prescott, un telegrafista. Questi, calcolando il rapporto $v(t)/i(t)$, affermò che: «it is a well known fact that alternating currents do not follow Ohm's law, and nobody knows what law they follow». Era il 1888: da un quarto di secolo Maxwell aveva mostrato che «the AC obeyd Ohm's law».

Accadrà in tal modo che i trasformatori, non solo appariranno ben cinquant'anni dopo della legge di Faraday, ma la loro stessa teorizzazione scientifica, non senza difficoltà e a fronte di non pochi e risibili paradossi, risulterà possibile, con Ferraris, solo vent'anni dopo della *Dynamical Theory* maxwelliana.

Nel 1873, a conclusione dei suoi precedenti studi di elettromagnetismo, Maxwell pubblica il suo *Treatise*. Pur paradigmatico, nella sua ampiezza e completezza, della futura ingegneria elettrica, di fatto, e forse inizialmente non del tutto a torto, esso viene inizialmente considerato dai tecnici come una semplice «paper theory» incapace di fornire una risposta concreta all'urgenza dei loro quesiti applicativi.

La stessa teoria ferrarisiana del trasformatore, ammettendo maxwellianamente la costanza della terna dei coefficienti di auto e mutua induzione, era rimasta vincolata all'idea preliminare propria di un nucleo magnetico perfetto. Implicita in una lettura metodologica di tipo fisico matematico, essa, più vicina al mutuo induttore che non al trasformatore, aveva pertanto ignorato aspetti cruciali nei riguardi del funzionamento reale degli apparecchi elettrici, quali l'esplicita dipendenza della permeabilità dalle correnti di eccitazione, il ruolo delle perdite per isteresi ed infine il non secondario contributo dei flussi dispersi.

Negli anni successivi il rifiuto degli elettrici, cui andò contrapponendosi l'accettazione sempre più ampia dei fisici matematici, privò l'ingegneria elettrica della benefica osmosi con una scienza elettromagnetica già ampiamente consolidata, capace in quanto tale di precisare con chiarezza i metodi e gli obiettivi propri della parallela area applicativa. Ne derivò in tal modo, proprio nel momento in cui la potenza delle macchine e delle linee elettriche rendeva sempre più impegnativa la progettazione, una netta separazione tra la pratica, empiricamente gestita da tecnici di incerta preparazione, e la teoria, coltivata invece da scienziati-inventori che non sempre sapevano oltrepassare i limiti dell'approccio puramente metodologico.

In questo senso, all'indomani di Lauffen, la teorizzazione ferrarisiana del trasformatore e dell'asincrono aveva ormai esaurito il suo compito scientifico. Non poteva pertanto recare i necessari contributi concreti a chi si accingeva a progettare concretamente le macchine reali. Secondo Steinmetz, coinvolto con la supervisione di Kelvin nel progetto di *Niagara Falls*, occorreva a quel punto, precisata in qualche misura la teoria della conversione e della trasmissione, una «translation of information from science to technology». E, con essa, la messa a punto di opportune «design equations» in grado di incorporare a livello progettuale tutti quegli aspetti reali, quali non linearità, dispersioni ed isteresi, fino a quel momento “negati” dalla *Dynamical Theory*. Solo in questo modo, infatti, sarebbe stato possibile, agli effetti della progettazione, mettere i contenuti fisico matematici del *Treatise* in grado di fornire soluzioni ingegneristiche corrette e, nel contempo, generali e ricorsive.

Ciò che, pur con tutte le incertezze e le divergenze del caso, si intuiva con chiarezza era che la soluzione ad un problema di così ampia portata non avrebbe potuto che essere approssimata. Si trattava infatti di legittimare un compromesso che, per l'immediatezza dei calcoli e delle misure richieste, risultasse nel contempo sia direttamente fruibile sul piano realizzativo che sufficientemente legittimo su quello del rigore metodologico.

Il nuovo approccio prospettato, dal quale doveva nascere la futura ingegneria elettrica, non mancò di suscitare vivaci polemiche tra gli ingegneri ed i fisici matematici di quegli anni. I primi, rinunciando consapevolmente al rigore, sostenevano di poter riuscire solo per via approssimata ed intuiti-

va a tener conto in modo soddisfacente dei contributi di dispersione, non linearità ed isteresi. I secondi, fautori invece di una lettura maxwelliana di stretta osservanza, accusavano i primi di non essere neppure in grado, con le loro *design equations*, di fornire definizioni formalmente corrette per le grandezze e le relazioni di cui facevano uso.

E, a conferma della loro accusa di mancato rigore, essi sottolineavano come la maggior parte di questi ingegneri, Steinmetz per primo, evitassero accuratamente di pubblicare le loro relazioni anche nei casi particolari in cui esse non erano in alcun modo coperte dal segreto industriale...

La polemica divampò in tutta la sua asprezza nel 1894, al Congresso AIEE di Chicago, quando M. Pupin, docente alla Columbia University, criticò aspramente Steinmetz, accusandolo di «far uso di formule empiriche e mal definite». Fu Kennelly, in quell'occasione, a prendere le difese di Steinmetz, a nome del quale rivendicò il «diritto degli ingegneri di ricorrere a metodi ingegneristici per risolvere problemi ingegneristici». Non per questo la polemica si sopì, tanto che fu lo stesso Pupin a tornare nuovamente all'attacco. Prendendo spunto dalla teoria perfezionata del mutuo induttore, in quegli anni oggetto di ricerca da parte dei costruttori di macchinario elettrico, egli accusò lo stesso Steinmetz, e più in generale gli ingegneri elettrici, di voler illecitamente abbandonare la strada maestra tracciata dell'elettromagnetismo maxwelliano per sostituirla con una nuova teoria, legata al cosiddetto metodo ibrido, di dubbia validità.

Quella mossa da Pupin era un'accusa assai grave per la futura ingegneria elettrica scientifica. Sulla teoria perfezionata del mutuo induttore si basava infatti la rappresentazione circuitale dei contributi trasformatori e mozionali impliciti, per il caso di due circuiti mutuamente accoppiati, nella legge di Faraday. Metterne in discussione i contenuti, come fece Pupin, e soprattutto negarne la precisa derivazione maxwelliana, significava riconoscere alla nascente elettrotecnica la sua matrice scientifica, privandola in tal modo dell'apporto che essa avrebbe potuto derivare dal paradigma maxwelliano². La critica di Pupin era poi scorretta anche dal punto di vista scientifico perché le definizioni di induttanze che conseguivano dal modello ibrido erano in realtà rigorosamente di tipo maxwelliano³.

Ne derivarono divergenze metodologiche che videro sempre più spesso elettrici di diversa formazione arroccati su schieramenti avversi. Ne è significativa testimonianza, ancora una volta, la affermazione dello stesso Pupin, per il quale « *Attempts of ordinary mortals to do better than Maxwell did must discouraged. Let us follow Maxwell as long as we can, then, when someone is born who is more profound than Maxwell, we will bow him* ».

Comune a molti fisici matematici dell'epoca, tale convinzione, nel momento in cui essa veniva estesa alla tecnologia, evidenziava però un falso problema, perché in realtà i «comuni mortali» in questione, nello studiare e nel progettare le loro apparecchiature, non cercavano in alcun modo di

²Già nei primi anni '80 gli elettrotecnici avevano compreso come il modello maxwelliano, legato alle auto e mutue induttanze, pur corretto agli effetti esterni, cioè nel senso del calcolo di tensione e corrente ai morsetti, fosse del tutto inadeguato per le applicazioni tecniche. Quest'ultima consapevolezza derivava dal fatto che esso non solo non si prestava facilmente a mettere in conto le non linearità del legame $b(h)$, ma soprattutto non conduceva al calcolo di quei flussi comune (presente nel circuito ferromagnetico) e disperso (concatenato con uno solo dei due solenoidi), la cui conoscenza, in termini di equivalenza agli effetti interni, era indispensabile per il costruttore. Il perfezionamento della teoria del mutuo induttore, introdotto da Hopkinson e da Kapp sul finire degli anni '80, era consistito nell'adottare un metodo, cosiddetto ibrido, nel quale alla terna degli elementi $\{L_1, L_2, M\}$, propri del circuito elettrico, veniva associata quella corrispondente delle permeanze $\{\lambda_{d1}, \lambda_{d2}, \lambda_{\mu}\}$ deducibili dal circuito magnetico concatenato e rispettivamente rappresentative dei tubi di flusso disperso e comune.

³ Sul piano formale la definizione che ne seguiva di induttanza di dispersione, essendo del tipo:

$$\frac{N\Phi_d}{i} = N^2 \lambda_d = \ell_d$$

era infatti perfettamente riconducibile a quella del tipo:

$$\frac{N\Phi}{I} = N^2 \Lambda = L$$

già dovuta a Maxwell.

agire meglio del fisico scozzese. Né, tanto meno, intendevano modificare quella sua teoria che essi, al pari degli stessi fisici matematici, consideravano la base comune dell'elettromagnetismo, sia teorico che tecnico. Il loro obiettivo, una volta constatato che tale approccio generale non era abbastanza accurato per il lavoro pratico, era invece un più circoscritto approdo progettuale che potesse rappresentare ingegneristicamente quegli effetti di saturazione, isteresi, flussi dispersi e tempo-varianza che risultavano sempre meno trascurabili nelle macchine e negli apparecchi elettrici. Nulla di meglio dunque rispetto a Maxwell, ma, al più, qualcosa di diverso e, se possibile, di complementare in senso applicativo.

Assimilata la *Dynamical Theory*, gli elettrici, "galileianamente", rinunciavano dunque a «tentare l'essenza per cercar solo di alcune affezioni». Ancora una volta la figura più emblematica in questa transizione, certamente il primo ingegnere elettrico nel senso più completo e moderno, fu proprio C.P. Steinmetz, «*a mathematical physicist who began to be an engineer*», come assai efficacemente fu definito dagli americani. Integrando la sua rigorosa formazione teorica di base con la concretezza applicativa della grande industria, egli portò a compimento l'evoluzione già iniziata dai postmaxwelliani come Heaviside e dagli «scienziati-inventori» come Hopkinson e Fleming, approdando in tal modo all'elettrotecnica attuale, quella che egli stesso definì «*the most mathematical of all engineering disciplines*».

L'espressione più significativa di questa evoluzione si ebbe con la pubblicazione, rivolta ad ingegneri e tecnici, del modello perfezionato del mutuo induttore. La sua formulazione⁴, avente come scopo la «rappresentazione agli effetti interni del trasformatore», comportò la transizione dal «metodo delle induttanze», già introdotto da Maxwell nella *Dynamical Theory* e valido ai soli «effetti esterni», al «metodo di campo», proposto nel 1897 da Steinmetz in *Theory and Calculation of Alternating Current Phenomena*. Tale operazione, resa possibile dal ricorso anche in ambito applicativo a fisici matematici di rigorosa formazione, segnava in modo netto la nascita della moderna ingegneria elettrica scientifica quale evento specificamente postmaxwelliano. In quel momento infatti, lasciando immutato un substrato maxwelliano giudicato patrimonio comune sia di scienziati che di tecnici, tra le figure dei postmaxwelliani poteva annoverarsi a tutti gli effetti anche quella dell'ingegnere elettrotecnico moderno. Anch'egli infatti, come già Heaviside ed Hertz, aveva in qualche modo riletto, e mai negato, il lascito maxwelliano e, interrogandosi sia sui suoi contenuti che sugli obiettivi ed i metodi dell'elettrotecnica, lo aveva successivamente "ritrascritto" in un modo nuovo, più consono alle sue specifiche esigenze e sensibilità.

Da quel momento l'esperimento di Laufen, che pure, grazie alle "intuizioni" di Dobrowolsky e di Brown, aveva consacrato la tecnologia polifase, sarebbe stato relegato nel passato. Ed al suo posto Steinmetz, Ferraris, Doherty, Slepian e Kron, al sicuro dalle autoevidenze apparenti proprie di un'empirismo scambiato per sperimentazione, avrebbero scritto la moderna elettrotecnica scientifica.

In questo senso, oltre che per il suo contenuto applicativo legato all'analisi dell'interazione magneto-elettrica presente nelle apparecchiature, il mutuo induttore sarebbe divenuto l'espressione canonica del legame postmaxwelliano tra *Dynamical Theory* ed elettrotecnica. Concepito e via via perfezionato con lo scopo di conseguirne la necessaria equivalenza agli effetti interni, non fu certo casuale il fatto che, in anni successivi, ad un altro fisico matematico, E. Weber, toccasse il compito di mostrare, con un classico controesempio, oltre alla non univocità del modello⁵, la sua incapacità di rappresentare senza eccezione gli effetti interni del nucleo magnetico⁶. Ancora

⁴Correlando, secondo il metodo ibrido, le auto e le mutue induttanze maxwelliane del circuito elettrico alle corrispondenti permeanze proprie e mutue del circuito magnetico ad esso accoppiato, Steinmetz pervenne ad un legame costitutivo del tipo seguente:

$$\begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & M \\ M & L_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1^2(\Lambda_\mu + \lambda_{d_1}) & N_1 N_2 \Lambda_\mu \\ N_1 N_2 \Lambda_\mu & N_2^2(\Lambda_\mu + \lambda_{d_2}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$

grazie al quale, evidenziando corrispondentemente le induttanze di dispersione, gli fu possibile isolare e separare a livello circuitale il flusso comune e i flussi dispersi.

⁵ Essa derivava dall'arbitrarietà, rispetto all'equivalenza agli effetti esterni, del rapporto spire N_1/N_2 prescelto.

una volta il tentativo di «tentare l'essenza» si infrangeva contro la realtà: accadeva dunque, ad ulteriore conferma del carattere paradigmatico del *Treatise*, quanto già si era verificato con il vortice molecolare di Maxwell. Alla teoria delle reti non restava che confermare il suo carattere agnostico nei confronti dei campi interni di cui era rappresentativa in forma integrale quasi-stazionaria.

Nel 1909 Steinmetz avrebbe pubblicato il suo *magnum opus*: “*Theory and calculation of transient phenomena and oscillation*”, espressione evoluta della sua “filosofia ingegneristica”, nella quale la fusione applicativa tra equazioni a derivate parziali proprie di una teoria di campo e calcolo operatoriale formalizzavano in modo ormai definitivo quelle che egli definì le «*connecting links between pure science and practical work*». Ancora oggi, in tale opera, prosecuzione in senso applicativo del *Treatise* e della *Electromagnetic Theory* di Heaviside, sono racchiusi i contenuti post-maxwelliani propri della figura del moderno ingegnere elettrico.

Nel frattempo, sempre «*with the eye of a mathematical physicist who was becoming an engineer*», egli aveva risolto sia il problema cruciale della messa in equazione delle perdite nel ferro⁷ che quello simultaneo della messa a punto dell'algebra dei fasori⁸. Quest'ultimo risultato non era in-

⁶ Calcolata la mutua induttanza $M \neq 0$ di una bobina di Helmholtz, Weber tracciò il campo magnetico ad essa associato per $I_1=2$ A ed $I_2=-1$ A. In accordo con i contenuti della formulazione locale e globale delle equazioni di Maxwell, la mappa ottenuta mostrò, negando in tal modo la condizione $M \neq 0$, una totale mancanza di concatenamenti comuni. A quasi settant'anni dalla Dynamical Theory, tale risultato confermò il carattere agnostico dell'approccio circuitale: pur corretto agli effetti esterni, esso non poteva dare alcuna reale informazione sulla situazione interna del campo

⁷ I tecnici riflettevano su questo problema già dai primi anni '70. La presenza delle perdite nel ferro si avvertiva infatti in modo sempre più massiccio, sia in termini di rendimento che di problemi correlati di ventilazione. Vi era poi, sovrapposta all'isteresi, la questione delle correnti parassite. Il tutto aggravato di giorno in giorno dalla comparsa dell'AC system. In tali condizioni le macchine funzionavano in modo del tutto diverso da come teoricamente venivano rappresentate sui manuali. Occorreva pertanto mettersi in grado di quantificare tali perdite e nel contempo stabilire da quali grandezze esse dipendevano, così da intervenire su di esse sia a livello progettuale che di gestione della refrigerazione corrispondentemente necessaria. Quando, nel 1899, Steinmetz inizia ad occuparsi di isteresi, conosce già le pubblicazioni di Ewing perché le ha esplicitamente citate nei suoi studi sul trasformatore. Affrontando il problema, Steinmetz, «*with the eye of a mathematical physicist who was becoming an engineer*», esegue un *fitting* delle curve sperimentali in quel momento disponibili in letteratura. Ottiene in tal modo risultati che, affetti da un errore inferiore al 2%, egli giudica già probanti. Espressi analiticamente in una forma del tipo:

$$W_h = 300 + 0,00032 \cdot B^{1,83}$$

egli non li pubblica tuttavia, perché l'esponente ottenuto gli appare tipico più di un'indagine empirica che non di quella legge naturale che egli va cercando. Dedotto dall'integrazione di un'equazione differenziale, esso dovrebbe essere infatti, secondo la sua interpretazione, un intero. Prende allora tempo ed esegue nuovi *fitting* dei cicli $b(h)$. Ottiene in tal modo risultati che gli danno ancora un errore dell'1,5%; nel contempo l'esponente, pari ad 1,6, è ancora non intero. Pubblica tuttavia su *Electrical World* del 1890 la sua «legge di isteresi», che da quel momento diventa patrimonio comune dell'ingegneria elettrica scientifica.

Il conseguimento di tale risultato analitico segnava l'avvenuta integrazione dei metodi della fisica matematica con quelli dell'ingegneria. Per giungere alla sua legge Steinmetz non aveva infatti adottato procedure empiriche; si era invece servito proprio dei criteri da lui appresi nei corsi di meccanica celeste seguiti a Breslau e basati sulle tecniche formalizzate da Legendre per la messa in equazione dell'orbita, nota per punti, di una cometa. Identificati operativamente tali punti sul piano $\{B, H\}$, egli si era “semplicemente” limitato ad estendere all'isteresi i metodi appresi all'università. Nel fare questo aveva nel contempo preso le distanze dall'approccio operativo dei fisici. Abbandonato infatti l'uso del galvanometro balistico, da lui ritenuto auspicabile in laboratorio ma non adottabile in ambito industriale, egli si era invece servito, secondo i «*factory methods*» propri dell'ingegneria, solo di voltmetri e di wattmetri, evitando in tal modo sia il tracciamento del ciclo che il successivo ed incerto calcolo dell'area. In seguito Steinmetz perfezionò ulteriormente tali ricerche e mise in conto anche il simultaneo contributo delle correnti parassite. A questo punto, nel 1892, i risultati della sua *AC testing room* vennero da lui pubblicati nella loro forma definitiva. Egli era giunto a tale determinazione ritenendo superato anche il problema legato alla presenza di un esponente non intero, per il quale veniva ad essere negato al suo *best fitting* il voluto carattere di legge universale. Secondo la sua interpretazione la legge di partenza non era differenziale, bensì, fondata su basi probabilistiche, integrale: la presenza di un esponente frazionario era pertanto lecita. La comunità degli elettricisti fu unanime nel riconoscere i suoi meriti. Quanto all'ingegneria elettrica postmaxwelliana, il risultato ottenuto e soprattutto il percorso seguito per conseguirlo confermavano il raggiunto assetto scientifico.

⁸ Gli anni che volgono alla fine del secolo costituiscono un momento propizio per le tecnologie elettriche negli USA. Telegrafia, telefonia, illuminazione, conversione elettromeccanica, trasmissione della potenza elettrica sono in ampia espansione applicativa. E in tale ambito la battaglia dei grandi sistemi, la continua e l'alternata, si combatte ormai da

tempo senza esclusione di colpi. Quella attraversata in quel momento dall'ingegneria elettrica statunitense è però ancora la fase eroica della sua evoluzione. Nell'ipotesi più favorevole, i pionieri dell'elettricità sono infatti solo degli abili e fortunati empiristi con prevalenti doti manageriali. Requisiti necessari, anzi indispensabili, ma certamente, all'indomani di Hopkison, Kapp e Ferraris, non più sufficienti. Non a caso *The Electricians* si rivolge sia a fisici matematici impegnati nell'elettromagnetismo metodologico che a tecnici come Edison, Westinghouse, Kennelly, Thomson, etc. Molti di questi, come W. Stanley, provengono dalle arti liberali a Yale, altri dalla Marina Militare degli Stati Uniti; pochi, come Tesla, hanno invece una formazione specifica, conseguita, in questo caso, a Vienna. Per l'affermazione definitiva dell'elettrotecnica industriale occorre dunque un salto di qualità definitiva, di portata tale da consentire di coniugare Edison con Maxwell...

Nell'anno in cui Steinmetz approda negli USA le università locali hanno già iniziato a sfornare i loro primi laureati, gli *operating engineers*. E la definizione usata è quanto mai esplicita. Da più parti, con spiccato spirito di corpo, si mormora infatti che, pur con gli indubbi contributi resi alla trazione, agli opifici, all'illuminazione, «*electrical engineering was born yesterday and had no long-standing tradition, no professional culture*». In particolare, se il trasformatore e l'asincrono hanno imposto l'AC system, di fatto si hanno grandissime difficoltà nel trasferire questa scelta nella concretezza della produzione industriale perché l'analisi delle reti in alternata, abbandonata l'algebra dei numeri reali propria della corrente continua, richiede il ricorso alle equazioni differenziali ordinarie, ignorate dalla maggior parte degli ingegneri elettrici americani di quegli anni. Per rendersene conto, basta osservare che, ancora nel 1899, solo quattro facoltà di ingegneria americane, MIT, Armour Institute, California e Ohio State, prevedono il calcolo differenziale...Lo stesso Steinmetz, consapevole di queste difficoltà, osservò al riguardo che «*at present all mathematical theories, especially if they have to start from the solution of differential equations, are still of very little value for 'practical engineer' who is not yet generally expected to master the powerful weapons of mathematics*». La soluzione giunse nel 1885, con la pubblicazione su *The Electrician*, da parte del matematico Thomas Blakesley, docente al Collegio Navale di Londra, di un articolo dal titolo "Alternating currents". In esso, sfruttando la corrispondenza tra sinusoidi isofrequenziali e vettori rotanti già evidenziata da Fresnel, la ricerca della soluzione di regime veniva resa più facile e spedita riducendola ad una serie di costruzioni di statica grafica da compiersi su vettori rotanti sincroni. Il procedimento, successivamente perfezionato da Kapp a proposito dei trasformatori, non dava certamente le soluzioni transitorie, ma risultava pur tuttavia oggetto di concreto interesse, dal momento che, combinando un po' di trigonometria con righello e compasso, forniva in modo diretto e tangibile risultati comparabili con quelli ottenibili integrando faticosamente le leggi di Maxwell. Confermata preliminarmente con Maxwell l'isofrequenzialità e la sinusoidalità della risposta di regime, le equazioni dei circuiti divenivano in tal modo più semplici. Soprattutto esse risultavano più tangibili e più visibili rispetto all'immagine offerta in precedenza da quelle "astratte equazioni differenziali" così tanto lontane dalla formazione di base dei tecnici dell'epoca. Nel contempo, provenendo essi in gran parte da ingegneria meccanica o civile, la dimestichezza con la statica grafica risultava per loro un percorso concettuale obbligato ed efficace. Impegnato in prima linea nell'AC system, Steinmetz perfeziona le costruzioni di Blakesley e di Kapp, avvalendosi a questo scopo dei metodi grafici, cartesiani e polari, che egli ha imparato a Zurigo nello studio delle valvole impiegate negli impianti a vapore. Imposto dall'AC System, il calcolo fasoriale andava dunque affermandosi e perfezionandosi grazie alle conoscenze della tecnologia.

In effetti molti fisici matematici avevano già fatto ricorso a questo metodo. Ad esempio, per studiare il ponte in AC che Maxwell aveva ideato nel 1863, un assistente di von Helmholtz aveva tradotto le equazioni differenziali del ponte in equazioni algebriche complesse. E, nel calcolare il rapporto tensione-corrente, egli era giunto a quella che espressivamente denominò in seguito «resistenza complessa». Già lo stesso Helmholtz, d'altra parte, probabilmente per primo, aveva fatto uso dell'identità di Eulero per trovare sbrigativamente per via algebrica, secondo il «metodo degli esponenziali complessi», le soluzioni di regime permanente sinusoidale delle equazioni di Maxwell. E lo stesso era accaduto successivamente a Lord Rayleigh, che se ne era servito, dapprima per i suoi lavori di ottica, acustica, idrocinetica e successivamente per perfezionare i suoi studi sull'effetto Kelvin, con i quali sarebbe giunto per via complessa allo spessore di penetrazione. Nel luglio del '92, un anno prima della pubblicazione dei lavori di Steinmetz, F. Bedell e A. Crehon, della Cornell University, avevano addirittura sostituito, per evidenti ragioni di chiarezza tipografica, l'operatore i mutuo dai matematici, con l'attuale j .

Lo stesso Heaviside, d'altra parte, coniò il termine impedenza già nel 1886, elaborando il suo calcolo operatoriale ed introducendo in quell'occasione, attraverso il suo "fattore p ", quella resistenza operatoriale «*that turns the current into voltage*». Indicata con z , poichè la lettera dell'alfabeto che veniva immediatamente prima è la y , egli denotò successivamente con questa lettera l'ammittanza operatoriale. E' un fatto che per le sue «*complex quantities*» Steinmetz adottò la stessa scelta ed è assai poco probabile che egli abbia avuto autonomamente la medesima idea per due identiche lettere consecutive dell'alfabeto. Del resto Steinmetz conosceva molto bene l'opera di Heaviside, sia come serie di articoli che come successiva raccolta pubblicata nel '92 sotto il titolo *Electrical Papers* da *The Electrician*. E' lo stesso suo alter ego, E.J. Berg, a ricordare, in una conversazione con l'amico Heaviside, come, già nell'83 Steinmetz ne stesse leggendo i lavori.

In alcuni passi delle sue opere Heaviside fece presente come la sua funzione $z(p)$ fosse riguardabile come una spontanea generalizzazione di quanto potrebbe scriversi sul piano di Gauss. Egli tuttavia, ove si prescindia dai due casi isolati del gennaio 87 e novembre del '93 in cui rispettivamente propose la posizione $p=j\omega$ ed analizzò il collegamento serie e

teramente nuovo, dal momento che, sotto il nome di «metodo degli esponenziali complessi⁹», era stato da tempo adottato da von Helmholtz e comunque era già implicito nei lavori di ottica matematica di Fresnel. Innovativo era invece lo spirito, quello della “nuova ingegneria”, che animava questa elaborazione. E con esso la consapevolezza che nel combattere la battaglia dell’AC system non si poteva né prescindere dal livello matematico degli «*operating engineers*», né dal fatto che, per visualizzare loro la soluzione, occorreva ricondursi a quei metodi di statica grafica nei quali esse erano senz’altro ferrati. Solo in quel momento, portando alle estreme conseguenze applicative un formalismo che presso i fisici matematici era stato solo accennato, la battaglia dell’alternata, iniziata da Ferraris, poteva dirsi completamente vinta. Non a caso V. Karapetoff, a proposito dell’impatto del calcolo simbolico sullo studio delle reti, delle macchine e degli elettrodotti, parlerà postmaxwellianamente di «*to try to generate electricity from square root of minus one*».

4-2) Dal metodo storico al metodo logico: verso un’ingegneria dei circuiti elettrici

Il 1826 fu *anno mirabilis* per la comunità degli elettrici: proprio in quell’anno, infatti, G. S. Ohm, sotto l’esplicita influenza degli studi compiuti in precedenza da J.B. Fourier sul calore, enunciò la sua famosa legge. Con essa, quasi repentinamente, prendeva il via la *Teoria dei circuiti*. Nel 1845 fu poi la volta di G. Kirchhoff, il quale dedusse per le reti i due omonimi principi. Nel seguito, abbandonato il campo elettromotore voltiano, di tipo stazionario, si passò con Faraday al più generale ed impegnativo regime variabile. Almeno all’apparenza, nessun inconveniente sembrò tuttavia frapporsi all’estensione spontanea delle leggi già enunciate in precedenza. E la conferma si ebbe già nel 1854 con la formalizzazione lagrangiana, da parte di lord Kelvin, di un’equazione circuitale a “due energie” del tipo seguente:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{L}{2} q^2 + \frac{1}{2C} q^2 \right] = -Rq^2$$

nella quale, provvisoriamente, la futura induttanza compariva come una non meglio identificata «capacità dinamica».

Nel seguito, superata l’urgenza applicativa imposta dalle prime trasmissioni via cavo, sarebbe stato compito di J.C. Maxwell quello di formalizzare tale approccio con il rigore e con la generalità che, anche “accademicamente”, gli erano comunque dovuti. Ciò sarebbe accaduto, già nel 1864, proprio con la sua *Dynamical Theory*.

quello parallelo di un condensatore e di un solenoide, egli non sviluppò mai consapevolmente la possibile lettura fasoriale implicita nel suo approccio. In realtà, sono questi gli anni in cui, indagando il modo TEM di una linea, perviene all’omonima condizione che rende possibile la telefonia, Heaviside rimase un fisico matematico interessato prioritariamente all’analisi della propagazione e della diffusione di onde guidate da linee. Ed è in questa ottica che, a proposito del suo calcolo operatoriale, deve collocarsi la sua affermazione secondo cui «*I do not refer to practical men in very limited sense of anti-or extra-theoretical, but to theoretical men who desire to make theory practically workable*». Steinmetz fa suo il contenuto delle dichiarazioni programmatiche di Heaviside. Solo che egli le particularizza alla *Starstromtechnik* e soprattutto non lascia nulla di implicito in questo potente formalismo, ma dedica invece i migliori anni della sua vita a scandagliare tutti i fondali dell’algebra dei fasori fino a farne, proprio in quella che è la sua forma attuale, uno strumento perfetto per l’ingegneria dell’AC system. Nell’agosto del 1893, all’IEC a Chicago, Steinmetz presenta, in un articolo rivolto agli applicativi, le sue «*complex quantities*». Nell’ottobre del ‘94 il lavoro viene pubblicato dall’AIEE. In tal modo, di articolo in articolo, egli insegnerà alla comunità degli elettrici l’uso del teorema di Kennelly-Steinmetz nelle reti, nelle macchine e negli impianti.

Dal 1893 al 1910, quando il metodo entra ufficialmente nella IEC, vengono scritti trenta articoli sui fasori. Di questi tredici sono di Steinmetz e sei di Berg: con tali risultati, si incomincia finalmente a parlare di una «*Steinmetz School at GE*».

⁹Ancora oggi alcuni trattati moderni di Fisica Matematica, tra cui quello autorevolissimo di Enrico Persico, usano tale terminologia a proposito della ricerca della soluzione di regime di un’equazione differenziale lineare a coefficienti costanti sottoposta ad ingresso sinusoidale.

Per parte sua la *Teoria delle reti* proseguì, e con eccellenti risultati concreti, nella propria ricerca. Inizialmente il percorso compiuto, assai spesso legato ad un “volonteroso quanto fortunato empirismo”, parve confermarsi del tutto autonomo rispetto alla *Dynamical Theory*. Nel 1888 invece, inaspettatamente, l’approccio seguito si scontrò con l’esperienza hertziana. Nel compiere la sua indagine, volta a verificare sperimentalmente il contenuto propagativo implicito nelle equazioni di Maxwell, Hertz formalizzò appositamente la sua teoria del dipolo oscillante. Dovette avvalersi a questo scopo anche della formula di Kelvin, ma, per elaborarla, accettò di utilizzare le relazioni pre-maxwelliane di *Neumann*. Commise in tal modo, e la cosa non sfuggì ad un Poincaré particolarmente critico, il grave errore metodologico di dimostrare sperimentalmente la validità di una teoria nuova servendosi di relazioni che, a priori, erano proprie solo di quella vecchia.

Sul piano concettuale una simile critica, del tutto lecita, rischiava di invalidare sia l’attesa legittimità del pensiero maxwelliano che la conseguente possibilità di una sua successiva particolareggiata circuitale.

Sarà una lettera di Heaviside ad Hertz del *13 agosto 1889*, oggi gelosamente conservata al *Deutsche Museum* di Monaco, a tranquillizzare il fisico matematico tedesco. E con lui, per quanto del tutto inconsapevolmente, l’intera comunità degli elettricisti dell’epoca. In essa si precisava come il metodo hertziano potesse ritenersi correttamente applicabile solo a condizione che «*le onde in gioco fossero più lunghe*» dell’oscillatore stesso. Grazie al ricorso preliminare alla più generale Teoria dei Campi, la Teoria delle Reti trovava dunque la sua prima condizione di legittimità.

Per parte sua Heaviside anticipava, e di non pochi anni, quelle che successivamente sarebbero state le più usuali condizioni di Abraham. In seguito il necessario lavoro di chiarificazione, in larga parte preliminarmente compiuto proprio su quelle stesse formule di Neumann incriminate da Poincaré, non sarebbe risultato né facile né immediato. In ogni caso da tale ricerca sarebbe apparso definitivamente chiaro come le teorie circuitali di Ampère, Neumann, Kirchhoff etc., fino ad allora indiscriminatamente utilizzate come se il regime fosse sempre stazionario, costituissero soltanto dei risultati approssimati, deducibili per via quasi-statica dagli integrali generali delle equazioni di Maxwell.

Negli anni successivi l’analisi fondazionale dell’approccio circuitale non avrebbe più potuto prescindere da tale consapevolezza. E, con essa, dalla necessità di dedurre in modo diretto e rigoroso la teoria delle reti dalle equazioni di Maxwell, così da esplicitarne con la dovuta chiarezza sia la portata concettuale che le condizioni di legittimità. La soluzione a tale problema, successiva ai lavori dello stesso Steinmetz, sarebbe giunta solo nel 1927, a cento anni dalla legge di Ohm, con la pubblicazione da parte di J.R. Carson di «*Electromagnetic theory and foundations of electric circuits theory*».

Oggi quel lontano lavoro post-maxwelliano di Carson, fondamento della moderna Ingegneria Elettrica, deve considerarsi, unitamente ai lavori di Steinmetz, come la necessaria prosecuzione circuitale di quella *Dynamical Theory* di cui conserva sia il rigore fondazionale che il ruolo innovatore¹⁰.

In quegli anni l’analisi fondazionale dell’elettrotecnica andò radicalizzandosi su due posizioni separate e, per certi aspetti, antitetiche. Da un lato prevalse l’impostazione dei fisici matematici, maxwellianamente legata alla priorità concettuale dell’approccio campistico. Dall’altro, influenzata dalle esigenze proprie di una conoscenza efficace, andò affermandosi quella di natura tecnica, legata invece ad un prioritario approccio sperimentale di natura più direttamente circuitale. In questa dicotomia la didattica dell’elettrotecnica imponeva, come passaggio obbligato, la scelta preliminare

¹⁰ Questa analisi, oltre che per i suoi fondamentali contenuti metodologici, appare oggi altrettanto storicamente significativa per i processi osmotici che essa, espressione di uno scambio fecondo tra università e industria, seppe innescare tra le varie aree di competenza interessate. Presentata dapprima alla *National Academy of Sciences*, essa, convenientemente ampliata, fu in seguito didatticamente inclusa in un corso appositamente tenuto presso il MIT; comparve infine, con specifica valenza tecnica, nel *Bell System Technical Journal*. Era questo, a pochissimi anni dalla prematura scomparsa di Steinmetz e dalla pubblicazione nel 1917 del suo *Theory and calculation of electric circuits*, il segno tangibile di come la “sua” ingegneria elettrica stesse approdando all’assetto scientifico-tecnico attuale.

del percorso concettuale da seguire. In altri termini: la disciplina doveva essere proposta a partire dai campi verso le reti oppure in senso opposto? Doveva inoltre essere adottato 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, legato invece alla adozione di un'opportuna successione dosata di postulati di definizione preliminari?

In questa situazione non soddisfacente anche la letteratura disponibile rifletteva e confermava i disagi legati alle difficoltà del momento. Da un lato si aveva il Mascart-Joubert, con la sua impostazione preliminarmente basata sull'azione a distanza e da questa orientata, lungo un percorso non sempre strettamente indispensabile agli elettrici, verso le onde e, solo in subordine, ai circuiti. Dall'altro si aveva invece una letteratura tecnica nei cui testi principali, estranei a qualunque riflessione fondazionale, si avvertiva l'incertezza di un approccio legato alla presenza consistente di un "fortunato empirismo", incapace, in quanto tale, di cogliere nella sua presentazione della teoria dei circuiti quella che in fondo era avvertita dai teorici come un'autoevidenza solo apparente.

In seguito tale disagio, tipico degli "elettrici della seconda generazione", avrebbe pesantemente condizionato sia l'analisi fondazionale dei primi decenni del secolo che la didattica ad essa stessa corrispondente. Pur con le oggettive difficoltà legate alle diverse scelte possibili, una cosa appariva tuttavia chiara fin da subito: 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 dal 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".

Tale disagio era sentito, all'indomani della rivoluzione scientifica provocata dalla *Electromagnetic Theory* di Heaviside, in tutto il mondo. Nel 1895 il francese Cornu prendeva posizione, dalle pagine di *The Electrician* contro il Perry, 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 tensiometro e dall'amperometro... Il Cornu bollava questi metodi come antiscientifici ed affermava che nessun esperimento 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, come evento postmaxwelliano, andava prendendo coscienza di sé, della contrapposizione tra la bilancia di torsione di Coulomb e gli strumenti integrali. In tale discussione intervenne il fisico matematico ed ingegnere Giovanni Giorgi, il quale, il 12 aprile 1896, sempre dalle pagine di *The Electrician*, nell'articolo «*The foundations of electrical science*», prese posizione a favore di Perry, affermando non solo che «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 esemplare di Giorgi, una pietra miliare con la quale epistemologicamente si evidenziava la sostituzione in elettrotecnica del metodo storico con quello logico, segnava in modo irreversibile la transizione dall'indirizzo antico a quello moderno.

In accordo con tali riflessioni, il primo a proporre in forma compiuta una strategia fondazionale alternativa fu proprio lui. Con le sue *Lezioni di Fisica Matematica*, pubblicate nel 1926-27, l'impostazione della Scienza Elettrica imboccò una nuova strada, basata su un approccio lagrangiano e legata nel contempo, in accordo con la sua presa di posizione su "*The Electrician*", sia alla sostituzione del metodo storico con quello logico, sia alla priorità, nell'ordine espositivo, della lettura circuitale rispetto a quella campistica. Quest'ultima, riguardando Heaviside come il primo vero postmaxwelliano, partiva direttamente dalla azione per contatto e solo in seguito proponeva, come caso particolare, quella a distanza.

In seguito tale impostazione avrebbe avuto numerosi seguaci, da K. Kupfmüller (Berlino-1932) a B. Rossi (Padova-1936), da V.V. Petrovic (Belgrado-1941) a J.A. Stratton (New York-

1941). Nel 1936, al Politecnico di Milano, con anche maggiore aderenza all'aspetto ingegneristico, sotto l'influenza dello stesso Giorgi e 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) ». In essa, osservato preliminarmente che «ha importanza la conoscenza delle cose, lo sviluppo dell'intuito prima di ogni sistemazione a priori», Bottani propose un nuovo schema fondazionale basato su:

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

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, in quegli anni in fase di grande affermazione. Ne emergeva in tal modo 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 e, come si conviene ad una disciplina comunque nata dalla Fisica Tecnologica, quel po' di Termodinamica necessaria per i bilanci energetici.

Dallo scienziato inventore al fisico matematico-ingegnere

Mentre Steinmetz fu un fisico matematico che in USA seppe e poté diventare “definitivamente” ingegnere, nell'Italia umbertina, il clima culturale ed industriale, non disgiunto comunque dall'indole personale del grande piemontese, fece sì che Ferraris, pur operando nell'ambito ingegneristico, restasse in parte ancora un fisico matematico. Per le sue geniali teorizzazioni, cui non fecero però seguito i momenti realizzativi, egli deve essere dunque postmaxwellianamente considerato come una figura in parte ancora “intermedia”, certamente successiva a quella degli scienziati-ingegneri, quali Fleming e Hopkinson, ma nel contempo pur sempre preliminare rispetto a quella transizione che, all'indomani di Lauffen ed a partire dalle Niagara Falls, avrebbe condotto alle figure di Doherty, Slepian e Fortescue. O dello stesso Steinmetz. Fisici matematici, questi ultimi, di rigorosa formazione, ma che tuttavia, calati nella dimensione culturale ed imprenditoriale del loro paese, accettarono in qualche modo, a teorizzazione avvenuta, la compromissione con le *design equations*.

La teoria trasformatorica di Ferraris fu scientifica in senso stretto perché riguardò la messa in equazione maxwelliana del mutuo induttore e la rappresentazione corrispondente delle perdite nel ferro nell'ipotesi esclusiva di considerare cicli di isteresi equivalenti di tipo ellittico. L'assenza di una ricerca, anche a posteriori, finalizzata alla rappresentazione delle non linearità, dei flussi dispersi e comunque della equivalenza agli effetti interni confermano, quale espressione esplicita di un distacco dalla realtà produttiva, la posizione intermedia di Ferraris, in questo caso più vicina a Fleming che non a Steinmetz. La messa in equazione, seppure in forma ellittica, del ciclo di isteresi dinamico conferma invece la perfetta continuità metodologica tra Ferraris e lo stesso Steinmetz.

In quest'ottica non applicativa va letta anche la totale assenza negli studi iniziali del Ferraris dell'impiego, se non dell'algebra fasoriale, in quegli stessi anni oggetto di attenzione da parte di Blakesley, per lo

meno del metodo degli esponenziali complessi di von Helmholtz¹¹. Ferraris, guidato dalla sola esigenza scientifica, mantenne sul piano analitico, nei confronti dell'alternata, il simbolismo differenziale-trigonometrico classico. Del resto il passaggio all'algebra fasoriale fu favorito negli USA dalla scarsa preparazione matematica degli ingegneri elettrici e tale situazione non aveva corrispondenza alcuna all'Accademia delle Scienze di Torino.

Sorretta dalle sue conoscenze di fisica-matematica ed imposta dall'affermazione in atto dell'*AC system*, il campo rotante fu in Ferraris un risultato inevitabile, una meta voluta ed irrinunciabile a valle del trasformatore. Il fatto stesso che egli pervenisse a tale invenzione proprio mentre esaminava il generatore secondario Gaulard mostra ancora una volta, all'interno di una linea globale di sviluppo legata alla trasmissione dell'energia, la coerenza dell'indagine compiuta ed il carattere per nulla casuale della soluzione.

Sotto l'aspetto metodologico, in tale risultato il Ferraris ravvisò innanzitutto l'ulteriore conferma sperimentale dell'unificazione maxwelliana tra elettromagnetismo ed ottica.

Trattandosi, al traferro della macchina, di fenomeni quasi-stazionari, l'onda rotante non poteva essere ottenuta, in accordo con le equazioni di Maxwell, facendo intervenire le correnti di spostamento. Per questo Ferraris, seguendo Fresnel, si servì di fenomeni ondulatori dell'etere sfasati nello spazio e nel tempo e dall'ottica li traspone all'elettricità. La conoscenza delle analogie fisiche, propria della sua ampia formazione di base, negando ogni possibile occasionalità all'invenzione, giocò dunque un ruolo dominante.

Quanto alla coppia elettrodinamica, lo scienziato, trascurando l'induttanza del disco di Faraday utilizzato come rotore, ammise la proporzionalità della corrente rispetto al rapporto tra la velocità angolare relativa e la resistenza del rotore stesso. Ne derivò una caratteristica coppia-velocità rettilinea discendente con coppia massima in avviamento e nulla in sincronismo. Per tale motivo egli fu inizialmente scettico sulla effettiva utilizzabilità della sua idea negli azionamenti. Si limitò a sottolinearne l'applicabilità nei contatori, ma avanzò riserve per i motori.

Altro motivo di perplessità fu la necessità di disporre di un sistema polifase di alimentazione. Al riguardo occorre osservare che il laboratorio del Politecnico non poteva certo fornire al Ferraris i mezzi adeguati. E la stessa industria elettromeccanica italiana, sul finire degli anni '80, allorché il campo Ferraris divenne di dominio pubblico, era troppo arretrata per consentire serie applicazioni di questo tipo.

Non fu tuttavia rinunciatario per il futuro, ritenendo, e la dinamo ed il trasformatore stavano a confermarglielo, che il risultato si potesse ampiamente migliorare studiando in modo accurato la forma più appropriata del circuito elettrico e magnetico.

Sorprendono pertanto in questo senso le critiche sulla presunta malintesa interpretazione della macchina asincrona da parte del Ferraris. E' vero che egli riconobbe una priorità al sincrono, ma questa era comunque un'opinione diffusa. A Schenectady, ad esempio, in quei medesimi anni, esso veniva addirittura definito dallo stesso Steinmetz «*the best AC motor at the time!* »

Spettava comunque agli ingegneri, secondo il Ferraris, rendere disponibili le necessarie alimentazioni polifase ed avviare una produzione industriale evoluta di tale idea.

A fronte di un'ampia preparazione fisico-matematica, procedendo quasi per gradi naturalmente concatenati secondo una linea organica di sviluppo, il campo rotante non fu in Ferraris una scoperta accidentale di fatti nuovi isolati dal contesto precedente. Tutto avvenne infatti secondo una sicura e rigorosa deduzione logica consapevolmente compiuta a partire dall'unificazione maxwelliana, sapendo in essa distinguere senza incertezze il certo dall'ipotetico, così da convergere in modo netto e sicuro verso un risultato ed un meccanismo perfettamente spiegati. Quanto alla sperimentazione, essa fu coinvolta nella sola fase conclusiva, laddove era comunque richiesta la necessaria

¹¹Ferraris conosceva a fondo l'opera di von Helmholtz e proprio in occasione dei suoi studi sul trasformatore, ebbe occasioni di contatto, seppur indirette, anche con Blakesley.

convalida finale. Quello seguito dal Ferraris, di chiara impostazione scientifica, era comunque solo uno tra i percorsi adottabili. Allo stesso risultato si poteva infatti giungere seguendo un'altra strada, certamente meno rigorosa e deduttiva, ma sicuramente più consona all'usuale e diverso spirito dell'invenzione tecnica. Questa infatti, intesa ad individuare anche per tentativi apparecchiature idonee alle applicazioni industriali, può risultare talvolta come una successione di assaggi empirici e di constatazioni di fatto, frutto più di ingegnosa inventiva che non di rigorosa formazione scientifica. Nel caso della macchina asincrona inoltre una scelta "alternativa" di tale tipo sarebbe stata favorita in modo naturale dalla presenza di un sincro già materialmente disponibile su cui ragionare con il ricorso alla legge di Lenz.

5-7) *Physics today, engineering tomorrow*

Nel 1897 Galileo Ferraris, scienziato ed ingegnere postmaxwelliano, improvvisamente scompariva. Le sue aspettative scientifiche, se si esclude il caso esemplare di Giorgi, sarebbero state in parte disattese dai suoi successori. E le conseguenze di tale discontinuità, per la quale non sempre dal fisico Heaviside risultò possibile passare all'ingegnere Steinmetz, sarebbero state di non poco conto, perché, ancora per anni, l'ingegneria elettrica italiana avrebbe guardato a Schenectady come ad una località più lontana di quanto non apparisse dalla carta geografica.

2-2) *La teoria scientifica del trasformatore*

Il suo primo contributo in questa direzione è costituito dalla teoria scientifica del trasformatore.

Di questa macchina, in tre successive memorie dell'85 e dell'86, egli fornisce la formalizzazione fisico matematica del principio di funzionamento, l'energetica, un criterio calorimetrico ed uno elettrodinamico di misura ed infine il primo modello perfezionato compendioso delle perdite nel ferro.

Tale indagine, dimostrando innanzitutto la compatibilità del rendimento del trasformatore con l'energetica della trasmissione, valica i limiti contingenti propri della teorizzazione della singola macchina e costituisce di fatto, nella storia dell'elettrotecnica, la legittimazione dell'uso industriale della corrente alternata. Pur con il suo formalismo non più usuale, questa memoria costituisce a tutt'oggi un esempio insuperato di rigorosa impostazione fisico-matematica di un problema tecnico, di soluzione teorica del medesimo, di genialità nella condotta delle sperimentazioni di verifica ed infine di elaborazione conseguente delle valutazioni conclusive in vista delle applicazioni previste¹².

¹²All'indomani dell'Esposizione di Torino, pur con gli esiti confortanti emersi dall'esperimento di Lanzo, le idee sul generatore secondario, frutto di un'indagine geniale ma tuttavia empirica, non erano per nulla chiare e persuasive e davano luogo ad aspre controversie. Si avanzavano in particolare riserve sia sulla validità di impiego in alternata degli elettrometri e degli elettrodinamometri usati che sulla attendibilità delle misure di rendimento corrispondentemente compiute. Proprio su quest'ultimo aspetto, dal momento che una corretta valutazione di tale grandezza costituiva l'elemento di giudizio decisivo sulla applicabilità tecnica del generatore secondario e dunque della corrente alternata, il dibattito degli specialisti era poi particolarmente acceso. Presidente della sezione elettricità della giuria dell'Esposizione, Galileo Ferraris si accinse allora a studiare il problema. Per far questo egli poteva direttamente avvalersi, con opportunità operative ben più ampie di quelle fornite da un laboratorio, di un impianto già esistente: il Torino-Lanzo stesso. Consapevole del ruolo giocato dal rendimento sulla fattibilità tecnico-economica del sistema di trasmissione, il suo primo obiettivo fu proprio la misura di tale grandezza. A questo scopo, onde evitare possibili controversie, egli abbandonò completamente, perché ritenuta non ancora dominabile, la via elettrica e si avvale in modo diretto di un calorimetro. La semplificazione in tal modo ottenuta fu però solo apparente perché, proprio mentre predispondeva concettualmente la misura prevista, la materia oggetto di studio, solo apparentemente circoscritta, gli si estese in modo inaspettato con tutti i suoi dubbi irrisolti e con tutte le sue incongruenze. Egli comprese allora di trovarsi di fronte ad un apparecchio per nulla chiarito scientificamente e dunque tale da racchiudere in sé dubbi cruciali sia sulle interpretazioni fisiche dei possibili esperimenti in atto che sulla loro possibile correlazione. Ferraris non poteva dunque in alcun modo limitarsi a ripetere, seppur critica-

2-3) *L'invenzione del campo magnetico rotante*

Procedendo nei suoi studi sul trasformatore, il Ferraris si rese sempre più conto della necessità di pervenire ad un motore che, dotato di rotazione spontanea, costituisse l'arma decisiva e definitiva per la vittoria sulla continua. Tale meta gli appariva sempre più irrinunciabile nei riguardi della trasmissione dell'energia: senza l'abbattimento di questo ostacolo estremo infatti qualunque affermazione del trasformatore e dell'alternata sarebbe risultata vana o comunque destinata a restare circoscritta.

Già nell'85 il Ferraris inviò, a fronte degli studi da questa commissionatigli, una nota tecnica alla Ditta Ganz. Nell'originale manoscritto italiano, successivamente reperito tra le carte della famiglia Ferraris, lo scienziato accenna ad altri studi che nel frattempo egli sta svolgendo ed a questo proposito parla esplicitamente «dell'intero sistema di cui il trasformatore non è che un organo». L'idea del motore andava dunque facendosi strada di pari passo con i chiarimenti del trasformatore. Per ora tali riflessioni, pur accennate, non ebbero comunque carattere prioritario, in quanto egli proseguì e concluse l'analisi del trasformatore.

mente, esperienze già compiute da altri, ma doveva invece studiare il sistema ripartendo completamente da zero. Tale scelta, cruciale per la futura elettrotecnica scientifica, avrebbe inevitabilmente richiesto la revisione ed il successivo approfondimento di una teoria e di un formalismo della corrente alternata fino a quel momento ancora relegati alla loro fase pionieristica. Per raggiungere l'obiettivo prestabilito, Ferraris formalizzò, parallelamente all'ingegneria del mutuo induttore, anche l'energetica dell'alternata. A questo scopo sottopose innanzitutto a critica l'impostazione del bilancio energetico adottata fino a quel momento. Ciò gli consentì di ravvisare nell'uso della potenza apparente $A=V_M I_M/2$, un valore istantaneo solo formalmente riconducibile all'espressione VI propria della potenza stazionaria, la causa principale degli errori commessi nel bilancio energetico del trasformatore. Trattandosi in questo caso di regime variabile, egli fece invece ricorso alla potenza media. Tale impostazione, guidata dalle analogie con i suoi studi di ottica matematica, lo condusse alla formula $\langle p(t) \rangle = VI \cos \varphi = (V_M I_M/2) \cos \varphi$ della potenza attiva. A questo punto, mantenendo immutate le condizioni operative già adottate nelle precedenti indagini, egli passò infine, relativamente alle varie condizioni di carico, al calcolo del rendimento. La comparsa, con Ferraris, del fattore di potenza $\cos \varphi$ si rivelò risolutiva per la legittimità del trasformatore: egli pervenne infatti, correggendo in tal modo gli inattendibili 86% e 90% ricavati nelle precedenti indagini, ad un rendimento massimo del 96%. Gli studi paralleli di fisica matematica dei fenomeni acustici ed ottici, indirizzando la sua ricerca elettrica, avevano condotto dunque ai frutti sperati: con i valori di rendimento ottenuti, oltre alla trasformazione preliminare delle tensioni già implicita nella legge di Faraday, anche la successiva distribuzione economica dell'energia diventava possibile. La corrente alternata poteva dunque definitivamente riconoscersi come l'elemento risolutore della trasmissione. Quanto al retroterra culturale necessario all'ingegnere elettrico, i risultati cruciali ottenuti laddove in precedenza la fisica tecnologica aveva interamente fallito, l'eleganza stessa del processo logico ottenuto, evidenziavano il rapporto sempre più stretto dell'elettrotecnica scientifica con la fisica matematica e con la *Dynamical Theory*.

In un secondo tempo, consapevole di trovarsi all'interno di una ricerca ancora in atto, Ferraris decise di perfezionare il modello matematico impiegato in precedenza, così da renderlo rappresentativo delle perdite nel ferro fin qui trascurate. In tale prospettiva, ritenendo il successivo approccio inizialmente di tipo operativo, egli affrontò e risolse preventivamente il problema misuristico, mettendo a punto il metodo detto dei tre elettrodinometri. Ciò gli consentì, individuando sperimentalmente lo sfasamento tra tensione e corrente primarie, di confermare il disaccordo tra l'esperienza e le soluzioni teoriche fornite dal suo modello di prima approssimazione. Escludendo la possibilità di errori di osservazione, egli ricondusse tale incongruenza al ritardo, dovuto ad isteresi e correnti parassite, con cui il flusso presente nel nucleo ferromagnetico segue la corrente che lo sostiene. In tali ipotesi, conservando per le grandezze in gioco la sinusoidalità, egli identificò uno sfasamento temporale α tra induzione $b(t)$ e forza magnetica $h(t)$ e mostrò come la dissipazione associata al fenomeno sia proporzionale proprio al seno di tale "angolo di perdita". Compariva in tal modo, rappresentativo di un ciclo equivalente di isteresi ellittica, l'«angolo Ferraris». Per ottenerne analiticamente il valore, egli calcolò le derivate temporali presenti nel suo modello sinusoidale in un istante anticipato rispetto a quello attuale di un intervallo di tempo pari a quello, incognito, attribuito alle perdite di isteresi. Elaborate le equazioni in tal modo ottenute, Ferraris ricondusse infine l'angolo α corrispondente a grandezze esterne misurabili: il problema veniva in tal modo ricondotto ad una misura ai morsetti. In una seconda fase della sua indagine egli abbandonò totalmente lo schema precedente e pose il problema in modo anche più generale: ipotizzò cioè, con equivalenza agli effetti esterni, la presenza di un terziario in corto circuito percorso dalle medesime correnti di fatto presenti nel nucleo. Ottenne in tal modo tre equazioni grazie alle quali, con semplici passaggi, sempre mantenendo immutata l'ipotesi di sinusoidalità, gli fu possibile ritrovare il risultato già ottenuto in precedenza ipotizzando il ritardo. Tornato infine all'evidenza sperimentale, egli trovò conferma operativa della sua lettura. Il conteggio supplementare delle perdite nel ferro conduceva in tal modo il Ferraris alla formalizzazione definitiva del rendimento. La teoria classica del trasformatore, cui si associavano contributi cruciali relativi all'analisi della corrente alternata, poteva dunque dirsi conclusa.

Tutto questo avveniva mentre i suoi studi di fisica matematica evolvevano di pari passo, evidenziando sempre di più le possibili analogie tra fenomeni distinti. Ancora una volta il Ferraris aderì alle riflessioni ed alle suggestioni che ne derivavano. Seguendone il filo logico e pensando nel contempo alle azioni elettrodinamiche da utilizzare per il nuovo motore, egli si domandò se un fenomeno di polarizzazione ellittica o rotatoria, quale deriva dalla composizione di semplici eventi oscillatori nell'etere, non avrebbe potuto avere una sua corrispondente lettura magnetica-elettrica. La risposta, affermativa, gli venne certamente dalla consapevolezza della legittimità di un approccio maxwelliano unificato dell'elettromagnetismo e dell'ottica. Per esso anche due campi magnetici pulsanti potevano essere sovrapposti per ottenere come risultato, non già un campo che si annulla, bensì uno che ruota producendo gli stessi effetti di un magnete permanente posto in rotazione. Al trasferimento la conclusione appariva dunque quanto mai confortante: l'abbattimento dell'ostacolo estremo del motore in alternata si delineava come un obiettivo prospettabile...

Il resto è cosa ben nota. Lo scienziato raccontò, è Riccardo Arnò a ricordarlo, che, guidato da queste intuizioni preliminari e sorretto da queste analogie, egli ebbe l'idea chiara nella primavera dell'85, mentre passeggiava al tramonto presso la caserma Cernaia. Ne sarebbe emerso il teorema di Galileo Ferraris: se si iniettano in due o più circuiti correnti sinusoidali isofrequenziali, ma di fase diversa, basta orientare spazialmente i circuiti stessi in modo corrispondente alla fase temporale per ottenere da un dispositivo immobile un campo magnetico rotante. Questo, nell'ipotesi di eguale ampiezza delle correnti, descrive un profilo circolare, compiendo un giro nel tempo impiegato dalle correnti stesse a compiere un ciclo.

Per ottenere poi da un'unica corrente disponibile le due correnti sfasate che gli venivano suggerite dalle sue stesse riflessioni, il Ferraris si servì di un piccolo alternatore Siemens a sua disposizione e delle bobine del trasformatore Gaulard che aveva studiato in precedenza. Inviò la corrente primaria su una delle due bobine e la secondaria sull'altra. Regolando resistenze ed induttanze, egli ottenne due correnti praticamente in quadratura. Creato in tal modo un campo bifase, egli, pensando al disco di Faraday, seguì una breve porzione di un cilindro cavo di rame e la collocò, appesa galvanometricamente per un filo, nel campo stesso. Il rotore iniziò a girare: avveniva in tal modo la transizione dalla macchina a conduzione a quella ad induzione. Con essa l'ostacolo estremo era superato.

Risultavano dunque in tal modo definitivamente acquisiti all'Ingegneria Elettrica il trasformatore e la macchina asincrona, il cui indivisibile connubio aveva saputo vincere la battaglia dell'alternata, rendendo possibili nel breve tempo i grandi impianti industriali. L'asincrono, e dopo di esso, per le stesse ragioni, il sincrono, avrebbero poi imposto quella tecnologia polifase di cui essi abbisognavano, scegliendo nel contempo, per ragioni di convenienza che apparvero completamente chiare nel seguito, il trifase.

2-4) *Drehfeld oder Ferrarisschefeld*

Nel '91, all'Expo di Francoforte, «...è tutto un *drehfeld oder Ferrarisschefeld*...». Grandi riconoscimenti vengono attribuiti in quell'occasione a Galileo Ferraris per la sua geniale idea: vicepresidente del Congresso, egli ebbe, quale attestato esplicito della sua invenzione, la presidenza di una delle sedute. Lo stesso von Helmholtz, il grande vecchio, volle essere tenuto sistematicamente informato sul progredire dell'invenzione. Gli fu inoltre offerta la commenda della Corona Reale di Prussia con una motivazione che gli riconosceva per intero il merito della sua invenzione. Superato senza postumi l'incidente Tesla, il prof. Ferraris è pienamente soddisfatto: «ho visto a Francoforte - scriverà all'amico G. Grassi - che tutti attribuiscono a me la prima idea: il che mi basta. Gli altri facciano i denari, a me basta quel che mi spetta: il nome». Sono trascorsi ventidue anni dalla tesi di Ferraris. Ora, tramite l'elettricità, il suo sogno di «valli che attingono energia da un unico torrente tramite l'etere», si è avverato. Il motto di Hirn, grazie a lui, è diventato finalmente realtà.

2-5) *All'indomani di Lauffen*

In realtà, all'indomani di Lauffen, pur con esiti quanto mai probanti, la soluzione ottenuta appariva parziale, nel senso che ancora mancava quella definitiva chiarificazione che solo una radicale teorizzazione poteva assicurare. Tale disagio si rifletteva in particolare sull'aspetto costruttivo. Lo stesso Dobrowolsky, dopo tutto, pur con la sua concreta competenza tecnica, aveva in fondo operato lasciandosi ancora guidare prevalentemente dall'intuito. Come già era accaduto per la dinamo e per il trasformatore, anche per l'asincrono la realizzazione anticipava la formalizzazione ed abbisognava pertanto, per evolvere, dell'opportuno chiarimento scientifico.

Ancora una volta, spinto innanzitutto dal suo bisogno di chiarezza e di approfondimento, Galileo Ferraris intervenne in modo determinante con il suo contributo teorico definitivo. Operando nuovamente in analogia con l'ottica di Fresnel, egli mise a punto al trasferimento delle macchine elettriche il principio di scomposizione di un vettore pulsante in due vettori controrotanti sincroni di ampiezza opportuna. In tal modo, con un contributo assimilabile al teorema di Kennelly-Steinmetz, egli pose la base per un'analisi sistematica delle macchine elettriche in alternata fondata sull'impiego dei vettori rotanti ed alternativi. Si trattava di un metodo completo e potente, che avrebbe profondamente influenzato la teoria unificata delle macchine elettriche e del quale nel seguito, proprio per questo motivo, sarebbe stato fatto un uso sistematico sempre più ampio¹³.

Nel '93 Ferraris pubblicava la memoria dal titolo «Un metodo per la trattazione dei vettori rotanti od alternativi ed una applicazione di esso ai motori elettrici a correnti alternate». In tale pubblicazione si verificava nuovamente quanto già era accaduto per il trasformatore: l'indagine teorica, fondata sull'ampia conoscenza fisico-matematica dell'autore, era portata a fondo. Vi compariva infatti l'equazione $f(\Omega, C) = 0$ della caratteristica meccanica del motore; inoltre, mediante l'introduzione della nozione di scorrimento, era esplicitato il carattere asincrono del fenomeno dell'induzione. Veniva poi analizzata nella sua completezza l'espressione della coppia massima, di cui si precisava nel contempo sia l'indipendenza dalla resistenza rotorica che il legame con la dispersione magnetica. Infine si esplicitava, interpretandolo fisicamente, il fatto che, assorbendo lavoro meccanico all'albero, la macchina oltrepassava la velocità di sincronismo¹⁴.

Nel '94, nell'adunanza solenne dei Lincei, Galileo Ferraris, alla presenza dei Sovrani, lesse una splendida conferenza dal titolo «Sulla trasmissione dell'energia», nella quale la totalità delle relative problematiche veniva analizzata. Il bilancio glorioso di un quarto di secolo si chiudeva. La rivoluzione industriale, resa possibile proprio dalla tecnologia polifase, avrebbe poi fatto il resto.

Il motto di Hirn appariva dunque ormai lontano e scontato. Alla morte del Ferraris, nel '97, la centrale di *Niagara falls*, 50.000 CV di potenza, pur non ancora realizzata, era comunque ormai una concreta realtà. Dietro a tale realizzazione comparivano due figure solo apparentemente distinte, lord Kelvin, il fisico matematico di scuola vittoriana, e Steinmetz, secondo gli Americani «*a mathematical physic who began to be an engineer*». Affiorava dunque, con il crescere della potenza installata e con l'impegno richiesto alla progettazione industriale, l'esplicito carattere postmaxwelliano proprio del moderno ingegnere elettrico.

3) La realtà culturale ed imprenditoriale italiana ai tempi di Ferraris

3-1) Il mondo accademico

Ancora attorno alla seconda metà del secolo scorso la comunità scientifica italiana, maggiormente vicina alla Spagna ed al Portogallo che non alla Francia, all'Inghilterra ed alla Germania, non poteva certo considerarsi tra le più autorevoli ed importanti del mondo. Vi erano stati certamen-

¹³Successivamente esteso ed approfondito, esso sarebbe stato oggetto di unificazioni metodologiche, di confronti di ampio interesse concettuale, nonché, in seguito, di elaborazioni formali di grande efficacia didattica. Ulteriori approfondimenti ne avrebbero infine evidenziato il raccordo con la trasformazione delle coordinate simmetriche di Stokvis-Fortsecue e con la stessa teoria unificata delle macchine rotanti di Kron.

¹⁴Gli esiti applicativi di tale lettura potevano essere evidenziati dal Ferraris stesso che, avvalendosi di tale metodo, con la memoria dal titolo «Sopra un motore elettrico sincrono a corrente alternativa», forniva una brillante teorizzazione della macchina sincrona monofase di C.E.L. Brown.

te episodi prestigiosi che, con i nomi di Volta, Galvani, Felici, Mossotti e Bartoli, avevano comunque saputo collocare la scienza degli stati preunitari al centro dell'attenzione mondiale. Ma si trattava per la verità solo di episodi circoscritti, assai spesso privati della dovuta risonanza in campo accademico ed applicativo e più che altro capaci, quali "glorie patrie", di orientare verso tali interessi amatori, dilettanti, artigiani ed inventori, lontani dalla cultura scientifica ed assai spesso molto più vicini al senso dell'avventura¹⁵.

La situazione accademica non poteva certo dirsi migliore. Essa era infatti impostata su un rigido centralismo di tipo francese cui si contrapponeva, con un governo centrale incapace di opporsi ai fortissimi interessi locali, una molteplicità di centri di tipo tedesco. In tal modo l'università italiana si trovò a godere dei difetti, ma non dei pregi, di tale dualità: alla dispersione delle risorse si sovrappose la paralisi burocratica e la soffocante gestione del potere centrale. Inoltre, se le università erano parecchie, i fondi erano invece modestissimi e gestiti con la parsimonia di un potere ben determinato a controllare in modo capillare, all'indomani dell'unificazione, il debito pubblico. Quanto poi al peso specifico delle facoltà scientifiche nella spartizione del già magro pasto, esso era il più modesto¹⁶.

Un'altra pesante eredità della situazione preunitaria fu la totale prevalenza delle cattedre di matematica rispetto a quelle di fisica¹⁷, ciò che limitò sensibilmente la possibilità dei docenti di tale disciplina di influenzare su scala nazionale la ricerca.

La stessa scuola di Pisa, nella quale, accanto a Mossotti, operarono Matteucci, Felici e Pacinotti padre, non seppe far di meglio. Seguaci di una scuola francese orientata verso Fourier piuttosto che non verso Laplace e Poisson, i suoi componenti, animati da un certo scetticismo nei confronti dello strumento analitico, produssero infatti una fisica sperimentale e tecnologica puntigliosamente attenta nei confronti dell'esperienza, ma diffidente verso ciò che poteva oltrepassare l'immediatamente controllabile e per tale motivo singolarmente povera di una matematica anche elementare. Pur prossima, con Felici, a Faraday, la loro produzione non si avvicinò mai alla grande scuola di fisica matematica inglese di Maxwell, Stokes e Kelvin e finì pertanto con il restare legata

¹⁵La conferma si ebbe a Parigi nel 1881, dove l'Italia venne a trovarsi al quinto posto tra gli espositori, dopo Francia, Inghilterra e Germania, ma prima degli Stati Uniti. Tutto ciò era in realtà soltanto apparenza: non solo la maggior parte di questi partecipanti era costituita da dilettanti più o meno volenterosi, ma addirittura, fatto che non ebbe riscontri negli altri paesi presenti e che confermava l'isolamento culturale e scientifico interno, il ministero italiano delle poste e telegrafi fu l'unico a non fornire contributi e supporti ai propri espositori. Quanto alla comunità presente a Parigi, essa, solo numerosa, non brillò certo per qualità e suscitò duri commenti da parte degli osservatori.

¹⁶La cosa risultò ancor più aggravata dallo scarsissimo peso degli uomini di scienza nei gruppi dirigenti dell'organizzazione universitaria. Ben più attivi politicamente, ben più abili nel curare i propri interessi, medici ed avvocati, che già negli stati preunitari avevano costituito il gruppo intellettuale prevalente per numero, prestigio e potere, ebbero la capacità di imporre il loro netto controllo sul consiglio superiore della pubblica istruzione. Così, mentre le risorse per la ricerca medica venivano elargite in modo relativamente largo, quelle relative al settore scientifico passarono del tutto in secondo ordine. Non a caso, il primo ministro della pubblica istruzione scienziato dopo il Matteucci sarà il Corbino, ben sessant'anni dopo.

¹⁷Tale disparità derivava innanzitutto dal fatto che nel periodo della Restaurazione la matematica apparve senz'altro meno compromessa della fisica con il razionalismo illuminista ed in egual misura più direttamente riassorbibile in ambito classico ed umanistico. Inoltre va anche tenuto presente il fatto che, oltre a Mossotti, furono molti i matematici italiani che parteciparono alle lotte risorgimentali. E questi, a cose fatte, godettero di un ben più ampio credito di benevolenza e di privilegio nella assegnazione di cattedre. Tutto questo, con effetti negativi sul futuro decollo industriale, non favorì certo la buona armonia e la collaborazione, essenziale invece in altri paesi, tra matematici e fisici e portò questi ultimi all'isolazionismo. Così, mentre si ebbe una grandissima scuola di matematica, costituita da uomini che, si pensi a Brioscchi ed a Volterra, condizionarono sia la vita scientifica a livello mondiale che quella pubblica ed organizzativa del loro paese, la fisica e la fisica tecnologica furono del tutto assenti. Spenta la tradizione di Volta e di Galvani, rimasero gli studi del Melloni e del Codazza sul calore. Ed essi, a giudicare dal ruolo assolutamente di frontiera della macchina a vapore in Italia, dimostrarono ancora una volta quanto pericolosamente arretrata fosse la situazione industriale ed imprenditoriale che vi si celava.

all'area continentale, all'Ecole, in un momento in cui questa aveva ormai esaurito la sua spinta propulsiva¹⁸.

Il risultato più tangibile della scuola di Pisa furono le lezioni di Felici, dalle quali il giovane Pacinotti trasse la sua dinamo. L'opera di quest'ultimo è stata ripetutamente celebrata, piuttosto che non studiata, da molti autori. Ciò è accaduto soprattutto in trascorsi periodi nei quali egli divenne uno dei nomi di richiamo e di prestigio dell'operazione di recupero di un «primato italico oscurato dalla perfida congiura di paesi stranieri». In realtà il fisico pisano non fu mai uno scienziato disinteressato attratto dal vero, né, diversamente dal Ferraris, il filantropo amante del genere umano che mette a disposizione di tutti le sue scoperte. Fu certamente consapevole dell'importanza industriale della sua scoperta, ma, all'interno di una scienza singolarmente povera di matematica che non seppe mai elevarsi dal rango di semplice fisica tecnologica, non fu in grado, né poté, di dar seguito applicativo alla sua scoperta. In tal modo, se tecnici ed imprenditori stranieri sfruttarono in modo spudorato e disonesto la sua idea, per la quale, seppur tardivi, gli giunsero comunque i riconoscimenti dovuti, è soprattutto vero, ed è questo il dato prioritario su cui conviene riflettere, che, sia in ambito industriale che universitario, non gli fu possibile trovare un qualche riscontro nel suo paese. In questo senso la sua vicenda dimostra come, attorno al 1870, in Italia, ad un non trascurabile interesse per l'elettricità e le sue applicazioni, di fatto non corrispondesse un adeguato tessuto accademico e produttivo in grado di offrire sbocchi concreti alle idee ed ai progetti.

3-2) Il tessuto culturale ed imprenditoriale italiano

L'Italia si avviava, nella seconda metà del secolo scorso, verso una classe di scienziati legati ad un malinteso concetto di scienza pura che andava preservata da una tecnica vista invece come il peccato. Incapaci di cogliere nella tecnologia il fattore di sviluppo economico, essi, preda dell'illusione della ricerca e della contemplazione del sommo vero, non fecero studi applicativi e, incredibilmente, furono distaccati dal reale più degli stessi matematici. Questo disinteresse "aristocratico" per le applicazioni pratiche della scienza, tanto più grave in quanto fu presente in modo radicato e consapevole anche nella stessa scuola di Pisa, fu il segno più clamoroso della arretratezza dell'ambiente culturale italiano. Esso non rappresentò tuttavia solo una pericolosa connotazione psicologica specifica di una classe particolare di intellettuali perché, a differenza di altre nazioni, il tessuto culturale ed industriale italiano, espressione di una società rurale ed arretrata in cui scienza e tecnica avevano un ruolo del tutto subordinato, si mostrò perfettamente adeguato a tale lettura, non la mise in discussione, né tentò di modificarla.

Vi era a questo riguardo innanzitutto il primato umanistico, per il quale prevalevano indirizzi di pensiero poco inclini ad accordare attenzione ed a riconoscere dignità e prestigio alla scienza. Alle scienze, per l'esattezza, perché addirittura si escludeva che fra i diversi ambiti disciplinari, visti solo come distinte tecniche di ricerca, potesse esservi una qualche sostanziale unità. Il quadro complessivo che si era andato componendo era così riassumibile: la cultura italiana poteva e doveva affidarsi interamente agli interessi umanistici. Alla scienza, e pertanto, a maggior ragione, alla tecnica ed all'ingegneria, venivano riconosciuti solo una funzione pratica ed un ruolo strumentale. Rispettabili entrambi, ma ben lontani da quella dignità che poteva appartenere solo al pensiero puro. Tale perniciosa visione, sostenuta dai più ancora nei primi decenni di questo secolo e forse ancora oggi non del tutto superata, collocava la conoscenza scientifica ad un rango inferiore rispetto a quella umanistica, sulla quale, anche in ambito imprenditoriale, doveva comunque formarsi la futura classe dirigente.

Non a caso in Italia, a proposito delle scuole di applicazione, si parlò sempre di scuole speciali come sinonimo di "inferiori". Tutto questo ebbe conseguenze incalcolabili: basti pensare che, ad eccezione di Milano,

¹⁸La rottura dell'isolamento dei matematici italiani fu resa possibile anche grazie al soggiorno italiano (1862-64) di B. Riemann, che spostò l'orientamento culturale italiano verso la scuola tedesca, in quel momento la prima del mondo. Qualcosa di analogo, pur con il carteggio Faraday-Felici, con la presenza di Mossotti o con la decisione dello stesso Maxwell di imparare l'italiano per poter «discorrere di elettricità e magnetismo con Felici», non avvenne invece per i fisici.

furono negati alle facoltà di ingegneria i bienni propedeutici autonomi, ciò che ebbe, tra gli altri inconvenienti, quello di escludere i tecnici dal consiglio superiore della pubblica istruzione

Quanto poi all'apparato produttivo italiano, esso era così inadeguato che per la sua "tecnica" non aveva certo bisogno delle "scienze" e poteva pertanto lasciarle all'ultimo posto dopo le scuole di belle arti.

2-3) *Le prime esperienze tecniche*

In questo panorama, che nulla pareva quasi chiedere alla conoscenza scientifica¹⁹, furono compiute le prime esperienze industriali²⁰. Già nel 1883 si ebbe la prima "cattedrale nel deserto": Santa Redegonda. Dovuta a Giuseppe Colombo, che seppe far fiutare l'affare all'imprenditoria lombarda, essa fu interamente realizzata dalle competenze americane della Edison. Tutte le parti necessarie furono infatti acquistate "a scatola chiusa" negli USA, impacchettate e portate a Milano. Non solo: Edison pretese inoltre esplicitamente che la direzione tecnica dei lavori fosse affidata al suo collaboratore più diretto: J.W. Lieb.

Solo con i primi anni '90, dopo l'iniziale dipendenza dalle competenze straniere, si cominciò a vedere da parte degli italiani un salto di qualità e, pur senza contributi scientifici innovativi, una considerevole autonomia. L'industria del settore, superate alcune difficoltà iniziali legate più che altro ad alcuni scandali bancari di fine secolo, prese slancio e divenne rapidamente una delle attività imprenditoriali più importanti. In tal modo impianti come quello di Paderno-Milano, con i suoi 13,5 kV, elevatissimi rispetto ai 6 kV di Heidelberg, entrarono nella leggenda. Non vi furono grandi conoscenze teoriche e più della matematica e del laboratorio forse prevalsero largamente ancora "intuizione e buon senso". Ma la strada poteva dirsi ormai tracciata.

Ben diverso fu invece il problema delle macchine elettriche, la cui produzione poteva implicare problemi tecnici interdisciplinari anche più complessi e bisognosi di una tecnologia e di una scienza più sofisticate. Fu così che in questo ambito, eccezion fatta per alcuni casi circoscritti, la produzione del grosso macchinario fu straniera.

2-4) *La nascita delle scuole di ingegneria elettrica*

Lo sviluppo industriale, ormai fiorente, richiedeva comunque un numero sempre più elevato di tecnici, stimolava la crescita delle competenze, favoriva il diffondersi e l'approfondirsi delle conoscenze.

Solo dopo che la lampada Edison cominciò a diffondersi, affermandosi definitivamente all'Expo di Parigi dell'81, l'Ingegneria Elettrica venne tuttavia presa in seria considerazione. In tale prospettiva, nel 1882, nacque presso il MIT il primo corso di Ingegneria Elettrica, cui fecero subito seguito Darmstadt, Berlino, Monaco e Stoccarda. Nel 1883 fu la volta dell'Istituto Montefiore di Liegi e, nel 1884, a Londra, del Central Institution.

In Germania le *Technische Hochschulen*, fino a quel momento relegate a livello di *College*, in seguito alle affermazioni di Edison iniziarono a decollare. Già dopo quegli anni infatti, con grande lungimiranza, si distinsero esplicitamente le *Starstromtechnik* (teoria delle correnti forti) e le *Schwachstromtechnik* (teoria delle correnti deboli). Di lì a poco la German Edison Company e la Siemens & Halske introdussero in Germania il sistema Edi-

¹⁹Intorno al 1860, mentre Prussia, Austria, Francia e Russia avevano rispettivamente 2, 1, 3 e 2 accademie di belle arti, l'Italia ne aveva quattordici, cui andavano aggiunti 5 istituti musicali.

²⁰Ancora in occasione dell'Expo di Parigi dell'81 l'atteggiamento italiano non fu tra i più lungimiranti. Una conferma si ebbe con la diffidenza mostrata verso Edison. Dalle pagine de l'*Elettricista* si giunse addirittura ad invitare esplicitamente a diffidare di tutto quanto giungeva da Menlo Park... E la relazione tecnica sull'Expo non solo evitò accuratamente di fare il nome del tecnico americano, ma, ignorando la sua dinamo Jumbo proprio nel momento in cui tutto il mondo si interrogava sulle possibilità energetiche possedute dall'elettricità, illustrò come sua unica invenzione il fonografo... Vi furono, per fortuna, due autorevoli eccezioni: Colombo e lo stesso Ferraris. Il primo colse immediatamente le prospettive imprenditoriali legate all'elettricità. Quanto al secondo, da buon tecnico, non solo intravide, pur con le dovute riserve scientifiche, gli aspetti positivi propri della dinamo Edison, ma, tornato a Torino, diede immediatamente impulso e vigore ai suoi studi ed alle sue ricerche in tale ambito.

son. Un fisico-matematico di Darmstadt, Erasmus Kittler, scrisse allora in quattro anni, suddividendolo in due tomi, il primo *Handbuch der Elektrotechnik*. E a Breslau, all'interno degli insegnamenti di fisica matematica, il prof. Weber insegnò a Steinmetz l'Elettrotecnica adottando come libro di testo proprio l'opera di Kittler.

Iniziative istituzionali di tale tipo, sorrette dagli uomini che nel frattempo si erano formati sotto la tutela dei tecnici stranieri, si ebbero anche in Italia. Esse però, per i tempi e le modalità secondo cui si svolsero, non poterono che confermare l'arretratezza complessiva del tessuto connettivo culturale, imprenditoriale e politico italiano.

Solo nel 1887 si ebbe, a Milano, con la IECE, la prima struttura organizzativa stabile. Nel 1888 il ministero dell'agricoltura, da cui dipendeva il Museo Industriale di Torino, istituzionalizzò il corso del Ferraris, che vide in tal modo una rapida crescita di allievi, mentre quelli di Milano, alla IECE, rimasero pochissimi.

Nelle Università si portò avanti prevalentemente una ricerca teorica e di laboratorio. L'espansione applicativa, indispensabile per una vera crescita, si poteva infatti compiere solo in quelle aree nelle quali era parallelamente presente un'attività industriale che richiedesse una ricerca in qualche modo sperimentale ed applicativa. Ciò accadde, ma solo in parte, in una Milano e in una Torino in via di espansione, mentre a Roma, Napoli e Palermo si cercò rifugio nella sola teoria, elevata, ma pur sempre teoria.

Per la verità gli industriali elettrotecnici lombardi e piemontesi, pur ormai consci dell'importanza della ricerca, furono per lo più propensi a risolvere il loro problema appoggiandosi ad istituzioni locali, del resto più che sufficienti per le loro esigenze ancora limitate. Mai giunsero ad una visione globale della questione che fosse in grado di elevare a problema nazionale lo sviluppo e la ricerca. In tal modo le loro iniziative restarono occasionali e periferiche e non incisero mai sull'impostazione universitaria generale.

Tutto ciò peggiorò la già ottusa miopia del potere centrale, che rimase in tal modo ulteriormente isolato dalla realtà industriale. Ne derivò una regolamentazione ancora più rigida dei nuovi insegnamenti, con il risultato che le due scuole di Milano e Torino non poterono aderire ai bisogni dell'industria se non con un adeguamento troppo lento. Per questo motivo, laddove fu possibile, le scuole di applicazione ebbero uno sviluppo derivante non tanto da un piano governativo organico, quanto da gruppi imprenditoriali locali che vissero come sempre meno accettabile lo sfasamento temporale tra bisogni tecnico-scientifici reali ed evoluzione della formazione scientifica.

A fronte di iniziative economicamente anche vivaci, sia il ministero che l'industria non risposero dunque nel modo dovuto. La crescita che ne derivò per l'insegnamento fu conseguentemente stentata, faticosa ed affidata più allo spontaneismo ed al volontariato che non ad un consapevole e mirato intervento ministeriale.

Il risultato fu, in particolare proprio per le macchine elettriche, una ricerca assai prossima alla pubblicistica e ad una divulgazione di livello assai contenuto, sorprendentemente quasi del tutto priva di matematica ed assolutamente inadatta alle competenze di un tecnico.

Nel 1898 il parco generatori era composto da 1864 unità di fabbricazione italiana e solo da 176 di altra provenienza. Ma, mentre queste generavano 66.420 kW, quelli di produzione locale giungevano solo a 20.150, il che confermava come il macchinario di grossa potenza fosse tutto straniero²¹.

²¹Chiusa prematuramente nel '97 la breve parabola di Galileo Ferraris, l'Italia non ebbe più un fisico matematico-elettrotecnico paragonabile alla sua figura. Dopo di lui, quello che ebbe la maggior propensione teorica e fu capace delle maggiori generalizzazioni fu certamente Giovanni Giorgi, la cui opera di ingegnere non poté tuttavia sempre giovare nel modo dovuto del supporto e dello stimolo insostituibile dell'espansione industriale. Tale evoluzione fu prevalentemente il frutto di un'opera di attenta assimilazione dei risultati conseguiti da una più avanzata ricerca straniera. All'ingegneria elettrica italiana di quegli anni d'altra parte non erano riservate possibili strade alternative: la cronica carenza di fondi impediva infatti l'impostazione di quella ricerca a lungo termine che, sola, attraverso studi approfonditi e protratti nel tempo, è premessa indispensabile per una produzione scientifica caratterizzata da concezioni globali e da teorie di grande respiro. Esaurita la breve parentesi del fisico matematico piemontese, la produzione italiana non oltrepassò dunque i limiti, pur pregevoli, dell'aggiornamento e del chiarimento didattico e metodologico di quanto già veniva conseguito dalla grossa produzione scientifica straniera. Solo là, consolidando finalmente la propria identità in una non facile transizione da Maxwell a Steinmetz, la nascente ingegneria elettrica avrebbe trovato la dimensione che andava cercando.

Bibliografia

G. Ferraris, Opere, pubblicate a cura dell'AEI, Milano, Hoepli, 1902-1904, 3 voll.

G. Ferraris, Lezioni di Elettrotecnica, Torino, STEN, 1899.

J.C. Maxwell, Trattato di Elettricità e Magnetismo, a cura di Evandro Agazzi, UTET, Torino, 1973

J.C. Maxwell, Una teoria dinamica del campo elettromagnetico, a cura di Salvo D'Agostino, Edizioni Teknos, Roma, 1996

O. Heaviside, Electromagnetic Theory, a cura di E. Weber, Dover Publications, INC, New York, 1950

C.P. Steinmetz, Theory and calculation of alternating current phenomena, Mc Graw Hill, New York, 1897

* Sono significative a questo riguardo, quale testimonianza esplicita del disagio vissuto dagli elettricisti proprio negli anni postmaxwelliani della progettazione dell'impianto di *Niagara Falls*, le critiche mosse dallo stesso Steinmetz. Per lui, circoscritto il mutuo induttore maxwelliano all'esempio scolastico costituito da una coppia di «*ironless induction coils*», il passaggio al caso applicativo reale mostrava che «*the maxwellian theory of the transformer described a device that does not exist in practise, but merely haunts as a phantom transformers the text-books and mathematical treatise on transformers*». Coinvolgendo in seguito anche l'asincrono a valle, egli affermò in modo analogo che «*most theories of the induction motor were written only by theorist who never constructed a motor themselves and who have never seen a motor taken apart*». E in tempi successivi la sua critica giunse a non risparmiare neppure le linee, per le quali, pur nella consapevolezza dell'importanza in dubbio dei contributi di Heaviside, «*phantom transmission lines circuit of uniformly distributed capacity and inductance was very different from the circuit existending in practis*».

Valicando l'ambito immediatamente progettuale, tali riserve finirono con l'investire l'intera scienza elettrica, fino a giungere a posizioni prossime a quelle dello stesso Maxwell. Sono significative al riguardo le osservazioni di J.A. Fleming, discepolo del fisico scozzese, il quale, a proposito di una teoria scientifica delle reti elettriche che proprio in quel momento iniziava a muovere i primi passi, non mancò di osservare che «*Maxwell, by a process of extraordinary ingenuity, extended this reasoning (the method of Lagrange) from materio-motive forces, masses, velocities and kinetic energies of gross matter, to the electromotive forces, quantities, currents and elektrokinetic energies of electrical matter, and, in so doing, obtained a similar equation of great generality for attacking electrical problems*».

Si trattava in questo caso di un contributo cruciale che negli anni successivi, valicando il caso contingente del campo Pacinotti, avrebbe profondamente influenzato la teoria delle macchine elettriche. Tanto che, ancora nel primo decennio del nuovo secolo, alla *General Electric* di Schenectady, C.P. Steinmetz, insofferente di una teoria classica della conversione elettromeccanica formulata in modo apparentemente diverso per ogni singola macchina, avrebbe annotato nel suo taccuino il seguente ambizioso proponimento: «studiare Clausius per impostare la teoria unificata delle macchine elettriche». E la sfida, successivamente raccolta in ASEA da L. Dreyfus con il suo ricorso alla nozione di energia libera di Helmholtz nello studio dinamico degli alternatori, sarebbe stata ancora presente nel 1930 nel primo articolo di Teoria Unificata di Gabriel Kron, lo scienziato-ingegnere padre della moderna analisi tensoriale delle macchine rotanti.