

IL RAPPORTO TRA STRUMENTI E TEORIE
NELL'INGEGNERIA ELETTROMAGNETICA IN ITALIA E NEL
CONTESTO INTERNAZIONALE TRA OTTOCENTO E NOVECENTO.
DAL TRASFORMATORE E DAL TEOREMA DI POYNTING
ALLA TEORIA DELLE MACCHINE ELETTRICHE
E DELLE RETI DI GIOVANNI GIORGI ED ERCOLE BOTTANI

SALVO D'AGOSTINO*, SONIA LEVA**, ADRIANO PAOLO MORANDO**, ARCANGELO ROSSI***

* Università di Roma, ** Università di Milano, *** Università di Lecce

Il 1897, anno della morte di Galileo Ferraris e della contemporanea nascita di Ercole Bottani, fu un anno cruciale per la Scienza Elettromagnetica italiana. A più di un secolo di distanza, l'analisi di tale evento offre l'opportunità per sintetizzare linee di tendenza ormai consolidate nell'impostazione didattica e di ricerca di tale disciplina. Consente inoltre di evidenziare inattesi legami di continuità metodologica e didattica tra le due «distinte» letture ferrarisiana e bottaniana. In questo senso il 1960, con l'istituzione della Cattedra di Campi Elettromagnetici e Circuiti, segna la felice conclusione di un ciclo che, iniziato nel 1926 con Giovanni Giorgi, si sarebbe concluso postmaxwellianamente proprio con Bottani.

Introduzione

Nel 1863, con F. Brioschi e G. Colombo, nasce il Politecnico di Milano. E con esso, con una contemporaneità forse non del tutto occasionale, il Tecnomasio Italiano di B. Cabella. Figure diverse e pur tuttavia così ravvicinate e complementari, Brioschi, Colombo e Cabella, domineranno lo scenario scientifico-tecnico e imprenditoriale italiano di quel periodo. Sono questi gli anni in cui va compendosi, non senza difficoltà e con non poche contraddizioni, l'unificazione del Regno e in cui la futura «italietta umbertina», già affetta dal suo «complesso dell'elmo di Scipio», inizia a interrogarsi sul proprio possibile decollo industriale. E, strettamente legato a questo, sul ruolo che essa sarebbe stata in grado di giocare nel consorzio delle potenze e delle alleanze europee.

In quegli stessi anni un'altra «triplice alleanza», quella tra spazio, tempo e materia, sta dominando il parallelo scenario della ricerca scientifica. Da poco il lascito faradiano è stato raccolto da un giovane fisico matematico e filosofo naturale scozzese: J.C. Maxwell. Questi, dopo una serie di geniali matematizzazioni preliminari delle idee di Faraday, nel 1864, con la sua *Dynamical Theory*, approda alla formalizzazione della moderna teoria classica del campo elettromagnetico. In essa, seppure ancora latente, affiora un possibile superamento del meccanicismo. Sul piano fisico la nozione di corrente di spostamento, anche se per ora circoscritta al semplice ruolo di «metafora scientifica» tutta da verificarsi, promette l'unificazione dell'ottica con l'elettricità. Quanto all'ambito energetico, con conseguenze che avranno pesanti influenze sul «modo di pensare evocativamente per modelli» proprio degli ingegneri, lo scozzese, pur dinanzi ad un «etere sempre più volatile», precisa che,

parlando di energia del campo elettromagnetico, intende comunque essere preso alla lettera quando afferma che si tratta di energia meccanica.

Sono questi nel contempo gli «anni eroici» che assistono alle prime affermazioni di un'ingegneria elettrica alla ricerca della propria identità. Le prime macchine dinamoeltriche, ponendo pesanti ipoteche sulla teoria dei circuiti magnetici, hanno iniziato da poco a funzionare. Ne è derivato in tal modo un clima di attesa nel quale, finalmente con qualche credibilità, si comincia a discutere sia di illuminazione che di trasporto di energia elettrica...

Nell'agosto del 1870, a Sedan, i Prussiani, con un *blitz* conclusosi in una sola settimana, decretano la fine del II Impero dei Bonaparte. Sarebbe stata la definitiva affermazione del mondo germanico e, con essa, l'inizio del lento ma inarrestabile declino inglese. Tre anni dopo, Maxwell pubblica il suo *Treatise*. Illudendosi di rallentare in tal modo una decadenza ormai in atto, egli lo dedica a studenti e ad ingegneri. In esso la teoria maxwelliana del «mutuo induttore lineare e tempo-invariante», transitori compresi, seppur lontana da quella ingegneristicamente evoluta di C.P. Steinmetz del 1897, è già svolta. Nel 1884, sette anni prima di Laufen, H.J. Poynting e O. Heaviside, chiudendo in tal modo un ciclo iniziato con A. Volta, chiariscono infine l'energetica della trasmissione.

Tuttavia, benché il *Treatise* possa già dirsi paradigmatico della futura ingegneria elettrica, di fatto, e forse inizialmente non del tutto a torto, esso viene in un primo momento considerato dai tecnici come una semplice *paper theory* del tutto incapace di fornire una risposta ai loro quesiti. Accadrà in tal modo che, con lo stesso Ferraris, la teorizzazione del generatore secondario di Gaulard venga svolta vent'anni dopo l'elaborazione maxwelliana del modello del mutuo induttore. E il caso non resterà isolato: dopo tutto lo stesso Hertz non seppe mai intravedere nelle «sue» onde hertziane la possibilità di un loro utilizzo concreto.

In tale complessa transizione è racchiuso il passaggio dall'elettromagnetismo teorico a quello tecnico. E, con esso, il successivo approdo alla ricerca e alla didattica su cui si fonda la moderna Scienza Elettromagnetica. I Politecnici di tutto il mondo, seppur con diverse vicende e modalità, vissero in quegli anni le inevitabili contraddizioni implicite in questo passaggio. L'Italia, con le sue giovani scuole di ingegneria operanti in una realtà «arretrata», le visse in modo particolare. Subì le conseguenze di una voluta estraneità al mondo produttivo che fu caratteristica di certo mondo accademico. Assai spesso vide sovrapporsi all'impegno fisico-matematico preliminare l'esigenza, da parte della scienza, di una sua «incontaminazione» dal mondo produttivo. E il risultato fu quello di vedere invalidate quelle aspettative di decollo industriale che, almeno nelle premesse, erano talvolta di buon livello. Visse inoltre, anche se forse solo inconsapevolmente, gli «anni bui» del dopo-Ferraris. E probabilmente proprio per tale motivo, spinto dal bisogno di venire a contatto soprattutto con un *practical side of electrical engineering* che percepiva come non sufficientemente presente nell'interiorità di Ferraris, non sempre seppe cogliere nell'insegnamento del grande piemontese quei contenuti metodologici che era invece opportuno trasferire alla generazione successiva. Si trattava in tal caso del lascito che, attraverso G. Codazza che ne fu discepolo prediletto, Ferraris aveva consapevolmente tratto dall'insegnamento del maestro di questi: Fabrizio Ottaviano Mossotti. E con esso, nettamente percettibile in quella invenzione dell'asincrono che,

così lontana da Tesla, unificava così sapientemente Fresnel con Maxwell, il culto e la fiducia per un metodo di indagine rigoroso, da fondarsi sulle opere di von Helmholtz, Maxwell, Kirchhoff ecc. E poi, nel contempo, con non minore rilevanza, l'impiego voluto di una matematica «sapientemente povera», capace di affrontare, con il ricorso ad un formalismo semplice ed essenziale, problemi complicati altrimenti attaccabili solo con lunghe e astratte catene deduttive.

Tener conto preliminarmente di queste tematiche, inscindibili dall'evoluzione di una disciplina scientifico-tecnica, è essenziale per poter cogliere i modi di quella che, sia sul piano della didattica che su quello della ricerca, è stata l'evoluzione della Scienza Elettromagnetica in Italia. Occorre poi, e in egual misura, essere ben consapevoli del fatto che, necessariamente, il contributo delle prime generazioni di elettricisti, pur cruciale in ambito industriale e didattico, non poté mai condurre a risultati veramente originali e basilari. Questi, a partire da ben altre risorse e comunque attraverso una formazione di base certamente diversa, provenivano infatti dai paesi d'oltralpe. 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. E le conseguenze di questa latitanza della cultura scientifico-tecnica italiana non sarebbero state di poco conto, perché, per molti anni, Laufen e Schenectady sarebbero state molto più lontane di quanto non apparisse da una carta geografica.

Dalla fisica tecnologica all'elettrotecnica

Inizialmente, l'insegnamento e la ricerca delle «scienze elettriche» fecero parte della «più antica» fisica tecnologica. Tale collocazione era in linea con il comune approccio fenomenologico ed energetico proprio delle due discipline. Riportava in ogni caso ad una comune matrice «positivista» i cui contenuti, precisati dal suo autore tramite il concetto di «equazione di un fenomeno», erano stati espressamente indicati nella *Théorie analytique de la chaleur* da J.B. Fourier.

In quest'ottica, nel 1878, il fisico tecnologico R. Ferrini pubblica il volume *Elettricità e Magnetismo*. A conferma dell'importanza del lavoro compiuto, basterà ricordare come, già subito nel '79, esso venga tradotto e pubblicato in Germania. Osserva al riguardo R. Arnò come l'opera, scritta per la verità solo cinque anni dopo il *Treatise*, fosse mirabile per completezza e ampiezza. Dopo una breve rassegna sui principi dell'elettricità e del magnetismo, vi compaiono il «principio» di Pacinotti, le macchine Gramme e Siemens. Non mancano nel contempo anche contributi in qualche modo originali: oltre ad un approfondimento delle varie leggi presentate e dei limiti delle loro possibili applicazioni tecniche, vi compaiono formule per il calcolo dei «disperdimenti delle linee telegrafiche» e «sulle perdite dei solenoidi degli elettromagneti delle macchine telegrafiche». In seguito, a ulteriore conferma del suo impegno in questa direzione, il Ferrini avrebbe pubblicato anche un volume sulle macchine dinamo-elettriche che, seppure collocabile su un piano divulgativo rispetto a opere come quella classica di S.P. Thompson, avrebbe avuto in quegli anni un concreto riscontro didattico. Ormai però, in conseguenza della sua espansione concettuale e del numero di aree di competenza che andava coinvol-

gendo, era tempo che l'Elettrotecnica iniziasse un percorso applicativo e metodologico autonomo. Ciò era quanto, d'altra parte, già a partire dai primi anni Ottanta, era accaduto all'interno delle scuole politecniche straniere.

In quest'ottica, nel 1885, a Milano, nasceva l'Istituzione Elettrotecnica Italiana Carlo Erba (IEICE). La scuola, per le ragioni già precisate, con Zunini, Motta, Conti e Semenza, non avrà al suo attivo contributi paragonabili a quelli di Torino con Galileo Ferraris. Sarà però la prima a comprendere con chiarezza l'importanza applicativa e imprenditoriale delle scienze elettriche. E questo, in un mondo accademico ancora bisognoso di tutelarsi dalla contaminazione delle applicazioni industriali, costituirà una premessa basilare per lo sviluppo futuro. In questo senso, nella generale arretratezza del paese, fu merito del Colombo far decollare in pochi anni un'industria elettrica.

Il contributo preliminare dei fisici matematici: Max Abraham

In quello stesso periodo, dal 1909 al 1915, insegna a Milano Max Abraham. Oltre a Meccanica Razionale, egli tiene il corso di Teoria dell'Elasticità, grazie al quale ha modo di ravvivare presso l'Ateneo milanese una felice tradizione di ricerca e didattica nelle matematiche superiori. Fisico matematico insigne, già allievo di Max Planck, sono celebri le sue ricerche sulla dinamica dell'elettrone, sull'irraggiamento, sulla velocità di gruppo nei fenomeni dispersivi. Nel 1905 egli ha scritto un trattato in due volumi, *Theorie der Elektrizität*, nel quale si può ravvisare uno dei fondamenti della successione postmaxwelliana nell'elettromagnetismo. Pur non tenendo corsi esplicitamente legati alle scienze elettriche, la sua presenza al Politecnico avrebbe esercitato grande influenza su quella scuola milanese di fisica matematica nella quale si sarebbero in seguito riconosciuti, tra gli altri, U. Cisotti, B. Caldonazzo e B. Finzi. Ed una conferma in tal senso si avrà nel 1911, quando, sulla scia degli studi compiuti da V. Volterra sui fenomeni ereditari, proprio il Cisotti, già discepolo di T. Levi Civita, giungerà ad una messa in equazione del ciclo di isteresi. Sempre al Politecnico di Milano, quelle che in seguito sarebbero state comunemente denominate *condizioni di quasi-stazionarietà di Abraham*, riceveranno particolare attenzione da Bottani e Sartori. L'approccio, esplicitamente finalizzato alla presentazione della nozione preliminare di *bipolo in senso elettrico*, non varcherà i limiti della lettura didattica, tuttavia, in termini di ampiezza e profondità, risulterà non usuale, né occasionale, se rapportato ai trattati dell'epoca.

Riccardo Arnò

La successiva nascita, per volere di G. Colombo, di un Istituto di Elettrotecnica autonomo dalla IEICE determinò la chiamata da Torino di R. Arnò. A lui, senza concorso, venne conferita la cattedra di Elettrotecnica che egli tenne dal '99 al '28, suddividendone peraltro, dal 1906 in poi, i contenuti in due successivi insegnamenti di Elettrotecnica I e II. Figura di studioso assai complessa e per certi versi atipica nel panorama scientifico-tecnico dell'epoca, discepolo, poi assistente e infine colla-

boratore e amico di Ferraris, Arnò trasferì a Milano le competenze e la sensibilità della scuola di Torino, di cui, con l'improvvisa e prematura scomparsa del grande piemontese, egli divenne il naturale continuatore.

In questo senso, tra i suoi contributi, vanno innanzitutto ricordati gli studi da lui compiuti sul campo elettrico rotante, sulle perdite e sulle rotazioni dovute all'isteresi dielettrica, sui metodi di compensazione dell'induttanza nei circuiti percorsi da corrente alternata. Significativo risulta inoltre quel suo *rivelatore di onde hertziane a campo Ferraris* con il quale avrebbe confermato la sua simultanea competenza nel campo delle correnti deboli. Sempre sulla scia dei lavori già iniziati con Ferraris, va poi ricordato il *trasformatore di fase Ferraris-Arnò* che, nel 1900, con Alexanderson, avrebbe avuto, presso la Norfolk and Western Railway, concrete applicazioni nella trazione elettrica.

Menzione particolare, anche perché originale della sua permanenza a Milano, merita inoltre la sua teoria del *carico complesso* del 1910 con la quale, attraverso una particolare ripartizione delle potenze attiva e apparente, egli elaborò metodi più evoluti di tarifficazione elettrica. Da tale approccio sarebbe in seguito derivato, con un brevetto ottenuto dalla ditta tedesca Artman & Braun, il cosiddetto *arnometro*.

Nell'ambito delle macchine elettriche, accanto ad un metodo di avviamento dei motori monofase, va infine ricordata la sua conferenza AEI del 1925 dal titolo *Funzionamento dei motori elettrici dimostrato col tubo di Braun*. L'esposizione, il cui scopo era quello di mostrare la capacità di unificazione propria del metodo, si concludeva osservando che

Pacinotti ha trovato il modo di mantenere fisso nello spazio un magnete ideale, pur essendone in rotazione il rispettivo supporto elettromagnetico materiale. Galileo Ferraris ha scoperto di mantenere in rotazione un magnete ideale, pur essendone fissi i supporti elettro-magnetici materiali componenti. Su questi due principi riposano tutti i motori a corrente continua ed alternativa oggi funzionanti nella pratica industriale.

Si trattava dunque di una lettura che, concludendo l'opera ferrarisiana, ne coglieva, anticipandolo, lo spirito della successiva *Teoria unificata delle macchine elettriche*.

Ferdinando Lori

Allievo a Roma di M. Ascoli, esponente di spicco della generazione intermedia che, continuando in Italia l'opera del Ferraris, assistette all'affermazione definitiva dell'ingegneria elettrica, fu Ferdinando Lori. Accanto a contributi quali l'approfondimento del teorema di Kennelly Steinmetz, l'impiego dei condensatori nella compensazione, la teoria dell'asincrono, l'isteresi e i metodi di tracciamento del corrispondente ciclo, il suo apporto maggiore resta la sua opera di docente e di appassionato divulgatore. Il primo contributo in questo senso è testimoniato dal suo *Trattato di Elettrotecnica*, che, curato in successive edizioni, raggiunse un elevato livello di approfondimento. Questo è testimoniato dalla larghezza con la quale vi è svolta la teoria delle reti elettriche e dalla presenza simultanea, seppur ancora «autonoma

rispetto ai circuiti», dell'approccio maxwelliano di cui, con sicuro taglio fisico matematico, sono sviluppati in una forma molto ampia e profonda, del tutto inusuale per i corsi di quegli anni, i contenuti. Altrettanto significativa fu la sua opera di divulgatore in qualità sia di fisico matematico che di storico e filosofo della scienza¹.

Nel complesso, quello di Lori, a conferma della fase di transizione vissuta dagli elettricisti in quegli anni, fu un paziente lavoro di revisione, di messa a punto, di inquadramento metodologico. E in questo senso, per il ruolo svolto nella formazione di intere generazioni di tecnici, la sua opera, pur non sempre innovativa, deve considerarsi altrettanto importante, valida e utile, quanto le grandi scoperte, nel dar vita al rapido sviluppo industriale di un paese.

La rivoluzione di Ercole Bottani

In anni immediatamente postmaxwelliani 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 del percorso concettuale da seguire. 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 di *postulati di definizione* preliminari?

In realtà, ad una più attenta analisi, le due letture, che pure per lungo tempo avrebbero rivendicato una reciproca autonomia concettuale, risultavano distinte solo all'apparenza. Tale conclusione, già implicita nel lascito maxwelliano, trovava conferma nei lavori di Carson e di Abraham, grazie ai quali era risultato possibile sia formalizzare in modo ampio e rigoroso la transizione campi-reti sottesa ai due distinti approcci che elaborare la condizione stessa di regime quasi stazionario, di per sé premessa all'analisi circuitale.

In questa situazione non soddisfacente anche la letteratura disponibile rifletteva e confermava i disagi legati alle difficoltà presenti. Da un lato si aveva il Mascart-Joubert, con la sua impostazione preliminarmente basata sull'azione a distanza e

¹ Sul primo versante va ricordato, tra i molti altri, un suo lavoro sulla fisica matematica delle onde, ancora oggi didatticamente efficace, sia per la dosata fusione tra i vari esempi esplicativi proposti che per il formalismo analitico adottato. Sul secondo sono significativi, oltre al suo contributo allo studio dell'opera di Maxwell pubblicato in occasione del centenario della nascita dello scozzese, il suo saggio dal titolo *La scienza fisica e la fede*, espressione di un'ampia serie di riflessioni di ampio respiro su tale tema al quale egli si dedicò negli anni della maturità. Altrettanto rilevante, accanto alla sua classica *Storia del Regio Politecnico*, resta la sua analisi sul cosiddetto «problema dei politecnici», nella quale, contemporaneamente ad A. Barbagelata, vengono anticipate e discusse le ipotesi di una possibile «laurea breve».

da questi orientata, lungo un percorso non sempre indispensabile agli elettrici, verso le onde e, in subordine, i 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 Italia, Ferraris aveva aderito alla lettura pre-maxwelliana di Mascart-Joubert. Tutto ciò risulta dalle sue *Lezioni di Elettrotecnica*, così come da quelle successive dei molti autori della sua scuola, da Lombardi a Vallauri, da Ascoli allo stesso Lori. Tale orientamento risulta inoltre confermato, con E. Perucca, dalla intenzione più volte manifestata dal Ferraris stesso di scrivere un grande trattato maxwelliano di Elettrotecnica Generale.

L'impostazione seguita dal piemontese, legata al metodo storico e con esso alla priorità dei campi e della azione a distanza, non dovette tuttavia risultargli di particolare soddisfazione. Racconta in proposito un suo illustre allievo, Ettore Thovez, come un giorno, chiedendo al maestro come mai egli non avesse ancora deciso di pubblicare le sue lezioni, questi gli abbia risposto: «Perché non ho ancora potuto renderle semplici come vorrei. Ho fatto questa notte una grande fatica per rendere accessibile a loro allievi certe teorie del Thomson e del Mascart per fare la lezione di stamane».

L'esigenza di una nuova sensibilità pedagogica e fondazionale, sicuramente diffusa in quegli anni in cui l'Elettrotecnica andava rivendicando una propria autonomia metodologica, appare dunque chiaramente documentabile già nello stesso Ferraris e nella sua scuola. In seguito tale disagio, tipico degli «elettrici della seconda generazione», avrebbe pesantemente condizionato l'analisi fondazionale dei primi decenni del secolo. Pur con le oggettive difficoltà legate alle diverse scelte possibili, una cosa appariva tuttavia chiara fin da subito: non era più accettabile che da una parte vi fosse un modo di «impostare l'elettricità» proprio dei fisici e 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 e unificata. E in ogni caso, per i Politecnici, «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 contenuto nel Mascart, proponeva «addirittura» di impostare l'elettromagnetismo partendo direttamente dal tensiometro e dall'amperometro. Il Cornu bollava questi metodi come antiscientifici e 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 e 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 del 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 una strategia fondazionale alternativa fu proprio il Giorgi. 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, che 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, sulla scia dei lavori di E. Mach, 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 e 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.

Tale impostazione avrebbe dato vita ad una scuola, e con essa ad una sensibilità interpretativa del «sapere elettrico», oggi più che mai vitale. Desunto dalle premesse fisico-matematiche del Giorgi, dichiaratamente legato al pensiero di Bridgman, in qualche punto riconducibile all'energetica di J. Slepian, l'approccio bottaniano, spinto dalla necessità di mettere a punto un «lessico familiare» comune ai docenti delle Università e ai tecnici dell'Industria, si inseriva nelle riflessioni che, già da tempo, l'«ingegner Bottani», con il suo irrinunciabile concetto di *bipolo in senso elettrico*, andava maturando. Docente in quegli anni dei Corsi di Misure e di Impianti Elettrici, nel '34 egli aveva già pubblicato una fondamentale memoria dal titolo *Sulla teoria dei trasduttori*, nella quale la teoria dei bipoli, già vista come «agnostica» e dunque rappresentativa dei soli effetti esterni, era stata magistralmente indagata. Ora il contributo del 1936, precisandone i rapporti con il lascito di Maxwell-Heaviside e con l'operazionismo di Bridgman, completava il discorso.

L'Elettrotecnica si rinnovava dunque, e non senza contributi originali, inserendosi autorevolmente in un'evoluzione che, su scala mondiale, risentiva in modo inevitabile del dopo-Maxwell e del Circolo di Vienna. Di lì a poco, nel 1947, il «disagio postmaxwelliano» comunicato da Ferraris a Thovez, confermando inattese continuità metodologiche tra le Scuole di Torino e di Milano, con la pubblicazione del Trattato di Bottani e Sartori, avrebbe trovato l'attesa risposta.

Il dopo Bottani

Da allora tale approccio ha subito una vasta diffusione. Fino a diventare, non più solo in Italia, la «strategia fondazionale» attualmente più diffusa. Tale affermazione, sempre più consolidata fino a far parte dell'«inconscio collettivo degli elettrici», non ha tuttavia escluso, né lo avrebbe potuto, la consapevolezza della necessità di successivi approfondimenti di tipo più esplicitamente maxwelliano. E a essi ha affidato, superando a piè pari i «limiti di prima lettura» propri dei *postulati di definizione* e degli *esperimenti concettuali*, il compito del successivo non rinunciabile affinamento.

Ne è derivato, non a caso ancora concepito da Bottani e ritrovabile nel secondo volume delle *Lezioni di Fisica Matematica* del Giorgi, quello espressamente dedicato ai campi, il corso di *Circuiti e Campi Elettromagnetici*. In esso, una volta interiorizzato il bipolo bottaniano, la progressione verso le equazioni «indefinite» di Maxwell, verso Poynting e le linee TEM avviene senza alcun scollamento metodologico.

Il percorso di Ferraris, quello preannunciato nei suoi appunti per la preparazione del Suo Trattato può dirsi dunque concluso.