

# Fisica sperimentale, fisica matematica e fisica teorica: il caso di Galileo Ferraris

Giuseppe Giuliani  
Dipartimento di Fisica ‘Volta’, Pavia

**Riassunto.** Il primo lavoro di Galileo Ferraris sul trasformatore viene analizzato come un esempio significativo di quella produzione scientifica dei fisici italiani del tardo ottocento, in cui lo studio sperimentale dei fenomeni è accompagnato da una elaborazione teorica. L’analisi pone in luce, tra l’altro, aspetti rilevanti della interazione teoria - esperimento nel caso specifico del trasformatore.

**Abstract.** The first paper by Galileo Ferraris on the transformer is studied as a significant example of that part of the scientific production of Italian physicists in late nineteenth century in which the experimental study of phenomena is accompanied by a theoretical description. Moreover, this study shows some interesting features of the theory - experiment interaction in the case of the transformer.

## 1 Introduzione

Le ricerche storiche disponibili sulla fisica italiana del tardo ottocento permettono di delineare un quadro di riferimento in cui inquadrare i percorsi specifici dei singoli fisici o analisi di situazioni locali o indagini tematiche [1].

I dati strutturali significativi sono costituiti dal piccolo numero di fisici, dalla ridotta possibilità di selezione di giovani aspiranti ricercatori, dalla scarsità dei fondi per la ricerca, dalla dispersione delle risorse (molte sedi universitarie), dalla struttura centralistica del sistema universitario, dalla rigidità derivante dal fatto che le tensioni interne al potere accademico tendono a risolversi – nel medio periodo – in una sostanziale conferma dei rapporti di forza esistenti [2].

Dal punto di vista culturale, la situazione può essere descritta affermando che i fisici erano per tradizione e per formazione fisici sperimentali. La figura del fisico teorico non solo non era istituzionalmente prevista, ma neppure concepita come possibile o auspicabile. Solo la fisica matematica era istituzionalmente riconosciuta e praticata da matematici che ne curavano anche, salvo rarissime eccezioni, l’insegnamento. Ciò non significa che i fisici, almeno con i loro esponenti migliori, non si cimentassero con gli aspetti teorici della loro

disciplina: ma lo facevano, in quanto fisici sperimentali costretti, come dirà efficacemente Corbino nel 1929 ad essere <<teorici di sé stessi.>> Infatti, per usare ancora le parole di Corbino:

La vecchia e gloriosa Fisica Matematica aveva deviato verso una forma di trattazione puramente analitica dei problemi fisici, i quali spesso costituivano appena il pretesto per porre e risolvere delle questioni di interesse esclusivamente matematico. Si era così perduto ogni contatto fra i cultori delle due discipline, che avevano finito per ignorarsi a vicenda, senza alcun turbamento per questa mutua incomprendimento. E poiché agli sperimentatori occorreva sovente il bisogno di sintetizzare i risultati ottenuti in teorie, anche poco rigorose, ma più adattabili ai complessi fatti osservati, e soprattutto più accessibili alla comune insufficiente preparazione nelle alte matematiche, i Fisici sperimentali furono per qualche tempo i teorici di sé stessi [3].

Altrove ho mostrato come questo giudizio di Corbino possa essere convalidato sulla base di una analisi qualitativa e quantitativa della produzione teorica di fisici e matematici e come la separatezza tra fisici e matematici abbia negativamente influito sulla capacità dei fisici italiani di fare i conti con le innovazioni apportate dalla teoria della relatività e dalla fisica dei quanti [4].

Infine, per quanto concerne i rapporti tra fisica e tecnica, si può affermare che il contesto economico, istituzionale e culturale non favoriva certamente lo scambio di idee e la mobilità di uomini tra il settore della ricerca universitaria e quello delle applicazioni tecniche.

## **2 Galileo Ferraris, tecnologo, fisico sperimentale e teorico**

Nella complessa figura di Galileo Ferraris si ritrovano fuse insieme le caratteristiche del tecnologo, del fisico, del docente, del divulgatore e del filosofo della fisica. Queste caratteristiche del Ferraris emergeranno a tutto tondo dall'insieme degli studi sollecitati dalla celebrazione del centenario della sua morte. Più modestamente, questo lavoro intende illustrare come alcune di queste caratteristiche si possano ritrovare in uno dei suoi contributi teorici fondamentali: quello sulla teoria del trasformatore.

## 2.1 Come nasce la teoria del trasformatore

Il primo lavoro di Galileo Ferraris sul trasformatore è un lungo articolo di cui presentiamo qui di seguito la suddivisione originale in paragrafi [5].

### Parte I Ricerche teoriche

1. Descrizione del generatore secondario
2. Intensità delle correnti e della magnetizzazione del nucleo
3. Differenza di potenziali tra le estremità delle spirali
4. Energia assorbita e restituita dal generatore secondario
5. Caso del generatore secondario colle spirali indotte collegate in circuiti multipli

### Parte II Ricerche sperimentali

6. Cenno sui procedimenti già tentati per la determinazione del coefficiente di rendimento
7. Descrizione delle nuove esperienze fatte per mezzo del calorimetro
8. Risultati delle esperienze
9. Calcolo delle esperienze
10. Valori dei rapporti  $m$  e  $g$
11. Coefficiente di rendimento
12. Altra determinazione del coefficiente di rendimento pratico
13. Calcolo coi risultati delle esperienze fatte coll'elettrometro e coll'elettrodinamometro
14. Coefficiente di rendimento quando le spirali sono collegate in quantità
15. Sulla potenza del generatore secondario

Questi paragrafi sono preceduti da una introduzione che trascriviamo integralmente:

Nella Sezione internazionale di elettricità dell'Esposizione generale italiana, di recente chiusa in Torino, figuravano esposti dalla "National Company for the distribution of electricity by Secondary Generators" di Londra, con grande ricchezza di impianto e nella loro forma più nuova, i Generatori secondari di Gaulard e Gibbs. Tali apparati di induzione, che gli inventori presentavano come un mezzo acconcio per distribuire a grandi distanze e su estese superficie correnti elettriche per l'illuminazione o per altri impieghi industriali, suscitarono, come si sa, *discussioni e controversie, che perdurano tuttavia ostinate ed acerbe*. Quindi io, avendo a mia disposizione nella Esposizione un impianto di generatori secondari fatto nelle condizioni di un vero impianto industriale, e quale difficilmente si potrebbe riprodurre in un laboratorio scientifico, *aveva il dovere di servirmene per fare esperienze, le quali potessero apportare nella soluzione delle questioni dibattute un qualche contributo*. La maggiore controversia si riferiva alla determinazione del coefficiente di rendimento, ed era principalmente dovuta alle obiezioni alle quali dava luogo l'impiego, fatto dall'Hopkinson e da altri, dell'elettrometro a quadranti e dell'elettrodinamometro quali strumenti di misura per le correnti alternative. E siccome a tali obiezioni non si sarebbe potuto rispondere in modo decisivo se non dimostrando la coincidenza dei risultati delle esperienze fatte coi due strumenti nominati con quelli di altre esperienze, ove essi non fossero impiegati come strumenti di misura, così io, assecondando un parere ed un desiderio del Giurì internazionale dell'Esposizione, feci alcune determinazioni, nelle quali tutte le misure erano eseguite per mezzo del solo strumento contro l'uso del quale non si fossero sollevate obiezioni: per mezzo di un calorimetro. *Il confronto tra le mie misure e quelle già da altri eseguite coll'elettrometro e coll'elettrodinamometro riuscì, come speravo, istruttivo. Ma dalla discussione dei risultati ricavai più di quello che dapprima aveva sperato e cercato. Tale discussione, infatti, mi condusse ad uno studio teorico dei fenomeni che avvengono nel generatore secondario, studio teorico, che, controllato coll'esperienza, venne a rischiarare, in modo superiore alle mie previsioni, la questione*. Da tale studio risultò:

- 1° Che le esperienze che si erano eseguite per la determinazione del coefficiente di rendimento, anche quando erano veramente atte a servire a tale determinazione, erano state male interpretate ed erroneamente calcolate;

- 2° Che non solo dalle mie esperienze calorimetriche, ma anche da quelle già fatte da altri coll'elettrometro e coll'elettrodinamometro, rettamente interpretate, si può effettivamente ricavare il coefficiente di rendimento; ma che tale coefficiente ha un valore diverso da quello che si era creduto finora, e segue una legge affatto diversa da quella a cui l'erronea interpretazione delle esperienze aveva condotto;
- 3° Finalmente che dalle medesime esperienze è possibile ricavare, oltre al coefficiente di rendimento, anche gli altri elementi utili a conoscersi per uno studio numerico, completo, dei fenomeni che avvengono nel generatore secondario.

Nella Memoria che oggi presento ho cercato di riassumere i risultati principali delle mie ricerche. La Memoria si compone di due parti: la prima parte riassume le ricerche teoriche necessarie per la interpretazione delle esperienze; la seconda le ricerche sperimentali [6].

L'intreccio esperimento - teoria viene chiaramente descritto in questa introduzione: dapprima una ricerca sperimentale, poi l'esigenza di una riflessione teorica, infine l'utilizzazione delle formule teoriche per il calcolo del coefficiente di rendimento sulla base dei risultati degli esperimenti svolti in precedenza da Ferraris, con il calorimetro, e da altri autori, con elettrometro ed elettrodinamometro. La struttura dell'articolo non riflette tuttavia il percorso della scoperta; la parte iniziale del lavoro consiste infatti nella trattazione teorica dell'argomento, svolta, come vedremo, secondo una procedura ipotetico - deduttiva; i risultati sperimentali vengono invece presentati e discussi nella seconda parte del lavoro.

## **2.2 Le misure di rendimento dei generatori secondari prima di Galileo Ferraris**

Queste venivano effettuate sulla base della definizione, corretta, secondo cui il rendimento del generatore secondario è dato dal rapporto tra l'energia dissipata nel carico del circuito secondario e quella "consumata" dal generatore secondario. L'energia "consumata" dal generatore secondario veniva assunta essere:

- a) quella dissipata da una resistenza che, inserita nel circuito al posto del generatore secondario, veniva attraversata dalla stessa corrente che attraversava la spirale primaria del generatore secondario, producendo ai suoi capi la medesima tensione misurata ai capi della spirale primaria;

oppure

- b) quella ottenuta dai valori medi della differenza di potenziale misurata ai capi della spirale primaria e della corrente circolante nella spirale primaria.

Le misure di Galileo Ferraris vengono effettuate all'interno di questo contesto teorico. La differenza, irrilevante dal punto di vista concettuale, consiste nel fatto che egli utilizza un calorimetro per misurare le energie dissipate dalle varie parti del circuito; come riconosce Ferraris,

[...] se si fa astrazione dalle modificazioni che l'impiego del nuovo strumento di misura doveva inevitabilmente introdurre nella condotta delle esperienze, il metodo si riduce, nel principio, ad uno di quelli di cui abbiamo parlato [7].

L'uso del calorimetro, come spiega Ferraris nell'introduzione del suo lavoro, era stata suggerita dalla diffusa convinzione che le misure effettuate con elettrometro ed elettrodinamometro non fossero attendibili: nelle misure effettuate da Ferraris questi due strumenti vengono usati solo per controllare la costanza nel tempo delle relative grandezze misurate.

Avvenne dunque che Ferraris individuò la procedura corretta per il calcolo del rendimento del generatore secondario solo dopo averne sviluppato compiutamente la teoria, successivamente allo svolgimento delle misure. Fortunatamente, come la teoria dimostra, le grandezze misurate da Ferraris – e da chi lo aveva preceduto – permettono tuttavia il calcolo del rendimento del generatore secondario.

## 2.3 La teoria

Diciamo  $\varepsilon$  la forza elettromotrice della macchina dinamoelettrica,  $i$  l'intensità della corrente primaria,  $i'$  quella della corrente secondaria, ed  $m$  l'intensità della magnetizzazione del nucleo di ferro. Se  $\varepsilon$  è una data *funzione periodica* del tempo  $t$ , le grandezze  $i$ ,  $i'$ ,  $m$  sono pure esse funzioni periodiche di  $t$ , ed egli è evidente che l'analisi dei fenomeni che avvengono nel generatore secondario dipende tutta dalla determinazione di queste funzioni.

Ora noi possiamo fare facilmente tale determinazione, se, *riservandoci di verificare in seguito l'ammessibilità dell'ipotesi per mezzo del confronto dei risultati della teoria con quelli degli esperimenti, riteniamo per ora che l'intensità della magnetizzazione del nucleo sia proporzionale alla intensità della corrente che la produce* [8].

Si noti come la forza elettromotrice venga supposta semplicemente periodica e non, per esempio, sinusoidale e a frequenza definita: ciò permette di svolgere la teoria ad un buon livello di generalità. Tuttavia, i calcoli significativi verranno effettuati solo nel caso di forza elettromotrice sinusoidale. I calcoli vengono poi ulteriormente semplificati sin dall'inizio sfruttando il fatto che nei trasformatori a disposizione <<le due spirali, primaria e secondaria, sono identiche l'una all'altra, hanno le spire vicinissime ed alternate, e sono ugualmente collocate rispetto al nucleo di ferro.>> Ciò permette di assumere [9]:

1. Che i coefficienti di induzione delle due spirali su se stesse siano uguali tra di loro ed uguali entrambi al coefficiente d'induzione mutua dell'una sull'altra.
2. Che i coefficienti di induzione del nucleo sulle due spirali siano uguali.
3. Che l'intensità  $m$  della magnetizzazione sia dovuta alla somma  $i + i'$  delle due correnti.

Le equazioni che descrivono il funzionamento de generatore secondario sono allora:

$$ri = \varepsilon - a \frac{dm}{dt} - b \left( \frac{di}{dt} + \frac{di'}{dt} \right) \quad (1)$$

$$r'i' = -a \frac{dm}{dt} - b \left( \frac{di}{dt} + \frac{di'}{dt} \right) \quad (2)$$

$$m = M(i + i') \quad (3)$$

dove  $r$  e  $r'$  sono, rispettivamente, le resistenze totali del circuito primario e secondario,  $a$  e  $b$ , rispettivamente, il coefficiente di induzione del nucleo di ferro su di una spirale e quello di una spirale sull'altra o su se stessa;  $M$  un coefficiente dipendente dalle dimensioni e dalla struttura dell'apparecchio. Si osservi come le grandezze incognite siano le due correnti e la magnetizzazione del nucleo del generatore secondario e come tale magnetizzazione sia assunta nulla in assenza di correnti; il coefficiente  $M$  descrive le proprietà ferromagnetiche del nucleo; il fenomeno di isteresi viene trascurato.

Se si prescinde dalla semplificazione dovuta al fatto che le due spirali <<dell'apparecchio del Gaulard>> sono identiche, queste equazioni sono equivalenti a quelle che troviamo sui nostri manuali:

$$ri = \varepsilon - L \frac{di}{dt} - L_m \frac{di'}{dt} \quad (4)$$

$$r'i' = -L' \frac{di'}{dt} - L_m \frac{di}{dt} \quad (5)$$

Nei nostri manuali, l'effetto del nucleo è descritto dai coefficienti di autoinduzione  $L$  e  $L'$  e di induzione mutua  $L_m$ : non è quindi necessaria una terza equazione.

Impostato così il problema, il compito è ora quello di dedurre dalle premesse tutte le conseguenze possibili. La forza elettromotrice, supposta periodica, viene ovviamente sviluppata in serie di Fourier; quando, tuttavia, si tratta di calcolare il rendimento dell'apparecchio, Ferraris assume che la forza elettromotrice sia sinusoidale.

Nello corso dello sviluppo della teoria, Ferraris calcola il valore che deve avere la resistenza di cui al punto a) a pagina 5: cioè la resistenza che, inserita nel circuito al posto del generatore secondario, viene attraversata dalla stessa corrente che attraversa la spirale primaria del generatore secondario. Commenta Ferraris:

E' importante per noi di determinare la resistenza del filo su nominato, o, come suol dirsi *impropriamente dai pratici*, la resistenza equivalente al generatore secondario [10].

L'importanza di questo calcolo risiede ovviamente nel fatto che la energia dissipata da questa resistenza veniva considerata l'energia consumata dal generatore secondario e che Ferraris stesso aveva misurato questa energia.

Quando Ferraris affronta il problema del rendimento dell'apparecchio, scrive:

Il lavoro  $[q]$  assorbito dal generatore secondario [nell'unità di tempo] è la differenza tra l'energia elettrica prodotta dalla macchina dinamo-elettrica e quella che si converte in calore nel circuito primario fuori del generatore secondario [11].

Abbiamo pertanto:

$$q = \frac{1}{T} \int_0^T [\varepsilon - (r - \rho) i] i dt \quad (6)$$

ove  $T$  è il periodo della forza elettromotrice supposta sinusoidale e  $\rho$  la resistenza della spirale del circuito primario. Si dimostra che:

$$q = \frac{1}{2}(I'^2 r' + I^2 \rho) \quad (7)$$

ove  $I$  e  $I'$  sono, rispettivamente, i valori di picco della corrente primaria e secondaria. Ferraris commenta:

Tale uguaglianza dice che l'energia assorbita dall'apparecchio è uguale alla somma di quella che viene restituita come calore nel

circuito secondario e di quella che si converte in calore nella spirale primaria. Noi avremmo potuto scrivere subito questa uguaglianza partendo dal principio della conservazione dell'energia [...] abbiamo tuttavia voluto seguire l'altra strada, benché fosse meno facile, perché, come avremo modo di notare più sotto, tutti quelli che finora fecero misure elettriche sull'apparecchio fecero il calcolo di  $q$  per mezzo di  $v$  [la differenza di potenziale ai capi della spirale primaria] e di  $i$  [la corrente primaria], *ma sbagliarono arrivando senza accorgersi a valori incompatibili col principio di conservazione dell'energia* [12].

La parte finale della trattazione teorica è quindi dedicata al calcolo del coefficiente di rendimento dell'apparecchio. Dopo aver calcolato la quantità di calore  $q'$  sviluppata nel circuito secondario nell'unità di tempo, Ferraris definisce il *coefficiente di rendimento totale dell'apparecchio*  $\mu = q'/q$  e il *coefficiente di rendimento esterno o utile*  $\nu = q''/q$ , ove  $q''$  è il calore sviluppato nel carico del circuito secondario nell'unità di tempo. Indicata inoltre con  $Q$  l'energia assorbita dalla resistenza di cui al punto a) di pagina 5, ottiene:

$$\mu = \frac{r' C^2}{\rho r'^2 + (r' + \rho) C^2} \quad (8)$$

$$\nu = \frac{(r' - \rho) C^2}{\rho r' + (r' + \rho) C^2} \quad (9)$$

$$Q = \sqrt{q^2 + \frac{r'}{C} q'} \quad (10)$$

ove  $C = (aM + b)\omega$  ( $\omega$  è la pulsazione della forza elettromotrice). Ferraris è ora in grado di confrontare il rendimento totale dell'apparecchio  $\mu$  con il rapporto  $\mu^* = q'/Q$  “che finora gli sperimentatori hanno confuso col coefficiente di rendimento  $\mu$  medesimo” [13]. Risulta:

$$\mu = \frac{\mu^*}{\sqrt{1 - (r' \mu^* / C)^2}} \quad (11)$$

Si osservi come il *presunto* coefficiente di rendimento  $\mu^*$  sia sistematicamente inferiore a quello corretto in qualunque situazione pratica ( $r' \neq 0$ ).

## 2.4 La teoria illumina gli esperimenti

Dopo avere passato in rassegna i metodi precedentemente usati per determinare il rendimento del generatore secondario (si veda la sezione 2.2), Ferraris commenta:

Le considerazioni teoriche svolte nella prima parte del presente lavoro fanno evidente che tutti i descritti procedimenti, tanto quelli fondati sull'uso dell'elettrometro e dell'elettrodinamometro, quanto quelli più grossolani, che abbiamo denominato procedimenti industriali, *furono studiati partendo da una idea inesatta, e vennero quindi malamente interpretati* [14]. Risulta infatti dalla nostra teoria che il prodotto della media intensità della corrente, misurata coll'elettrodinamometro o con altri strumenti, per la media differenza di potenziali misurata coll'elettrometro a quadranti, od altrimenti, non rappresenta l'energia impiegata, per mezzo della corrente primaria, per far funzionare il generatore. Tale prodotto sarebbe uguale alla energia impiegata solamente quando la resistenza  $r'$  del circuito secondario fosse uguale a zero; in tutti gli altri casi, nei casi reali, pratici, *quel prodotto ha un valore maggiore di quello dell'energia che si vuol misurare* [15].

[...]

*L'errore dipende dal non avere riflettuto alla differenza di fase tra la corrente primaria e i potenziali sui morsetti della spirale primaria* [16], differenza che esiste sempre quando la resistenza del circuito secondario non è uguale a zero, e che cresce fino ad un massimo assai prossimo ad un quarto di periodo se si fa crescere fino all'infinito quella resistenza. Ora, per dati valori medi della intensità della corrente e della differenza di potenziali *l'energia assorbita effettivamente dall'apparecchio dipende da quella differenza di fase, diminuisce col crescere della medesima e si annulla quando essa raggiunge un valore uguale ad un quarto di periodo* [17];

[...]

Bastano queste considerazioni per dimostrare che le esperienze che noi abbiamo classificato col nome di esperienze industriali, nelle quali si cerca di calcolare il coefficiente di rendimento per mezzo di una o di poche determinazioni fatte con lampade elettriche, non solo sono grossolane, ma sono assolutamente prive di valore e di significato.

[...]

Le altre esperienze, quelle basate sull'uso di strumenti di misura come l'elettrometro e l'elettrodinamometro, benché male interpretate, abbiano condotto i loro autori e lo stesso inventore del generatore secondario a idee erronee sul valore del coefficiente di rendimento e sulla legge delle sue variazioni, potrebbero tuttavia

bastare a risolvere completamente il problema quando formassero una serie abbastanza estesa per dare con qualche sicurezza oltre al valore di  $\mu^*$  quello delle altre grandezze che figurano nelle formule teoriche e che servono con  $\mu^*$  al calcolo di  $\mu$ . Le esperienze del signor Uzel, di cui ho riferito qui sopra i risultati, soddisfano a questa condizione, e sarebbero veramente importanti se tutte le resistenze  $r'$  colle quali si sperimentò fossero state, invece che calcolate per mezzo di  $v'$  e di  $i'$ , direttamente e accuratamente misurate [18].

Io potrei servirmi dei numeri trovati dal signor Uzel per verificare le conclusioni della nostra teoria e per determinare l'efficacia effettiva del generatore secondario. Siccome però, indipendentemente dalle considerazioni teoriche di cui abbiamo parlato, sussistono serie obiezioni contro l'impiego dell'elettrodinometro nella misura delle correnti alternative, e siccome si sollevarono eziandio obiezioni sull'uso dell'elettrometro a quadranti per la misura delle differenze di potenziale alternative, così è più conveniente che io mi serva dapprima, per confrontare la teoria coll'esperienza, di determinazioni nelle quali non si sia fatto uso di tali strumenti di misura.

Per tale motivo io descriverò alcune mie esperienze calorimetriche e mi servirò dei risultati di esse:

1. Per verificare l'attendibilità delle misure fatte coll'elettrometro.
2. Per controllare l'esattezza delle conclusioni della teoria che ho esposto nella prima parte di questo lavoro.
3. Per determinare l'effettivo coefficiente di rendimento del generatore secondario [19].

Il metodo usato dal Ferraris non si discosta quindi, fatta eccezione per l'uso del calorimetro, da quelli usati dai predecessori. Esso, infatti, prevede:

- a. <<[la] misura per mezzo di un calorimetro [del]la media dei quadrati della intensità di corrente secondaria, media che moltiplicata per la resistenza misurata del circuito secondario, dà la quantità di energia svolta nell'unità di tempo nel circuito secondario medesimo [20].>>
- b. <<Tolto allora dal circuito l'apparecchio di Gaulard, gli si sostituisce una resistenza priva di selfinduzione, della quale si fa variare il valore fino a tanto che si abbia fra le sue due estremità, con una medesima intensità di corrente, una media differenza di potenziali uguale a quella che prima si aveva fra le estremità della spirale primaria; con una misura calorimetrica fatta col medesimo calorimetro dianzi adoperato si determina allora la

media dei quadrati della intensità della corrente primaria, media che, moltiplicata per la resistenza misurata, dà il valore dell'energia che questa trasforma in calore [21].>>

Ferraris procede quindi sistematicamente alla descrizione degli esperimenti da lui effettuati, alla esposizione dei risultati ottenuti, alla utilizzazione - guidata dalla teoria - delle sue misure e di quelle effettuate in precedenza da altri sperimentatori. La parte finale del lavoro si sofferma sul confronto tra l'apparecchio da lui usato per le misure e quello utilizzato in precedenza dal signor Uzel. I due apparecchi differivano solo per la struttura del nucleo: costituito interamente da un fascio di fili di ferro quello usato da Uzel, di legno rivestito da uno strato di fili di ferro, quello usato da Ferraris. La struttura interamente in ferro era quella originariamente usata da Gaulard, <<l'altra, invece costituiva una innovazione introdotta dall'inventore allo scopo di diminuire le correnti di Foucault e migliorare con ciò le condizioni del generatore secondario [22].>> Ferraris dimostra che:

*colla sostituzione del nucleo col legno al nucleo interamente di ferro il Gaulard ha peggiorato sensibilmente il suo apparecchio [23].*

### 3 Conclusioni

Il caso del generatore secondario presenta alcuni aspetti significativi del complesso rapporto tra tecnica, esperimento e teoria. Il generatore secondario viene concepito e progettato per le applicazioni industriali: esso diventerà infatti, con il nome di *trasformatore*, un elemento insostituibile di tutte le applicazioni elettriche. La sua realizzazione avviene tuttavia in assenza di una teoria quantitativa del suo funzionamento; donde le <<ostinate ed acerbe controversie>> concernenti, in primo luogo, il suo rendimento e i tentativi di migliorarne il funzionamento guidati da considerazioni puramente qualitative (per esempio, le modifiche apportate da Gaulard al nucleo del generatore secondario).

L'intervento di Ferraris sulla questione è motivato da un lato dall'invito della Giuria della esposizione ad occuparsene e, dall'altro, <<dal dovere>> di sperimentare su apparecchi eccezionalmente a disposizione dello scienziato. Le misure vengono effettuate nell'arco di sei giorni (11 - 16 novembre 1884). Ferraris non racconta come nacque l'esigenza di una teoria del generatore secondario. Verosimilmente, il confronto dei suoi dati sperimentali con quelli dei predecessori e la loro sostanziale equivalenza - non ostante le diverse procedure di misurazione - lo convinse della ineludibile necessità di una teoria dell'apparecchio. Questa viene sviluppata rapidamente: la memoria di cui ci stiamo occupando fu presentata alla Reale Accademia delle Scienze di Torino l'11 gennaio 1885 a distanza quindi di neppure due mesi dalla conclusione

delle misure. Nella introduzione, Ferraris descrive puntualmente il contesto della scoperta, se si eccettua il passaggio cruciale dal confronto dei suoi dati con quelli dei predecessori allo sviluppo della teoria; questa viene presentata secondo una procedura ipotetico - deduttiva. Tuttavia, la presentazione della teoria conserva qualche traccia del contesto della scoperta: per esempio, laddove Ferraris, per calcolare l'energia assorbita dall'apparecchio non segue la strada maestra della applicazione del principio di conservazione dell'energia, ma una via <<meno facile>>, funzionale alla illustrazione degli errori concettuali commessi in precedenza.

Appare inoltre evidente come questo lavoro del Ferraris possa costituire un illuminante esempio di quella produzione scientifica del tardo ottocento in cui i fisici agivano contemporaneamente da sperimentali e da teorici, erano cioè, secondo la definizione di Corbino, <<teorici di sé stessi.>> Va tuttavia sottolineato come nel contesto del discorso di Corbino, questa definizione possa apparire limitativa. Essa lo è certamente nella misura in cui Corbino si riferisce alla assenza di teorici di professione; non lo può essere in senso assoluto perché Corbino, anche per le sue vicende personali, non poteva non riconoscere il ruolo propulsivo che una solida preparazione teorica svolge nell'attività dei fisici sperimentali.

## Bibliografia

- [1] Si veda ad esempio: R. MAIOCCHI, *Il ruolo delle scienze nello sviluppo industriale italiano*, in *Storia d'Italia, Annali 3*, Einaudi, Torino, 1980, pp. 865 - 999; B. REEVES, *Pensieri sulla decadenza della fisica in Italia, 1861 - 1911*, in *Atti del IV Congresso Nazionale di Storia della Fisica*, Como, 1983, pp. 147 - 154; B. REEVES, *Le tradizioni di ricerca fisica in Italia nel tardo diciannovesimo secolo*, in *La Scienza accademica nell'Italia post - unitaria*, a cura di V. ANCARANI, Milano, Franco Angeli, 1989, pp. 53 - 95; G. GIULIANI, *Il Nuovo Cimento - Novant'anni di fisica in Italia, 1855 - 1944*, Pavia, La Goliardica Pavese, 1996. Si vedano inoltre i lavori citati da questi autori.
- [2] Si veda, in particolare, per i dati statistici: S. GALDABINI, G. GIULIANI, *Physics in Italy between 1900 and 1940: the universities, physicists, funds and research*, *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, XIX, 1988, pp. 115 - 134.
- [3] O.M. CORBINO, *I compiti della nuova fisica sperimentale*, *Atti della Società Italiana per il Progresso delle Scienze*, Riunione XVIII, Firenze, 18 - 25 settembre 1929, Roma, 1930, pp. 157 - 168, pp. 159 - 60.
- [4] Si veda nel volume citato in nota [1] la sezione sui rapporti tra Fisica Matematica e Fisica Teorica.
- [5] Questo articolo - *Ricerche sperimentali e teoriche sul generatore secondario di Gaulard e Gibbs* - apparve nel volume XXXVII delle *Memorie della Reale Accademia delle Scienze di Torino* dell'11 gennaio 1885; fu ripubblicato, nello stesso anno, su *Il Nuovo Cimento*, suddiviso in tre parti: X-VII, (1885), pp. 218 - 261; XVIII, (1885), pp. 12 - 48; XVIII, (1885), pp. 115 - 127. La versione apparsa su *Il Nuovo Cimento* differisce da quella delle Memorie per una nota aggiunta alla parte introduttiva in cui si chiarisce il significato e l'importanza del coefficiente di rendimento del generatore: <<Il coefficiente di rendimento di cui si tratta qui, alla determinazione del quale mirano, come tutte le esperienze anteriori, le ricerche descritte nella presente memoria, è quello dell'apparecchio di Gaulard e Gibbs considerato come un trasformatore dell'energia: è cioè il rapporto tra l'energia utilizzabile restituita dall'apparecchio e quella ad esso consegnata. Tale coefficiente di rendimento non deve essere confuso con quello di un intero impianto di illuminazione elettrica nel quale sia adoperato come uno degli organi il generatore secondario. Tuttavia la sua determinazione si imponeva come la prima ricerca sperimentale necessaria. Infatti l'utilità che avrebbe potuto presentare nella pratica un trasformatore atto a far variare a piacimento i

due fattori dell'energia elettrica, ossia la forza elettromotrice e l'intensità della corrente, era apparsa evidente al primo annuncio dell'invenzione; ma sorgevano dei dubbi sulla possibilità di operare la trasformazione con lieve perdita di energia, ed era necessario che a tali dubbi rispondessero le prime ricerche sperimentali.>> Nel seguito, citando brani del lavoro, utilizzeremo la versione dell'articolo pubblicata in: *Opere di Galileo Ferraris*, Volume II, Milano, Hoepli, 1903, pp. 163 - 254.

- [6] Ivi, introduzione, pp. 163 - 164; corsivi nostri.
- [7] Ivi, paragrafo 7, p. 208.
- [8] Ivi, paragrafo 2, p. 166 - 67; corsivi nostri.
- [9] Ivi, paragrafo 2, p. 167.
- [10] Ivi, paragrafo 3, p. 184; corsivi nostri.
- [11] Ivi, paragrafo 4, p. 188.
- [12] Ivi, paragrafo 4, p. 189 - 90; corsivi nostri.
- [13] Ivi, paragrafo 4, p. 196; per il rapporto  $q'/Q$  abbiamo usato una notazione simbolica diversa da quella di Ferraris per evitare confusioni con altre grandezze definite in precedenza.
- [14] Corsivo nostro.
- [15] Corsivo originale.
- [16] Corsivo nostro.
- [17] Corsivo nostro.
- [18] Si veda la formula (11);  $v'$  e  $i'$  sono, rispettivamente, la differenza di potenziale ai capi della spirale secondaria e la corrente che vi circola.
- [19] Ivi, paragrafo 6, p. 204 - 7.
- [20] Ivi, paragrafo 7, p. 208.
- [21] Ivi, paragrafo 7, p. 208.
- [22] Ivi, paragrafo 15, p. 251.
- [23] Ivi, paragrafo 15, p. 254; corsivo nell'originale.

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Galileo Ferraris, tecnologo, fisico sperimentale e teorico</b>	<b>2</b>
2.1	Come nasce la teoria del trasformatore . . . . .	3
2.2	Le misure di rendimento dei generatori secondari prima di Galileo Ferraris . . . . .	5
2.3	La teoria . . . . .	6
2.4	La teoria illumina gli esperimenti . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>12</b>