

**DIESSE FIRENZE**  
Didattica e Innovazione Scolastica  
Centro per la formazione e l'aggiornamento

**SCIENZA FIRENZE**  
SETTIMA EDIZIONE

Docenti e studenti a confronto su:

**SULLE SPALLE DEI GIGANTI**  
**interrogare la realtà guidati da un maestro**

Aula Magna  
Polo delle Scienze Sociali, Università di Firenze  
Firenze, 19 – 20 aprile 2010

Menzione d'onore – Sezione Triennio

**Titolo:** *Realtà, meraviglia, progresso: Nikola Tesla*

**Di:** Federico Berti, Laura Capponi, Marco Mazzavillani, Andrea Menichetti, Marco Turicchi

**Scuola:** Liceo Scientifico 'Oriani', ITIS "N. Baldini" - Ravenna

**Docenti:** Lucia Mazzola, Gianfranco Tiganì Sava

**Motivazione:** I fenomeni sono stati esplorati in maniera sistematica e completa sia dal punto di vista sperimentale, sia dal punto di vista della teoria che ne sta alla base, nello spirito del tema del concorso seguendo le indicazioni di un grande maestro. I risultati sperimentali sono coerenti e bene interpretati. Interessante la decisione di costituire un gruppo misto di studenti appartenenti a scuole diverse, integrando con reciproco vantaggio le competenze degli uni e degli altri.

## Realtà, meraviglia, progresso: Nikola Tesla



# Realtà, meraviglia, progresso: Nikola Tesla

## Indice analitico

- Introduzione e motivazioni;
- 1) Storia del motore ad induzione di Nikola Tesla;
- 1.1) Controversie sulla paternità della scoperta;
- 2) La bobina di Tesla;
- 3) Costruzione dei prototipi ed esperimento;
- 4) L'eredità di Nikola Tesla;
- 5) Bibliografia e sitografia;
- 6) Ringraziamenti;
- 7) Allegato 1;
- 8) Allegato 2;
- 9) Allegato 3;
- 10) Allegato 4 (Documentazione fotografica)

## Introduzione e motivazioni

A molti di noi piacerebbe credere che le grandi conquiste vengano sempre premiate, se non dal punto di vista economico, almeno attraverso lo sguardo imparziale della storia. Un uomo le cui conquiste riguardano la vita quotidiana di ognuno di noi è stato quasi dimenticato, eppure l'uso della corrente alternata, della radio, dell'illuminazione a fluorescenza, del telecomando e della robotica si possono attribuire quasi esclusivamente in toto a lui: Nikola Tesla.

Era incredibilmente consapevole delle conseguenze delle sue invenzioni scientifiche e dell'impatto che avrebbero avuto sullo sviluppo dell'umanità, ma, come lui stesso osservava, il successo pratico di un'idea, indipendentemente dalla sue qualità inerenti, dipende dalla scelta dei contemporanei: se al passo coi tempi, l'idea viene rapidamente adottata; in caso contrario

*“è destinata a vivere come un germoglio che sboccia, attirato dalle lusinghe e dal calore del primo sole, per essere poi danneggiato e crescere con difficoltà a causa del gelo che s'impone” (Nikola Tesla).*

L'unica colpa di Tesla fu l'essere non conforme ai canoni della sua epoca, il suo essere controcorrente, la sua capacità di rompere gli antichi paradigmi per proporre di nuovi, verso l'innovazione, verso il progresso. In una parola sola: era un inventore o meglio uno scopritore come lui stesso amava definirsi.

Ma era anche una figura solitaria, che faceva ricerche in maniera indipendente, rimanendo al di fuori della scienza tradizionale. Proprio per attirare l'attenzione del pubblico e dei suoi investitori si fabbricò l'immagine di genio eccentrico, eppure ha donato alla nostra civiltà un incredibile bagaglio di tecnologie, applicazioni, meraviglie. Grazie alla sua opera la nostra vita è molto migliorata.

*“La scienza non è nient'altro che una perversione se non ha come suo fine ultimo il miglioramento delle condizioni dell'umanità” (Nikola Tesla).*

Aveva l'incredibile capacità di visualizzare nella propria mente le sue invenzioni, riuscendo a definire le eventuali modifiche che era necessario apportare senza ricorrere a progetti, disegni, modelli o esperimenti, sia da sveglia che nel sonno. Fin da ragazzo la sua più grande aspirazione era incanalare la potenza delle Cascate del Niagara, sogno che riuscì a realizzare, rendendo popolare la corrente alternata.

Ora, ben oltre mezzo secolo dopo la sua morte, la figura di Nikola Tesla è avvolta dal mistero ed i suoi numerosi contributi sembrano caduti nell'oscurità. Il suo lavoro venne screditato dagli esperti a lui contemporanei, che arrivarono a considerare le affermazioni di Tesla nient'altro che follie. Le stesse affermazioni però, a distanza di decenni, risultano parzialmente realizzate o totalmente corrette. Un esempio tra i tanti: prima venne definito pazzo, quando usando la sua strumentazione scoprì le frequenze di risonanza della Terra e solo 50 anni dopo Schumann fu il primo a dargli ragione.

Un altro esempio molto significativo è quello descritto dall'articolo “L'inventore di sogni”, pubblicato su *Le Scienze* (numero 441, maggio 2005). W. B. Carlson afferma che Tesla era un maestro nel dare spettacolo: il 13 maggio 1899 i soci del Commercial Club di Chicago, entrando nella sede del loro circolo per assistere ad una conferenza del famoso inventore, rimasero stupiti alla vista di un lago artificiale collocato nel bel mezzo della sala. D'altronde sei anni prima, all'Esposizione colombiana di Chicago, Tesla aveva impressionato il pubblico inviando scosse di 250.000 V attraverso il suo stesso corpo: dato il precedente, i soci del club erano curiosi di sapere che sorpresa si celasse dietro a quel lago in miniatura e alla barchetta che vi galleggiava in superficie. Improvvisamente l'imbarcazione cominciò a muoversi sull'acqua, mentre a fianco del laghetto Tesla azionava un telecomando che guidava la barca mediante invisibili onde radio: usando il suo trasmettitore senza fili, Tesla inviava segnali alla barca, che eseguiva le manovre richieste.

Tesla pensò di armare una nave con la dinamite, per poi inviarla, telecomandata, contro un'imbarcazione nemica. Nonostante la proposta sarebbe potuta essere economicamente vantaggiosa, sia per i finanziatori che per l'inventore stesso, la barca telecomandata di Tesla non diventò mai un'arma. Abbiamo riportato l'episodio perché riteniamo che questa mancata realizzazione sia emblema di quello che fu il tema fondamentale di tutta l'esistenza di Tesla: un profondo idealismo che riuscì a tradursi in realtà concreta solo in pochi casi, ma molto spesso solo per mancanza di fondi economici. Certi idealismi si adattano più alle romantiche buone intenzioni, piuttosto che al mondo reale della pragmatica economia industriale. Ogni ricerca nasce dalla curiosità, dalla creatività e dalla necessità dei singoli individui che rispondono a bisogni, interessi e stimoli, ma questi ultimi non sempre sono dettati dalla logica economica. L'inventare, questa è la chiave del progresso.

*“Lo sviluppo progressivo dell'uomo è direttamente collegato all'invenzione. Essa è il prodotto più importante della sua mente creativa. Il suo scopo ultimo è il dominio completo della mente sul suo mondo materiale, l'imbrigliamento delle forze della natura per le necessità umane. Questo è il difficile compito dell'inventore che è spesso male interpretato e non remunerato”* (Nikola Tesla)

*“Non penso che il cuore umano possa provare un'eccitazione paragonabile a quella di un inventore quando vede una creazione del proprio cervello trasformarsi in un successo... Queste emozioni fanno dimenticare cibo, sonno, amici, amore, tutto”* (Nikola Tesla)

Per tutta la sua carriera Tesla si sforzò di trovare il principio perfetto su cui basare un'invenzione rivoluzionaria. Quando scopriva un concetto importante, era disposto a brevettarlo e a darne una dimostrazione, ma spesso lasciò ad altri il “lavoro sporco” di svilupparlo in un prodotto in grado di rendere denaro, senza contare che nel progredire della sua carriera l'inventore trovò sempre più difficile convincere i potenziali finanziatori ad aiutarlo, divenendo tanto amareggiato da isolarsi dal resto del mondo.

Ci siamo chiesti come mai questo grande inventore sia stato trascurato dalla scienza. Ci siamo chiesti perché nei manuali di fisica viene ricordato solo per l'unità di misura del campo magnetico  $\mathbf{B}$  (\*), il “tesla”. Eppure la comunità scientifica, come tributo alla sua opera, gli dedicò un'unità di misura. Ben due premi Nobel (che Tesla rifiutò) gli conferirono l'onore di essere stato uno degli intelletti più brillanti al mondo. Nella prima parte della sua vita effettuò ricerche in cui non si espose in modo particolare alla censura del “sapere accettato” e fu ammirato dai più grandi scienziati e fisici dell'epoca, in modo particolare Lord Kelvin, Hermann von Helmholtz, William Crookes, Lord Rayleigh e in modo davvero inaspettato da Albert Einstein, Ernest Rutherford, Arthur Compton e Niels Bohr. La rivista *Life magazine*, in un numero speciale menzionò Tesla tra le cento persone più importanti negli ultimi mille anni, citato come uno dei più lungimiranti inventori dell'era elettrica. Si dice che il suo lavoro sul campo magnetico rotante e sulla corrente alternata diede un fondamentale contributo per l'elettrificazione del mondo intero. Un secolo dopo le sue invenzioni rivoluzionarie, la sua opera appare in moltissimi libri di stampo scientifico (ma non accademico) o pseudoscientifico che, ignorando tutte le invenzioni che Tesla concretizzò effettivamente, “descrivono” le sue sperimentazioni relative all'utilizzo di energia libera. Nel mondo intero è attivo un gruppo sempre crescente di ricercatori, purtroppo inquinato anche da cospirazionisti e millantatori, che tentano di proseguire la ricerca di Tesla. D'altra parte le oligarchie che controllano le multinazionali non permettono che il nome di Tesla venga risuscitato, perché così facendo rischierebbero di essere messe da parte per via delle sue scoperte rivoluzionarie, scoperte che, se messe in pratica sconvolgerebbero economicamente non solo queste multinazionali ma perfino il mondo stesso e il sistema di potere su cui si basa.

Nikola Tesla ci ha incuriositi, ci ha stupiti per la sua genialità, per la varietà di opere prodotte, e per i poliedrici interessi che non riguardavano solo la scienza e la tecnologia, ma anche la filosofia e la sociologia per citarne qualcuna. Così abbiamo deciso di esaminare più da vicino qualcuna delle invenzioni che Tesla effettivamente concretizzò e di farci guidare nell'osservazione della realtà da questo grande maestro.

(\*)Assumiamo valida la nota di pag. 761 del testo “Halliday, Resnick, Krane-Fisica 2- quinta edizione, Casa Editrice Ambrosiana

*“Non c'è accordo generale sui nomi dei vettori in tema di magnetismo. Il vettore  $\mathbf{B}$  talvolta è chiamato vettore induzione magnetica o vettore densità di flusso magnetico, mentre il vettore  $\mathbf{H}$ , spesso è chiamato vettore campo magnetico. Siamo dell'idea che  $\mathbf{B}$  rappresenti la grandezza fondamentale del magnetismo e pertanto ad essa spetti il nome di campo magnetico.*

*Chiameremo  $\mathbf{H}$  vettore intensità del campo magnetico”.*

## 1. Storia del motore ad induzione di Nikola Tesla

Quando Tesla era ancora studente al politecnico di Graz, Austria, il professore Poeschl, insegnante di fisica, illustrò agli studenti il funzionamento del motore a corrente continua, appena ricevuto dalle Officine Gramme di Parigi. Fu durante le lezioni di Poeschl che Tesla iniziò a concepire quella che sarebbe poi diventata la sua invenzione più importante, una versione migliorata del motore a corrente alternata. Un giorno osservò il suo professore che tentava di controllare le scintille prodotte dal commutatore a spazzole di un motore a corrente

continua. Tesla suggerì che forse sarebbe stato meglio progettare un motore privo di commutatore. Infastidito dall'insolenza dello studente, Poeschl tenne una lezione sull'impossibilità di creare un motore del genere, concludendo: *"Signor Tesla, lei può realizzare grandi cose, tuttavia in questo caso non vi riuscirà mai. Sarebbe equivalente a convertire una forza stabilmente costante, ad esempio quella di gravità, in un momento rotante. Si tratta di un progetto impossibile"*. Nel 1881 Tesla andò a Budapest sperando di lavorare per alcuni amici di famiglia. Nell'attesa, si ammalò gravemente, e si riprese grazie all'aiuto di un amico di università che lo spronò a camminare ogni sera per recuperare le forze. Fu durante una di queste passeggiate che Tesla ebbe l'illuminazione. Mentre ammiravano il tramonto improvvisamente immaginò di usare un campo magnetico rotante nel motore. L'intuizione del giovane serbo fu di invertire la procedura standard: invece di cambiare i poli magnetici nel rotore avrebbe invertito il campo magnetico nello statore. Questa configurazione avrebbe eliminato la necessità di un commutatore, e quindi le scintille. Tesla capì che facendo ruotare il campo magnetico nello statore, si produceva un campo elettrico opposto nel rotore, che cominciava così a girare. Immaginò che il campo magnetico rotante potesse essere creato usando la corrente alternata al posto della continua, ma al momento non aveva idea di come fosse possibile farlo. Tesla trascorse i cinque anni successivi cercando in tutti i modi di acquisire le conoscenze pratiche che gli avrebbero permesso di realizzare il suo motore. Tesla, rifacendosi alla visione avuta a Budapest cominciò a sperimentare con correnti alternate multiple in un motore. Era un approccio insolito, dato che la maggior parte degli esperimenti contemporanei, usavano una corrente alternata singola. Entro il mese di settembre del 1887, Tesla aveva scoperto che poteva produrre un campo magnetico rotante iniettando due correnti alternate diverse in coppie di bobine poste su lati opposti dello statore. Tradotto in linguaggio moderno, le due correnti sono sfasate di 90° e il motore gira con corrente bifase. Euforico, Tesla depositò le richieste di brevetto nell'autunno del 1887, e ottenne i brevetti n° 381968, n° 381969 e n° 382279 il primo maggio del 1888. In questi documenti, presentò l'idea che la corrente alternata multifase potesse trasmettere energia elettrica su grandi distanze, un concetto che in seguito si sarebbe rivelato decisivo. (vedi **Allegato 1**, estratti dei brevetti n° 381968, n° 381969 e n° 382279).

Quando fu chiaro che il motore a corrente alternata di Tesla era davvero promettente, i suoi finanziatori cominciarono a riflettere su come promuoverlo e decisero di vendere il brevetto di Tesla al più alto offerente. A tal fine, fecero in modo che nel maggio 1888 Tesla tenesse una relazione all'American Institute of Electrical Engineers. La conferenza ebbe ampio spazio sulle riviste specializzate, e suscitò l'interesse di George Westinghouse. In quel periodo le società fornitrici di illuminazione elettrica stavano pensando di passare dalla corrente continua a quella alternata perché quest'ultima poteva essere trasferita su lunghe distanze. Mentre Edison si concentrava sulla tecnologia a corrente continua, Westinghouse puntò sulla corrente alternata. Egli sperava che il motore di Tesla potesse essere usato per alimentare i tram, così Tesla cercò di adattare il suo progetto a questa applicazione. Alcune difficoltà tecniche però ostacolarono l'inventore e gli ingegneri della Westinghouse. Poiché il suo motore richiedeva due correnti alternate e quattro fili, non era possibile inserirlo con semplicità nel sistema a corrente alternata monofase già esistente. Alla fine gli ingegneri della Westinghouse riuscirono a risolvere il problema, modificando il motore di Tesla e sviluppando un nuovo sistema a corrente alternata che usava corrente trifase a 60 Hz. Nel 1895 la Westinghouse diede una spettacolare dimostrazione della nuova tecnologia costruendo una centrale idroelettrica alle Cascate del Niagara, un impianto che successivamente erogò corrente per 40 Km, fino alle fattorie di Buffalo, nello stato di New York. Il motore a corrente alternata di Tesla e il sistema multifase a corrente alternata costituirono dunque la base dell'odierno sistema di distribuzione della corrente elettrica nel Nord America.

### **1.1 Controversie sulla paternità della scoperta**

L'acquisizione dei brevetti di Tesla da parte della Westinghouse nel 1888 e il conseguente impatto industriale della macchina ad induzione nel sistema di trasmissione e distribuzione in corrente alternata portò ad innumerevoli controversie sulla paternità della scoperta.

Per più di vent'anni la Westinghouse dovette affrontare in diversi tribunali le rivendicazioni di altre società che cercavano di entrare in un mercato così promettente. Una causa del 1895 - Berlino, vide la AEG (Ferraris) contro Helios (Tesla); la sentenza diede ragione a Ferraris, o per meglio dire alla AEG. Una causa d'appello del 1901 - Connecticut, della Westinghouse Co. Contro New Engand Granite Co.- ( si veda Federal Reporter Vol.101-1901) portò ad una vittoria di Tesla, o meglio della Westinghouse.

Abbiamo voluto saperne di più sulla questione, e abbiamo trovato che nell'autunno del 1885 Galileo Ferraris, fisico e ingegnere piemontese dimostrò pubblicamente che, disponendo due bobine perpendicolarmente tra loro e facendole percorrere da due correnti fortemente sfasate (quasi in quadratura), si generava, nello spazio compreso tra esse, un campo magnetico rotante, però pubblicò solo nell'aprile del 1888 un articolo dal titolo *"Rotazioni elettrodinamiche prodotte per mezzo di correnti alternate"* sulla rivista Il Nuovo Cimento, in cui (pag 250) faceva riferimento ad *"...una prima esperienza ..."* del 1885. Nello stesso articolo, analizzando le due possibili applicazioni del dispositivo: come rivelatore di differenza di fase e come motore, Ferraris sottolineava in relazione a quest'ultimo utilizzo (pag 260) *"...era evidente a priori, che un apparecchio fondato sul principio di quello da noi studiato non potrebbe avere alcuna importanza industriale come motore..."*. (Fig 5, **Allegato 1**)

Riteniamo, pertanto, che entrambi gli scienziati siano pervenuti alla medesima scoperta indipendentemente l'uno dall'altro, però basandoci sulle pubblicazioni, sicuramente il primato della scoperta è da assegnare a Tesla, per il semplice fatto che la richiesta dei brevetti sui motori a induzione fu presentata nell'autunno del 1887.

Ma in che modo le correnti polifasi, e in particolare quindi quelle trifasi, in determinate condizioni, possono dar luogo a campi magnetici rotanti? Ci siamo incuriositi e ci è sembrato doveroso approfondire l'argomento. (Forniamo una breve descrizione in **Allegato 1** paragrafo **1.2 Campi magnetici rotanti**).

## 1. La bobina di Tesla

Tesla era riuscito a creare il motore a corrente alternata ideale, ma non era interessato a metterne a punto i dettagli, e nel 1889, usando le sue royalty, costruì un nuovo laboratorio a New York. Cercando di creare una lampada ad arco da usare nei sistemi a corrente alternata, Tesla finì per trovare un nuovo ideale a cui dedicarsi: i fenomeni elettrici ad alta frequenza. Mentre in precedenza aveva combinato bobine di induzione magnetica, resistenze e condensatori per creare i suoi motori, ora per produrre correnti ad alta frequenza Tesla collegava le bobine di induzione e i condensatori in nuove configurazioni.

Se si poteva costruire un motore usando corrente alternata a 60 Hz, quale impiego avrebbe potuto dare la corrente con una frequenza di 10.000 Hz? L'inventore lavorò a questa grandiosa idea negli anni successivi, e si rese conto che un circuito configurato in maniera adeguata avrebbe potuto amplificare i segnali elettrici e portarli a frequenze e voltaggi mai raggiunti fino ad allora.

Sfruttando questa idea, costruì enormi "trasmettitori amplificanti -oggi chiamate bobine di Tesla.

La rivoluzionaria bobina di Tesla, ora di impiego universale, è stata mostrata ed illustrata da Tesla per la prima volta il 20 maggio 1891 alla conferenza tenuta presso l'*American Institute of Electrical Engineers* (Columbia College, N.Y.), in cui illustrò i suoi risultati sperimentali. *"...Sarete piuttosto interessati ai risultati che vi descriverò al fine di poterne comprendere lo studio sperimentale; se sarete convinti della veridicità dell'argomento andrò avanti, ricordando che il vostro obiettivo sarà quello di produrre alte frequenze e alti potenziali, ovvero potenti effetti elettrostatici. Incontrerete pertanto molte difficoltà, che se completamente superate vi permetteranno di ottenere risultati veramente meravigliosi. Innanzitutto incontrerete la difficoltà di ottenere le frequenze richieste mediante apparati meccanici, e nel caso le otterrete in altro modo vi si presenteranno ostacoli di differente natura. Successivamente incontrerete la difficoltà di fornire il richiesto isolamento senza aumentare notevolmente le dimensioni dell'apparato, poiché i potenziali richiesti sono elevati, ed a causa della rapidità delle oscillazioni alternate l'isolamento presenta particolari difficoltà. In generale la mia esperienza tende a mostrare che corpi i quali presentano la maggiore induttanza specifica, quali il vetro, forniscono un isolamento piuttosto inferiore ad altri che, mentre sono buoni isolanti, presentano un'induttanza specifica molto più piccola, quali gli oli, ad esempio...Un'altra difficoltà sarà incontrata con la capacità e l'autoinduzione necessariamente dovute alla bobina. Se la bobina è grande, ovvero se ottenuta da un filo di lunghezza molto elevata, in generale sarà inadatta per frequenze eccessivamente alte; se invece è piccola, può essere adattata in modo corretto anche per esse, tuttavia il potenziale potrebbe non essere alto come desiderato. Un buon isolante offrirebbe un duplice vantaggio: Innanzitutto ci permetterebbe di costruire una bobina molto piccola in grado di resistere ad enormi differenze di potenziale; inoltre una bobina così piccola, grazie alla minore capacità e alla minore autoinduzione, sarebbe in grado di fornire vibrazioni più rapide e di maggiore intensità. Pertanto il problema della costruzione di una bobina lo ritengo di importanza tutt'altro che trascurabile, e mi ha impegnato per moltissimo tempo".*

Nel volume Nikola Tesla - Scritti IV (Esperimenti con correnti alternate di alto potenziale e di alta frequenza, "Conferenza tenuta presso l'Institution of Electrical Engineers", Londra, febbraio 1892) si legge *"...dei diversi ambiti di investigazione elettrica, forse il più interessante ed istintivamente il più promettente è quello delle correnti alternate...grazie all'impiego di queste correnti, persino in questo momento si prospettano possibilità impensabili e solo parzialmente realizzate...Noi attorcigliamo su un semplice anello di ferro un avvolgimento, lo colleghiamo al generatore, e con meraviglia e stupore osserviamo gli effetti di strane forze che ci spingono a operare, e che ci permettono di trasformare, di trasmettere e di collimare energia a nostro piacimento. Noi colleghiamo opportunamente il circuito, ed osserviamo la massa di ferro e l'avvolgimento comportarsi come se fossero pervasi da vita...Noi osserviamo in modo sorprendente il manifestarsi di una corrente alternata che attraverso il conduttore non tanto nel filo conduttore, quanto nello spazio circostante, assumendo la forma di calore, di luce, di energia meccanica...Tutte queste osservazioni non possono che affascinarci, riempiendoci di un intenso desiderio di approfondire ancora di più la natura di questi fenomeni. Ogni giorno ci accostiamo al nostro lavoro con la speranza di una nuova scoperta, e nella speranza che qualcuno, non importa chi, possa scoprire una soluzione di uno dei grandi problemi da risolvere, e che ogni giorno successivo possiamo tornare al nostro lavoro con rinnovato ardore, e persino in caso di insuccesso il nostro lavoro non sarà stato vano, poiché in questi impeti ed in questi sforzi oltre a trovarvi l'onore del nostro godimento abbiamo anche diretto le nostre energie verso i benefici dell'umanità....*

*In tutte queste investigazioni e in tutti questi esperimenti, per molti di questi ultimi anni abbiamo avuto una compagna stabile, un'applicazione a voi tutti familiare, quasi un gioco, anche se ora è un qualcosa di molto importante, ovvero la bobina ad induzione. Non vi sono altre applicazioni così apprezzate dagli studiosi di elettricità...Abbiamo tutti trascorso piacevolmente molte ore ad eseguire esperimenti con la bobina ad*

*induzione. Ne abbiamo studiato il comportamento, riflettendo e ponderando sui meravigliosi fenomeni che si sono dischiusi di fronte ai nostri occhi estasiati...Abbiamo agito sulla bobina sia mediante uno speciale alternatore in grado di invertire la polarità della corrente migliaia di volte al secondo, oppure mediante un condensatore con scarica disruptiva attraverso il primario generando una vibrazione nel circuito secondario con frequenza di centinaia di migliaia, o milioni, di cicli al secondo, nel caso sia necessario; agendo pertanto in alcuni di questi modi ci addentriamo in un campo ancora inesplorato”.*

*Nella sua autobiografia “Le mie invenzioni”, l’inventore scrive “...verso la fine del 1889, tornai a New York, e ripresi il lavoro sperimentale in un laboratorio presso Grand Street, dove iniziai immediatamente il progetto di macchine ad alta frequenza. I problemi costruttivi in questo inesplorato ambito erano nuovi e piuttosto particolari, ed incontrai molte difficoltà. [...]Da molte considerazioni appariva possibile inventare un semplice apparato per la produzione di oscillazioni elettriche. Nel 1856 Lord Kelvin aveva esposto la teoria della scarica del condensatore, ma da questo importante concetto non era stata tratta alcuna applicazione pratica. Personalmente ne intuì le possibilità ed intrapresi lo sviluppo di un apparato ad intuizione basato proprio su questo principio. I miei progressi furono così rapidi da permettermi, durante la mia conferenza del 1891, di mostrare una bobina che emetteva scintille lunghe 13 centimetri. In quella occasione riferii candidamente agli ingegneri di un difetto riguardante la trasformazione mediante questo nuovo metodo, ovvero le perdite nello spinterometro. Successive investigazioni mostrarono che il rendimento era identico indipendentemente dal mezzo impiegato, che poteva essere aria, idrogeno, vapore di mercurio, olio oppure un fascio di elettroni. È una legge molto simile a quella che governa la conversione dell’energia meccanica. Possiamo lasciar cadere verticalmente un peso da una determinata altezza, oppure portarlo al livello più basso attraverso un percorso indipendente, tuttavia la modalità esecutiva risulta indipendente dalla quantità di lavoro eseguita. Fortunatamente questo inconveniente non ne inficia le prestazioni, poiché grazie ad una opportuna progettazione del circuito risonante si può ottenere un rendimento dell’85%. Da questo primo annuncio della mia invenzione si è ora giunti all’impiego universale, e ciò ha rappresentato una rivoluzione in molti campi. Tuttavia è attesa da un futuro ancora più radioso. Quando, nel 1900 ottenni potenti scariche di lunghezza trenta metri e lampeggiò una corrente intorno al globo, mi fu ricordato della prima piccolissima scintilla che osservai nel mio laboratorio di Grand Street, e provai un’emozione simile a quella di quando scoprii il campo magnetico rotante”*

Ma come funziona una bobina di Tesla? Il circuito di una classica bobina di Tesla è semplice. . (Vedi **Allegato 2** Fig.2.1). Esso presenta solo cinque componenti fondamentali. Un trasformatore elevatore convenzionale, con nucleo di ferro che eleva la tensione di linea. Questa tensione carica un condensatore per alta tensione. La struttura più semplice di un condensatore si compone di due piastre conduttrici separate da uno strato isolante. Le cariche elettriche si accumulano nel condensatore, positive su una piastra e negative sull’altra. Questa carica genera un potenziale che può vincere la resistenza di un piccolo volume d’aria all’interno dello spinterometro. La scarica tra i due elettrodi dello spinterometro è molto rapida e viene utilizzata per far oscillare vigorosamente una bobina costituita da poche spire di spesso filo conduttore. La regolazione dello spinterometro, ovvero della distanza fra gli elettrodi, determina la rapidità di queste scariche. L’energia elettrica, rimbalzando avanti e indietro tra il condensatore e la bobina del primario, origina una rapida oscillazione di tipo elastico. Nella bobina primaria è contenuta un’altra bobina, secondaria, con centinaia di spire che ha le proprie caratteristiche elettriche determinate in parte dalla lunghezza del sottile conduttore avvolto. Il secondario è accoppiato induttivamente al primario e deve oscillare ad una particolare frequenza. Il circuito primario deve essere quindi progettato per farlo oscillare ad una frequenza compatibile con la frequenza con cui il secondario deve oscillare.

Facciamo un esempio meccanico. Immaginiamo di spingere un bambino su un’altalena. L’altalena rappresenta il secondario, chi spinge l’altalena rappresenta il circuito primario. Una caratteristica delle oscillazioni forzate è che l’ampiezza del moto diventa tanto maggiore quanto minore è la differenza fra la frequenza propria dell’oscillatore e la frequenza della forza eccitatrice esterna. In particolare, se la forza esterna presenta una frequenza prossima a quella propria del sistema, le vibrazioni aumentano progressivamente di ampiezza e il sistema si dice in risonanza.

Se la perturbazione forzante ha la “giusta” frequenza, anche una successione di piccoli impulsi, applicati con opportuna periodicità a un corpo oscillante, può produrre oscillazioni di notevole ampiezza, come accade quando un’altalena è spinta ad intervalli di tempo regolari in sincronismo con la sua frequenza propria. Se la sincronizzazione è esatta l’altalena oscillerà sino ad altezze elevate e avremo raggiunto la risonanza. Così avviene per la sincronizzazione o sintonizzazione della bobina di Tesla. L’artificio è di portare il primario ad uno stato in cui la sincronizzazione sarà tale che , ogni volta che si verifica la scarica tra il condensatore e la bobina si rafforzerà l’oscillazione del secondario esattamente all’istante finale della fine del ciclo. In questa condizione di risonanza le oscillazioni possono giungere a valori elevatissimi. La frequenza del primario è determinata dalla frequenza e dalla tensione della sorgente, dalla capacità del condensatore, dai parametri dello spinterometro e dalle caratteristiche della bobina del primario, ma è anche determinata in parte dalla lunghezza del suo avvolgimento. Ora quando tutti questi componenti del circuito primario sono sintonizzati per lavorare in accordo con gli altri e la frequenza risultante del circuito è “giusta” per accoppiare il secondario in un “modo ritmico compatibile”, il secondario è eccitato al massimo al suo punto estremo e può sviluppare una tensione molto elevata. Questa è la potenza della risonanza.

La bobina di Tesla è dunque un trasformatore risonante che genera suggestive e spettacolari scariche elettriche ed oggi è possibile ammirarla in tutta la sua efficacia nei musei della scienza e della tecnica o in qualche laboratorio di fisica. Alcuni di questi Trasformatori di Tesla sono in grado di generare scintille lunghe anche qualche metro. Per questo motivo sono ormai utilizzate, per esempio, per effetti cinematografici o rappresentazioni teatrali oltre che da molti hobbisti sperimentatori.

Le scariche elettriche raggiungono tensioni di diverse centinaia di migliaia di volt ma in linea di massima non sono pericolose per l'uomo perché si tratta di tensioni ad altissima frequenza e quindi le correnti indotte circolano all'esterno del corpo umano e non al suo interno. Chi le ha sperimentate ha in genere avvertito solo una sensazione di calore. Ma la raccomandazione che ci sentiamo di fare è comunque quella di **NON SPERIMENTARE SUL PROPRIO CORPO L'EFFETTO DI QUESTE SCARICHE E DI MANTENERSI AD UNA CERTA DISTANZA DI SICUREZZA DAL TRASFORMATORE QUANDO QUESTO E' IN FUNZIONE.**

In particolare è bene tenerlo lontano da qualunque apparecchiatura elettronica o elettrica, come per esempio un PC e ovviamente anche da persone che portano un pace-maker.

Tesla sperimentò una grande varietà di bobine e le usò per condurre innovativi esperimenti sulla luce elettrica, fluorescenza, raggi X, fenomeni di corrente alternata ad alta frequenza, trasmissione di segnali elettrici e di energia elettrica senza fili. Una particolarità della sua bobina è per esempio quella di riuscire ad accendere i tubi al neon senza che questi siano collegati ad alcun impianto elettrico: è infatti sufficiente avvicinare il tubo alla bobina per vederlo accendersi.

Questa invenzione di Tesla ci ha letteralmente affascinati, e abbiamo voluto, in un primo momento, approfondire le nostre conoscenze sul trasformatore (vedi **Allegato 1**, paragrafo **2.1**) e sui sistemi oscillanti (vedi **Allegato 1**, paragrafo **2.2**), e successivamente progettare e costruire due prototipi.

### 3. Costruzione dei prototipi ed esperimento

#### OBIETTIVI:

Ci proponiamo

- di misurare l'energia elettrica che è possibile ottenere, a distanza, da un Trasformatore di Tesla, in rapporto a quella impiegata per alimentarlo;
- di valutare il rendimento di Trasformatori di Tesla costruiti con soluzioni circuitali diverse e utilizzando tecnologie diverse.

#### MATERIALI:

trasformatore NST per insegne al neon da 4 KV

spinterometro, Spark Gap

9 condensatori da 0.1  $\mu$ F in serie con isolamento da 1600 V

Condensatori, induttanze e resistenze per realizzare il filtro di protezione del trasformatore NST

filo di rame da 3 mm per i primari dei trasformatori

filo di rame da 0.28 mm per i secondari dei trasformatori

tubo PVC da 6 cm e da 12 cm per i secondari dei due trasformatori

misuratore di impedenze della Philips, modello PM 6303

oscillatore con NE555 amplificato a MOS

antenna

wattmetro Yokogawa 2535

oscilloscopio Tektronix TDS

#### PERCORSO SVOLTO PER RAGGIUNGERE GLI OBIETTIVI:

Il trasformatore di Tesla **NON** funziona semplicemente sul principio di base di tutti i comuni trasformatori elevatori di tensione e quindi non si basa solo sul rapporto spire tra primario e secondario. Il trasformatore di Tesla è un apparecchio elettrico detto a **trasformatore risonante**.

Un trasformatore risonante lavora alla frequenza di risonanza degli avvolgimenti, solitamente quella del secondario, sfruttando le capacità parassite che di solito esistono per esempio fra una spira e l'altra dell'avvolgimento o con il piano di massa. Se il primario è alimentato con una tensione periodica sinusoidale, ad onde quadre, o impulsiva, ad ogni impulso viene fornita energia sul secondario, che, se lavora alla frequenza di risonanza del circuito oscillante, sviluppa una tensione molto più elevata di quella dovuta semplicemente al rapporto spire tra primario e secondario. Di solito questi trasformatori lavorano a frequenze piuttosto elevate, per cui non hanno bisogno di nucleo magnetico. Affinché vengano generate delle tensioni molto elevate, e quindi delle scariche elettriche adeguate, occorre dunque che l'avvolgimento del secondario e quello del primario siano "accordati" su una esatta frequenza di lavoro, quella della loro risonanza. Le possibilità operative sono di solito due:

- Se si costruiscono sia il circuito LC primario, sia quello LC secondario, aventi la stessa pulsazione di risonanza ( $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ), allora il segnale applicato sul primario deve avere quella stessa pulsazione affinché i due avvolgimenti (primario e secondario) siano accordati, cioè



entrino in risonanza; bisognerà dunque fare in modo di poter variare la frequenza del segnale di ingresso fino a trovare quella giusta.

Oppure

- Se non si conosce la pulsazione di risonanza del primario, perché per esempio non è possibile quantificare o misurare l'induttanza o la capacità, bisogna variare sperimentalmente i parametri LC del circuito primario affinché ci sia l'accordo massimo col secondario.

In conclusione, per trovare l'accordo, o si varia la frequenza del segnale di ingresso o si variano i parametri del circuito primario. In caso contrario non si ottiene una tensione alta sul secondario.

Il circuito secondario, costituito da un avvolgimento con elevato numero di spire e da un puntale dispersivo, che realizza così anche una capacità parassita, sono in genere fissi.

Il segnale che alimenta il primario può essere generato in vari modi a seconda del tipo di dispositivo realizzato. Il problema più grosso nella costruzione di tali apparati, dopo quello della reperibilità dei componenti, in genere non di tipo standard per le elevate tensioni di isolamento necessarie, è quello della ricerca dell'accordo dei due circuiti, primario e secondario, per ottenere la risonanza.

L'esatta frequenza di accordo in un trasformatore di Tesla non può essere semplicemente "calcolata", come invece accade in altri tipi di circuiti, perché i parametri che dipendono dai materiali utilizzati e dal tipo di costruzione realizzata sono troppi e poco quantificabili. Per esempio se durante il funzionamento di un Tesla Coil si avvicinano alla punta irradiante oggetti di vario tipo la lunghezza delle scintille potrebbe diminuire perché questi oggetti introducono capacità parassite e quindi variano la frequenza di accordo facendo diminuire il rendimento del trasformatore.

Torniamo alla realizzazione pratica dei nostri prototipi. Abbiamo preso in esame diverse possibilità.

#### 1) Trasformatore di Tesla spinterometrico

È il primo prototipo che abbiamo costruito. Realizza lo schema classico di un trasformatore di Tesla e per questo lo chiameremo per semplicità Old Tesla. (Vedi **Allegato 2** Fig.2.1)

Una sorgente ad alta tensione (nel nostro caso un trasformatore NST per insegne al neon da 4 KV) alimenta con impulsi ad alta frequenza ( nel nostro caso generati da uno spinterometro, Spark Gap ) un circuito risonante LC costituito da una batteria di condensatori e una bobina ( il primario L1 del trasformatore di Tesla, filo di rame da 3 mm avvolti in aria su un diametro di 10 cm ) Il secondario è costituito da una seconda bobina L2 e dalle capacità parassite presenti, dovute per esempio anche al puntale inserito in una estremità.

Il primario ed il secondario devono essere sintonizzati tra loro, cioè devono lavorare alla stessa frequenza di accordo. Nel nostro caso però l'avvolgimento del secondario è fisso ed è costituito da 1200 spire di filo di rame avvolto su un tubo PVC di 6 cm di diametro. Non è possibile variare i parametri L e C del secondario per cui, per trovare l'accordo, si devono variare le spire della bobina del primario con una presa scorrevole.

Sperimentalmente abbiamo operato in questo modo.

Scollegato il trasformatore e lo spinterometro, abbiamo iniettato nel primario un segnale sinusoidale a frequenza variabile e tramite un oscilloscopio, con la sonda collegata al puntale del secondario, abbiamo individuato la frequenza per cui la tensione in uscita risultava massima. Questa frequenza risultava di circa 380 KHz pari a  $\omega = 2\,386\,400$  rad/s e doveva essere quindi la frequenza di risonanza del circuito primario accoppiato a quello del secondario.

Con questo valore di frequenza del segnale di ingresso abbiamo, tramite un contatto mobile, cercato di migliorare l'accordo variando le spire della bobina del primario. La situazione ideale è stata ottenuta con 12 spire. La bobina del primario L1 è stata allora tagliata di misura sulla dodicesima spira.

Come controprova abbiamo poi misurato l'induttanza dell'avvolgimento L1 attraverso un ponte RCL, un misuratore di impedenze della Philips, modello PM 6303. Il valore ricavato è risultato di circa 12  $\mu$ H che combinato al valore noto della capacità,  $C = 0.0122$   $\mu$ F, fornisce, attraverso la solita formula, un valore di pulsazione di risonanza  $\omega = 2\,787\,473$  abbastanza prossimo a quello iniziale. La differenza fra i due valori, sia pur minima, può essere giustificata anche dal fatto che l'ultimo calcolo è stato fatto ipotizzando il circuito L1 e C a vuoto, mentre il primo valore di pulsazione è stato ottenuto sperimentalmente quando il circuito del primario vedeva come carico quello del secondario e questo può aver variato di poco le condizioni di

risonanza. (Per soddisfare un'ultima curiosità abbiamo calcolato, utilizzando la formula inversa  $C = \frac{1}{\omega^2 L}$ , il

valore della capacità parassita introdotta dal puntale sul secondario. E' risultata essere di circa 11 pF).

Gli accorgimenti costruttivi sono stati impegnativi per via delle alte tensioni in gioco. Il condensatore del circuito primario per esempio è stato realizzato con una batteria di condensatori per poter raggiungere l'adeguata tensione di isolamento.

E' stato introdotto un filtro per proteggere il trasformatore NST dai disturbi prodotti dal circuito. Il filtro è riportato in **Allegato 2**, Fig 2.2.

Molto di questo lavoro, che ci ha permesso di passare dalla teoria alla realizzazione pratica, è stato agevolato dai preziosi consigli forniti da sperimentatori nel campo delle alte tensioni, e da tecnici, di nostra conoscenza, a cui vanno i nostri ringraziamenti.

Il collaudo del nostro Old Tesla ha avuto un esito positivo. E' stato necessario però inserire un ulteriore tubo di PVC tra primario e secondario per migliorare l'isolamento in quanto persisteva un pericoloso scintillio tra i due avvolgimenti.

Gli effetti prodotti dal puntale sono stati davvero esaltanti come documentano le foto riportate in **Allegato 4**.

## 2) Trasformatore di Tesla valvolare

Il segnale sinusoidale che alimenta il primario è generato da un oscillatore a valvole. Si possono raggiungere così potenze considerevoli. Abbiamo scartato la sperimentazione di questo tipo di trasformatore di Tesla per diversi motivi:

- il costo: le valvole, ma anche solo i portavalvole, hanno costi proibitivi arrivando a diverse centinaia di euro. Sono inoltre di difficili reperibilità ed è possibile recuperarli nei negozi di materiale surplus, per esempio di provenienza russa, o nei mercatini dell'usato specializzati in componentistica elettronica;
- Comunque, la realizzazione non avrebbero portato significative novità all'esperimento in programma perché i soli filamenti delle valvole per esempio devono essere alimentati con potenze elevatissime. Nel bilancio finale questo ha sicuramente un peso sproporzionato. Abbiamo visto in funzione un Tesla Coil Valvolare costruito da sperimentatori di nostra conoscenza che alimentava il filamento di ogni valvola a 12 volt con un assorbimento di corrente superiore a 10 ampere per un totale complessivo di circa 250 watt. E questo solo per i filamenti delle valvole!

E' indubbio che in questo caso gli effetti scenografici sono notevoli per via delle grandi potenze in gioco, ma non si può parlare di un sistema efficiente di trasmissione dell'energia elettrica a distanza.

## 3) Trasformatore di Tesla con componenti allo stato solido:

E' il secondo prototipo che abbiamo costruito.

Riteniamo che se Tesla fosse vissuto ai nostri giorni forse avrebbe tentato questa via nella sua sperimentazione.

Il circuito che alimenta il primario del trasformatore è un oscillatore a MOS che genera un segnale ad onda quadra. Nel nostro caso si tratta di un segnale di circa 90 volt massimo, 4 ampere e con frequenza che può essere variata tra 125 e 260 KHz.

Il circuito è quello riportato in parte in **Allegato 2**, Fig 2.3, ed è proposto da una nota rivista di sperimentazione elettronica.

Il circuito che genera il segnale periodico ad onda quadra è costituito da un noto componente elettronico, l'integrato NE 555, indicato nello schema da IC3.

Tale segnale viene poi diviso in frequenza dall'integrato IC2-B raggiungendo il campo di variazione sopra riportato.

I MOS realizzano l'amplificazione in potenza di questo segnale periodico e sostituiscono le valvole della soluzione presentata al punto 2)

I MOS sono componenti elettronici pilotati in tensione e quindi con assorbimento di corrente molto basso. In tal modo la potenza elettrica spesa all'ingresso è notevolmente inferiore a quella di un equivalente trasformatore di Tesla valvolare.

Bisogna dire che tale schema è stato fonte di insuccesso per molti sperimentatori che lo hanno realizzato, come testimoniano le documentazioni reperite in rete. Ma i nostri tecnici hanno trovato il motivo di questo malfunzionamento che portava alla rapida rottura dei MOS. Si trattava di una cattiva disposizione dei collegamenti di massa che, con queste tensioni e a queste frequenze, danneggiava irreparabilmente i dispositivi attivi. Individuato e risolto il problema, anche questo Tesla Coil ha dato ottimi risultati durante il suo collaudo, come documentato dalle immagini presenti in appendice.

Il problema dell'accordo in questo caso si risolve più semplicemente variando solo la frequenza dell'oscillatore elettronico. Ruotando la manopola del potenziometro, anche solo visivamente, osservando l'intensità delle scintille, si può intuire per quale posizione i due circuiti, primario e secondario, funzionano entrambi in risonanza. Nel nostro caso la frequenza migliore di utilizzo è stata misurata, con un frequenzimetro, intorno ai 165 KHz

## MISURE E ANALISI:

L'obiettivo dei nostri esperimenti era quello di misurare l'energia elettrica che è possibile ottenere, a distanza, da un Trasformatore di Tesla, in rapporto a quella impiegata per alimentarlo.

Certo con un tubo al neon che si illumina, o con una lampadina saldata ad una spira di rame e che si accende in prossimità del puntale, è possibile dedurre che il Tesla Coil irradia una certa quantità di energia riutilizzabile, ma non è possibile effettuare delle misurazioni attendibili.

Abbiamo allora adottato un sistema proposto da uno sperimentatore americano, Terry Fritz.

Si tratta di una doppia antenna montata davanti ad uno schermo riflettore di rame, come rappresentato in **Allegato 2** Fig.2.4.

La prima antenna permette, tramite un condensatore in serie, di prelevare un segnale proporzionale alla tensione a vuoto, presente nel punto dove è collocata l'antenna, e indotta dal Tesla Coil in funzione. In qualche modo serve a misurare l'intensità del campo elettrico presente in quel punto.

La seconda antenna, identica alla prima e affiancata ad essa, ha una resistenza in parallelo del valore di 50  $\Omega$  collocata tra la stessa antenna e massa. Su questa resistenza si può misurare una tensione. Lo abbiamo fatto tramite un oscilloscopio digitale modello Tektronix TDS 2002B 60MHz. Attraverso la formula

$$P_{eff} = \frac{V_{eff}^2}{R}$$

è possibile ricavare, in via approssimativa, la potenza elettrica rilevata in quel punto dello spazio, indotta dal Trasformatore di Tesla in funzione.

Abbiamo ripetuto ogni misura 3 volte per ogni distanza considerata. Per brevità non abbiamo riportato le singole misure, ma solo la media di esse, assumendo come errore assoluto la semidispersione. In particolare si voleva verificare, sia pur in modo approssimativo, se l'intensità del segnale captato decresceva in ragione del quadrato della distanza.

La potenza assorbita dal Trasformatore di Tesla sotto esame è stata misurata con un wattmetro Yokogawa 2535.

Le tabelle relative ai dati raccolti si trovano nell'**Allegato 2** Fig. 2.5 e Fig. 2.6.

## CONCLUSIONI

L' esperimento da noi condotto ci ha permesso di verificare che la trasmissione a distanza di energia elettrica implica problemi di rendimento notevoli, così come era nelle nostre ipotesi iniziali. Abbiamo osservato che l'intensità dei segnali elettrici ricevuti dipende fortemente dalla distanza, diminuendo col quadrato di essa.

Dalle misure effettuate è risultato nettamente più efficiente il tesla coil spinterometrico. Ci aspettavamo invece migliori prestazioni da quello utilizzante tecnologia allo stato solido come risulta anche dalla letteratura relativa. Probabilmente, oltre all'assorbimento dei circuiti elettronici stessi, questo minor rendimento potrebbe dipendere da un non perfetto accordo tra i due circuiti risonanti. Ci riserviamo di indagare su questo problema nei mesi successivi.

Le difficoltà costruttive sono state enormi, come descritto nella relazione, e questo ci ha convinto ancora di più degli impedimenti che la ricerca scientifica incontra sul suo cammino. Le difficoltà non riguardano solo le capacità e le abilità pratiche degli sperimentatori ma anche, per esempio, l'impossibilità di realizzare parti dei prototipi con le ridotte risorse finanziarie di cui si dispone, oppure di reperire componenti necessari in tempi brevissimi. La stessa ricerca delle fonti scritte non è stata facile. Molti dei testi impiegati hanno richiesto inoltre un'accurata traduzione ed interpretazione.

L'esperienza si è rivelata comunque utile, piacevole e formativa, poiché ci ha indotti ad approfondire le nostre conoscenze, ad acquisirne di nuove per la risoluzione dei crescenti problemi incontrati e a interagire tra di noi pur provenendo da scuole con obiettivi formativi diversi.

Le misure sarebbero state più attendibili se effettuate, come recitano tutti i testi che trattano la propagazione delle onde e.m., nello spazio aperto. Ma la stagione non certo propizia, la necessità di disporre della tensione di rete, l'uso indispensabile di strumenti di misura molto costosi quali oscilloscopio e wattmetro, ci hanno consigliato di effettuare le misure in laboratorio.

Ci siamo resi conto che la presenza di colonne di cemento armato, la presenza di campi e.m. generati dall'illuminazione al neon, dalle attrezzature di laboratorio e dai computer, in alcuni casi falsavano di poco le misure effettuate.

## 4 L'eredità di Nikola Tesla

L'inventore capì che la risonanza apriva la strada alla sintonizzazione dei segnali radio. Conferendo ad un trasformatore una certa capacità e induttanza si sarebbero prodotti segnali alla frequenza desiderata; analogamente fornendo la stessa capacità e induttanza ad un circuito ricevente, quest'ultimo avrebbe risposto ai segnali trasmessi alla frequenza originale.

Basandosi sull'idea fondamentale della risonanza elettrica, Tesla portò avanti contemporaneamente invenzioni nel campo dell'illuminazione, delle comunicazioni radio e della distribuzione senza fili di corrente elettrica. Nella primavera del 1899 Tesla si trasferì a Colorado Springs. Qui si occupò di quella che credeva sarebbe stata l'applicazione più importante delle onde elettromagnetiche: la distribuzione senza fili di corrente elettrica intorno al mondo. In quel periodo sembrava che in tutta l'America si stessero realizzando impianti elettrici. La richiesta di elettricità sembrava insaziabile, e Tesla sognava di battere le reti di terra che stavano rapidamente crescendo fornendo sia l'elettricità, sia lo scambio di messaggi senza l'uso dei fili. Il nuovo sogno di Tesla si basava sulla risonanza elettrica, e si fondava sulla duplice relazione tra trasmettitore e ricevitore. Il trasmettitore inviava onde radio al ricevitore attraverso l'aria, e, poiché entrambi gli strumenti erano collegati a massa, una corrente di ritorno passava dal ricevitore al trasmettitore attraverso la messa a terra. A differenza di tutti gli altri sperimentatori, che puntavano sulle onde radio-trasmittenti che utilizzavano l'atmosfera, Tesla decise di concentrarsi sulla corrente di terra. Pensò cioè di utilizzare il trasmettitore per inviare le onde al ricevitore tramite la terra, e di usare poi l'atmosfera per il circuito di ritorno. Tesla pensò che una stazione trasmittente sarebbe stata in grado di pompare energia elettromagnetica nella crosta terrestre, fino a raggiungere la frequenza di risonanza elettrica del pianeta; poi, con l'intero globo pulsante di energia, la si sarebbe potuta intercettare tramite stazioni riceventi sparse in tutto il mondo. Per mettere alla

prova questa teoria Tesla assemblò a Colorado Springs diversi trasmettitori amplificanti di grandi dimensioni, e si persuase che avessero effettivamente trasmesso energia intorno al mondo. Sicuro che l'elettricità poteva essere trasmessa intorno al mondo passando sotto terra, nel 1900 tornò a New York, scrisse un saggio di sessanta pagine per la rivista "Century" dal titolo "The problem of increasing human energy". I suoi sforzi promozionali diedero frutti, e nel 1901 il magnate J. P. Morgan investì 150 mila dollari nello schema elettrico senza fili di Tesla. L'inventore consumò questo anticipo attrezzando, senza badare a spese, un nuovo laboratorio a Wardenclyffe dove costruì un pilone d'antenna alto 57 metri, però non riuscì a procurarsi fondi necessari per portare a termine il progetto e si ammalò di esaurimento nervoso. Qui iniziò la parabola discendente nella carriera di Nikola Tesla e negli anni successivi si isolò vagabondando da un albergo all'altro.

Negli ultimi 20 anni della sua vita, Tesla visse come esiliato dalla comunità scientifica: d'altronde era questo l'obiettivo sia del mondo industriale come del mondo accademico e a partire dal 1931, anno in cui il settimanale "Time" celebrò il settantacinquesimo compleanno di Tesla dedicandogli la storia di copertina, prese l'abitudine di tenere ogni anno una conferenza stampa nel giorno del suo compleanno.

Per via della mancanza di un capitale d'investimento, indispensabile per testare le sue teorie, fu forzato a scrivere le sue idee su una infinità di diari e nello stesso tempo a vivere al limite dell'indigenza, mentre i magnati come Westinghouse e Morgan si erano arricchiti proprio grazie al suo talento e ai suoi progetti. Ancora oggi vengono premiati solamente quei concetti che possono essere messi in pratica in maniera redditizia. Questa è, molto probabilmente, la ragione per cui nella prima parte della vita di Nikola Tesla, vennero premiati progetti di immediato utilizzo, ma non il progetto di trasmettere potenza senza fili, perché ciò significava "energia libera" per tutti, e poco reddito per i capitalisti del tempo.

Tesla ha lasciato dietro di sé un'eredità controversa, dovuta anche in parte ad alcune sue dichiarazioni piuttosto "stravaganti". È sorto spontaneo un interrogativo perché pensiamo che alcune di queste affermazioni non potevano essere del tutto campate in aria, ma dovevano avere la loro radice nella grande quantità di esperimenti che lui stesso in molti anni aveva compiuto.

In **Allegato 3** vogliamo fornire, oltre ad alcune notizie biografiche, una panoramica di sviluppi, proiezioni e prospettive successive all'opera del grande maestro Nikola Tesla ma che non possiamo inserire qui per motivi di spazio.

Vogliamo concludere il nostro lavoro con una affermazione tratta da Feynman Richard P., Leighton Robert B., Sands Matthew, *La Fisica di Feynman, Elettromagnetismo e materia*, Zanichelli, Bologna 2009.

*Quando Faraday rese pubblica la sua sorprendente scoperta che un campo magnetico variabile produce una f.e.m., gli fu chiesto: "A cosa può servire?". Tutto quello che egli aveva trovato era il fatto bizzarro che quando muoveva un filo vicino ad un magnete una minuscola corrente si produceva nel filo. A cosa mai poteva servire? La sua risposta fu: "A che serve un bambino appena nato?". Eppure pensate alle formidabili applicazioni pratiche a cui la sua scoperta ha condotto... L'elettrotecnica moderna cominciò con le scoperte di Faraday. Sviluppandosi l'inutile neonato diventò un prodigio e cambiò la faccia della Terra in un modo che il suo padre orgoglioso mai avrebbe potuto immaginare.*

## 5. Bibliografia e sitografia

- Mario Pezzi, *Elettrotecnica generale*, Zanichelli, Bologna, 1965;
- Feynman Richard P., Leighton Robert B., Sands Matthew, *La Fisica di Feynman, Elettromagnetismo e materia*, Zanichelli, Bologna 2009;
- Halliday David, Resnick Robert, Krane Kenneth S., *Fisica 1 e Fisica 2*, CEA Casa Editrice Ambrosiana, Milano, 2002;
- Feynman Richard P., Leighton Robert B., Sands Matthew, *La Fisica di Feynman, Meccanica quantistica*, Zanichelli, Bologna 2009;
- Massimo Teodorani, *Tesla, lampo di genio*, Macro Edizioni, Cesena, 2005;
- Margaret Cheney, *Tesla, un uomo fuori dal tempo*, Liberi libri, Macerata, 2004;
- R. Scognamiglio, F.Guidi, M. Sperini, *L'opera di Nikola Tesla, vol.1*, Società editrice Andromeda, Bologna, 2004;
- George Trinkaus, *Radio Tesla*, Società editrice Andromeda, Bologna 2000;
- George Trinkaus, *La bobina di Tesla*, Edizioniandromeda, Bologna, 1989;
- Nikola Tesla, *Scritti II, Esperimenti con correnti alternate di frequenza elevatissima e loro applicazioni ai metodi di illuminazione artificiale parte I (Conferenza tenuta presso l'American Institute of Electrical Engineers 20 maggio 1891)*, Traduzione di F.Guidi e M.Sperini Società editrice Andromeda, Bologna, 2009;
- Nikola Tesla, *Scritti III, Esperimenti con correnti alternate di alto potenziale e di alta frequenza parte II (1892)- La trasmissione di energia elettrica senza fili (1904)*, Traduzione di F.Guidi e M.Sperini, Società editrice Andromeda, Bologna, 2009;

- Nikola Tesla, *Scritti IV "Le mie invenzioni" Autobiografia di Nikola Tesla (1919)*, Traduzione di F.Guidi e M.Sperini, Società editrice Andromeda, Bologna, 2009;
- W. Bernard Carlson, *L'inventore di sogni*, Le Scienze, n. 441, maggio 2005;
- John W. Coltman, *The Trasformer*, rivista Scientific American, gennaio 1988;
- Philip Yam, *Exploiting zero-point Energy*, rivista Scientific American, dicembre 1997;
- Timothy H. Boyler, *The classical vacuum*, rivista Scientific American, agosto 1985;
- Federal Reporter Vol.101 – 1901 *Westinghouse contro N.E. Granite*, 1901;
- G.Ferraris, *Rotazioni elettromagnetiche prodotte per mezzo di correnti alternate*, 1888;
- Gary L. Johnson, *Searchers for a New Energy Source – Tesla, Moray, and Bearden* IEEE Power Engineering Review, January 1992;
- Harald Reider, *"Serious inconsistencies in Beardens MEG and his other theories*, 9 marzo 2003;
- Philip Yam "Exploiting Zero-Point Energy" Scientific American, December 1997;
- Timothy H.Boyer "The Classical Vacuum" Scientific American , Agosto 1985;
- G.Bressi, G.Carugno, R.Onofrio e G.Ruoso "Measurement of the Casimir Force between Parallel Metallic Surface, Physical Review Letters, 28 Gennaio 2002;
- Onde evanescenti e trasmissione di energia senza fili, Notiziario Tecnico Telecom Italia , Anno 16 n° 3 , Dicembre 2007;
- [www.progettomeg.it/tecnica.html](http://www.progettomeg.it/tecnica.html);
- [www.progettomem.it](http://www.progettomem.it).

## 6. Ringraziamenti

Ci sentiamo riconoscenti verso tutte quelle persone che, con i loro consigli e insegnamenti, con la loro opera manuale, con il materiale fornito, con la pazienza dimostrata nel sopportarci specie nelle concitate fasi finali del progetto, ci hanno permesso di arrivare in fondo a questo impegnativo lavoro, e quindi si ringraziano in ordine rigorosamente casuale:

- il Preside Ing. Angelo Serafino Parrotta del Liceo Scientifico "A. Oriani" di Ravenna, che ci ha permesso di disporre della scuola a qualsiasi ora del giorno (...e non solo!);
- il Prof. Maurizio Montanari dell'ITI di Ravenna per l'insostituibile supporto tecnico/pratico fornito dall'inizio alla fine del nostro lavoro;
- il Sig. Fausto Focaccia e il Sig. Marcello Caselli, esperti e appassionati sperimentatori nel campo delle alte tensioni e alte frequenze, che ci hanno fornito consigli, materiale altrimenti irreperibile, sostegno e incoraggiamento con il solo scopo di incentivare la sperimentazione e la ricerca soprattutto fra i giovani;
- i nostri compagni Belardi Silvia, Gardella Matteo e Moncada Beatrice della VB Liceo Scientifico "A.Oriani", che sebbene non inseriti in questo gruppo, hanno lavorato costantemente insieme a noi nelle varie fasi di realizzazione del progetto;
- i tecnici Roberto Bendandi, Roberta Giardini, Andrea Sedioli dell'ITI di Ravenna che, in misura diversa, hanno permesso la realizzazione di parti del progetto e ci hanno assistito con pazienza e comprensione durante le realizzazioni pratiche;
- il nostro compagno di istituto Vincenzo Pulpito che ha effettuato le riprese fotografiche ed ha filmato le fasi finali del collaudo e delle misure;
- tutti gli sperimentatori che nel mondo si sono dedicati alla costruzione di Tesla Coil ed hanno messo in rete le loro conoscenze evitandoci così insuccessi o delusioni;

**Allegato 1**

Fig 1) Estratto del brevetto 381.968 (electromagnetic motor)

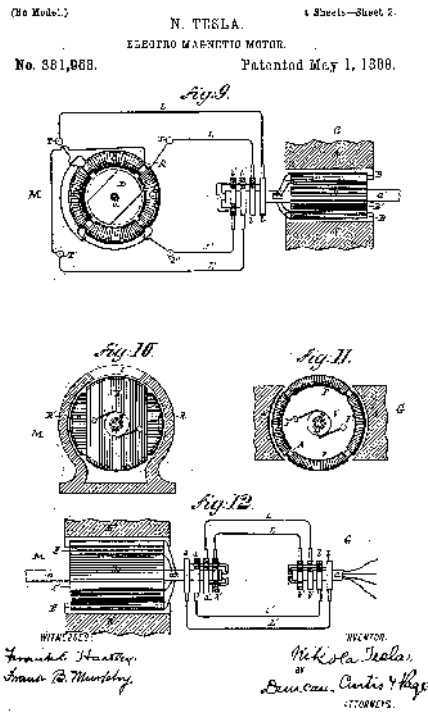


Fig 2) Estratto del brevetto 381.969 (electromagnetic motor)

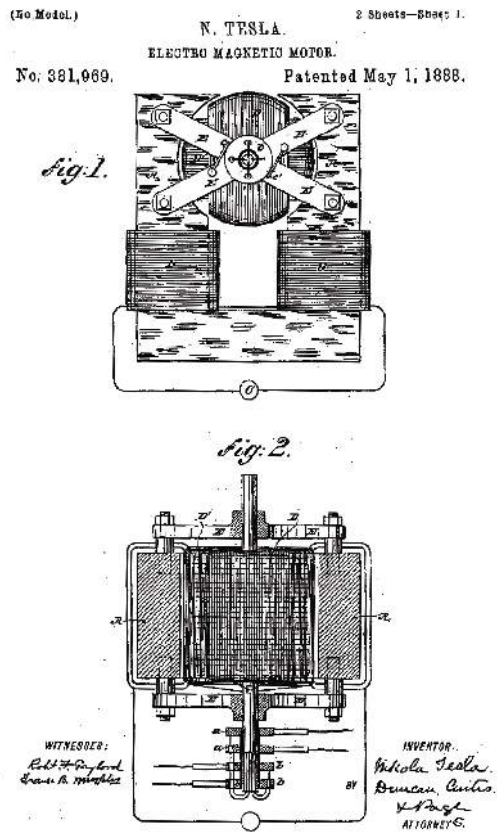


Fig 3) Estratto del brevetto 382.279 (electromagnetic motor)

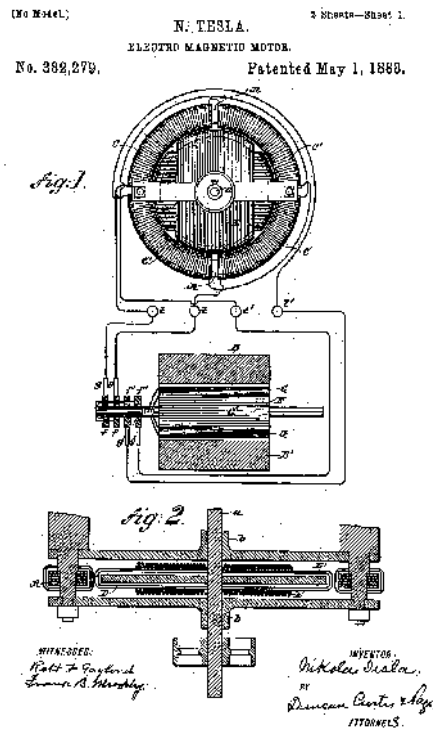
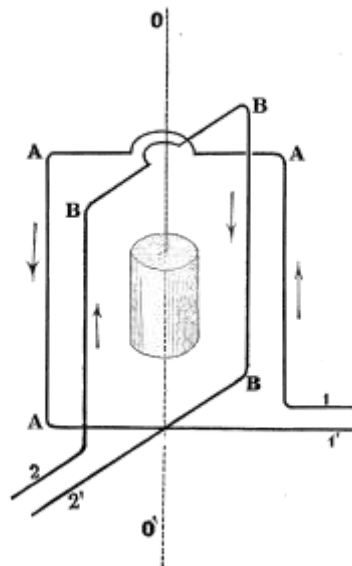


Fig 4) Esperienza di Galileo Ferraris per la verifica dell' esistenza del campo magnetico rotante tra le due spire perpendicolari. Schema pubblicato su "Il Nuovo Cimento", Pisa, 1888



## 1.2 Campi magnetici rotanti

Per campo magnetico rotante si deve intendere un campo magnetico il cui vettore rappresentativo  $H$  (intensità del campo magnetico) ruota nello spazio con una certa velocità (uniforme) attorno ad un punto ben determinato.

Prima però di esaminare le caratteristiche e le proprietà dei campi magnetici rotanti, vediamo alcune osservazioni sui campi magnetici dovuti a corrente monofasi.

Si consideri dunque un campo magnetico generato ad esempio, da una bobina ad asse rettilineo, come appare in Fig 5. █

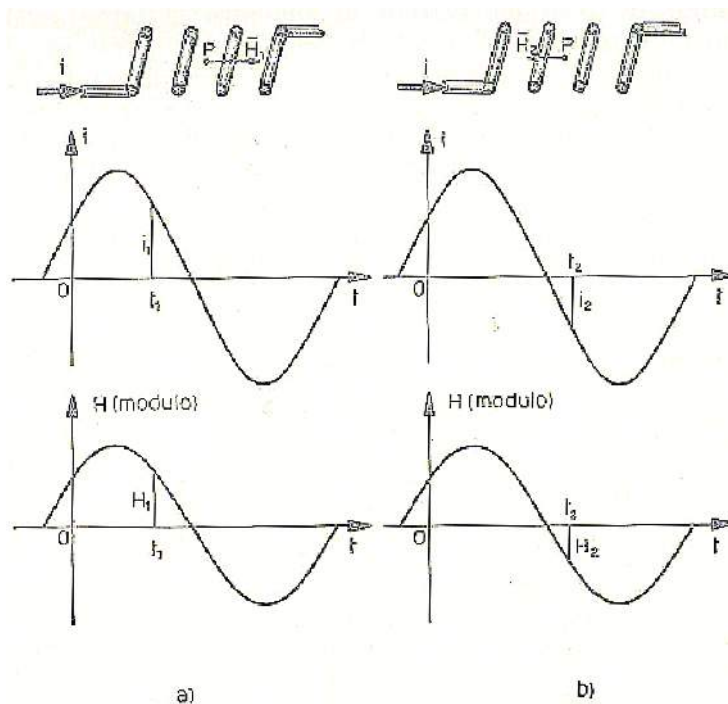


Fig. 5

Questa è alimentata, per ipotesi, con corrente sinusoidale, quale naturalmente potrebbe essere la corrente di una fase di un circuito trifase.

Se ora si prende un punto all'interno della bobina, ad esempio il punto P posto sul suo asse, il vettore  $\mathbf{H}$  in tale punto presenterà sempre la stessa la direzione, coincidente come si sa con l'asse della bobina, ma naturalmente la sua ampiezza seguirà quella della corrente. Pertanto quando quest'ultima inverte il senso della circolazione nelle bobina (semiperiodo negativo) anche il vettore  $\mathbf{H}$  invertirà il suo verso. In sostanza, dunque, il vettore  $\mathbf{H}$  non ruota, ma semplicemente è *alternato* [infatti  $H = H_M \text{sen}(\omega t + \psi)$ ] come alternata è la corrente  $i = I_M \text{sen}(\omega t + \psi)$  che alimenta la bobina.

Tuttavia si dimostra che questo vettore  $\mathbf{H}$ , la cui direzione nello spazio risulta immutabile, può essere costituito in ogni istante da due vettori rotanti aventi ampiezza costante eguale alla metà del valore massimo raggiunto dal modulo del vettore  $\mathbf{H}$  e caratterizzati da velocità di rotazione pure costante, tale da far compiere loro un giro nel tempo corrispondente ad un periodo della corrente alternata di alimentazione. I versi di rotazione di questi due vettori, sono invece fra loro contrari, per cui se uno gira in senso orario, l'altro gira in senso antiorario.

Nella Fig.6 è stata riportata la costruzione vettoriale che mostra abbastanza chiaramente come un vettore di ampiezza costante ( $\mathbf{H}_d$ ) rotante in senso orario (velocità angolare  $-\omega$ ) ed un vettore di ampiezza pure costante ( $\mathbf{H}_s$ ), ma rotante in senso antiorario (velocità angolare  $+\omega$ ) siano le componenti di un vettore fisso nello spazio però di modulo variabile nel tempo secondo la legge sinusoidale. Sempre dalla Fig.6 si può verificare come sia necessaria la condizione  $H_d = H_s = \frac{1}{2} H_M$  e come nell'istante in cui il campo raggiunge il massimo valore i due vettori componenti debbano avere la stessa direzione e lo stesso verso del vettore dato (Fig 6.c).

Concludendo, si può ora affermare che un qualsiasi circuito percorso da corrente alternata crea attorno a sé un campo magnetico alternato, il quale in ogni punto, può essere considerato *equivalente* a due campi magnetici di intensità costante e ruotanti in versi opposti. Come si può intuire questa proprietà è della massima importanza. ■



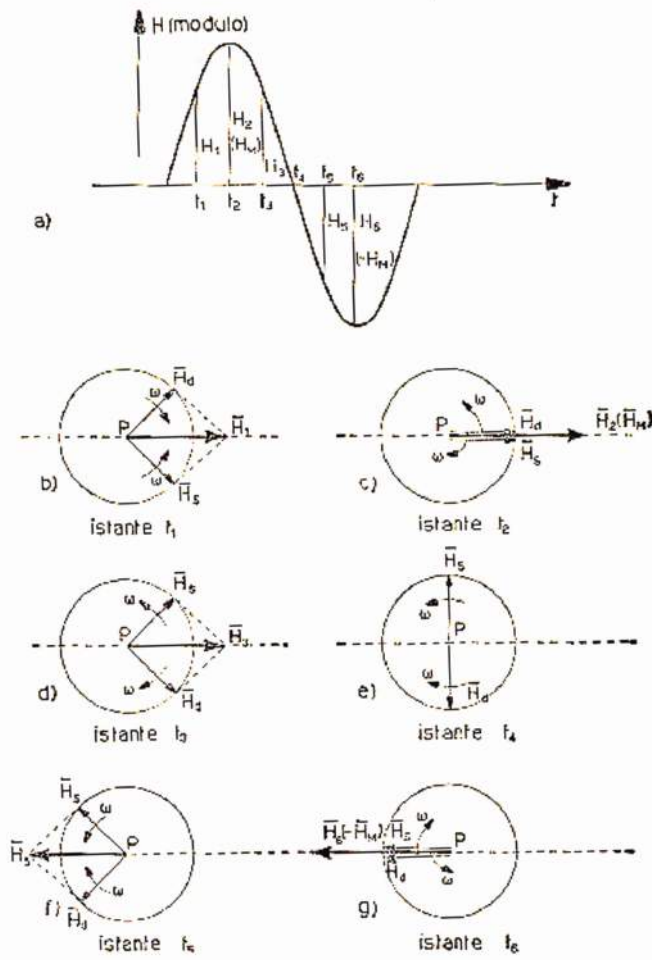


Fig. 6

### 1.2.1 Campi rotanti trifasi

Per ottenere un solo campo magnetico rotante occorre disporre di tre bobine eguali, aventi posizione simmetriche, i cui versi siano disposti tra di loro in un piano a  $120^\circ$  l'uno dall'altro e i cui avvolgimenti siano percorsi da un sistema trifase simmetrico di correnti (Fig.7). Come questo dispositivo possa dar luogo ad un campo magnetico rotante è facilmente dimostrabile qualora si considerino prima le componenti vettoriali  $H_d$  e  $H_s$  del campo magnetico generato da ciascuna bobina e quindi si proceda alla determinazione della risultante complessiva.

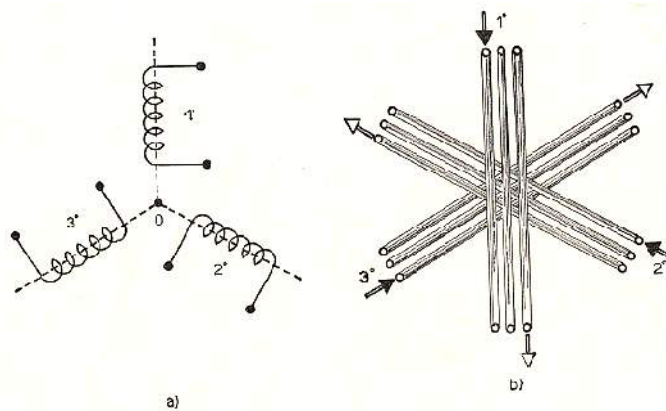


Fig. 7

Fig.7

Si incominci con l'osservare anzitutto che le tre bobine generano nella zona centrale O dei campi magnetici che raggiungono la stessa intensità  $H_M$ , a causa dell'eguaglianza ed equidistanza delle tre bobine e dell'alimentazione trifase, ma che proprio per quest'ultimo fatto essi sono ciclicamente in ritardo nel tempo di un terzo di periodo (Fig.8.a).

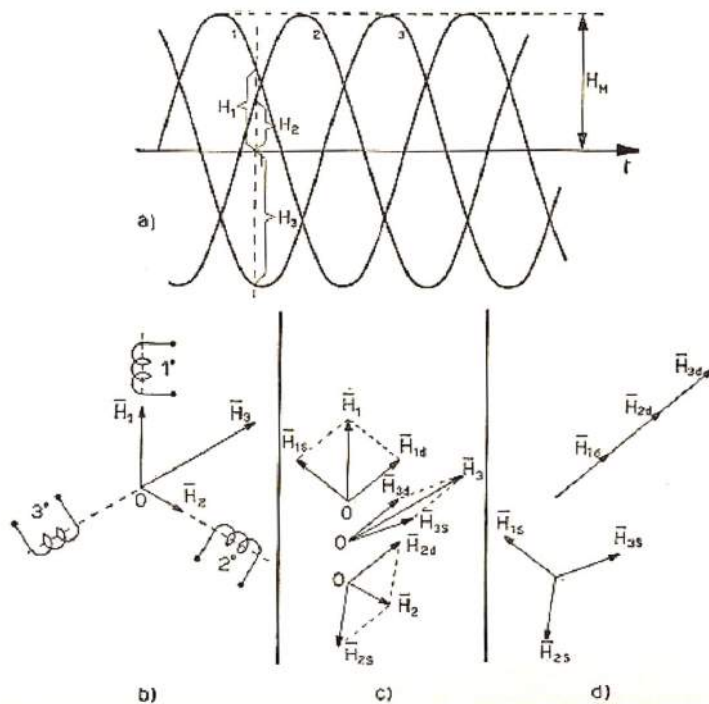


Fig. 8

Così, se la prima bobina genera lungo il suo asse nel punto centrale O (Fig.8.b), ad un certo istante t (Fig.8.a), ad esempio il vettore  $\mathbf{H}_1$  della seguente intensità:

$$H_1 = H_M \text{sen}(\omega t + \psi),$$

allora la seconda bobina, nello stesso punto e nello stesso istante, genererà un campo magnetico rappresentabile lungo l'asse di questa bobina con il vettore  $\mathbf{H}_2$  e la cui intensità risulta data da:

$$H_2 = H_M \text{sen}(\omega t + \psi - 120^\circ),$$

poiché è dovuta ad una corrente che ritarda sulla prima di un terzo di periodo; d'altra parte la terza bobina genererà nello stesso punto e nello stesso istante un campo magnetico il cui vettore  $\mathbf{H}_3$  presenta la seguente ampiezza:

$$H_3 = H_M \text{sen}(\omega t + \psi - 240^\circ)$$

ed ha per direzione l'asse di quest'ultima bobina.

Si deve quindi osservare che ciascuno dei tre vettori  $\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \mathbf{H}_3$  può essere scomposto, in base ai risultati del paragrafo precedente, in un vettore che ruota in senso orario ed uno in senso antiorario. Ciò appare in Fig.8.c. Poiché d'altronde il campo magnetico  $\mathbf{H}$  nel punto centrale O è determinato dall'azione simultanea dei tre avvolgimenti in quel punto, basterà procedere per la sua determinazione alla composizione vettoriale di tutte le componenti ruotanti in ogni senso, dovute ai tre vettori. Ora, poiché i tre vettori  $\mathbf{H}_{1s}, \mathbf{H}_{2s}, \mathbf{H}_{3s}$  hanno risultante nulla in quanto essi costituiscono, si veda la Fig.8d, una terna di vettori di eguale intensità ma sfasati fra loro di  $120^\circ$ , e poiché i tre vettori  $\mathbf{H}_{1d}, \mathbf{H}_{2d}, \mathbf{H}_{3d}$  risultano fra loro paralleli, questa composizione porta ad un unico vettore la cui ampiezza è tre volte quella della componente che ruota in senso orario.

Poiché quanto sopra esposto è stato dedotto per un istante generico t, si può affermare che in un altro qualsiasi istante la risultante dei tre vettori  $\mathbf{H}_{1s}, \mathbf{H}_{2s}, \mathbf{H}_{3s}$ , componenti che ruotano in senso antiorario dei campi magnetici generati dalle tre bobine, risulterà nulla per cui nello stesso istante il vettore  $\mathbf{H}$ , sarà dato dalla somma dei tre vettori  $\mathbf{H}_{1d}, \mathbf{H}_{2d}, \mathbf{H}_{3d}$ , che ruotano in senso orario.

Queste però risultano sempre fra loro parallele, per cui si ha in definitiva che:

$$H = 3H_d = \frac{3}{2} H_M$$

D'altronde la direzione del vettore  $\mathbf{H}$  si sposta nel piano nel verso negativo di  $\omega$ , quindi nel senso orario, perché questo è il verso con cui ruotano i vettori  $\mathbf{H}_a$ , e perché la direzione e il verso di  $\mathbf{H}$  coincidono con la direzione e il verso di  $\mathbf{H}_a$ .

I tre avvolgimenti generano dunque, se percorsi da correnti di eguale ampiezza e eguale frequenza, ma sfasate tra loro di  $1/3$  di periodo, un campo magnetico rotante d'intensità costante che vale  $3/2$  dell'intensità massima ( $H_M$ ) raggiunta dal campo magnetico prodotto da un singolo avvolgimento; il campo ruota d'altra parte con velocità angolare uniforme  $\omega = 2\pi f$  (poiché è per ipotesi costante la frequenza delle correnti di alimentazione) così che esso compie un giro completo per un periodo ( $T = 1/f$ ). D'altronde la direzione del vettore campo magnetico rotante si troverà a passare per l'asse di quella bobina nell'istante in cui la corrente circolante raggiunge il massimo valore poiché in questo istante particolare la direzione della componente che ruota in senso orario del campo da essa prodotto, coincide con l'asse della bobina. (Fig.6.c).

Si osservi ancora che il verso di rotazione del campo magnetico coincide con quello della successione dei ritardi di fase. Per invertire il senso di rotazione è quindi sufficiente invertire il senso ciclico delle fasi.

I campi magnetici rotanti trovano un'importante applicazione in certi tipi di motori elettrici, e il più diffuso è il motore ad induzione, o asincrono.

## 2.1 Il trasformatore

Nei circuiti a corrente continua la dissipazione di potenza in un carico resistivo è stabilita dall'equazione

$$P_R = i\Delta V_R = i^2 R.$$

Per una data necessità di potenza, si può scegliere tra una corrente  $i$  relativamente grande e una differenza di potenziale  $\Delta V_R$  relativamente piccola o viceversa, purché il loro prodotto rimanga quello desiderato. Nello stesso modo, per i circuiti AC puramente resistivi (nei quali il fattore di potenza,  $\cos\varphi$  è uguale a 1), la potenza media dissipata è data dall'equazione  $\bar{P} = i_{qm} f_{qm}$  e si ha la stessa possibilità di scelta riguardo ai valori di  $i_{qm}$  e di  $f_{qm}$ .

Nelle linee di trasporto dell'energia elettrica è auspicabile, sia per ragioni di sicurezza, sia per motivi di efficienza dell'apparato, avere tensioni relativamente basse sia all'estremo della linea dove viene generata l'energia (la centrale elettrica) sia all'estremo dove l'energia viene utilizzata (la casa, la fabbrica). D'altra parte, nelle linee di trasporto dell'energia elettrica dalla centrale al consumatore, sarebbe desiderabile avere la corrente più bassa possibile (e quindi la tensione più alta possibile) in modo da minimizzare la dissipazione di energia  $i^2 R$  lungo la linea. Sono quindi usate a questo scopo linee con valori di  $f_{qm}$  dell'ordine di 300-400 kV. Per questi motivi vi è un disaccordo fondamentale tra le necessità di una trasmissione efficiente da una parte e la sicurezza di manovra e d'impiego delle apparecchiature dall'altra. Per superare questo problema, occorre un dispositivo che possa abbassare (o elevare) la differenza di potenziale in un circuito mantenendo costante il prodotto  $i_{qm} f_{qm}$ . Un dispositivo di questo tipo è il trasformatore di tensione per corrente alternata schematizzato in Fig 9.

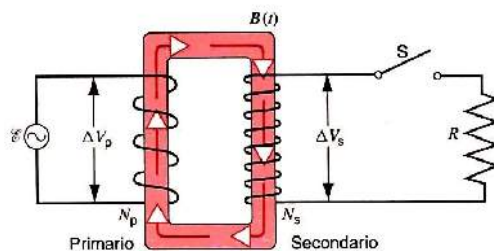


Fig 9

Dato che il suo funzionamento si fonda sulla legge di induzione di Faraday, il trasformatore non ha un analogo di equivalente semplicità tra i circuiti in corrente continua, motivo per cui i sistemi di distribuzione di energia elettrica in corrente continua, fortemente auspicati da Edison, oggi sono stati sostituiti quasi completamente da sistemi in corrente alternata, propugnati da Tesla e altri.

A questo proposito abbiamo tradotto l'articolo di J.W. Coltman, The Transformer, Scientific American gennaio 1988 nel quale viene ribadito che Edison e i suoi soci contrastarono il sistema a corrente alternata, sia nel campo pratico, che nella stampa, ma la loro fu solo una battaglia persa. Il motore polifase inventato da Nikola Tesla forniva un efficiente modo di utilizzare la corrente alternata, e l'invenzione di Shallenberger del Watt/ora metro, a corrente alternata rese possibile un accurato conteggio dei clienti per consumo di energia.

Queste due invenzioni, insieme con il basso costo del trasmettitore a corrente alternata, diedero al sistema a corrente alternata una flessibilità e una convenienza tali che presto relegarono i sistemi a corrente continua a poche e specifiche applicazioni.

I dieci anni successivi videro una rapida crescita dei sistemi a corrente alternata, sottolineata da sviluppi come l'illuminazione della fiera mondiale di Chicago del 1893 e l'installazione alle Cascate del Niagara di

enormi generatori idroelettrici a 500 cavalli di potenza, i primi due dei quali entrarono in servizio nel 1895. Insieme con la continua crescita della potenza elettrica generativa vennero grandi crescite nelle dimensioni dei trasformatori. Nel 1895 una fornace alla Carborundum Company, alle Cascate del Niagara, impiegò un trasformatore funzionante a 750 KVA (Kilo Volt Ampère, un'indicazione della capacità di potenza utilizzabile simile ai KiloWatt). Cinque anni dopo alcuni trasformatori furono fatti funzionare a 2000 KVA e operarono a 50000 V.

Si poteva far notare che i trasformatori costruiti all'inizio del secolo erano già un prodotto maturo: anche se le caratteristiche essenziali dello strumento rimangono immutate fino ad oggi, il trasformatore ha continuato ad evolversi. Anche se è ancora un raffreddato e isolato assemblaggio di fogli di ferro e spire di rame, lo sviluppo nel trasformatore dal 1900 è stato abbastanza notevole. I trasformatori moderni possono lavorare a 765 KV e usufruire di più di un milione di KVA, e possono avere tempi di durata da 25 a 40 anni.

Nella Fig 9 sono rappresentate due bobine avvolte attorno ad un nucleo di ferro. L'avvolgimento primario, di  $N_p$  spire, è collegato ad un generatore di corrente alternata la cui f.e.m. è data da  $f = f_m \sin(\omega t)$ . L'avvolgimento *secondario*, di  $N_s$  spire, si trova in un circuito aperto finché, come per ora si suppone, l'interruttore S rimane aperto. In questo modo nell'avvolgimento secondario non scorre alcuna corrente. Supponiamo inoltre di poter trascurare tutti gli elementi dissipativi, come le resistenze degli avvolgimenti primario e secondario. In effetti, trasformatori ad alte prestazioni, ben progettati, possono avere perdite dell'ordine dell'1%, sicché l'assunzione precedente di trasformatore ideale non è per essi irragionevole.

Per le condizioni precedenti l'avvolgimento primario è un'induttanza pura. La corrente primaria (molto piccola), detta *corrente di magnetizzazione*  $i_{mag}(t)$ , è sfasata di  $90^\circ$  in ritardo sulla differenza di potenziale primaria; il fattore di potenza ( $\cos\phi$  nell'equazione  $\bar{P} = i_{qm} f_{qm} \cos\phi$ ) è nullo, sicché il generatore non fornisce alcuna potenza al trasformatore.

Tuttavia, la piccola corrente primaria alternata,  $i_{mag}(t)$  induce un flusso magnetico alternato  $\Phi_B(t)$  nel nucleo di ferro e supponiamo che questo flusso sia interamente concatenato con le spire dell'avvolgimento secondario. (Supponiamo, cioè, che tutte le linee di forza del campo magnetico seguano dei percorsi chiusi all'interno del nucleo di ferro e che quindi nessuna esca nello spazio circostante). In base alla legge di induzione di Faraday, si deduce che la forza elettro motrice per spira  $f_s$  (uguale a  $-d\Phi_B/dt$ ) è uguale per l'avvolgimento primario e per il secondario, poiché il flusso primario e il flusso secondario sono uguali. In termini di quantità quadratiche medie si può scrivere

$$\left( \frac{d\phi_B}{dt} \right)_{prim} = \left( \frac{d\phi_B}{dt} \right)_{sec ond}$$

ossia

$$(f_s)_{qm,prim} = (f_s)_{qm,second}$$

In ogni avvolgimento la f.e.m. per spira è uguale alla differenza di potenziale totale divisa per il numero di spire dell'avvolgimento; l'ultima equazione si può allora scrivere:

$$\frac{\Delta V_p}{N_p} = \frac{\Delta V_s}{N_s}$$

Qui  $\Delta V_p$  e  $\Delta V_s$  si riferiscono a quantità quadratiche medie. Ricavando  $\Delta V_s$  si ottiene

$$\Delta V_s = \Delta V_p (N_s / N_p)$$

Se  $N_s > N_p$  (nel qual caso  $\Delta V_s > \Delta V_p$ ), si parla di un *trasformatore elevatore* di tensione; viceversa si parla di *trasformatore riduttore* di tensione.

In tutta la descrizione finora si è supposto che l'avvolgimento secondario sia aperto, di modo che non vi sia trasmissione di potenza attraverso il trasformatore. Se ora, azionando l'interruttore S di Fig 9 chiudiamo il circuito secondario, otteniamo una situazione più comune, in cui l'avvolgimento secondario è collegato a un carico resistivo R.

Nel caso più generale il carico contiene anche elementi induttivi e capacitivi, ma per il momento limitiamoci a considerare il caso particolare di un carico puramente resistivo.

Quando si chiude il circuito, si assiste a numerose conseguenze.

(1) Nel circuito secondario si instaura una corrente  $i_s$  con una corrispondente dissipazione di potenza  $i_s^2 R$  nel carico resistivo.

(2) La corrente alternata secondaria induce il suo flusso magnetico alternato nel nucleo di ferro e tale flusso induce (per la legge di Faraday e per la legge di Lenz) una f.e.m. di contrasto nel circuito primario.

(3)  $\Delta V_p$ , tuttavia, non può cambiare a causa di questa f.e.m., perché deve essere sempre uguale alle f.e.m. fornita dal generatore; chiudere il circuito secondario non può modificare questa condizione.

(4) Per soddisfare questa nuova condizione del circuito primario, la corrente  $i_p$  deve modificarsi e assumere modulo e fase tali da compensare esattamente la f.e.m. generata nel circuito primario da  $i_s$ .

Piuttosto che analizzare nei dettagli il processo ora descritto, che è piuttosto complicato, si può ricorrere a una visione globale ispirata al principio di conservazione dell'energia.

Per un trasformatore ideale con carico resistivo, il principio impone

$$i_P \Delta V_p = i_s \Delta V_s.$$

Poiché l'equazione  $\Delta V_s = \Delta V_p (N_s / N_p)$  vale indipendentemente dalla posizione dell'interruttore S di Fig 9, introducendola in quest'ultima equazione si ottiene

$$i_s = i_P (N_p / N_s)$$

che rappresenta la relazione di trasformazione delle correnti.

## 2.2 Oscillazioni

### 2.2.1 Oscillatore armonico semplice

Gli oscillatori armonici costituiscono un argomento di fondamentale importanza nello studio della meccanica: in primo luogo va osservato che vi sono numerosi sistemi fisicamente rilevanti che si comportano come un oscillatore armonico, o una sovrapposizione di più oscillatori armonici. Un banale esempio di questo dispositivo è quello formato da un corpo di massa  $m$ , sottoposto all'azione di una molla ideale, di costante  $k$ , libero di muoversi senza attrito su un piano orizzontale.

In secondo luogo, lo studio dell'equazione del moto armonico è di grande rilevanza perché in numerosi campi della fisica, vi sono problemi la cui analisi può essere ricondotta alla soluzione di un'equazione ottenuta facendo uso della seconda legge di Newton  $\sum F_x = ma_x$ : a  $\sum F_x$  va sostituito  $-kx$ , mentre all'accelerazione va sostituita la derivata seconda  $d^2x/dt^2$ . Si ha quindi:

$$-kx = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad \text{ovvero} \quad \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m} x = 0 \quad (1)$$

Questa equazione è detta *equazione del moto armonico semplice*; la sua soluzione è la funzione  $x(t)$ , che rappresenta la posizione occupata dalla particella all'istante  $t$ , definita dall'espressione:

$$x(t) = x_m \cos(\omega t + \varphi).$$

In essa la costante  $\omega$  è stata scelta in modo che  $\omega^2 = \frac{k}{m}$ , cioè in modo che si abbia un'identità. Tale costante rappresenta la cosiddetta pulsazione o frequenza angolare, e differisce dalla frequenza per il fattore  $2\pi$ .

Nella funzione  $x(t)$  le costanti  $x_m$  e  $\varphi$  sono ancora indeterminate, ovvero restano del tutto *arbitrarie*; ovvero comunque si scelgano queste costanti, la funzione  $x(t)$  è soluzione dell'equazione del moto armonico.

L'equazione (1) allora costituisce un'intera famiglia di possibili moti armonici, tutti caratterizzati dallo stesso valore di  $\omega$ , ma con parametri  $x_m$  e  $\varphi$  differenti. Per individuare un particolare moto armonico, ovvero per fissare  $x_m$  e  $\varphi$ , è necessario stabilire le condizioni iniziali, cioè è necessario scegliere la posizione e la velocità con cui inizia il moto. Tutti i moti descritti dall'equazione (1) hanno lo stesso periodo di oscillazione e tale periodo dipende solo dalla massa del corpo e dalla costante della molla, in particolare non dipende dalle condizioni iniziali del moto.

Il parametro  $x_m$  rappresenta l'ampiezza del moto; dal momento che  $x_m$  è arbitrario, l'oscillatore armonico può assumere moti con diversa ampiezza, ma tutti con lo stesso periodo e la stessa frequenza. *La frequenza di un moto armonico è indipendente dalla sua ampiezza.* La quantità  $\omega t + \varphi$  è detta fase del moto e la costante  $\varphi$  è detta *costante di fase*. L'ampiezza  $x_m$  e la costante di fase  $\varphi$  vengono determinati in modo univoco a partire dalla posizione e dalla velocità iniziale del corpo. Quindi, a partire dall'istante iniziale, se non entrano in gioco ulteriori forze, il corpo compirà le sue oscillazioni con ampiezza, costante di fase e frequenza immutati.

### 2.2.2 Oscillatore armonico smorzato

Le considerazioni fatte finora fanno riferimento ad un moto armonico ideale, che avviene in assenza di attrito; tuttavia, quando questi fenomeni vengono osservati nella realtà l'ipotesi della totale assenza di forze

dissipative non è da tenere in considerazione, anche se in alcune situazioni ci si può avvicinare con ottima approssimazione. L'effetto di queste resistenze (l'attrito, la resistenza dell'aria o le forze interne al sistema) consiste in una diminuzione dell'ampiezza delle oscillazioni, fenomeno noto come attenuazione o smorzamento delle oscillazioni; il moto armonico in presenza di attenuazione è detto quindi moto armonico smorzato.

Dal punto di vista matematico, il fenomeno delle oscillazioni smorzate può essere spiegato mediante la legge di Newton, facendo riferimento ad una forma particolare della forza dissipativa. Questa può essere definita come  $F_x = -bv_{x_s}$ , nella quale compare il coefficiente  $b$  definito come costante di smorzamento. La forza totale agente sul sistema sarà quindi  $F_x = -kx - bv_{x_s}$ , esprimibile anche con l'equazione

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = 0,$$

la cui soluzione è la funzione  $x(t) = x_m e^{-b/(2m)t} \cos(\omega' t + \varphi)$ , nella quale  $x_m$  e  $\varphi$  sono due costanti arbitrarie, e che permette di ricavare la pulsazione  $\omega'$ , del movimento "contrastante" della forza dissipativa:

$$\omega' = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{b}{2m}\right)^2}.$$

(naturalmente la soluzione dell'equazione differenziale è corretta solo sotto l'ipotesi che il coefficiente di smorzamento sia piccolo abbastanza da rendere positiva la quantità sotto radice).

Inoltre, tale definizione di  $\omega'$  dimostra come al crescere del coefficiente di smorzamento  $b$  l'ampiezza delle oscillazioni decresce più rapidamente; quando  $b$  tende a zero, invece, la costante temporale di dimezzamento diverge e l'ampiezza resta costante. In presenza di smorzamento la frequenza delle oscillazioni è più piccola e quindi il periodo è più grande.

### 2.2.3 Oscillazioni forzate e risonanza

Un altro caso molto interessante è quello di un oscillatore armonico che subisce l'effetto di una forza esterna periodica di tipo sinusoidale. Le oscillazioni indotte da questo tipo di perturbazione sono dette oscillazioni forzate e sono molto diffuse in molti campi della fisica come l'acustica, l'elettromagnetismo e la fisica atomica. L'effetto sull'ampiezza di tali oscillazioni dipende fortemente dalla relazione che esiste tra la frequenza della perturbazione forzante e la frequenza naturale del sistema (oscillatore). Se la perturbazione forzante ha la "giusta" frequenza, anche una successione di piccoli impulsi può produrre oscillazioni di ampiezza enorme.

Considerando per esempio un oscillatore smorzato, la cui pulsazione è  $\omega$ , l'oscillazione forzata viene prodotta da una forza esterna sinusoidale definita dalla funzione  $F_x(t) = F_m \sin(\omega'' t)$ , forza di ampiezza costante  $F_m$  e pulsazione  $\omega''$ . I primi istanti del moto sono dominati da un regime transitorio nel quale compaiono oscillazioni smorzate, periodo dopo il quale si realizzerà una *situazione stazionaria* in cui l'effetto dominante sarà quello dovuto alla perturbazione forzante. A questo punto l'ampiezza delle oscillazioni forzate sarà tanto maggiore quanto minore sarà la differenza tra la pulsazione forzante  $\omega''$  e la pulsazione  $\omega$ , propria del sistema. Nel caso di smorzamento debole, il massimo valore dell'ampiezza delle oscillazioni forzate si raggiunge quando la frequenza forzante è uguale a quella naturale del sistema;

$\omega'' = \omega$  questa condizione è nota come *condizione di risonanza* e il corrispondente valore della pulsazione  $\omega''$  è detto *pulsazione risonante*.

In certi contesti particolari vengono adottate definizioni diverse per il concetto di risonanza; frequenza alla quale *viene trasmessa la massima potenza al sistema oscillante*, oppure frequenza alla quale è *massima la velocità dell'oscillatore*. Queste definizioni in generale *non sono equivalenti*. Nel prossimo paragrafo parleremo della risonanza nei circuiti elettrici che di solito viene definita in termini dell'ampiezza della corrente e vedremo che questa definizione è simile a quella data in termini della velocità per i sistemi meccanici.

Nello *stato stazionario* il sistema oscilla alla frequenza del sistema forzante con ampiezza costante; ciò avviene in presenza di smorzamento, quindi una situazione in cui le forze dissipative dovrebbero indurre una diminuzione dell'ampiezza delle oscillazioni. In realtà l'ampiezza resta costante perché è *la sollecitazione esterna forzante che fornisce l'energia necessaria per compensare la perdita dovuta alle forze dissipative*.

**Nello stato stazionario la perturbazione forzante cede energia al sistema esattamente con la stessa potenza alla quale le forze dissipative la consumano;** nel complesso l'oscillatore allo stato stazionario si limita a trasferire energia dalla sorgente forzante al mezzo smorzante che lo circonda, mantenendo costante l'energia immagazzinata nel suo moto.

L'ampiezza delle oscillazioni forzate stazionarie varia in funzione della frequenza forzante e come si può osservare in Fig. 10 per piccoli valori del coefficiente di smorzamento l'ampiezza stazionaria cresce rapidamente con l'avvicinarsi di  $\omega''$  alla pulsazione naturale  $\omega$  e raggiunge il suo valore massimo proprio in condizione di risonanza. Per valori più alti del coefficiente di smorzamento, la crescita dell'ampiezza con l'avvicinarsi di  $\omega''$  alla frequenza naturale è più contenuta; per valori molto alti del coefficiente di

smorzamento, la crescita è ancora più debole e la frequenza di risonanza risulta addirittura diversa dalla frequenza propria del sistema. Tutti i sistemi meccanici (ad es. i palazzi o i ponti) hanno una specifica frequenza naturale di oscillazione o anche più di una frequenza e se tali strutture vengono sottoposte all'azione di perturbazioni risonanti, gli effetti possono essere disastrosi.

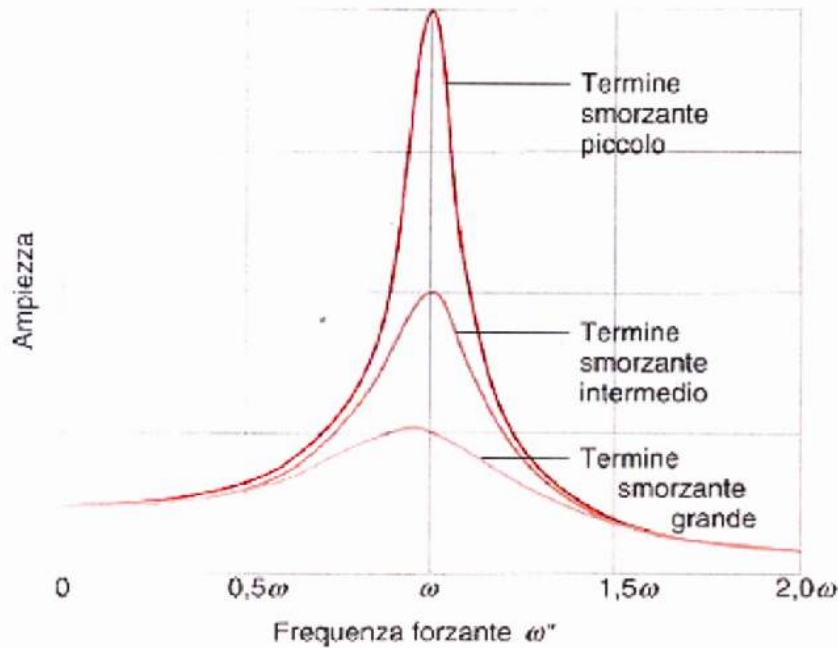


Fig. 10 Ampiezza di un oscillatore forzato in funzione della frequenza forzante  $\omega'$ . Il profilo di risonanza più netto viene osservato in corrispondenza del valore più piccolo dello smorzamento.

#### 2.2.4 Oscillazioni elettromagnetiche

Un circuito che contiene sia un condensatore C che un induttore L, costituisce un *oscillatore elettromagnetico*, in cui la corrente varia sinusoidalmente nel tempo. Vi sono molte analogie tra gli oscillatori elettromagnetici e quelli meccanici; queste analogie ci aiutano a capire gli oscillatori elettromagnetici basandoci sul precedente studio degli oscillatori meccanici.

Supponiamo che il circuito abbia resistenza nulla e che non vi siano generatori di f.e.m.

L'energia presente nel circuito viene dall'energia inizialmente immagazzinata in uno o in entrambi i componenti. Si supponga che il condensatore C sia dotato (per opera di qualche sorgente esterna) di una carica  $q_m$ , che venga scollegato dalla sorgente esterna e collegato all'induttore L.

Il circuito LC è illustrato nella Fig. 11. Inizialmente l'energia  $U_E$  immagazzinata nel condensatore è

$$U_E = \frac{1}{2} \frac{q_m^2}{C}$$

mentre l'energia  $U_B = \frac{1}{2} Li^2$  immagazzinata nell'induttore è inizialmente nulla, dato che la corrente è nulla.

Il condensatore ora, inizia a scaricarsi attraverso l'induttore, con i portatori di carica positiva che si muovono in senso antiorario, come mostra la Fig. 11. Attraverso l'induttore ora scorre una corrente  $i = \frac{dq}{dt}$  e l'induttore

comincia ad immagazzinare energia.

Contemporaneamente il processo di scarica del condensatore riduce l'energia in esso accumulata. Se il circuito ha resistenza nulla, non si dissipa energia e la diminuzione di energia nel condensatore viene compensata esattamente dall'aumento di energia nell'induttore, di modo che l'energia totale rimane costante. In effetti il campo elettrico diminuisce e il campo magnetico aumenta, trasferendosi energia dall'uno all'altro. All'istante corrispondente alla Fig. 11(c), il condensatore è completamente scarico e l'energia in esso immagazzinata è nulla. La corrente nell'induttore ha raggiunto il suo valore massimo e tutta l'energia del circuito è immagazzinata nel campo magnetico dell'induttore. Si noti che, anche se in questo

istante  $q = 0$ ,  $\frac{dq}{dt}$  è diverso da zero poiché la carica è in moto.



La corrente nell'induttore continua a trasportare carica dal piatto superiore al piatto inferiore del condensatore, come in Fig. 11(d), l'energia sta ora ripassando dall'induttore al condensatore a mano a mano che il suo campo elettrico si riforma. Ad un certo punto(Fig 11(e)) tutta l'energia è trasferita nuovamente al condensatore, che ora è completamente carico, ma con segno opposto a quello di Fig. 11(a). Il processo prosegue con il condensatore che si scarica finchè tutta l'energia non è tornata all'induttore, rendendo massimi il campo magnetico e l'energia in esso immagazzinata (Fig. 11(g)).

Infine, la corrente nell'induttore carica ancora una volta il condensatore fino a che esso non è completamente carico e il circuito è tornato nelle condizioni iniziali (Fig. 11(a)).

Il processo ricomincia e il ciclo si ripete all'infinito. Mancando una resistenza, che dissiperebbe l'energia, la carica e la corrente raggiungono lo stesso loro valore massimo ad ogni ciclo.

Le oscillazioni del circuito LC avvengono a una certa frequenza  $\nu$  (misurata in Hz) corrispondente a una pulsazione  $\omega$  è determinata da L e da C. Scegliendo opportunamente L e C, si possono costruire circuiti oscillanti con frequenze che vanno dagli infrasuoni (<20Hz) alle microonde ed oltre (10GHz).

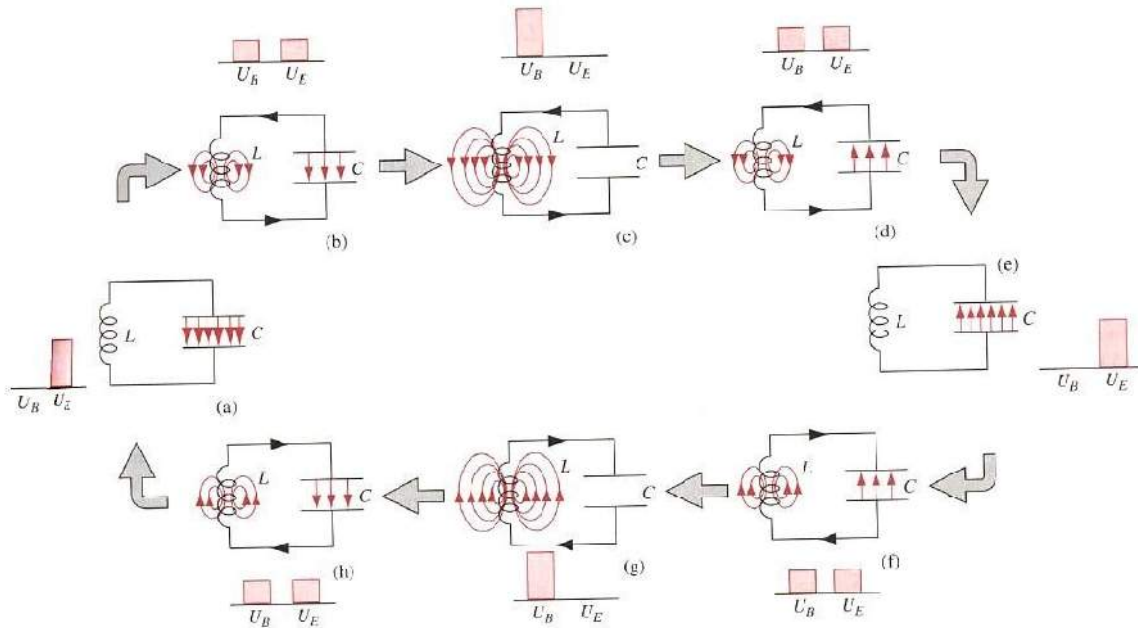


Fig.11. Otto stadi di oscillazione per un circuito LC privo di resistenza.

Osserviamo che in un sistema oscillante blocco-molla, come in un circuito LC, compaiono due tipi di energia. Una è l'energia potenziale della molla compressa o estesa; l'altra è l'energia cinetica della massa in movimento. La tabella

Meccanico		Elettromagnetico	
Molla	$U_m = \frac{1}{2} kx^2$	Condensatore	$U_E = \frac{1}{2} C^{-1} q^2$
Blocco	$K = \frac{1}{2} mv^2$	Induttore	$U_B = \frac{1}{2} Li^2$
	$v = \frac{dx}{dt}$		$i = \frac{dq}{dt}$

Suggerisce l'analogia con un condensatore, che in qualche modo si comporta come la molla, e un induttore, che si comporta come un corpo dotato di massa (il blocco attaccato alla molla); inoltre vi è corrispondenza tra le grandezze elettromagnetiche e le grandezze meccaniche, precisamente

$$q \text{ corrisponde a } x \qquad i \text{ corrisponde a } v$$

$$1/C \text{ corrisponde a } k \qquad L \text{ corrisponde a } m.$$

Notiamo inoltre che in entrambi i casi l'energia si alterna tra le due forme, magnetica-elettrica per il sistema LC e cinetica-potenziale per il sistema blocco molla.

Abbiamo visto che la pulsazione naturale di un oscillatore meccanico è  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ , e in base alla

corrispondenza tra i due sistemi si intuisce che  $\omega$  è esprimibile come  $\sqrt{\frac{1}{LC}}$ .



Ricaviamo ora l'espressione della frequenza di oscillazione di un circuito LC (privo di resistenza) partendo dal principio di conservazione dell'energia. L'energia totale  $U$  presente in qualunque istante in un circuito oscillante LC è data da

$$U = U_B + U_E = \frac{1}{2} Li^2 + \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} \quad (1')$$

da cui si evince che in un istante arbitrario l'energia è in parte immagazzinata in parte nel campo magnetico dell'induttore e in parte nel campo elettrico del condensatore. Se si suppone che la resistenza del circuito sia nulla, non si dissipa energia e  $U$  rimane costante nel tempo, anche se  $i$  e  $q$  variano.

In un altre parole,  $dU/dt$  deve essere nullo. Da questa considerazione si ottiene

$$\frac{dU}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} Li^2 + \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} \right) = Li \frac{di}{dt} + \frac{q}{C} \frac{dq}{dt} = 0 \quad (2)$$

Indichiamo con  $q$  la carica su un certo piatto del condensatore (per esempio il piatto superiore di Fig 11) e con  $i$  la derivata temporale di tale carica (in modo che sia  $i > 0$  quando si accumula carica positiva su quel piatto). In tal caso

$$i = \frac{dq}{dt} \quad \text{e} \quad \frac{di}{dt} = \frac{d^2q}{dt^2} \quad \text{e sostituendo nell'equazione (2), si ha: } \frac{d^2q}{dt^2} + \frac{q}{LC} = 0 \quad (3).$$

L'equazione (3) descrive le oscillazioni di un circuito LC (privo di resistenza). Per risolverla, si noti la

somiglianza con l'equazione (1):  $\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{kx}{m} = 0$

che descrive le oscillazioni meccaniche di una particella fissata a una molla. Fondamentalmente è dal confronto di queste due equazioni che nascono le corrispondenze evidenziate nelle relazioni 36.25.

La soluzione dell'equazione (1), è

$$x = x_m \cos(\omega t + \varphi)$$

Dove  $x_m$  è l'ampiezza del moto e  $\varphi$  è una costante di fase arbitraria. Poiché  $q$  corrisponde a  $x$ , si può scrivere la soluzione dell'equazione (3) nel seguente modo:

$$q = q_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

dove  $\omega$  è la pulsazione ancora incognita delle oscillazioni elettromagnetiche.

Si può controllare se l'equazione (4) sia veramente una soluzione dell'equazione (3) sostituendola assieme alla sua derivata seconda in tale equazione. Per determinare la derivata seconda, si scrive

$$\frac{dq}{dt} = i = -\omega q_m \sin(\omega t + \varphi) \quad \text{e poi} \quad \frac{d^2q}{dt^2} = -\omega^2 q_m \cos(\omega t + \varphi)$$

Sostituendo  $q$  e  $\frac{d^2q}{dt^2}$  nell'equazione (3) si ottiene:  $-\omega^2 q_m \cos(\omega t + \varphi) + \frac{q_m}{LC} \cos(\omega t + \varphi) = 0$

Eliminando  $q_m \cos(\omega t + \varphi)$  e risolvendo rispetto a  $\omega$  si ricava:  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5)$

Così, se a  $\omega$  si assegna il valore  $\frac{1}{\sqrt{LC}}$ , l'equazione (4) è una soluzione dell'equazione (3) a cui si era

arrivati in base alla corrispondenza tra oscillazioni meccaniche ed elettromagnetiche.

La costante di fase  $\varphi$  che compare nell'equazione (4) è determinata dalle condizioni all'istante iniziale  $t = 0$ .

L'energia elettrica immagazzinata nel circuito LC è:  $U_E = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} = \frac{q_m^2}{2C} \cos^2(\omega t + \varphi)$

e l'energia magnetica è:  $U_B = \frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} L\omega^2 q_m^2 \sin^2(\omega t + \varphi).$

Sostituendo in quest'ultima equazione l'espressione (5), si ottiene

$$U_B = \frac{q_m^2}{2C} \sin^2(\omega t + \varphi).$$

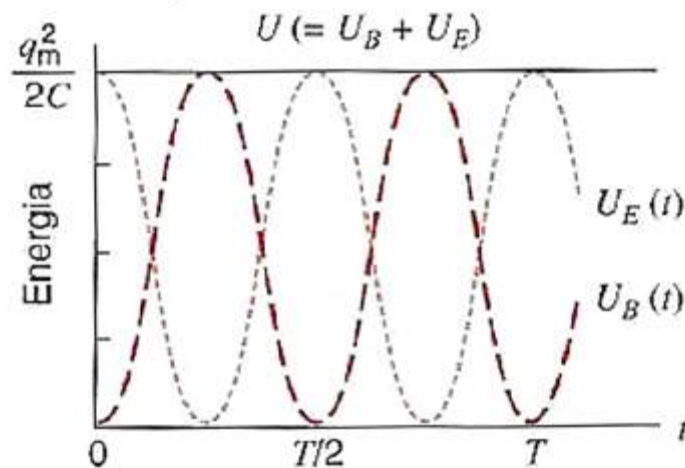


Fig 12

Nella Fig 12 sono riportati gli andamenti di  $U_E(t)$  e di  $U_B(t)$  nel caso di  $\varphi = 0$ . Si noti che:

- il valore massimo di  $U_E$  ed il valore massimo di  $U_B$  sono uguali  $\frac{q_m^2}{2C}$ ;
- la somma di  $U_E$  e di  $U_B$  è una costante  $\frac{q_m^2}{2C}$ ;
- quando  $U_E$  raggiunge il suo massimo valore  $U_B$  è nulla e viceversa;
- $U_B$  e  $U_E$  raggiungono il loro valore massimo due volte durante ogni ciclo.

### 2.2.5 Oscillazioni smorzate e forzate

In un circuito LC reale è sempre presente una resistenza  $R$  non nulla. Quando si tiene conto di questa resistenza, si trova che l'energia elettromagnetica totale  $U$  non è costante, dato che essa viene dissipata come energia interna nel resistore. Si potrà quindi analizzare l'analogia con l'oscillatore smorzato massa-molla.

Ricordiamo la relazione (1')

$$U = U_B + U_E = \frac{1}{2} L i^2 + \frac{q^2}{2C}$$

L'energia  $U$  non è più costante, ma soddisfa la relazione

$$\frac{dU}{dt} = -i^2 R \quad (6)$$

in cui il segno meno significa che l'energia immagazzinata  $U$  diminuisce al passare del tempo, essendo convertita in energia interna nel resistore con potenza  $i^2 R$ . Derivando rispetto al tempo l'equazione (1') e

combinando il risultato con l'equazione (6), si ottiene:  $-i^2 R = L i \frac{di}{dt} + \frac{q}{C} \frac{dq}{dt}$ .

Sostituendo  $\frac{dq}{dt}$  al posto di  $i$ ,  $\frac{d^2 q}{dt^2}$ , al posto di  $\frac{di}{dt}$  e dividendo per  $i$ , si ottiene

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0 \quad (7)$$

che descrive le oscillazioni LC smorzate. Ponendo  $R = 0$ , l'equazione (3) si riduce, come deve, all'equazione che descrive le oscillazioni LC non smorzate.

La soluzione generale dell'equazione (7) si può scrivere nella forma

$$\text{in cui } \omega' = \sqrt{\omega^2 - [R/(2L)]^2} \quad (8)$$

Si nota ancora una volta l'analogia espressa dalle relazioni tra grandezze elettromagnetiche e grandezze meccaniche

Confrontando la (8) con l'equazione  $\omega' = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{b}{2m}\right)^2}$ , si vede che la resistenza  $R$  corrisponde alla

costante di smorzamento  $b$  dell'oscillatore meccanico smorzato.

A questo punto consideriamo un circuito LC smorzato contenente una resistenza  $R$ .

Si supponga ora di alimentare il circuito con la f.e.m. dipendente dal tempo, data da:  $f = f_m \cos(\omega''t)$ , impiegando un generatore esterno. In questa situazione  $\omega''$ , che può essere variata a piacere, è la pulsazione della sorgente esterna. Oscillazioni di questo tipo sono dette oscillazioni *forzate*. Quando si applica la f.e.m. inizialmente nel circuito compaiono correnti transitorie dipendenti dal tempo. Una volta passato questo periodo iniziale e scemate le correnti transienti, si osserva che qualunque sia la frequenza naturale del circuito, queste oscillazioni della carica, della corrente o della differenza di potenziale nel circuito devono avvenire alla pulsazione  $\omega''$  imposta dall'alimentatore esterno. In base al confronto tra un sistema elettromagnetico oscillante e un sistema meccanico corrispondente, è ragionevole supporre che  $i_m$  sia elevata quando la frequenza di alimentazione data da  $\omega''$  è vicina alla frequenza naturale del sistema data da  $\omega$ . In altre parole ci si aspetta che, in un grafico ove venga rappresentata  $i_m$  in funzione di  $\omega''$ , si abbia un

massimo per  $\omega'' = \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , che viene detta condizione di *risonanza*.

Nella Fig. 13 sono riportati tre grafici di  $i_m$  in funzione di  $\omega''/\omega$  corrispondenti ciascuno ad un valore diverso della resistenza  $R$ . Si nota che ciascuna di queste curve presenta un massimo quando è soddisfatta la condizione di risonanza. La Fig. 13 è simile alla Fig. 10. Si noti che le curve della Fig. 13 e della Fig. 10 non sono esattamente corrispondenti. La prima rappresenta l'andamento dell'ampiezza della corrente, mentre la seconda rappresenta l'andamento dell'ampiezza dello spostamento. La grandezza meccanica che corrisponde alla corrente non è lo spostamento bensì la velocità. Ciononostante, entrambi gli insiemi di curve illustrano il fenomeno della risonanza.

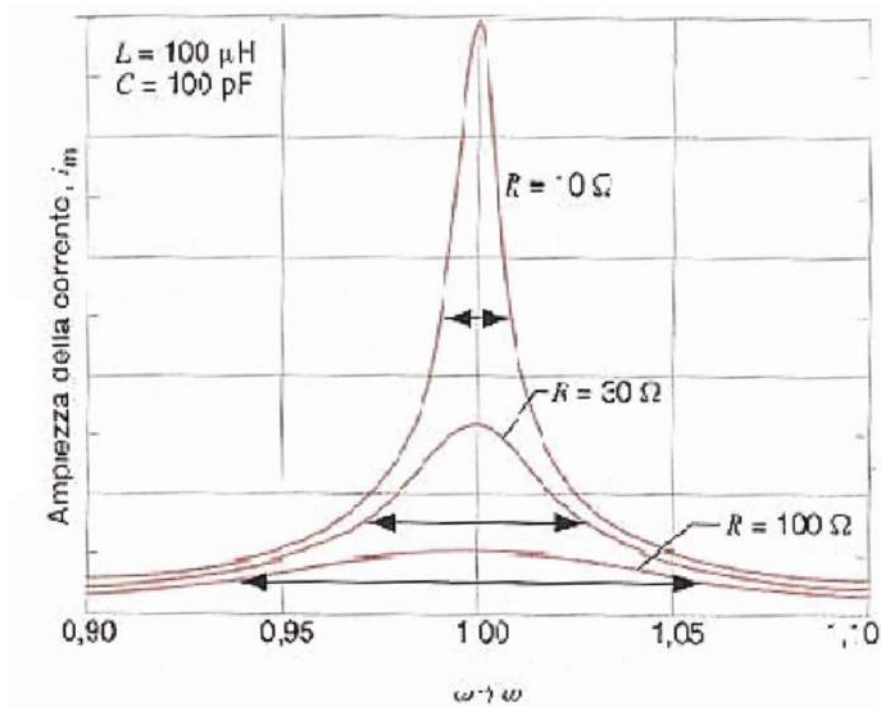


Fig.13 Curve di risonanza per un circuito oscillante forzato. Le tre curve corrispondono a differenti valori della resistenza del circuito. Le frecce orizzontali indicano la "larghezza a metà altezza" di ciascun picco di risonanza, un indice di quanto i picchi siano netti.

Allegato 2

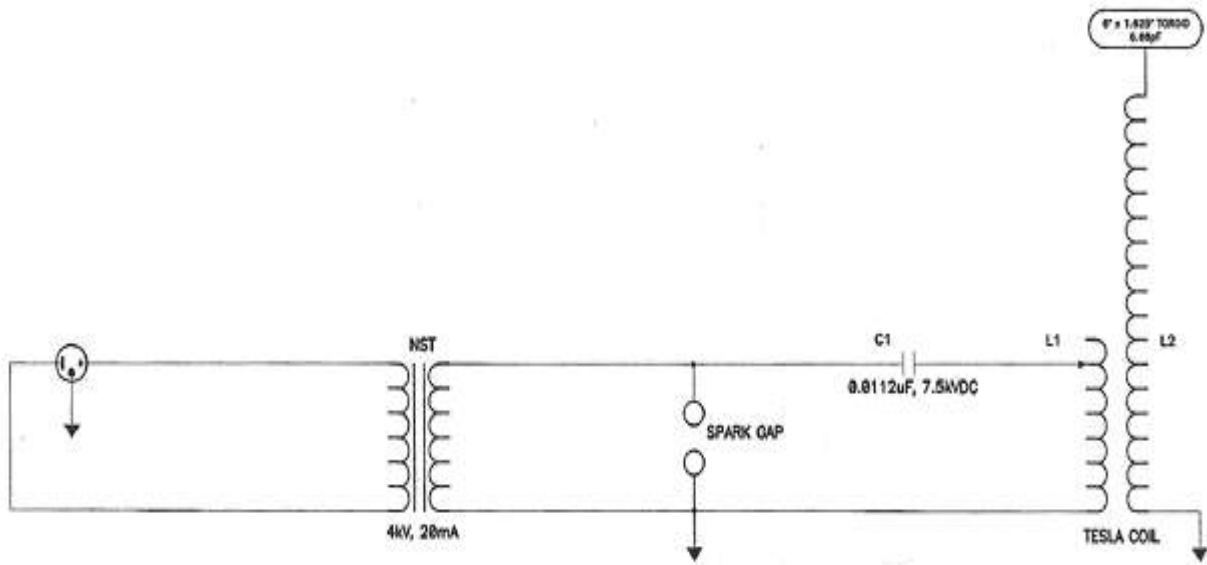


Fig. 2.1: schema circuito OLD TESLA

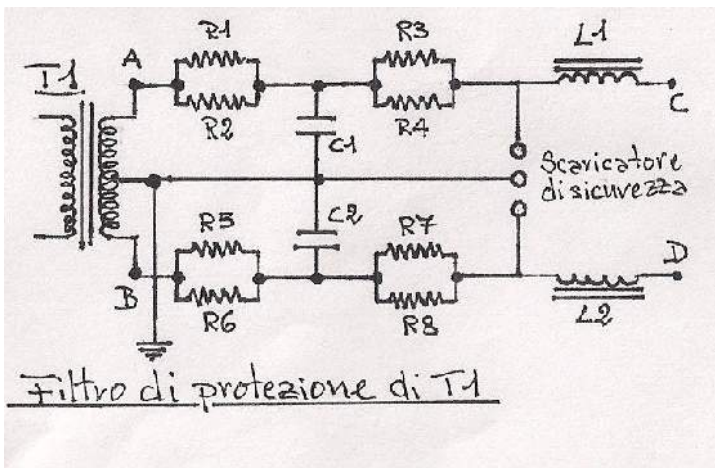


Fig 2.2

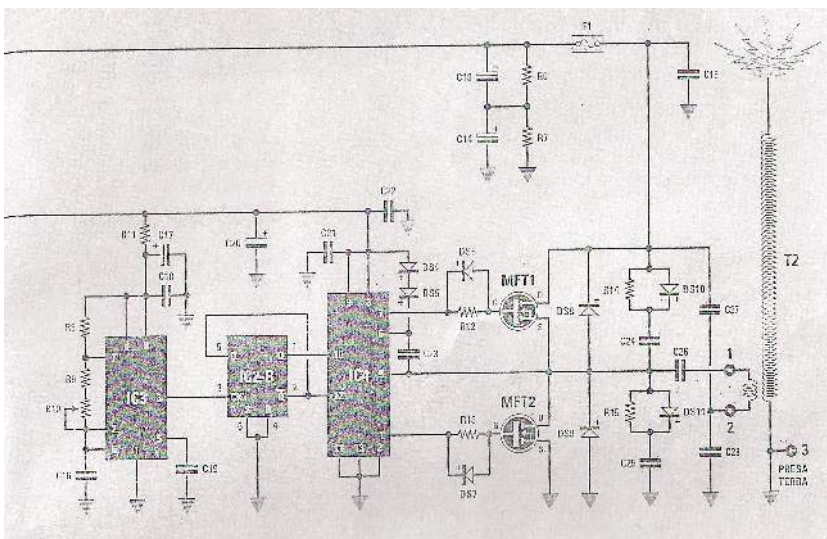


Fig 2.3: schema circuito NEW TESLA

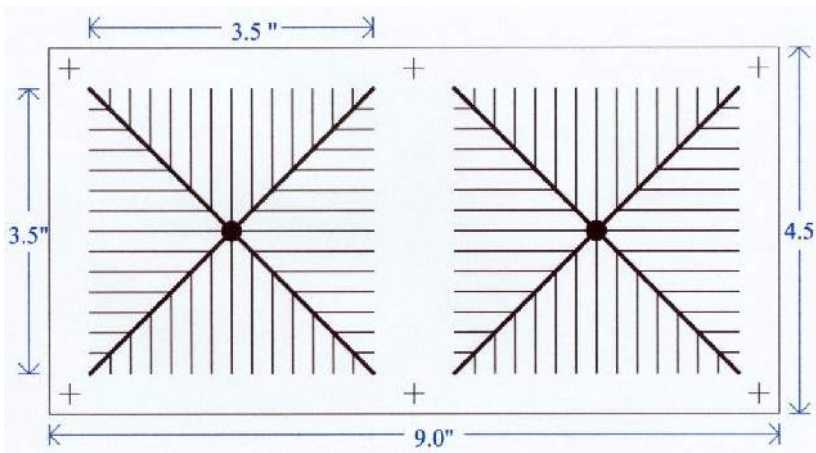


Fig 2.4: antenna

## OLD TESLA

### MISURE DI TENSIONE AI CAPI DELLA RESISTENZA DELL'ANTENNA

POTENZA FORNITA

$V_{\text{eff}}$ (V)	$I_{\text{eff}}$ (A)	$P_{\text{eff}} \cos \phi$ (KW)
244,4	0,90	0,106

<b>distanza d (m)</b>	2,00	3,00	4,00	6,00	8,00
<b><math>\Delta d</math> (m)</b>	0,02	0,03	0,02	0,04	0,03
<b>distanza <math>d^2</math> (m<sup>2</sup>)</b>	4,00	9,00	16,0	36,0	64,0
<b><math>\Delta d^2</math> (m<sup>2</sup>)</b>	0,08	0,18	0,16	0,48	0,48
<b>tensione: valore picco-picco <math>V_{\text{pp}}</math> (mV)</b>	370	302	244	102	149
<b><math>\Delta V_{\text{pp}}</math> (mV)</b>	10	13	2	7	9
<b>tensione efficace <math>V_{\text{eff}}</math> (mV)</b>	131	107	86,3	36,1	52,7
<b><math>\Delta V_{\text{eff}}</math> (mV)</b>	4	5	0,7	2,5	3,2
<b>resistenza R (<math>\Omega</math>)</b>	50	50	50	50	50
<b><math>\Delta R</math> (<math>\Omega</math>)</b>	3	3	3	3	3
<b>potenza ricevuta: <math>P_{\text{eff}} = V_{\text{eff}}^2 / R</math> (<math>\mu\text{W}</math>)</b>	343	229	149	26	55
<b><math>\Delta P_{\text{eff}}</math> (<math>\mu\text{W}</math>)</b>	41	34	11	5	10

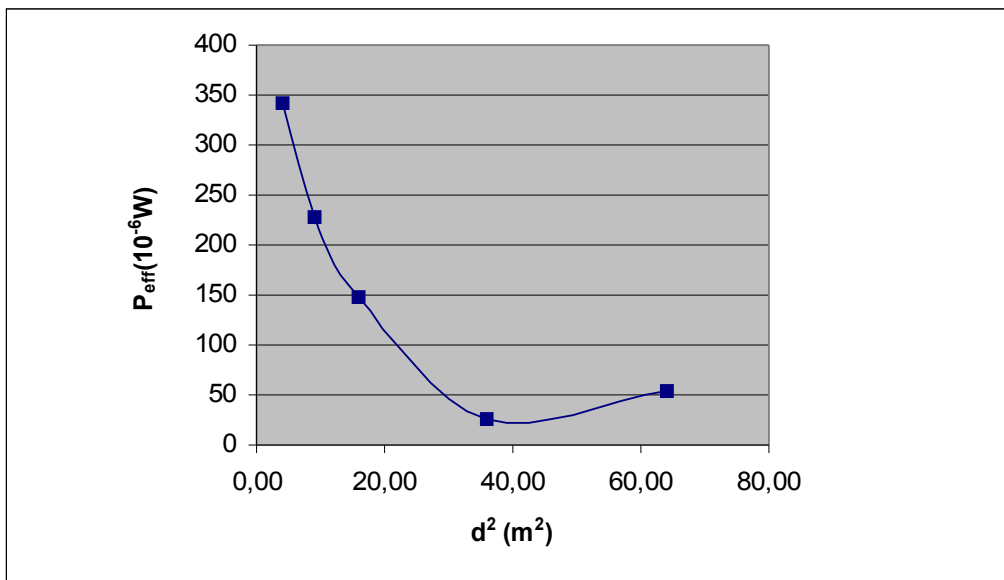


Fig. 2.5: Misure potenza OLD TESLA

## NEW TESLA

### MISURE DI TENSIONE AI CAPI DELLA RESISTENZA DELL'ANTENNA

POTENZA FORNITA

$V_{eff}$ (V)	$I_{eff}$ (A)	$P_{eff} \cos \phi$ (KW)
239,3	1,82	0,313

<b>distanza d (m)</b>	2,00	4,00	6,00	8,00
<b><math>\Delta d</math> (m)</b>	0,03	0,02	0,04	0,03
<b>distanza <math>d^2</math> (m<sup>2</sup>)</b>	4,00	16,0	36,0	64,0
<b><math>\Delta d^2</math> (m<sup>2</sup>)</b>	0,12	0,16	0,48	0,48
<b>tensione: valore picco-picco <math>V_{pp}</math> (mV)</b>	48,8	28,2	22,0	12,0
<b><math>\Delta V_{pp}</math> (mV)</b>	2,9	1,2	3,4	1,3
<b>tensione efficace <math>V_{eff}</math> (mV)</b>	17,3	9,97	7,78	4,24
<b><math>\Delta V_{eff}</math> (mV)</b>	1,0	0,4	1,2	0,5
<b>resistenza R (<math>\Omega</math>)</b>	50	50	50	50
<b><math>\Delta R</math> (<math>\Omega</math>)</b>	3	3	3	3
<b>potenza ricevuta: <math>P_{eff} = V_{eff}^2 / R</math> (<math>\mu W</math>)</b>	5,99	1,99	1,21	0,36
<b><math>\Delta P_{eff}</math> (<math>\mu W</math>)</b>	1,07	0,29	0,45	0,10

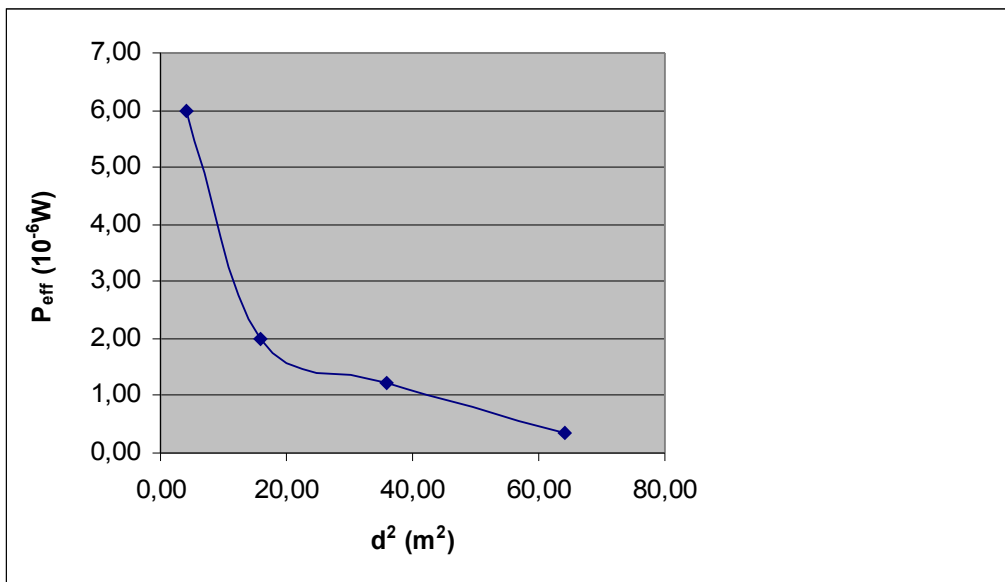


Fig. 2.6: Misure potenza NEW TESLA

## Allegato 3

### 1. Biografia di Nikola Tesla

Il progresso dell'umanità: celebrato e teorizzato da numerosi filosofi nel corso dei secoli, ma nessuno di questi si è mai interessato ad ottenere risultati concreti. Il progresso non si può raggiungere per inerzia, apaticamente, senza apportare cambiamenti oggettivi al mondo sensibile. Ai filosofi la teoria e l'etica, agli scienziati il più grande compito: inventare. Plasmare a proprio piacimento la realtà materiale, cioè applicare nel modo più produttivo le facoltà creative del cervello umano. Nikola Tesla la pensava così: "Lo scopo ultimo di queste facoltà è il dominio completo della mente sul mondo materiale, il compimento della possibilità di incanalare le forze della natura così da soddisfare le esigenze umane".

Nato nel villaggio di Smiljan, al confine tra Croazia e Serbia durante un violentissimo temporale notturno del luglio 1856, Tesla trascorse l'infanzia in campagna a stretto contatto con la natura. Già nei primi anni di vita la sua mente venne conquistata da immagini talmente vivide che talvolta lo rendevano incapace di distinguere se ciò che vedeva fosse reale o meno. Negli anni dell'adolescenza, Tesla trasformò le sue "visioni" in un metodo innovativo ed unico, in un'eccezionale capacità progettuale immaginativa: "Non avevo bisogno di nessun modello, disegno o esperimenti. Io potevo dipingerli tutti come reali nella mia mente". Si trattava quindi di una fervida immaginazione tecnica, che gli permetteva di visualizzare mentalmente e in maniera chiarissima un problema, passando immediatamente alla sua soluzione, senza alcun bisogno di pianificazioni scritte o calcoli preliminari. La sua mente realizzava progetti già completi, definiti e funzionanti: la realizzazione pratica era poi soltanto un particolare.

Si diplomò in soli tre anni nella scuola superiore di Karlovac sviluppando interessi poliedrici, non esclusivamente per le scienze matematiche, ma anche per materie umanistiche come la filosofia, la poesia e le lingue straniere. Conosceva infatti alla perfezione ben sette idiomi: il ceco, l'inglese, il francese, il tedesco, l'ungherese, l'italiano e il latino. Decise poi di intraprendere gli studi universitari in fisica e matematica (1875) al Politecnico Joanneum di Graz, in Austria, l'odierna *Technische Universität Graz*, dove, studiando fino a venti ore al giorno, riuscì a laurearsi in tempi brevi in Ingegneria con indirizzo elettrico e meccanico. In seguito il padre Milutin, ministro della chiesa ortodossa nella città natale, lo persuase ad iscriversi al *Dipartimento Charles-Ferdinand dell'Università di Praga*, ma a causa della morte del genitore non ebbe una bastevole disponibilità economica per proseguire gli studi. Quindi si trasferì a Budapest nel 1881, trovando impiego alla *Central Telegraph Office*, compagnia telefonica americana. In questo periodo Tesla visualizzò il principio del "campo magnetico rotante" (intuito già in precedenza mentre studiava il meccanismo della dinamo tradizionale) e incominciò a sviluppare dei progetti per un "motore ad induzione", che solo nell'anno successivo venne concretizzato, durante l'esperienza lavorativa alla *Continental Edison Company* di Parigi. Sempre nel 1882 incrementò diversi dispositivi che si basavano sull'impiego di campi magnetici rotanti che comportavano l'uso di corrente elettrica alternata, per i quali ottenne in seguito numerosi brevetti. Si vedevano ormai i tangibili presupposti per una più che promettente carriera in ambito scientifico, quando fu costretto a precipitarsi in Jugoslavia, al capezzale della madre morente, arrivando solo poche ore dopo la sua dipartita. Il forte legame che li univa influì sulla malattia nevrotica di cui si ammalò e da cui cercò di guarire in due o tre settimane di convalescenza presso la sua casa a Gospic, luogo natale della madre Djocetia, casalinga non scolarizzata ma dotata di una formidabile intelligenza e inventiva.

Il 1884 è l'anno di arrivo di Nikola Tesla negli Stati Uniti: sbarcò nel Nuovo Mondo solo con un blocco di appunti, 5 centesimi ed una lettera credenziale di Charles Batchelor, suo superiore nel precedente impiego. "Conosco due grandi uomini, uno siete voi, l'altro è il giovane che avete di fronte", scrive Batchelor: Edison non poté che seguire il consiglio dell'amico, assumendo Tesla nella sua azienda, la *Edison Machine Works*. Cominciò con attività di semplice ingegneria elettrica, ma grazie alle sue indubbie competenze e per la sua intensa capacità lavorativa gli venne proposta la riprogettazione dell'esistente generatore di corrente continua.

Dopo aver sentito in dettaglio le descrizioni di Tesla sulla natura dei benefici delle modifiche che proponeva, Edison gli promise 50.000 dollari in caso di successo: questo incentivò Tesla a produrre nuovi brevetti estremamente redditizi per la compagnia, nel corso di un anno di intenso lavoro.

Quando Tesla chiese del premio si dice che Edison abbia risposto: "Tesla, lei non capisce l'humour americano...", rinnegando la promessa fatta e offrendogli solo un aumento del suo salario di 10 dollari a settimana.

Rotta la collaborazione con Edison e dopo aver trascorso un periodo di disoccupazione o lavoro saltuario e spesso umiliante, nel 1886 Tesla fondò la *Tesla Electric Light & Manufacturing*. Tuttavia i primi finanziatori non concordavano sui progetti per il motore a corrente alternata e decisero di togliergli il controllo della società. Nel 1887 costruì il primo motore a induzione a corrente alternata senza attrito, dimostrandone con successo nel 1888 il funzionamento presso l'*American Institute of Electrical Engineers*, l'attuale *IEEE*. Sempre nel 1888 sviluppò i principi della famosa bobina (detta anche "trasformatore di risonanza" o "bobina ad alta frequenza"), simile ad un trasformatore ad alta frequenza che permette la produzione di corrente alternata usando i sistemi polifase, fondati sul principio dell'induzione magnetica. Iniziò a lavorare nei laboratori di Pittsburgh della *Westinghouse Electric & Manufacturing Company*, con George Westinghouse,



industriale ed inventore statunitense, diventato magnate grazie alla produzione di freni aerodinamici e sistemi di segnaletica per le ferrovie. Westinghouse era particolarmente interessato alle idee per i sistemi polifase, che, permettendo la trasmissione di corrente alternata sulle lunghissime distanze, avrebbero consentito la distribuzione su vasta scala con notevoli guadagni economici. Perciò il magnate decise di finanziare le ricerche di Tesla offrendogli 1 dollaro per ogni forza cavallo prodotta con i nuovi motori a corrente alternata. Ma appena lo scienziato si accorse che le spese che avrebbe dovuto sostenere la *Westinghouse Electric & Manufacturing Company* sarebbero state controproducenti se non dannose, si recò dal finanziatore dicendogli: *“I benefici che deriveranno alla società dal mio sistema di corrente alternata polifase sono per me più importanti dei soldi che entreranno nelle mie tasche. Mr. Westinghouse, voi salverete la vostra azienda così potrete sviluppare le mie invenzioni. Qui c'è il vostro contratto e qui c'è il mio, li strappo e non avrete più problemi con le mie royalties”*. Un uomo coerente con se stesso: aveva sempre affermato che lo scopo della scienza deve essere il miglioramento delle condizioni dell'umanità. Diversamente, è una perversione.

Il genio creativo di Tesla fu veramente multiforme, tanto che nell'aprile del 1887, parallelamente alla grande invenzione dei motori a corrente alternata, iniziò ad occuparsi di quelli che in seguito sarebbero stati chiamati raggi X. Nel novembre del 1890 trasmise per la prima volta energia elettrica senza l'utilizzo di fili ad un tubo a vuoto illuminandolo, fornendo la prova delle potenzialità della trasmissione senza fili di potenza. Dopo aver ottenuto la naturalizzazione a cittadino americano, nel 1891 creò un laboratorio a Houston Street nella città di New York, dove riuscì nuovamente ad accendere lampadine a distanza. Qui iniziò la sua amicizia con il famoso scrittore Mark Twain, il quale trascorse molto tempo con lui, anche nel suo laboratorio.

Nel 1892, all'età di 36 anni, Tesla depositò i primi brevetti del sistema energetico polifase ed in seguito i principi del campo magnetico rotante decisivi per il suo funzionamento. Contemporaneamente approfondì gli esperimenti sui misteriosi raggi X, di cui si sarebbe occupato il fisico tedesco Wilhelm Röntgen, confermandone e formalizzandone le leggi. Tesla eseguì numerosi esperimenti (compresa la radiografia delle ossa della propria mano che in seguito spedì a Röntgen) e, anche se non rese note le scoperte, ne denunciò la pericolosità. I risultati di queste ricerche vennero tuttavia perduti nell'incendio del suo laboratorio del marzo 1895.

Lavorò come vicepresidente dell'*American Institute of Electrical Engineers* dal 1892 al 1894. Dal 1893 al 1895, periodo in cui poteva godere di una notevole disponibilità economica e di una vita esaltante e appagata, spinse all'estremo la sua ricerca sulle correnti alternate, utilizzando elevatissime frequenze e voltaggi fino ad un milione di volt usando la sua ben nota bobina e non solo. Investigò sull'*effetto pelle* nei conduttori, progettò circuiti regolatori, inventò una macchina per indurre il sonno, inventò nuovi tipi di lampadine ad altissimo rendimento (in particolare quelle a fluorescenza) e migliorò quelle esistenti (ad arco), e arrivò ad una maggiore comprensione della trasmissione di energia elettrica senza fili, cosa che lo avrebbe portato a costruire il primo trasmettitore radio al mondo. La prima dimostrazione di comunicazione radio ebbe luogo a St. Louis nel Missouri, tre anni prima degli esperimenti di Guglielmo Marconi. In questa presentazione Tesla descrisse le cinque fondamentali caratteristiche dall'impianto radio da lui concepito: un'antenna, un collegamento a terra, un circuito antenna-terra per la sintonizzazione, un impianto di ricezione e uno di trasmissione e un rivelatore elettronico dei segnali. Scopri, prima di Marconi, che il passaggio di una corrente elettrica ad alta frequenza attraverso una bobina ed un condensatore produceva un effetto di risonanza che poteva funzionare a distanza senza bisogno dei fili.

Alla *World Columbian Exposition* di Chicago del 1893 venne dedicato per la prima volta un padiglione all'energia elettrica: fu presentata la “Città della Luce” che era alimentata da 12 generatori a corrente alternata progettati da Tesla. A questa fiera Tesla partecipò con grande successo e, con l'appoggio di Westinghouse, fece conoscere ai visitatori la corrente alternata direttamente applicata all'illuminazione dell'esposizione e spiegò i principi del campo magnetico rotante e del motore ad induzione. Inoltre dimostrò che la corrente alternata non era pericolosa come diffuso dalle dicerie di Edison, facendo passare attraverso il proprio corpo corrente ad alta frequenza ed elevata tensione per illuminare lampadine, in particolare le nuove lampadine a fluorescenza. L'assenza di pericolosità era dovuta al cosiddetto effetto pelle (già scoperto da Lord Kelvin), a causa del quale le correnti ad alta frequenza viaggiano solo attraverso gli strati esterni anziché attraversarli, mantenendo l'elettricità solo sulla superficie del conduttore.

Già dalla fine degli anni 1880, Tesla ed Edison erano diventati avversari, dando inizio alla famosa “guerra delle correnti”, dovuta alla promozione da parte di Edison della corrente continua per la distribuzione dell'energia elettrica contro la più efficiente corrente alternata tanto voluta da Tesla e Westinghouse.

Prima che Tesla inventasse il motore ad induzione non vi era possibilità di utilizzare i motori esistenti sulla corrente alternata, e quindi i vantaggi di questa corrente per la trasmissione di alte tensioni su lunghe distanze non erano pienamente fruibili.

Edison cercò di calunniare Tesla e di screditare il suo lavoro geniale, distribuendo volantini sulla pericolosità della corrente alternata, ma anche proponendo allo Stato di New York una legge contro l'utilizzo domestico. Il culmine si ebbe con crudeli e cruente dimostrazioni pubbliche dell'uccisione di cani, gatti e animali domestici, utilizzando corrente alternata. Ma la grande occasione per la sua delirante campagna si presentò quando Edison venne a conoscenza del bisogno di abbattere un pachiderma del circo di Coney Island.

Topsy era un'elefantessa irrequieta di età avanzata, ormai impossibile da controllare. Edison organizzò un'esecuzione pubblica sfarzosa, decidendo di filmare il macabro spettacolo. L'evento appartiene ad un passato in cui la sensibilità verso gli animali non era ancora un abito mentale della società occidentale. Invece di impiccarla, Edison le collegò un generatore da 6600 volt alle zampe e, di fronte a 1500 persone, inviò la corrente. In realtà i poveri animali venivano crudelmente sacrificati non in nome della sicurezza ma in nome di quel business che fino a quel momento Edison aveva costruito con il suo aviatissimo ma obsoleto metodo della corrente continua. Ma Edison non si limitò agli animali: manipolando le scoperte di Tesla arrivò anche alla progettazione per il governo USA della sedia elettrica, credendo di mostrare ancora una volta gli effetti deleteri della corrente alternata.

Dall'altra parte, Westinghouse era solo interessato al profitto e aveva comprato i diritti sui brevetti di Tesla relativamente ai sistemi polifase e ai trasformatori a corrente alternata, con lo scopo di creare una nuova multinazionale dell'elettricità che sostituisse quella creata da Edison.

Nel 1895 Westinghouse stipulò un accordo con la *General Electric*, che aveva adottato la nuova tecnologia allo scopo di realizzare una centrale idroelettrica alle Cascate del Niagara: la messa in opera venne affidata all'ingegnere scozzese George Forbes e vennero utilizzati enormi generatori idroelettrici a 500 cavalli di potenza, i primi due dei quali entrarono in servizio proprio nel 1895: i primi al mondo a produrre energia usando corrente alternata trifase. Inizialmente, trasmisero elettricità solo lungo i 40 km che separavano la centrale da Buffalo, ma nel giro di pochi anni le linee elettriche raggiunsero New York, inondando di luce le strade e i teatri di Broadway.

Nacque la *Niagara Falls Power and Conduit Company*, la più importante opera d'ingegneria elettrica mai realizzata. Nikola Tesla divenne uno dei più eminenti scienziati e ricavò 500.000 dollari, oltre alla libertà di proseguire i suoi esperimenti.

A causa della "guerra delle correnti", Edison e Westinghouse fecero quasi bancarotta, perciò nel 1897 Tesla sciolse Westinghouse dal contratto, privandolo dei diritti d'autore sul suo brevetto.

Nello stesso anno, Tesla, oltre ad inventare l'iniettore elettrico per automobili, si dedicò ad ulteriori ricerche sulle particelle radioattive e sulla radioattività, arrivando alla formulazione della teoria di base sui raggi cosmici e, dopo accurata e lunga sperimentazione, produsse il primo brevetto di base per la radio.

Un anno dopo, mostrò all'esercito degli Stati Uniti il funzionamento di un modello di imbarcazione telecomandata, alimentata da una batteria interna e guidata da controllo remoto, dimostrando ai militari la possibilità di lanciare dei siluri da una barca senza equipaggio e telecomandata e di dirigerli sul bersaglio utilizzando una guida radio. Per realizzare questo battello radiocontrollato, inventò le "porte logiche", le stesse impiegate nei computer e nella robotica ai giorni nostri. Tesla robotizzò non solo barche ma anche sottomarini ed aerei: è qui che si concretizza integralmente il connubio fra le sue conoscenze elettriche e meccaniche. Già allora la robotica era possibile, eppure fu realizzata su scala industriale solo un secolo dopo, forse per la mancanza di lungimiranza degli accademici e dei militari del tempo. Alcune delle invenzioni di Tesla non apparivano direttamente e immediatamente commercializzabili, ma qualcosa di insolito o fantascientifico.

Nel 1899 si trasferì a Colorado Springs, nel Colorado meridionale, dove rimase per 9 mesi con l'intento di proseguire più liberamente le sue ricerche, in particolare gli esperimenti sulle alte tensioni, le alte frequenze e sulla trasmissione di segnali e di potenza elettrica senza fili, senza pensare ai sistemi di telegrafia e telefonia. Tesla tenne un diario dei suoi esperimenti che consiste di 500 pagine di note contenenti le descrizioni e la spiegazione dei suoi esperimenti.

Tra gli strumenti con cui Tesla allestì il suo laboratorio vi era la più grande bobina mai costruita del diametro di 16 metri, chiamata "trasmettitore di amplificazione", e contraddistinta, rispetto ai precedenti modelli, da un terzo elemento induttore con caratteristiche di risonanza, e da un'antenna utilizzabile sia in trasmissione che in ricezione. A differenza della classica bobina di Tesla, si trattava di un sistema di amplificazione costituito da tre bobine e poteva essere interpretato come una sorta di pila elettrica progettata per far oscillare elettricamente la Terra stessa dopo essersi sintonizzato con le sue frequenze di risonanza.

Tesla utilizzò questo gigantesco congegno elettrico per trasmettere 10.000 watt di potenza senza fili, potendo generare milioni di volt di elettricità e in grado di produrre scariche di fulmine della lunghezza di oltre 50 metri. Tesla fu dunque il primo uomo al mondo a creare effetti elettrici sulla scala del fulmine. Usando il suo apparato riuscì ad accendere ben 200 lampadine opportunamente collegate a degli apparati riceventi, usando un sistema di trasmissione senza fili ad una distanza di 40 chilometri.

Gli abitanti della cittadina notarono fenomeni inspiegabili: chi camminava nelle vicinanze del laboratorio, subiva delle scariche elettriche nei piedi attraverso la suola delle scarpe. Delle scintille uscivano dagli idranti dell'acqua e l'erba nei pressi dell'edificio era talmente elettrizzata da provocare un effetto a corona di luminescenza blu, simile ai fuochi di Sant'Elmo. Questi erano gli effetti collaterali dei tentativi di Tesla di sintonizzare il suo trasmettitore con le frequenze di risonanza della Terra.

Uno degli esperimenti condotti con il trasmettitore di amplificazione, quello che richiese la massima potenza fino ad allora utilizzata, distrusse il generatore della compagnia elettrica mandando in black-out la città. La compagnia elettrica negò a Tesla ogni ulteriore accesso al generatore se non avesse riparato il generatore primario a sue spese. Tesla riparò il generatore in pochi giorni, ma nonostante ciò il direttore della centrale

elettrica non concesse mai più il permesso di connettersi alla rete elettrica e questo causò la conclusione delle attività di Tesla a Colorado Springs.

Massimo Teodorani afferma che, *“probabilmente la scoperta più importante che Tesla fece a Colorado Springs fu quella delle “onde stazionarie terrestri”, sicuramente il più grande risultato di Tesla in materia di fisica terrestre, scoperta che a suo dire avrebbe permesso la trasmissione ovunque di energia senza fili. Ciò gli consentì di provare che la Terra può essere usata come un conduttore, cosa che permette ad essa di rispondere in maniera efficace a vibrazioni elettriche ad una certa frequenza. Tesla scoprì infatti che se fosse stata caricata in maniera sufficientemente potente, sarebbe potuta diventare il conduttore ottimale. Questa scoperta, da lui effettuata misurando l’energia innescata da un fulmine che quando colpisce il suolo crea delle onde di energia che si muovono da un lato all’altro della Terra attraversando il nucleo terrestre per poi rimbalzare, permetteva di trasmettere energia in maniera milioni di volte più efficiente delle onde trasmesse in atmosfera, aprendo la possibilità ovunque nel mondo di comunicazioni istantanee e di trasmissione di potenza attraverso la crosta terrestre. Nell’esperimento del 1899 Tesla tramise dieci milioni di volt di corrente ad alta frequenza alla Terra, nella speranza di riuscire a produrre quel fenomeno che lui aveva definito “insorgenza risonante”. Tesla si accingeva allora a sintonizzare il suo equipaggiamento, aggiustando il suo trasmettitore di amplificazione in maniera che esso fosse in perfetta risonanza con la Terra (la quale vibra con un periodo di un’ora e 49 minuti). Dopo aver calibrato il suo strumento in questa maniera il suo apparato entrò in funzione pompando energia dentro la superficie terrestre. Immediatamente dopo era possibile veder emergere un enorme fulmine dalla sua bobina. Esso era prodotto dall’onda che dopo aver raggiunto il lato opposto del pianeta rimbalzava ritornando al punto di origine. Questa onda veniva a sua volta amplificata non appena, nella fase di ritorno, incontrava nuova energia iniettata tramite nuovi potenti impulsi emessi dal trasmettitore. Il sogno di Tesla era dunque quello di una stazione trasmittente in grado di pompare energia elettromagnetica nella crosta terrestre fino a raggiungere la frequenza di risonanza elettrica della Terra. In tal modo, usando l’intero pianeta, sarebbe stato possibile intercettare questa energia utilizzando stazioni riceventi sparse in tutto il mondo. Il gioco consisteva semplicemente nell’usare un trasmettitore per inviare le onde ad un qualunque ricevitore tramite la terra e poi usare l’atmosfera per il circuito di ritorno. Proprio come aveva imbrigliato le cascate del Niagara per trasmettere via filo energia elettrica a centinaia di chilometri di distanza usando la corrente alternata, adesso l’obiettivo di Tesla era imbrigliare la Terra stessa come conduttore di energia elettrica ovunque nel mondo”*

Allo stesso periodo risalgono gli esperimenti di trasmissione a frequenza molto basse (ELF=Extremely Low Frequency, di frequenza tra 3Hz e 30Hz e lunghezza d’onda tra 100.000km e 10.000km). Appartengono ad una regione dello spettro magnetico di piccole dimensioni, che veniva utilizzata principalmente perché le onde di bassa frequenza erano facilmente generabili con dispositivi elettrici alla portata della fisica della fine del XIX secolo. Si trattava di apparecchi come oscillatori, antenne, rivelatori a risonanza, disponibili ai tempi di Hertz, Marconi e Tesla). Nel corso dei suoi esperimenti, mentre trasmetteva frequenze ELF attraverso il terreno, sulla base di calcoli basati su questi esperimenti egli scoprì che la frequenza di risonanza della Terra era di circa 8Hz. Fu negli anni ’50 che i ricercatori, in particolare W.O.Shumann, poterono confermare questa ipotesi. Utilizzando frequenze ELF e la tecnologia di cui disponeva, Tesla intuì fin d’allora la possibilità di alterare le correnti in alta atmosfera con enormi e inquietanti opportunità per modificare il clima terrestre e che era possibile interagire sia con l’attività bioelettrica del cervello che con la naturale vibrazione delle molecole del corpo degli esseri viventi. Le frequenze ELF erano in grado di manipolare la biofisica umana e in merito a quest’ultimo aspetto effettuò con successo degli esperimenti su se stesso.

Agli anni di Colorado Springs risale anche un nuovo sistema di esplorazione geofisica, chiamato da Tesla “telegeodinamica”. Era una conseguenza di un precedente progetto del 1894 sugli oscillatori meccanici: attraverso questi esperimenti, Tesla affermò di poter provocare terremoti artificiali anche particolarmente dannosi. Gorge Trinkaus nel volume *“Tesla: le invenzioni perdute” (quaderni Andromeda per la Scienza)* afferma che quando Tesla era ancora nel suo laboratorio di New York, aveva già iniziato ad effettuare esperimenti del genere, e attaccò ad un pilone d’acciaio un piccolo, ma potente oscillatore pilotato ad aria compressa. Lasciatolo lì, tornò al suo lavoro. In strada, nel frattempo, si sviluppò un violento movimento sismico, che fece crollare l’intonaco, provocò la rottura dell’impianto idraulico, delle finestre e ruppe gli ancoraggi dei robusti macchinari. L’oscillatore meccanico di Tesla aveva trovato la frequenza di risonanza in uno strato sotto l’edificio causando un terremoto artificiale. Presto lo stesso edificio iniziò a tremare, e proprio nel momento in cui la polizia irruppe nel suo laboratorio, Tesla fu visto colpire il dispositivo con un martello da fabbro: era l’unico modo in cui poteva rapidamente fermarlo. Sfortunatamente Tesla non si era accorto che il pilone d’acciaio era piantato nelle fondamenta sotto l’edificio e, senza volerlo, aveva costruito una macchina per produrre pericolosi effetti sismici. La vibrazione prodotta dai suoi oscillatori non era altro che una conseguenza dei principi fisici della risonanza, argomento che lo affascinò e lo ossessionò per tutta la sua vita sia nelle applicazioni elettriche che in quelle meccaniche. In un esperimento simile, durante una passeggiata serale per la città, Tesla collegò un oscillatore alimentato a batteria all’impalcatura d’acciaio di un edificio in costruzione e, regolandolo alla frequenza opportuna, portò la struttura alla frequenza di risonanza. La struttura subì una scossa e così il terreno sotto i suoi piedi. Tesla, dopo, si vantò di poter creare una scossa sotto l’Empire State Building con tale dispositivo, e, come se questo clamore non fosse

abbastanza di richiamo, precisò che una oscillazione risonante su vasta scala era in grado di "...spaccare la Terra in due metà". Non è comunque disponibile alcun dettaglio sugli oscillatori meccanici di Tesla.

Sempre nel periodo passato a Colorado Springs, mentre usava il suo apparato di ricezione per monitorare il passaggio di temporali e relativi fulmini, registrò quelli che concluse essere segnali radio di origine extraterrestre, ma l'annuncio pubblico e i dati rilevati vennero duramente respinti dalla comunità scientifica ad eccezione del fisico Lord Kelvin, l'unico che assunse le sue difese. Lo scienziato aveva notato delle differenze sostanziali nelle misure dei segnali ricevuti rispetto ai soliti dati raccolti dai temporali e dal rumore terrestre. Sull'Albany Telegram del 25 febbraio 1923 scrisse: "Ventidue anni dopo, mentre effettuavo esperimenti a Colorado con un sistema di trasmissione senza fili, ottenni l'evidenza sperimentale di vita su Marte. Avevo perfezionato un ricevitore senza fili di straordinaria sensibilità, di molto superiore a quanto conosciuto, e registrai segnali interpretabili come 1-2-3-4. Credo che i marziani abbiano usato numeri per comunicare, perché i numeri sono universali". Nel 1996 i ricercatori Corum and Corum hanno ritenuto di essere in grado di dimostrare che i segnali registrati da Tesla non venivano da Marte e non erano di natura intelligente, ma provenivano probabilmente dalla fascia di plasma che avvolge Giove.

Tesla sviluppò anche i rivelatori (i cosiddetti "coherer") per separare e ricevere onde elettromagnetiche, cosa che lo portò nelle fasi finali del suo lavoro all'invenzione dei circuiti elettrici sintonizzati, che stanno alla base delle radio e dei televisori odierni e ciò che era scritto nel suo diario, nel 1899, fu usato per confermare il brevetto di Tesla per la radio.

Tesla lasciò Colorado Springs il 7 Gennaio 1900. La sperimentazione a Colorado preparò Tesla a sviluppare il più audace dei progetti da lui mai intrapresi, la costruzione di un'infrastruttura *per la trasmissione di potenza senza fili* nota come Torre Wardencllyffe a Long Island (New York).

La struttura in legno grezzo della torre, progettata da Stanford White, si ergeva per 57 m. Essa era sormontata da un elettrodo di rame del diametro di 21 m, ora identificato come un condensatore isotropico, che Tesla aveva posizionato sopra il terzo sistema induttore per poter raccogliere carica elettrica. Al di sotto della torre vi era un apparato per la trasmissione di carica alla Terra: quest'ultima si comportava come un circuito risonante eccitabile elettricamente a frequenze predefinite. Facendo credere al finanziatore J.P. Morgan che la torre era stata concepita come sistema globale per le telecomunicazioni senza fili, in realtà Tesla intendeva usare la Torre Wardencllyffe per sfruttare la risonanza naturale della Terra, al fine di permettere la trasmissione di grandi potenze elettriche utilizzando piccole antenne. Basandosi sulla scoperta delle onde stazionarie terrestri effettuata nel periodo trascorso a Colorado Springs, Tesla riteneva di poter usare la Terra come un enorme conduttore per poter trasmettere potenza e comunicazioni senza l'utilizzo di cavi in qualunque punto del globo mediante un trasmettitore di amplificazione ancora più potente di quello utilizzando a Colorado Springs.

La torre fu operativa nel giugno 1902: tra gli oltre 700 brevetti registrati sotto il nome di Tesla presso lo US Patent Office, la Torre Wardencllyffe fu senz'altro il più controverso. Nel 1903, dopo aver appreso il vero obiettivo di Tesla, il quale aveva nel frattempo promesso di accendere tutte le luci della Fiera di Parigi usando il suo nuovo trasmettitore risonante di Wardencllyffe, Morgan decise di sospendere i finanziamenti economici. La Torre Wardencllyffe venne smantellata in tempo di guerra e venne considerata dalla stampa come "la follia di Tesla da un milione di dollari".

Tesla, che da quel momento non ebbe mai più una possibilità concreta di trasmettere energia libera al mondo, commentò l'esperienza della Torre Wardencllyffe come "Il Futuro dell'Arte Senza Fili", nell'omonimo articolo pubblicato nel 1908 sul *Wireless Telegraphy & Telephony*: "*Non appena il progetto sarà realizzato, sarà possibile per un uomo d'affari a New York dettare le sue istruzioni e vederle istantaneamente apparire in forma di stampa nel suo ufficio a Londra o altrove. Egli dalla sua scrivania sarà in grado di telefonare a chiunque nel globo senza dover effettuare alcun cambiamento nell'equipaggiamento esistente. Uno strumento di poco costo, non più grande di un orologio, permetterà a chiunque lo porti di sentire informazioni ovunque, sia sul mare che sulla terra, musiche o canzoni, il discorso di un leader politico, l'indirizzo di un eminente uomo di scienza, o il sermone di un eloquente predicatore, diffuso in qualunque altro posto a qualunque distanza. Utilizzando lo stesso sistema, qualunque fotografia, carattere tipografico o stampa potrà essere trasferito da un posto all'altro. Milioni di tali strumenti potranno essere collegati ad una sola centrale di questo tipo. Più importante della comunicazione di informazione, sarà comunque la trasmissione di potenza senza l'utilizzo di fili, su larga scala, cosa che convincerà chiunque sulle enormi potenzialità del suo utilizzo. Ciò sarà sufficiente a mostrare che l'arte senza fili offre possibilità di gran lunga più elevate di qualunque altra invenzione o scoperta mai effettuata prima d'ora e se le condizioni saranno favorevoli, ci si può aspettare con certezza che nei prossimi anni meraviglie verranno fuori dalle applicazioni di questa tecnologia*".

Con il suo trasmettitore di amplificazione in risonanza per la ricezione e trasmissione senza fili, nato a Colorado Springs e perfezionato a Long Island, Tesla intendeva perseguire due obiettivi: 1) trasmettere segnali e informazioni in tutto il mondo, 2) trasmettere potenza elettrica ovunque senza bisogno di utilizzare cavi elettrici.

Nel 1907, l'Ufficio Brevetti Statunitense confermò il brevetto della radio a Guglielmo Marconi. Risulta con certezza che Tesla aprì il proprio laboratorio più volte a Marconi, fornendogli delle notizie utili, che sono state poi sviluppate e attuate dallo scienziato italiano. La rivendicazione dell'invenzione della radio di Marconi fu

sempre contestata da Tesla che intraprese immediatamente le sue battaglie per confermare che il brevetto era suo.

Tuttavia, nel 1909, Marconi riuscì a vincere il Premio Nobel per la radio e Tesla ne fu profondamente risentito e amareggiato perché riteneva che Marconi avesse usato illegalmente ben 17 brevetti di sua proprietà. Ad esempio nel 1900 Tesla brevettò (consegnato nel 1897) un sistema di trasmissione dell'energia elettrica che poteva essere anche usato per la trasmissione dei segnali radio (U.S. Patent 645,576, March 20, 1900 – System of Transmission of Electrical Energy - primo esempio brevettato di quattro circuiti sintonizzati alla stessa frequenza due utilizzati come trasmittente e due come ricevente- e U.S. Patent 649,621, May 15, 1900 Apparatus For Transmission of Electrical Energy, per citarne due) e nel 1898 brevettò un radiocomando multicanale che permetteva su breve distanza di comandare vascelli, il sistema base di controllo era formato da quattro circuiti sintonizzati alla stessa frequenza.

Nel brevetto di Marconi #676,332 a pag 2 riga 69 compare il termine "Tesla Coil". Nonostante ciò Marconi non citò l'inventore nel suo discorso al Nobel. Per questa ragione Tesla intraprese un'azione legale contro Marconi e contestò sempre le affermazioni di Marconi anche per quel che riguardava il metodo di indagine da lui seguito. Molti ritengono che tutti i brevetti conquistati da Tesla dal 1888 in avanti costituissero la base della moderna radio e della tecnologia senza fili.

La storia ufficiale identifica spesso Tesla con il motore polifase, ignorando del tutto le sue ultime invenzioni e trascurandole come il lavoro di uno spostato. Ma tra coloro che hanno pubblicato onesti lavori in questo campo, c'è il consenso unanime nell'affermare che Tesla è stato defraudato del suo effettivo peso nella storia, particolarmente del suo status come figura guida nella tecnologia della radio. Anche se una prima sentenza del 1915 non gli diede ragione, finalmente nel giugno del 1943, cinque mesi dopo la sua morte, i diritti di Tesla sulla radio furono finalmente definitivamente riconosciuti a suo favore. Questa decisione si basò proprio sui fatti relativi a tutto il lavoro che era stato fatto da Nikola Tesla prima che venisse fuori il brevetto di Marconi sulla radio. La sentenza della Corte Suprema Statunitense tuttavia non è universalmente riconosciuta. I sostenitori di Marconi deliberarono che Marconi non era a conoscenza del lavoro di Nikola Tesla negli Stati Uniti. Comunque i lavori "*Sulla luce ed altri fenomeni di altra frequenza*" (Philadelphia/St. Louis; Franklin Institute in 1893) e "*Esperimenti con correnti alternate ad alto potenziale e frequenza*" (London; 1892) furono diffusi in tutto il mondo e quindi è possibile che in realtà Marconi conoscesse i lavori.

Negli anni successivi alla chiusura di Wardenclyffe, Tesla spostò i suoi sforzi creativi dall'ingegneria elettrica a quella meccanica. Rendendosi conto che nelle centrali elettriche si stavano sostituendo i motori a vapore a pistone alternativo con le più efficienti turbine rotanti a vapore, cominciò a studiare un modello di turbina con la girante priva di pale, e nel 1906, in occasione del suo cinquantesimo compleanno, Tesla dimostrò il funzionamento della sua "turbina a disco rotante senza pale". Il vantaggio della turbina senza pale rispetto a quella tradizionale con le pale consisteva nel fatto che le pale andavano soggette a stress meccanico con conseguente perdita di efficienza. Come in tutte le altre invenzioni di Tesla, anche alla base di questa c'era un'intuizione importante. Così come nel suo motore a corrente alternata un campo magnetico rotante "trascinava" con sé il rotore, Tesla pensò che fosse possibile fare in modo che il vapore nella sua turbina trascinasse, per via delle forze viscosive, i dischi che erano posti l'uno accanto all'altro e fissati all'asse della turbina facendoli ruotare, e sottoponendoli così ad uno sforzo di taglio dipendente dalla velocità di fluido del flusso. In tal modo veniva efficacemente trasmessa energia meccanica al mezzo (nave o aereo) a cui suppliva come propulsione. Si può dire senz'altro che il progetto della turbina fu l'ultimo che ebbe una commercializzazione su vasta scala. In questo periodo inventò e commercializzò il tachimetro per automobili, che fra l'altro era basato sul principio della turbina rotante. Tesla mostrò, nonostante gli scarsi guadagni un grande interesse per le macchine elettriche a scopo terapeutico (elettroterapia), che non brevettò mai ma ne permise la diffusione, soprattutto tramite il famoso inventore Thomas Henry Moray, che proseguì queste ricerche negli anni '40. Tesla scoprì infatti che certe frequenze avevano un potere di guarigione sul corpo e sulla mente. Effettuò moltissime sperimentazioni su se stesso e su altri. Ricerche di questo genere, che si avvalgono di trasmettitori sia di alta che di bassa frequenza sono continuate e messe in pratica anche oggi. Inoltre, Tesla effettuò molte sperimentazioni che comportavano la trasmissione al cervello umano delle frequenze più svariate nella gamma bassa dello spettro, in particolare la banda ELF (3-30Hz). In particolare scoprì che le onde ELF (<8 Hz) erano altamente dannose al cervello umano e potevano essere usate come arma sconvolgendo l'attività bioelettrica del cervello e anche che a 8Hz (frequenza che è anche la frequenza di risonanza principale della Terra) la mente esprimeva un profondo stato di rilassamento. Studiando il comportamento delle onde a bassissima frequenza si rese conto che era possibile costruire un'arma elettromagnetica in grado di manipolare e controllare la mente, oltre che le forze della natura. (Un progetto del genere, noto come MK-ULTRA, si riferisce ad una serie di attività svolte dalla CIA tra gli anni 50 e 60 che aveva come scopo quello di influenzare e controllare il comportamento di determinate persone. Si suppone che uno degli scopi del progetto fosse quello di modificare il livello di percezione della realtà di alcune persone, costringendole a compiere atti senza rendersene conto).

Nel 1912, Tesla venne candidato al Premio Nobel per la Fisica. Egli lo rifiutò per non averlo ricevuto nel 1909 al posto di Marconi. Nel 1915, di nuovo, Tesla rifiutò il premio Nobel, venendo a conoscenza del fatto che

avrebbe dovuto dividerlo con Edison. Entrambi non ricevettero tale onorificenza. Nel 1917, contemporaneamente alla demolizione della Wardenclyffe, Tesla ricevette la più alta onorificenza della AIEE, la Edison Medal, il più alto riconoscimento nel campo dell'ingegneria. Nell'agosto dello stesso anno, lo scienziato mise a punto i principi riguardanti i livelli di frequenza e di potenza che avrebbero permesso nel 1934 di costruire le prime apparecchiature radar: ciò fu reso possibile dai suoi precedenti esperimenti sulle correnti alternate ad alto voltaggio e alta frequenza. Aveva dunque messo a punto anche il concetto di usare le onde radio per rilevare la posizione e la velocità di oggetti a distanza.

Nel 1928 Tesla ricevette il suo ultimo brevetto per un congegno destinato al trasporto aereo, il primo esempio di aeromobile a decollo e atterraggio verticale.

In occasione del suo settantacinquesimo compleanno, il Time Magazine dedicò a Tesla l'intera copertina, ringraziandolo per i suoi contributi nel campo conoscitivo della produzione dell'energia elettrica. Nello stesso numero del Time Tesla annunciò il progetto di un gigantesco trasmettitore, "Teslascope", che voleva utilizzare per inviare segnali verso le stelle. Una delle più grandi ossessioni della sua vita fu proprio la ricerca di un'intelligenza aliena.

Più avanti con l'età, attorno al 1937, Tesla annunciò che stava lavorando su una teoria dinamica della gravità, in alternativa a quella della relatività di Einstein, ma questa teoria non fu mai pubblicata. Tesla era scettico sulle teorie di Albert Einstein (con il quale era comunque in contatto) perché riteneva avessero profondi errori di base: in particolare, Tesla riteneva che l'energia non è contenuta nella materia, ma nello spazio tra le particelle di un atomo e che la velocità di propagazione di un segnale elettromagnetico poteva superare la velocità della luce. Tesla, in contrasto con Einstein e di quasi tutti i suoi colleghi di quel tempo, era convinto che tutte le proprietà della materia e dell'energia derivassero dall'etere. Le convinzioni di Tesla sull'etere, seppure in mezzo a svariate polemiche con il lato conservatore dell'accademia, sono state riprese in esame da svariati fisici contemporanei come Thomas Bearden e Harold Puthoff.

È collegata a questa concezione, la teoria di Tesla sulla natura del fulmine globulare: egli riteneva che fosse etere in moto vorticoso reso visibile dalla fluorescenza di particelle cariche: in sostanza, Tesla riteneva che quando alte e basse frequenze interagiscono tra loro, fosse possibile visualizzare l'etere in forma energetica. Questa sua teoria, nata da alcune sue intuizioni scaturite da alcuni suoi esperimenti concreti effettuati a Colorado Springs e a Long Island, non era comunque suffragata da modelli matematici.

Anche se i fulmini globulari sono stati un po' trascurati come argomento di ricerca, negli ultimi 10 anni si è ritornato a studiarli dal punto di vista teorico, sperimentale e osservativo. Si sono tenuti due simposi internazionali sull'argomento, uno nel 1988 e l'altro nel 1990 ed è stato creato un comitato internazionale per il loro studio.

Tesla fu affascinato dai concetti fondamentali dell'altra grande teoria (rivale della relatività) in gran voga in quel periodo: la meccanica quantistica, e condivideva, in particolare, la concezione della luce intesa sia come particella che come onda. Sembra che sulla base delle nuove teorie della luce, Tesla lavorasse ad un progetto relativo ad una non meglio precisata "barriera di luce" in grado di alterare a volontà tempo, spazio, gravità e materia. Lo scopo di queste ricerche, che hanno contribuito ad alimentare le leggende fantastiche su di lui, sembra fosse quello di costruire macchine in grado di generare antigravità, teletrasporto, viaggi nel tempo e invisibilità. Non si ha certezza di veridicità riguardo a questi studi, e si specula che egli avesse pronto un congegno capace di "imbrigliare" il campo magnetico che avvolge la Terra ma non esistono brevetti su questo congegno. Come afferma Massimo Teodorani, leggende metropolitane, senza alcun concreto fondamento, sostengono che ci sia un collegamento tra le scoperte di Tesla e quello che si ritiene sia successo con il fantomatico Progetto Philadelphia nell'ottobre 1943, quando nel corso di un esperimento militare della Marina americana, una nave da guerra con tutto l'equipaggio scomparvero dopo essere stati sottoposti ad un fortissimo campo magnetico. L'evento risale all'anno della morte di Tesla, data in cui l'FBI requisì tutti gli appunti dello scienziato.

Negli ultimi 20 anni della sua vita, Tesla visse come esiliato dalla comunità scientifica. La mancanza di un capitale d'investimento lo costrinse a vivere al limite dell'indigenza, mentre i magnati come Westinghouse e Morgan si erano arricchiti proprio grazie al suo talento e ai suoi progetti. Il successo non premiava certo chi proponeva alle accademie e alla società la possibilità di energia libera per tutti, non ricompensava chi aveva grandi idee per il bene comune, non gratificava chi produceva progetti poco redditizi per i capitalisti.

Nikola Tesla morì in solitudine in una stanza del New Yorker Hotel a causa di un attacco cardiaco, tra il 5 e l'8 gennaio del 1943. Aveva già venduto tutti i suoi brevetti sulla corrente alternata, ma al momento della morte non aveva ancora saldato i suoi debiti.

Fino a poco prima della sua morte aveva lavorato ad un'arma da lui denominata "teleforza", riguardo alla quale aveva affermato che era *"perfettamente praticabile la trasmissione di energia senza fili e la produzione di effetti distruttivi a distanza"*. Tesla affermò anche di aver *"già costruito un trasmettitore senza fili che rende ciò possibile, di cui ho descritto i dettagli in alcune recenti pubblicazioni tecniche e in uno dei miei più recenti brevetti... Il mio apparato proietta particelle che possono essere relativamente grandi o di dimensioni microscopiche, un sistema che permette di concentrare in un'area molto piccola queste particelle e di inviarle a distanze enormi, con energie triloni di volte più potenti di quella ottenuta con qualunque"*

*apparato tuttora esistente. In tal modo migliaia di cavalli vapore possono essere trasmessi sotto forma di un fascio più sottile di un capello a cui nulla può resistere”.*

Nel 1937 egli compose un trattato intitolato *The Art of Projecting Concentrated Non-dispersive Energy through the Natural Media* riguardante fasci di particelle cariche che fu pubblicato in seguito per cercare di illustrare una descrizione tecnica di un'arma “*che avrebbe messo fine a tutte le guerre nel mondo*”. Questo documento si trova attualmente nell'archivio del Nikola Tesla Museum di Belgrado. Lo scienziato aveva pensato a questo congegno per scopi esclusivamente difensivi e come deterrente per fermare qualsiasi offensiva. Pochi giorni dopo aver contattato il Dipartimento di Guerra per proporre la sua invenzione, Tesla venne trovato morto e i suoi articoli pertinenti al raggio della morte e molti altri progetti furono dichiarati top secret e confiscati per ordine dell'FBI. La famiglia dello scienziato e l'ambasciata jugoslava lottarono per avere indietro gli effetti personali, alcuni dei quali si trovarono presso il *Museo Nikola Tesla* di Belgrado, tra i 150.000 documenti che documentano la vita, l'attività e il genio creativo dell'inventore. Il funerale si ebbe il 12 gennaio 1943 presso la Cattedrale Saint John The Divine a Manhattan, New York.

Vogliamo concludere questa biografia su Nikola Tesla, uno dei più geniali uomini apparsi in questo pianeta, con una sua frase emblematica che descrive la sua natura di scienziato in maniera superlativa: *“Il dono del potere della mente proviene da Dio, Essere Divino, e se concentriamo le nostre menti su quella verità, noi ci sintonizziamo con questa grande potenza”*

## **2. L'eredità di Nikola Tesla**

Massimo Teodorani, nel suo libro dedicato interamente alla figura di Tesla descritto come uno degli emblemi del progresso umano, si trascina appesantito dalle incalcolabili intuizioni di Nikola Tesla verso una conclusione non troppo rosea: *“Noi uomini del ventesimo secolo, pur avendo assorbito molto bene molte delle invenzioni di Nikola Tesla, siamo rimasti con un punto interrogativo in merito ad alcune delle sue teorie e speculazioni più esotiche come quella dell'energia che scaturisce dall'etere cosmico. Questo interrogativo è decisamente forte perché sappiamo che le affermazioni di Tesla, nemmeno quelle più esotiche, non potevano essere fantasie campate in aria ma dovevano per forza trarre la loro radice dall'enorme quantità di esperimenti che lui stesso aveva compiuto con le sue attrezzature. Possiamo presumere che da questi esperimenti qualcosa in più fosse scaturito e che lui, molti anni dopo aver compiuto le sue sperimentazioni, impossibilitato a essere preso in considerazione dall'accademia dell'epoca avesse deciso comunque di fornire informazioni alle masse nella speranza che qualcun altro in futuro potesse poi continuare dove lui si era dovuto per forza fermare.”* (Tesla, *Lampo di genio, la Storia e le Scoperte del più geniale inventore del ventesimo secolo*, Massimo Teodorani, Scienza e Conoscenza, Macro edizioni, 2005).

Dalla storia che ha segnato il cammino conoscitivo dell'uomo, sappiamo che spesso, di fronte a tali interrogativi, la moda è di dimenticare. Ma rimane assai arduo cancellare le “fantasie” che trovano la loro radice in una serie di dati empirici e sperimentali.

L'ammirazione per Nikola Tesla ha spinto molti ricercatori e fisici contemporanei a continuare la sua opera, usando svariate tecniche di sperimentazione e costruendo svariati modelli teorici, ma lo scopo di tutti questi ricercatori è solo uno: quello di tentare di imbrigliare la cosiddetta “free-energy”.

In un articolo della rivista *IEEE Power Engineering Review*, dal titolo “Searchers for a New Energy Source, Tesla, Moray and Bearden”, pubblicato nel gennaio 1992, l'autore Gary L. Johnson (IEEE Senior Member, Department of Electrical and Computer Engineering, Kansas State University) illustra le conquiste e gli ostacoli che hanno segnato il cammino di tre tra i più famosi ricercatori che hanno rivendicato l'esistenza di un'altra fonte di energia oltre a quelle attualmente conosciute: Tesla, Moray e Bearden.

Come il sole e il vento, questa energia è disponibile senza riguardo per i confini politici. Se fosse vero, lo sviluppo di questa fonte di energia sarebbe stato uno degli eventi più importanti del secolo. Questa fonte sarebbe in aggiunta alla fusione fredda se quest'ultima si dimostrasse valida. Le parole esatte per descrivere la fonte di energia sono differenti per i tre uomini, tuttavia il concetto di base sembra essere il seguente: considerate un piccolo volume vuoto di fronte al vostro viso. Chiedete a un bambino cosa c'è nel volume e otterrete uno sguardo perplesso e la risposta che nel volume non c'è nulla. In base ai sensi sembrerebbe proprio che il piccolo volume sia vuoto. Ponete la stessa domanda ad uno studente di ingegneria e la risposta può comprendere ossigeno, idrogeno, azoto, argon, vapore acqueo, fotoni, onde radio, pochi ioni e forse un neutrino. Lo spazio che appare vuoto non è realmente così vuoto. Dobbiamo solo costruire rivelatori o ricevitori per stabilire che cosa è già lì. Questi tre ricercatori affermerebbero che il nostro piccolo volume contiene anche energia, che può essere estratta con il corretto ricevitore. Abbiamo solo bisogno di scoprire come costruire un ricevitore o pompa di energia.

Ciò che accomuna queste tre insigne figure della fisica è il proposito di dar vita ad un ricevitore o ad una pompa che estragga energia dal vuoto.

Nikola Tesla all'incirca nel 1900, ha iniziato ad investigare su concetti avanzati che non sono stati accettati dalla comunità scientifica del tempo, e, al momento, sono ancora non accettati. Alla sua morte i suoi articoli personali scomparvero per riapparire dopo in misura frazionata nella nativa Jugoslavia. Non sono disponibili specifiche del suo lavoro su questi concetti avanzati. A proposito dell'idea che lo spazio stesso contiene energia è istruttiva la seguente dichiarazione di Tesla all'Institute of Electrical Engineers di Londra: *“..nello spazio c'è energia. Questa energia è statica o cinetica? Se statica, le nostre speranze sono vane, se*

*cinetica (e questo è quello che crediamo) allora è una semplice questione di tempo..*” Come per molte altre idee, Tesla non è stato specifico, come avremmo voluto, riguardo a questa energia cinetica nello spazio. Aveva due brevetti, rispettivamente #685.957 (Apparato per l'utilizzo di energia radiante) e #685.958 (Metodo per utilizzare energia radiante), entrambi rilasciati il 5 novembre 1901. Sebbene l'efficienza di questi dispositivi risultò molto bassa, Tesla non perse il proprio ottimismo, dichiarando che *“è una semplice questione di tempo quando gli uomini riusciranno a collegare le loro macchine al MECCANISMO stesso della natura”*.

Questo messaggio ha scosso gli animi di coloro che in futuro ammetteranno di aver trovato ispirazione e coraggio da Nikola Tesla.

Fra questi il suo contemporaneo T. Henry Moray. Nato nell'agosto del 1892 da madre svedese e padre finlandese, sin da piccolo Moray mostrò uno spiccato interesse per l'energia e l'ingegneria elettrica. Iniziò il suo lavoro su un nuovo sistema di energia nel 1909. Ben presto fu in grado di riferire la seguente *“Durante le vacanze di Natale del 1911, iniziai a realizzare che l'energia con cui stavo lavorando non era di natura statica, ma di natura oscillante. In seguito realizzai che l'energia non veniva dalla terra, ma invece era venuta sulla terra da qualche sorgente esterna..”* Infine, nel 1925, Moray sviluppò un modello di lavoro, pervenendo alla realizzazione di un dispositivo. Una volta entrato in sintonia con la fonte di energia, l'output fu utilizzato per accendere normali lampadine, ferri da stiro, ventilatori e altri carichi elettrici. Il ricevitore è stato in grado di fornire diverse centinaia di watt per un periodo indeterminato, fino a diversi giorni.

Test dopo test, Moray mostrò il suo ricevitore a professori d'ingegneria elettrica, parlamentari, dignitari e una miriade di altri visitatori, permettendo più volte agli investigatori di smontarlo e rimontarlo completamente sia nel suo laboratorio che in località remote, senza telefono o fili elettrici nelle vicinanze che potessero in qualche modo influenzare gli esiti dell'esperimento, solo terra deserta: anche i più scettici non potevano che andarsene con la convinzione che si potesse trarre energia da una fonte universale, dal vuoto.

Nonostante ciò, le sette richieste di un brevetto per il suo dispositivo di energia radiante vennero respinte dalla *Patent and Trademark Office*. Le ragioni addotte erano sostanzialmente che il dispositivo non si adattava alla fisica conosciuta a quel tempo. Ad esempio, parte della richiesta era per un dispositivo a stato solido, come un transistor. Nel 1931, i transistor non erano ancora stati inventati e il flusso di elettroni richiedeva un catodo caldo nei dispositivi esistenti, così il dispositivo di Moray, *ovviamente*, non poteva funzionare. Inoltre l'esaminatore dei brevetti specificò che *“Nessuna fonte naturale di energia data da onde elettriche è conosciuta dall'esaminatore ed è richiesta la prova dell'esistenza di una tale fonte”*. Cioè, non è stato sufficiente sviluppare un dispositivo per sfruttare una fonte sconosciuta di energia. La fonte di energia deve essere completamente descritta. Moray non fu in grado di farlo, così i brevetti furono negati.

L'invenzione di un dispositivo per estrarre energia libera dall'ambiente circostante potrebbe avere un valore enorme e certamente attirare l'attenzione di due gruppi di persone: un gruppo che potrebbe trarre un vantaggio economico e quindi vorrebbe rubare l'invenzione, e un secondo gruppo, che perdere investimenti sui dispositivi di energia esistenti e desidera interrompere lo sviluppo dell'invenzione.

Non sembra esserci alcuna ragione valida per non credere che le immagini, le deposizioni scritte e giurate e le considerazioni dei testimoni siano attendibili e che T.H.Moray sia effettivamente *“inciampato”* su un dispositivo in grado di estrarre energia dall'ambiente circostante

Da questo punto di vista è parso molto più fruttuoso il lavoro di Thomas Bearden, forse il leader più autorevole nel settore dell'energia libera degli ultimi anni, facendosi conoscere anche attraverso diverse pubblicazioni di libri in materia. Bearden ha una buona preparazione tecnica (MS in Ingegneria Nucleare) e una buona base militare (tenente colonnello dell'Esercito degli Stati Uniti, ritirato). Ha sviluppato una teoria che spiega la fonte di energia, che cercheremo di riassumere. Egli chiama la sua teoria *elettromagnetismo scalare*. E' una teoria del campo unificato in cui la gravità è insieme con i campi elettrico e magnetico. Il punto di partenza della sua teoria è la natura del vuoto stesso, un concetto condiviso da un certo numero di altri fisici. Bearden afferma: *“Il concetto moderno di vuoto è che è come un ribollire di plasma e gas. Tuttavia, è un gas molto strano, ogni particella nasce spontanea dal nulla (in base alla meccanica quantistica), e quasi subito si trasforma in qualcos'altro e/o scompare. Così il vuoto è abbastanza particolare, le particelle che lo compongono appaiono e scompaiono così rapidamente che non possono essere rilevate singolarmente. Tuttavia, mentre una particella virtuale esiste, essa è in moto, e così un flusso violento di *particelle fantasma* costituisce il vuoto. “La meccanica quantistica assume che il violento flusso di particelle fantasma del vuoto sia totalmente casuale. Cioè, nel flusso non esiste alcun modello deterministico”*. Bearden ritiene che il vuoto non sia lo spazio vuoto che la maggior parte di noi hanno assunto che sia. Piuttosto, esso è costituito da particelle troppo piccole per essere rilevate che si muovono dentro e al di fuori del nostro spazio quadridimensionale troppo velocemente per essere rilevate. Per definizione, non c'è modo di provare (o smentire) la sua teoria. Resterebbe solo un altro concetto interessante della fisica moderna, a meno che un secondo concetto provasse sperimentalmente che le particelle possono essere riunite in una collezione abbastanza grande da produrre risultati osservabili. Per analogia con il laser, questo potrebbe richiedere un'azione di *pompaggio* in cui l'energia deve essere introdotta per avviare l'azione. Una volta avviata, l'energia potrebbe fluire dal vuoto attraverso un ricevitore in un carico. Il flusso casuale di particelle virtuali attorno al ricevitore dovrebbe ricaricare o sostituire l'energia che viene rimossa. Ma quali effetti fisici tenderebbero a riunire il vuoto? Bearden ritiene che dovremmo iniziare con due campi magnetici opposti, in



modo che si annullino a vicenda. Egli sostiene, tuttavia, che i singoli campo possono interagire con il vuoto, anche se il campo risultante è nullo. Nella teoria dell'elettromagnetismo classico, i campi sono considerati la causa e i potenziali sono considerati l'effetto. Otteniamo il potenziale  $V$  integrando il campo e su un certo percorso. La forza su una particella carica è uguale a zero quando  $E$  è zero, indipendentemente dal valore di  $V$ . Poiché la maggior parte dei nostri strumenti misura la forza su una particella carica piuttosto che il valore assoluto di  $V$ , si tende a pensare che i potenziali siano un necessario effetto collaterale dei campi. La meccanica quantistica, d'altra parte, inizia con il potenziale come la causa e il campo come l'effetto. In molti casi si ottiene esattamente la stessa risposta con entrambe le interpretazioni. La questione in quei casi è filosofica. Ma che dire del caso di un potenziale non nullo e di un campo nullo, con un effetto osservabile che implica una sorta di realtà assoluta al potenziale? Tale sembra essere la situazione nell'effetto Aharonov-Bohm. Un modo per ottenere campi magnetici opposti è avvolgere due bobine sullo stesso cilindro, una sopra l'altra, una destrorsa e l'altra sinistrorsa, facendole funzionare in parallelo attraverso lo stesso voltaggio. Il campo magnetico all'interno del cilindro sarà molto prossimo allo zero. Tuttavia, non appena si guardano i vettori di campo, sembra che lo spazio all'interno del cilindro è per entrambe in tensione o compressione. L'analogia è quella di prendere una canna rigida in entrambe le mani e spingere le due estremità una verso l'altra o tentare di separarle. La forza netta sulla canna è zero così che non trasla nello spazio. Tuttavia, mentre le forze individuali sono in atto lo stress interno non è nullo. Se questo stress supera i limiti del materiale dell'asta, l'asta verrà modificata in lunghezza, anche se la forza netta di traslazione è rimasta nulla. Allo stesso modo, Bearden ritiene che lo stress interno prodotto dai campi magnetici opposti causerà una coesione delle particelle virtuali dello spazio in modo tale da osservare effetti macroscopici. E' ragionevole che saranno necessarie speciali frequenze, forme d'onda e configurazioni di bobine. Ci può essere un livello minimo del segnale prima che l'effetto sia osservato, molto simile all'effetto Zener. E' ovvio che, anche se l'ipotesi di Bearden è corretta, può essere molto difficile ottenere esperimenti riproducibili. Un dato inventore può avere un prototipo funzionante, ma non essere capace di produrlo su scala economica per la mancanza di un adeguato sviluppo teorico. Questo può essere il caso di Bearden e dei suoi collaboratori in quanto egli afferma quanto segue: "Molti inventori, con tre dei quali lavoro, hanno modelli di dimostrazione di macchine del genere ".Questo è stato scritto a Dicembre del 1987, ma tuttora non c'è stata ancora alcuna esposizione pubblica, che implica una sospensione sia nella riproducibilità che nel brevettare l'idea.

Gary L. Johnson conclude l'articolo dicendo che abbiamo preso in considerazione tre leader nella ricerca di una nuova forma di energia, il cui lavoro si estende su un intero secolo. ci sono state decine di altri ricercatori e molte organizzazioni che si sono dedicati a pubblicazioni in merito, dall'inventore senza alcun background tecnico all'ingegnere o fisico provvisto di PhD. C'è un grande *rumore* in letteratura. Alcune idee ovviamente non hanno senso. Ma c'è un segnale in tutto questo rumore? Vi è se Tesla, Moray e Bearden hanno ragione. Così la ricerca deve continuare se c'è qualche possibilità di successo.

Abbiamo fatto altre ricerche e abbiamo scoperto che il 26 marzo 2002, l'ufficio brevetti degli Stati Uniti ha concesso il brevetto US 6,362,718 B1 a Bearden e ad altri quattro inventori (Stephen L. Patrick, James C. Hayes, James L. Kenny e Kenneth D. Moore) per il *generatore elettromagnetico immobile* (MEG). L'annuncio è stato particolarmente importante perché l'ufficio brevetti è sempre stato estremamente scettico sui dispositivi *free-energy*, considerati parenti stretti dell'impossibile moto perpetuo. Abbiamo letto alcune notizie su questo dispositivo e sembra che ci siano diverse *scuole di pensiero*. In sintesi argomentazioni in favore del MEG, che abbiamo letto sul sito [www.progettomeg.it](http://www.progettomeg.it), sostengono che *"...la ricerca di Bearden e colleghi sia partita dalle equazioni originali dell'elettrodinamica e...dalla constatazione sperimentale di una asimmetria nel comportamento del campo elettromagnetico...IL MEG è in grado di sfruttare questa asimmetria e per chiarire come faccia viene proposta l'analogia con un pendolo che oscilla vicino ad un muro, dietro il quale tira un forte vento. Quando l'ampiezza dell'oscillazione raggiungerà e supererà il muro il pendolo riceverà una forte spinta dal vento e continuerà ad andare da solo, risospinto ogni volta indietro dal colpo di vento...Anche se l'esempio è un po' approssimativo, aiuta a rendere l'idea di una "inerzia" da superare e una "soglia" oltre la quale c'è un apporto "extra" di energia dall'esterno che vince gli "attriti" e mantiene il moto...Quindi, la prima legge della termodinamica è sempre valida: tanto il "pendolo dietro il muro" quanto il MEG, infatti, non creano energia dal nulla, ma trasformano quella di una fonte naturale (il vento o un campo di forza ancora sconosciuto)...pertanto il moto perpetuo non ha nulla a che vedere con il MEG"*. Successivamente, il gruppo di progettomeg ha aggiunto un aggiornamento a causa delle polemiche ricevute e hanno *"...verificato che il MEG non è così facilmente realizzabile come si pensava all'inizio. Si è appurato anche che il progetto inizialmente descritto era incompleto perché, forse intenzionalmente, erano stati omissi dettagli fondamentali...Appare abbastanza evidente che la commercializzazione del MEG, se mai vi sarà, non è questione di poco tempo"*.

Altri, come *Harald Reider*, in un articolo del 9 marzo 2003 dal titolo *"Serious inconsistencies in Beardens MEG and his other theories"* segnalano gravi incongruenze relative al MEG e alla teoria proposta da Bearden e che *"i risultati di semplici esperimenti rivelano che l'effetto sostenuto, non è altro che un errore di misurazione...e che altri dispositivi disponibili sul sito di Bearden sono stati esaminati e alcune interpretazioni fuorvianti sono state spiegate correttamente secondo l'elettrodinamica classica"*. L'articolo si conclude con le seguenti parole: *"E' stato dimostrato che ci sono dei difetti nel lavoro di Bearden che*

*suggeriscono che il suo dispositivo non funziona come previsto. Altri difetti fondamentali suggeriscono che a Bearden manca la conoscenza e la comprensione teorica dei concetti coinvolti nell'elettrodinamica che lo hanno portato a proporre errori di base come dispositivi di moto perpetuo e come teorie rivoluzionarie".*

In maniera più tradizionale, solo la meccanica quantistica considera l'esistenza di un'energia proveniente dal vuoto definita come "energia di punto zero".

Per definirla è necessario chiarire il significato di principio di indeterminazione del fisico tedesco Werner Heisenberg stabilito nel 1927.

La formulazione originale di Heisenberg del principio di indeterminazione è la seguente: *"Se eseguendo la misura per un oggetto qualsiasi, si riesce a determinarne la componente  $x$  della suo impulso con un'incertezza  $\Delta p$ , non si può, contemporaneamente, conoscerne la sua coordinata  $x$  di posizione con una precisione maggiore di  $\Delta x = h/\Delta p$ , dove  $h$  è un ben definito numero fisso, assegnato dalla natura. Esso è detto "costante di Planck" ed è approssimativamente uguale a  $6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ . Le incertezze nella posizione e nell'impulso, a ogni istante, debbono avere prodotto maggiore della costante di Planck".* (Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands- *La fisica di Feynman*, 3. *Meccanica quantistica*, Zanichelli)

L'esigenza di formulare tale principio è avvertita da Heisenberg a seguito dell'impossibilità sperimentale di costruire un apparecchio che permetta di "vedere" il percorso di un elettrone senza perturbarlo. Fu suggerito da Heisenberg che le nuove leggi della natura potevano risultare coerenti solo se esisteva una basilare limitazione delle nostre possibilità sperimentali, non riconosciuta precedentemente. Egli propose, come principio generale il suo *principio di indeterminazione*. Nessuno ha mai trovato (né immaginato) un modo di sfuggire a questo principio. Così noi dobbiamo ammettere che esso rappresenti una caratteristica fondamentale della natura. L'intera teoria della meccanica quantistica dipende dalla correttezza del principio di indeterminazione. Poiché la meccanica quantistica è una teoria che ha avuto tanti successi, la nostra fiducia nel principio di indeterminazione è rafforzata.

Quindi l'idea che una particella abbia una posizione e una velocità definite non è più ammessa. Possiamo solo dare delle probabilità! Se questo è vero, ne segue che la fisica deve rinunciare all'idea di voler prevedere con esattezza ciò che accadrà in una data situazione. E la fisica vi ha rinunciato. Si deve riconoscere che questo è un ripiegamento rispetto al nostro antico ideale di comprensione della natura. Può darsi che sia un passo indietro, ma nessuno ha ancora trovato il modo di evitarlo.

Inoltre, sulla base di questo principio che definisce una proporzionalità inversa fra l'incertezza della quantità di moto e della sua posizione, si può giustificare la distinzione atomica tra nucleo ed elettroni: se gli elettroni fossero collocati nel nucleo, ne conosceremmo la posizione con precisione e il principio di indeterminazione richiederebbe in conseguenza che essi possedessero una quantità di moto molto grande, cioè un'elevatissima energia cinetica. Conseguentemente, gli elettroni si staccerebbero dal nucleo. Ma in conclusione gli elettroni giungono ad un compromesso: lasciano essi stessi un piccolo spazio per tale indeterminazione e poi oscillano con un movimento minimo.

Ciò vale anche quando un cristallo viene raffreddato fino allo zero assoluto. Contrariamente alle affermazioni della fisica classica, a questa temperatura gli atomi non cessano di muoversi, ma continuano ad agitarsi: se smettessero di muoversi, sapremmo dove si trovano e che sono in quiete, violando il principio di indeterminazione. Infatti non potendo sapere dove essi sono collocati, né a che velocità si spostano, devono essere necessariamente in movimento continuo. Abbassando la temperatura, la vibrazione diminuisce sempre di più, finché allo zero assoluto, vi è un minimo di vibrazione che gli atomi possono avere, ma *non zero*. A questo punto siamo in grado di definire l'energia di punto zero come energia vibrazionale conservata da parte delle molecole, anche ad una temperatura di zero assoluto. Nell'articolo "The Classical Vacuum" pubblicato su Scientific American (agosto 1985) l'autore Timothy H. Boyer afferma che *"il vuoto non è vuoto. Anche quando tutta la materia e la radiazione sono state rimosse da una regione di spazio, il vuoto della fisica classica rimane riempito con un motivo distintivo di campi elettromagnetici..."* Aristotele e i suoi seguaci credevano che nessuna regione dello spazio potesse essere completamente vuota. Questa idea che *"la natura aborrisce il vuoto"* è stata respinta dalla rivoluzione scientifica del 17° secolo; per ironia della sorte, però la fisica moderna è giunta a detenere una visione simile.

Oggi non vi è alcun dubbio che una regione dello spazio può essere svuotata dalla materia ordinaria, almeno in linea di principio. Nella visione moderna, tuttavia, una regione di vuoto è ben lontana dall'essere vuota. Ha una struttura complessa, che non può essere eliminata con nessun mezzo immaginabile.

Questo uso delle parole può sembrare sconcertante. Se il vuoto non è vuoto, come può essere chiamato il vuoto? Oggi i fisici definiscono il vuoto, come tutto ciò che è rimasto in una regione di spazio quando è stata svuotata di tutto ciò che può essere rimosso da essa mediante mezzi sperimentali. Il vuoto è il vuoto ottenibile sperimentalmente.

La creazione di una regione vuota procede a tappe, parallelamente allo sviluppo storico delle idee relative al vuoto. Nel 17° secolo si pensava che un volume completamente vuoto potesse essere creato rimuovendo tutta la materia, e in particolare tutti i gas. Nel tardo 19° secolo è emerso che quando tutta la materia è stata rimossa, tuttavia, lo spazio non è vuoto, ma contiene ancora una radiazione termica, ma si riteneva che la radiazione potesse essere eliminata per raffreddamento. In realtà solo una parte della radiazione è termica,

e può essere rimossa mediante raffreddamento, ma c'è anche una componente atermica della radiazione che ha un'origine più sottile. Questa radiazione residua, che è stata analizzata solo negli ultimi anni, è una caratteristica intrinseca del vuoto, e non può essere soppressa. Anche se fosse possibile ridurre la temperatura del vuoto allo zero assoluto, persisterebbe un campione di onde elettromagnetiche fluttuanti. In definitiva, la teoria (prima) e la sperimentazione (poi) hanno dimostrato di non riuscire a realizzare, neanche a queste condizioni, uno spazio completamente vuoto in quanto questo continuerebbe a manifestare la presenza di radiazioni atermiche, denominate poi radiazioni del punto zero, irradiate da elettroni in oscillazione costante.

L'esistenza di tali radiazioni e quindi dell'energia di punto zero, venne dimostrata per via sperimentale nel 1948 da Hendrik BG Casimir dei laboratori Philips Research di Eindhoven (Paesi Bassi), con la registrazione del cosiddetto effetto Casimir.

Casimir misurò la forza che agisce su due lastre conduttrici, disposte nel vuoto e mantenute parallele a piccola distanza l'uno dall'altro. Se i piatti hanno carica elettrica, le leggi elementari dell'elettrostatica prevedono una forza tra di essi, ma Casimir ha esaminato il caso in cui i piatti sono privi di carica. Anche in questo caso una forza può avere origine dalla radiazione elettromagnetica che circonda i piatti. L'origine di questa forza non è immediatamente evidente, ma può essere meglio compresa attraverso un'analogia meccanica: supponiamo che una corda liscia venga fatta passare per i fori di due blocchi di legno, e che la parte di corda tra i due blocchi venga fatta vibrare trasversalmente, sui blocchi agirà una forza in prossimità dei fori, ed essi tendono a scivolare lungo la corda l'uno verso l'altro. La forza è dovuta al fatto che il movimento trasversale della corda non è possibile quando passa attraverso il blocco, e così in quei punti le onde sulla corda si riflettono. La situazione proposta nell'esperimento di Casimir è simile. I piatti di metallo sono l'analogo dei blocchi di legno e i campi di radiazione elettrico e magnetico fluttuanti rappresentano la corda che vibra. L'analogo del foro nel blocco di legno è la conduttività dei piatti metallici; così come le onde sulla corda sono riflesse dal blocco così le onde elettromagnetiche sono riflesse dai piatti. In questo caso vi è radiazione su entrambi i lati di ciascun piatto, e quindi le forze tendono ad annullarsi, ma non del tutto e rimane una piccola forza residua che è attrattiva. Questa forza è direttamente proporzionale alla superficie delle lastre e dipende anche sia dalla distanza tra le lastre che dallo spettro della radiazione elettromagnetica fluttuante. Finora questa analisi è del tutto coerente con la visione del vuoto del 19° secolo. La forza che agisce sulle lastre si attribuisce alla radiazione termica fluttuante. Quando la temperatura viene ridotta allo zero assoluto, dovrebbero scomparire sia la radiazione termica sia la forza tra le lastre. L'esperimento contraddice questa previsione.

L'effetto Casimir starà alla base anche di diversi esperimenti successivi: fra i più celebri quello eseguito dal fisico olandese M.J. Sparnaay nel 1958, che misurò la forza residua attrattiva anche allo zero assoluto.

La forza osservata nell'esperimento di Casimir ha due componenti: la radiazione termica ad alta temperatura da luogo ad una forza direttamente proporzionale alla temperatura e inversamente proporzionale al cubo della distanza tra le piastre. Questa forza scompare allo zero assoluto come la stessa radiazione termica. La forza associata alla radiazione di punto zero è indipendente dalla temperatura ed è direttamente proporzionale alla superficie delle lastre e inversamente proporzionale alla quarta potenza della loro distanza; la costante di proporzionalità è pari a  $1,3 \cdot 10^{-18} \text{ erg} \cdot \text{cm}$ . Anche se tale forza è piccola è misurabile se le lastre sono sufficientemente vicine tra di loro. Qualunque sia l'entità dell'effetto Casimir, la sua stessa esistenza indica che vi è qualcosa di fondamentalmente sbagliato nell'idea del vuoto del 19° secolo. Se si adatta la teoria classica all'esperimento, allora anche alla temperatura zero il vuoto classico non può essere completamente vuoto, ma deve essere riempito con i campi elettromagnetici classici responsabili della forza attrattiva misurata. Questi campi del vuoto sono ora chiamati radiazione elettromagnetica di punto zero.

Per molto tempo l'effetto Casimir è stato poco più di una curiosità teorica, ma negli ultimi anni si è avuto un fiorire di lavori sull'argomento, da quando i fisici hanno da un lato messo a fuoco il fatto che la forza di Casimir può influenzare i microsistemi e dall'altro l'avanzamento della strumentazione ha loro reso possibile la misura di questa forza con crescente precisione.

Negli esperimenti effettuati più di recente, si è favorita la sostituzione di una delle due lastre con una sfera metallica di raggio  $R \gg L$  (distanza sfera-piano), poiché è risultato molto difficile realizzare in modo perfetto lastre piane e parallele. Ricordiamo:

Steve Lamoreaux, Università Washington di Seattle, 1997.

Pendolo di torsione con compensazione elettrostatica

Piano e sfera  $R=12,5 \text{ cm}$      $L=0,6-6 \text{ }\mu\text{m}$     Precisione 5% (??)

Umar Mohideen, Università di Riverside, 1988

Microscopio a forza atomica

Piano e sfera  $R=100 \text{ }\mu\text{m}$      $L=100-500 \text{ nm}$     Precisione 1-2%

Federico Capasso et al, Bel Lab, 2001

Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)

Piano e sfera  $R=100 \text{ }\mu\text{m}$      $L=100-500 \text{ nm}$

G.Bressi, G.Carugno, R.Onofrio e G.Ruoso Laboratori Nazionali di Legnaro Istituto di Fisica Nucleare, 2002

Nell'articolo "Exploiting Zero-Point Energy" pubblicato su Scientific American (Dicembre 1997), l'autore Philip Yam si pone la domanda: "*L'energia riempie lo spazio vuoto, ma c'è molto da sfruttare, come alcuni propongono? Probabilmente no*".

L'autore afferma che all'interno dell'Institute for Advanced Studies di Austin i ricercatori testano i congegni che possono estrarre energia dal vuoto. Le richieste di dispositivi free-energy persistono, ovviamente, anche se inevitabilmente violano almeno una legge della termodinamica. L'energia del vuoto, tuttavia, è una cosa molto reale. Secondo la fisica moderna, il vuoto non è la tasca del nulla, ma l'esatta quantità di "energia di punto zero" che risiede nel vuoto è sconosciuta. Alcuni sono ottimisti e pensano che ci attende una ricca offerta se solo sapessimo come attingere ad essa. Ad esempio, in un'intervista per la PBS's Scientific American Frontiers, Harold E. Puthoff, il direttore dell'Institute for Advanced Studies di Austin, ha osservato "*...pensiamo che il 21° secolo potrebbe essere l'età dell'energia di punto zero*". Questo concetto non è comunque condiviso dalla maggioranza dei fisici, secondo i quali l'energia del vuoto sia minuscola.

Come concetto scientifico, l'esistenza dell'energia di punto zero non è controversa, anche se la capacità di sfruttarla ha sollevato non poche critiche, soprattutto dal momento in cui vi è stata dichiarata, da parte di alcuni, la possibilità di dar vita a delle macchine di moto perpetuo. Però non è stato ancora dimostrato che un dispositivo alimentato da energia di punto zero funzioni.

Le conclusioni potrebbero quindi sembrare piuttosto sconfortanti: sembra molto lontana l'effettiva concretizzazione dei sogni di Tesla di una energia gratuita per tutti e che possa porre fine alle contese mondiali per aggiudicarsi i maggiori bacini petroliferi. Forse in una realtà incentrata esclusivamente sul guadagno e il proprio interesse personale non vi è più spazio per i filantropi? In ogni caso, mai perdere la speranza: "*C'è molta confusione nella letteratura. Alcune teorie sono ovviamente sciocchezze. La ricerca deve essere portata avanti fino a quando c'è una minima possibilità di successo.*" (Gary L. Johnson)

La possibilità di trasmettere energia elettrica senza l'utilizzo di fili, già predicata da Tesla, trova riscontro nella tecnologia attuale, in via di sperimentazione, con "witricity". Il termine è composto da "Wireless Electricity", ovvero elettricità senza fili, e viene utilizzato per la prima volta nel 2005 dal capo del team dei ricercatori del MIT, che si è dedicato al progetto con approccio pratico. L'idea della "witricity" è nata nella sua mente in funzione della possibilità di sviluppare apparecchiature elettroniche in grado di provvedere autonomamente al proprio mantenimento elettrico, come per esempio batterie di cellulari autoricaricabili.

Con questo progetto si spera di poter ampliare il campo di applicazione delle scoperte a cui pervenì Tesla dopo l'esperienza prima di Colorado Springs (1899) e poi della Wanderclyffe Tower (1903).

Probabilmente la scoperta più importante risalente a Colorado Springs fu quella delle "onde stazionarie terrestri" che avrebbe permesso ovunque la trasmissione di energia senza fili e senza perdite a qualunque distanza. Sebbene la portata di una tale affermazione è molto più prossima a quella che sembra la fervida immaginazione di un visionario, oggi sappiamo che non era totalmente da scartare.

Infatti ciò gli consentì di provare che la Terra può essere utilizzata come un conduttore, caratteristica che le permette di rispondere in maniera efficace a vibrazioni elettriche ad una certa frequenza, previsione che verrà confermata da Schumann attorno gli anni '50. A questo periodo risalgono infatti alcune importanti dichiarazioni del fisico tedesco circa l'esistenza di una cavità di risonanza terrestre, individuabile fra la crosta e la ionosfera con una circonferenza massima di 40.000 km e un'altezza di 100 km. Nonostante le diverse difficoltà nel rintracciare delle informazioni ulteriori su quella che in seguito venne chiamata la "Cavità Schumann", abbiamo reperito un progetto realizzato da parte di autorevoli istituti di ricerca come il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Ferrara, il Geomagnetic System e l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia di L'Aquila, Abruzzo. La risonanza di Schumann avviene perché lo spazio tra la superficie della Terra e la ionosfera conduttiva agisce come una guida d'onda, in particolare le dimensioni limitate del nostro pianeta, consentono la realizzazione di una cavità di risonanza per le onde elettromagnetiche nella banda ELF. Le scariche dei fulmini sono considerate la prima sorgente naturale delle risonanze di Schumann. Ciò era già stato intuito da parte di Tesla durante i mesi trascorsi a Colorado Springs quando sostenne che il fulmine non è altro che un fenomeno vibratorio in grado di innescare onde stazionarie dalla Terra dopo averla energizzata. Così nel 1899 Tesla trasmise dieci milioni di volt di corrente ad alta frequenza alla Terra, con l'intento di riuscire a produrre quel fenomeno che lui aveva definito "insorgenza risonante", accingendosi poi a sintonizzare i suoi strumenti in modo che fossero in perfetta risonanza con la Terra. Immediatamente dopo un enorme fulmine emerse dalla sua bobina, prodotto dell'onda che dopo aver raggiunto il lato opposto del pianeta rimbalzò, ritornando al punto d'origine. Tesla diede una prova della grande potenza dell'uomo nel riuscire a manipolare una delle più maestose e terrificanti forze della natura: il fulmine. Oggi questi studi addizionati alle più attuali intuizioni di Schumann, sono proiettati verso un loro giovevole impiego nello studio di fenomeni climatici e sismici, suggerendo la speranza di poter facilmente prevedere la distribuzione spaziale dei fulmini e dei terremoti ed evitare così le loro catastrofiche e purtroppo ben conosciute conseguenze.

Ma il vero scopo di Nikola Tesla continuava ad essere la possibilità di sfruttare la risonanza naturale della Terra per poter trasmettere potenza e comunicazioni senza l'utilizzo di cavi in qualunque punto del globo: collocando una piccola antenna nel proprio cortile chiunque avrebbe avuto a disposizione una fonte inesauribile di energia elettrica. Questo era il più grande sogno di Tesla, e forse oggi non siamo così lontani dal dargli forma.

Nelle ricerche del MIT (Massachusetts Institute of Technology) l'attenzione si è focalizzata sul fenomeno della risonanza magnetica. È stato attuato un significativo esperimento in cui due bobine di rame appositamente caricate, di 60 cm di diametro, orientate lungo lo stesso asse e distanti tra loro 7 piedi (più di 2 metri), sono utilizzate l'una da sorgente e l'altra da terminale.

Una è connessa induttivamente ad una sorgente energetica, l'altra ad una lampadina da 60 Watt. La prima produce onde che raggiungono la seconda, che vibra alla stessa frequenza e raccoglie gran parte dell'energia. Qualunque altro oggetto con una frequenza differente subisce una scarsa influenza e, respingendo il campo magnetico, indirizza l'elettricità a bersaglio con maggiore precisione. Il dispositivo accende la lampadina, anche quando la diretta linea visiva del campo viene interrotta tramite un pannello di legno. Diversamente dai sistemi di trasferimento energetico senza fili nel campo "lontano", basati sulla connessione nel campo elettrico, costruiti da Tesla alla fine del XIX secolo, la "witricity" utilizza la connessione indotta nel campo "vicino", attraverso i campi magnetici, i quali interagiscono molto più debolmente con gli oggetti circostanti, inclusi i tessuti biologici, essendo perciò in grado di entrare nelle regole di sicurezza. Grazie a questa tecnologia si potrebbero creare stanze attrezzate in modo tale da ricaricare la batteria di qualunque apparecchio elettronico presente all'interno, o fornendo energia al portatile, alimentandolo direttamente.

*"Nonostante il successo dell'impresa ed il meritato eco mediatico nella società scientifica, il prototipo del MIT è ancora molto concettuale",* spiega Valter Bella, laureato in fisica e autore di numerose pubblicazioni e brevetti internazionali, *"in quanto peso e dimensioni lo rendono tutt'altro che "portabile", i loop sono molto grandi e profondi e la loro taratura per ottenere la risonanza avviene manualmente, stringendo ed allargando le spire costituenti i medesimi, con tempi di sintonia lunghissimi. Proprio osservando i punti deboli di questo prototipo, e cercando di ovviarli, è stato realizzato il prototipo TILab".* Compatto, leggero, costituito da un loop a singola spira e quindi senza profondità e necessità di sostegno, il TILab vanta non solo una maggiore maneggevolezza ma anche una migliore efficienza rispetto all'altro prototipo: pur interponendo tra i loop un ostacolo di consistenti dimensioni, anche metallico, *"l'energia del campo magnetico trasmesso arriva ancora a destinazione",* come spiega ancora Bella. Nonostante si sia pervenuti a traguardi molto significativi, questi potenziali sostituzioni delle batterie e di fili presentano ancora dei 'punti deboli' legati in prima istanza alla natura delle onde evanescenti i cui effetti sono percepibili solo fino ad un terzo della loro lunghezza d'onda, per poi ricadere esponenzialmente, vanificando rapidamente la resa del sistema e poi alla necessità di sopprimere la corrente elettrica indesiderata del campo lontano sia per le interferenze radio presenti sulla frequenza in uso e per ragioni d'impatto biologico.

Se questi problemi verranno superati i campi d'applicazione di questa tecnologia saranno smisurati.

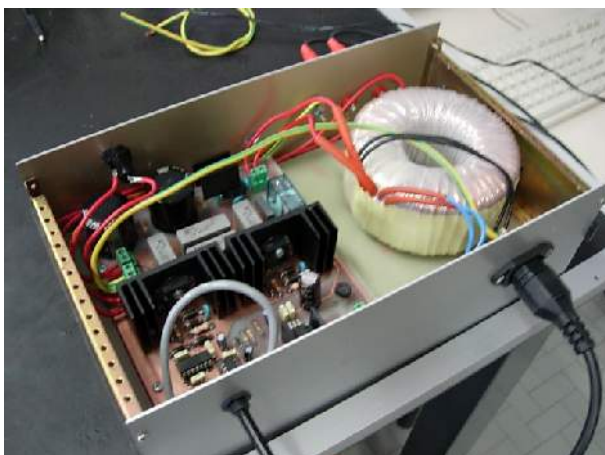
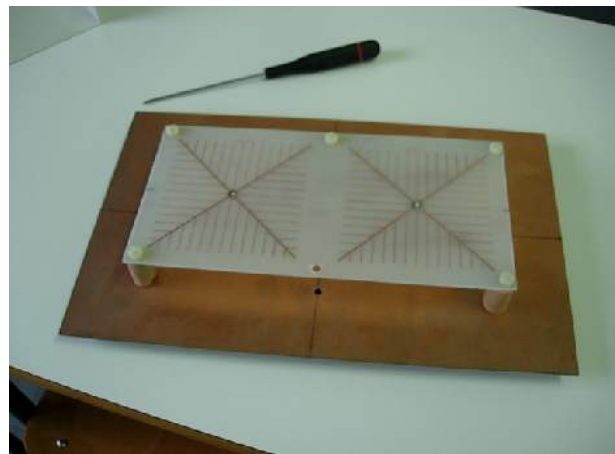
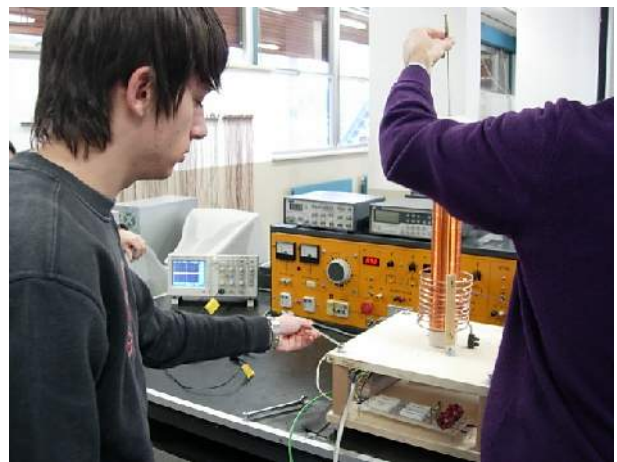
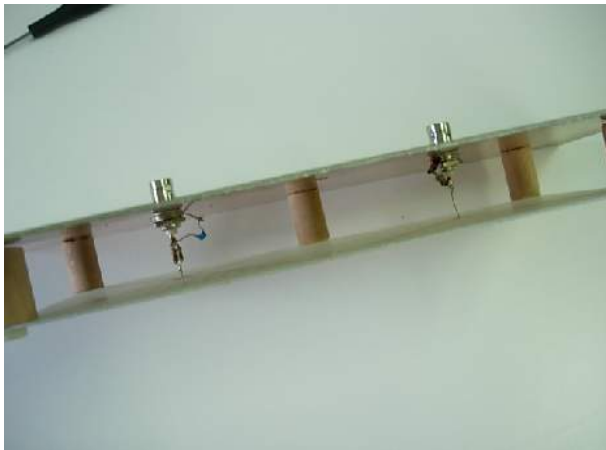
In ogni caso di fronte a queste meraviglie della tecnica e della scienza il nostro sguardo si rivolge nuovamente al passato: non si può certo rimanere indifferenti al pensiero di quanto avrebbe potuto fare questo inventore godendo degli strumenti tecnologici che abbiamo a disposizione oggi. Forse avrebbe potuto pervenire a quella realtà sociale che è sempre sopravvissuta come un'utopia: una egualitaria distribuzione dell'energia avrebbe annullato le distanze e condotto verso la fine del fanatismo xenofobo. Non è difficile da credere dal momento che la società è sempre stata mossa unicamente dal proprio interesse personale, spesso tradotto in economico, a cui né alleanze né atti politici hanno saputo dare una significativa risposta. Tesla era tormentato dal desiderio di contatti più stretti e di una migliore comprensione fra persone e comunità. Ed è il sogno che lo accomuna con noi.



## COSTRUZIONE DEI PROTOTIPI E COLLAUDO

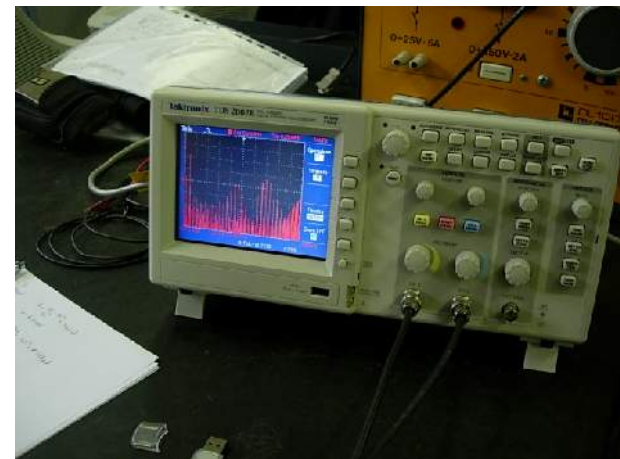
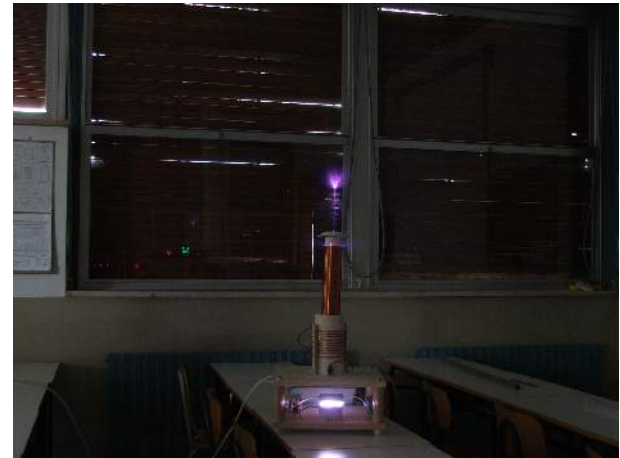
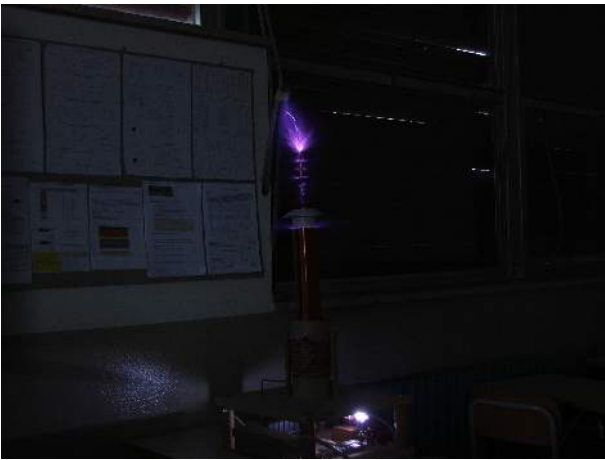
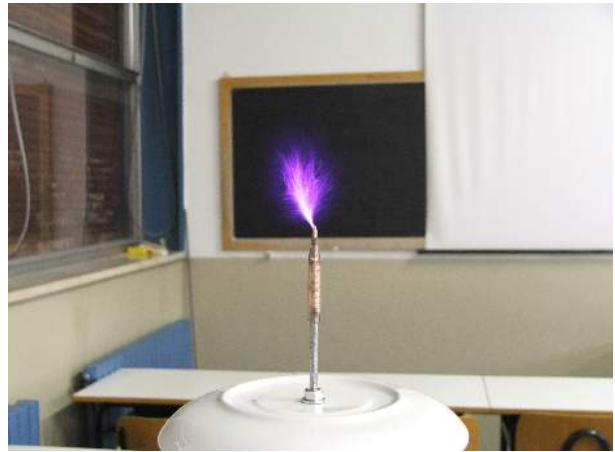
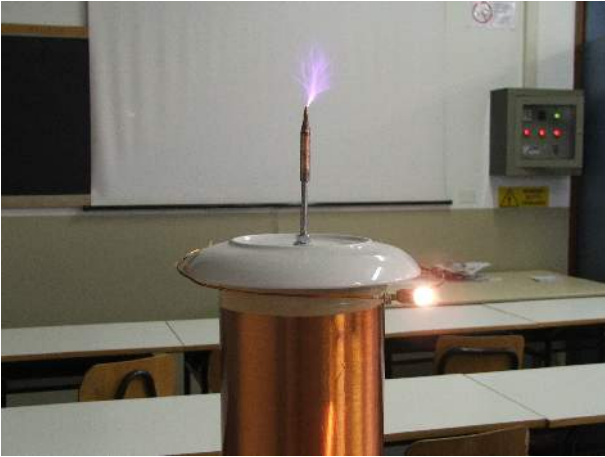


# COSTRUZIONE DEI PROTOTIPI E COLLAUDO





# MISURE





# RELAZIONE

