

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

SCUOLA DI SCIENZE  
Corso di Laurea in Fisica

STUDIO DEI PRINCIPI  
DI FUNZIONAMENTO E REALIZZAZIONE  
DI UNA BOBINA DI TESLA

Tesi di Laurea in Fisica

Relatore:  
Dott. Matteo Franchini

Presentata da:  
Naglieri Simone

Anno Accademico 2023-2024



# Ringraziamenti

Questa bobina di Tesla non sarebbe mai esistita senza il supporto della RENCO SPA di Pesaro (<https://www.renco.it/>), che ha provveduto a fornirci la maggior parte dei materiali di cui avevamo bisogno nei vari mesi dedicati alla costruzione della bobina di Tesla.

Un ringraziamento particolare lo dedico al mio collega Martino Garelli, studente all'università di Fisica di Bologna, che ha accettato di far parte del progetto lavorandoci a sua volta per sua tesi triennale.

Ringrazio il mio relatore Franchini Matteo, il Professor Gabrielli Alessandro e l'ateneo per avermi dato disponibilità degli spazi (laboratorio OPH <https://site.unibo.it/openphysicshub/en>) e delle strumentazioni per proseguire rapidamente alla costruzione della nostra bobina di Tesla.

Un ringraziamento particolare ai miei compagni di corso per l'entusiasmo mostratomi per il progetto, in particolare a Veronica Mungai che ci ha supportato per l'intera durata dell'esperienza.

Infine, un ultimo ringraziamento ai miei genitori che sono stati indispensabili nella realizzazione concreta del progetto, nella stesura di questa tesi e nell'implementazione del nostro sito.

Riporto, infine, il link al sito appena citato il quale contiene le stesse informazioni che sono presenti in questa tesi e quelle che abbiamo preferito omettere. Tra queste sono presenti ulteriori foto, video e maggiori dettagli sulla costruzione della nostra bobina di Tesla.



Figura 1:  
*QR Code al sito ufficiale della nostra bobina di Tesla: Sparky:*  
*<http://www.bobinaditesla.naglieri.it/>*



# Indice

<b>Abstract</b>	<b>6</b>
<b>Introduzione</b>	<b>8</b>
<b>1 Primo approccio alla Bobina di Tesla</b>	<b>10</b>
1.1 Cenni storici . . . . .	10
1.2 Definizione e applicazioni . . . . .	10
1.3 Il nostro caso: Sparky . . . . .	11
<b>2 Principio di funzionamento</b>	<b>12</b>
2.1 Il circuito LC . . . . .	12
2.1.1 Soluzione dell'omogenea . . . . .	14
2.1.2 Soluzione forzante sinusoidale . . . . .	15
2.2 Analisi e funzionamento . . . . .	18
2.2.1 Primo momento: carica condensatore . . . . .	19
2.2.2 Secondo momento: trasferimento dell'energia . . . . .	20
<b>3 Concezione e costruzione</b>	<b>22</b>
3.1 Schema del circuito . . . . .	22
3.2 Trasformatore HV . . . . .	23
3.2.1 Lunghezza fulmini prodotti . . . . .	25
3.3 Condensatori del primario . . . . .	26
3.4 Spinterometro: tipologia e funzionamento . . . . .	28
3.5 Bobina del primario: induttore . . . . .	32
3.5.1 "Effetto pelle" alle alte frequenze . . . . .	33
3.6 Altri contributi al primario . . . . .	35
3.6.1 Limitatore di potenza: il Variac . . . . .	35
3.6.2 Condensatore PFC ("correttore di fase") . . . . .	35
3.6.3 Sistema di sicurezza: filtro di Terry Fritz . . . . .	37
3.6.4 Sistema di sicurezza: filtro di linea per corrente alternata . . . . .	39
3.6.5 Sistema di sicurezza: protezione condensatori . . . . .	40
3.6.6 Sistema di sicurezza: protezione induttore primario . . . . .	41
3.7 Bobina del secondario: induttore . . . . .	42
3.8 Carico superiore: geometria e dimensioni . . . . .	44
3.8.1 Potere delle punte . . . . .	47
3.9 Messa a terra . . . . .	49
<b>4 Risultato finale e Misure</b>	<b>50</b>
4.1 "Accordare" la bobina: la frequenza di risonanza . . . . .	50
4.2 Misura delle componenti della bobina . . . . .	52
4.3 Misura del segnale elettromagnetico . . . . .	53
4.4 TeslaMap e JavaTC . . . . .	55
<b>Conclusioni</b>	<b>58</b>

<b>A</b>	<b>Appendice</b>	<b>60</b>
A.1	Guadagno di tensione e trasferimento energetico . . . . .	60
A.2	Perdite energetiche . . . . .	62
A.3	Relazioni empiriche e stime delle grandezze circuitali . . . . .	64
A.4	Avvertenze e precauzioni: cosa NON fare con la bobina . . . . .	67
A.5	Piccoli esperimenti e curiosità . . . . .	70
<b>B</b>	<b>Bibliografia</b>	<b>71</b>



# Abstract

La bobina di Tesla è stata, fin dalla sua invenzione nel 1891, una delle icone più rappresentative della fisica sperimentale e della ricerca scientifica. Sarà obiettivo di questa tesi quello di guidare il lettore verso la comprensione del funzionamento teorico di una bobina di Tesla e di spiegare nel dettaglio il suo funzionamento, fornendo le basi per una comprensione critica di ogni sua parte.

Questo scopo verrà raggiunto attraverso l'analisi di Sparky, una bobina di Tesla costruita appositamente per questo progetto e la cui teoria di funzionamento e costruzione verranno approfondite nel dettaglio nei vari paragrafi e sottoparagrafi.

Particolare attenzione nel testo sarà dedicata allo sviluppo dei sistemi di sicurezza che concorrono a rendere la bobina di Tesla sicura e a ridurre la probabilità di rottura della stessa nel tempo e durante il suo utilizzo.

Obiettivi ulteriori di questa tesi saranno di rappresentare una guida per chi volesse replicare una bobina di Tesla e di fornire un punto di riferimento per chiunque volesse migliorare la propria comprensione dei meccanismi alla base di questo strumento, delle tecniche per la misurazione e il design delle componenti circuitali, come la frequenza di risonanza di un circuito LC.



# Introduzione

Una bobina di Tesla è un trasformatore risonante ad alta tensione e bassa corrente, capace di generare corrente ad alta frequenza.

Nei successivi capitoli verrà approfondita la teoria di funzionamento e costruzione di Sparky, una bobina di Tesla costruita appositamente per questo progetto.

Obiettivo principale di questo lavoro di tesi è stata la costruzione della bobina di Tesla sopra citata e l'approfondimento di contenuti teorici che superano quelli di un corso di elettromagnetismo classico e la loro applicazione sperimentale.

Tra gli argomenti teorici più importanti si cita: la mutua induzione, il circuito LC, il teorema della punte, la frequenza di risonanza, la fisica delle alte tensioni, il concetto di rottura del dielettrico e l'effetto pelle. Altri argomenti importanti affrontati durante lo studio della bobina di Tesla sono stati: la sperimentazione diretta del campo elettrico e magnetico, l'importanza dell'analisi delle perdite energetiche, la realizzazione di una messa a terra elettrica e i problemi legati al suo effettivamente isolamento dalla rete elettrica principale e il rapporto tra teoria e verifica sperimentale.

In particolare si cercherà di mettere a fuoco questo ultimo punto, relativo al rapporto tra teoria e realizzazione sperimentale, fornendo soluzioni concrete ai problemi che la teoria solleva.

I contenuti nei capitoli saranno suddivisi nel seguente modo:

- Capitolo 1: sono riportate informazioni storiche introduttive e una breve descrizione di cosa sia una bobina di Tesla. Verrà, inoltre, brevemente descritto il nostro caso specifico: Sparky.
- Capitolo 2: si studia la fisica del circuito LC, fondamentale alla comprensione dell'andamento della corrente nella bobina di Tesla. A seguito si sfrutta questa teoria per descrivere la logica di funzionamento della bobina, ignorando i problemi sperimentali e limitandosi a una semplice trattazione teorica del suo funzionamento.
- Capitolo 3: ci sarà una descrizione più approfondita del circuito elettrico di Sparky, in cui saranno messe in evidenza tutte le componenti circuitali precedentemente trascurate (come i sistemi di sicurezza) in quanto non fondamentali al funzionamento della bobina.  
Verrà quindi approfondito il ruolo e le caratteristiche di ogni componente del circuito, approfondendo dove possibile il rapporto tra previsione teorica e misurazione sperimentale delle componenti circuitali più importanti o delle dimensioni geometriche della bobina di Tesla.
- Capitolo 4: verrà spiegato il concetto di "accordamento" della bobina di Tesla, step fondamentale per il corretto funzionamento della stessa. Inoltre sono presenti le spiegazioni e le istruzioni su come misurare la frequenza di risonanza della bobina di Tesla e la misura del segnale elettromagnetico prodotto dalla stessa.  
Infine, si dedicherà spazio a TeslaMap e JavaTC, simulatori online di bobine di Tesla che hanno avuto un ruolo fondamentale nella simulazione di Sparky e nella previsione degli ordini di grandezza di alcune componenti circuitali (come gli induttori e i condensatori).

- Nelle Appendici (A) si possono trovare approfondimenti teorici legati alle perdite energetiche e alle stime di alcune grandezze fisiche (come la massima tensione raggiungibile nella bobina di Tesla). Sono presentate alcune avvertenze e indicazioni su come comportarsi in presenza di una bobina di dimensioni e potenza simili a quelle di Sparky e saranno elencate alcune curiosità e esperimenti divulgativi con l'utilizzo di bobine di Tesla.

Questo progetto nasce dalla volontà di concretizzare la teoria studiata durante i vari corsi di studio in qualcosa di tangibile e memorabile.

Il progetto si pone il risultato di verificare gli esiti di una teoria perfetta, come l'elettromagnetismo, laddove la teoria non offre le stesse soddisfazioni di quelle che uno studente possa provare alla vista di un fulmine generato da un apparato costruito dalle proprie mani.

A questa necessità personale nasce Sparky, una bobina di Tesla che con i suoi 220 W di potenza mette in evidenza il frutto del risultato di tre anni di studio.

# 1 Primo approccio alla Bobina di Tesla

## 1.1 Cenni storici

Siamo nel 1891, 23 giugno, quando lo "United States Patent and Trademark Office" (in italiano : Ufficio brevetti e marchi degli Stati Uniti [1]) pubblica un brevetto dal nome "Electric lighting system" (tradotto: Sistema di illuminazione elettrico [2]) in cui Nikola Tesla descrive la sua bobina disruptiva, brevettando tale circuito per la prima volta. Le prime dimostrazioni pubbliche risalgono a qualche mese addietro, le quali, accompagnate da una sua conferenza del 20 maggio dal nome "Experiments with Alternate Currents of Very High Frequency and Their Application to Methods of Artificial Illumination" attira a se la curiosità di tutto il mondo con la sua cosiddetta "corrente senza fili" [3]. Oggi Nikola Tesla viene ricordato sotto i titoli di: inventore, ingegnere elettrico, ingegnere meccanico e futurista, noto soprattutto per i suoi contributi nel sistema di alimentazione elettrica a corrente alternata e pioniere nel campo delle telecomunicazioni [4].

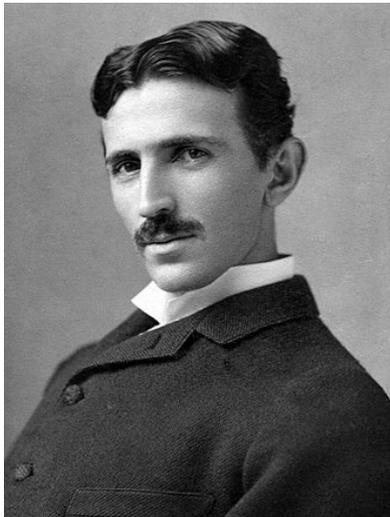


Figura 2: *Nikola Tesla nel 1890.*

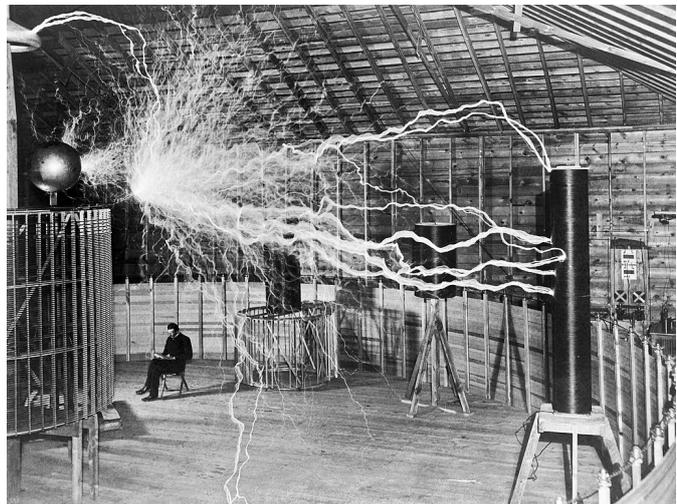


Figura 3: *Famosa immagine di Tesla seduto accanto al suo "magnifying transmitter". [5]*

## 1.2 Definizione e applicazioni

Una bobina di Tesla è un trasformatore risonante ad alta tensione, bassa corrente, capace di generare corrente ad alta frequenza. Nella cultura popolare è nota per la sua capacità di generare fulmini molto simili a quelli di origine atmosferica, anche se di entità decisamente ridotta.

Nel passato ha avuto svariate applicazioni partendo dalla generazione di onde a raggi-X, alla trasmissione di energia elettrica senza fili, fino all'elettroterapia. Oggi vede minori applicazioni limitandosi agli spettacoli di intrattenimento e didattici, sebbene delle bobine di piccole dimensioni siano ancora utilizzate come rilevatori di perdite per i sistemi ad alto vuoto.

### 1.3 Il nostro caso: Sparky

Sparky (Figura 4) è una bobina di Tesla di medie dimensioni. Questo in quanto ha una potenza approssimativamente pari a 220 W, valore piuttosto basso se paragonato alle bobine di Tesla costruite da professionisti, le quali arrivano facilmente alle prime migliaia di Watt.



Figura 4: *La nostra bobina di Tesla: Sparky.*

La costruzione di Sparky ha richiesto otto mesi di lavoro complessivo a partire dai primi studi sul suo funzionamento alla sua effettiva accensione.

Diverse componenti (come il design dello spinterometro) sono state rivisitate più volte e, data l'abbondante quantità di materiale a disposizione, è stato il tempo la risorsa più preziosa, a tal punto da terminare il progetto a sole due settimane dalla deadline.

L'esperienza non è stata priva di difficoltà in quanto non è stato possibile fare test per confermare il corretto funzionamento delle varie componenti.

Si è quindi adottato un approccio in cui tutte le componenti sono state costruite separatamente e successivamente assemblate, in modo da avere una bobina di Tesla modulare che facilitasse la rimozione di eventuali parti che non permettessero il corretto funzionamento della bobina stessa.

Fortunatamente non sono state apportate modifiche sostanziali, se non la costruzione di un secondo carico superiore toroidale e un secondo spinterometro.

Tra i vari traguardi personali si può sottolineare come questa tipologia di progetti porti grossi vantaggi nella formazione nel campo delle alte tensioni e nel miglioramento delle abilità fai-da-te.

## 2 Principio di funzionamento

### 2.1 Il circuito LC

Al fine di comprendere al meglio la sezione relativa all'analisi e funzionamento (2.2), è d'obbligo affrontare una breve descrizione del cosiddetto "circuito LC".

Questo studio sarà fondamentale per comprendere l'andamento della corrente all'interno delle diverse maglie del circuito che compone la bobina di Tesla. In particolare sarà utile per comprendere la frequenza e l'ampiezza della corrente nel circuito.

Un circuito LC è formato da un induttore  $L$  e un condensatore  $C$  connessi in serie o in parallelo a un generatore di tensione sinusoidale.

Nel caso della bobina di Tesla risulta presente solamente la prima configurazione (in serie) e quindi sarà l'unica che verrà trattata.

L'analisi seguente è da intendersi relativamente alla Figura 5.

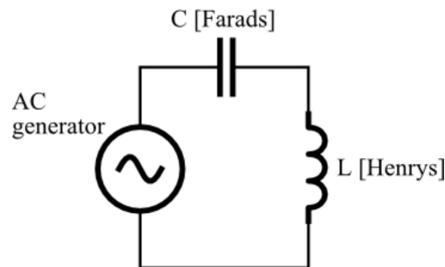


Figura 5: *Schema del circuito LC serie.* [6]

Usando la legge di Kirchoff per le correnti, si ottiene che le correnti attraverso i due utilizzatori sono le stesse.

Usando, in seguito, la legge di Kirchoff per le tensioni, si ottiene che la differenza di potenziale ai capi del generatore è pari alla somma delle differenze ai capi degli utilizzatori, secondo la relazione:

$$V_{gen}(t) = V_L(t) + V_C(t) \quad (2.1)$$

Espresse le differenze di potenziale, secondo la teoria, dell'induttore e del condensatore secondo le relazioni:

$$V_L(t) = L \frac{dI(t)}{dt} = L \frac{d^2Q(t)}{dt^2} \quad (2.2)$$

$$V_C(t) = \frac{Q(t)}{C} \quad (2.3)$$

si ottiene facilmente l'equazione differenziale generale per un circuito LC serie:

$$\boxed{V_{gen}(t) = L\ddot{Q}(t) + \frac{Q(t)}{C}} \quad (2.4)$$

spesso rappresentata nella forma alternativa:

$$\frac{V_{gen}(t)}{L} = \ddot{Q}(t) + \omega^2 Q(t) \quad (2.5)$$

in cui si è messa in evidenza  $\omega$ , chiamata "pulsazione naturale" (o di risonanza) del sistema.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.6)$$

Di particolare interesse sono le soluzioni che descrivono l'andamento della carica  $Q(t)$  e della corrente  $I(t)$  nel tempo, date dalle soluzioni della equazione differenziale (2.4) al variare della forma funzionale che descrive l'andamento della forzante del sistema, ovvero della  $V_{gen}(t)$ .

Per ragioni che risulteranno chiare solamente nella sezione successiva (2.2) verranno studiate solamente due soluzioni particolari: la prima con forzante nulla

$$V_{gen}(t) = 0 \quad (2.7)$$

e la seconda con forzante sinusoidale.

$$V_{gen}(t) = V_0 \sin(\Omega t) \quad (2.8)$$

### 2.1.1 Soluzione dell'omogenea

Sostituendo la (2.7) nella (2.5) si ottiene:

$$0 = \ddot{Q}(t) + \omega^2 Q(t) \quad (2.9)$$

Si cerca una "guess iniziale" ipotizzando che la carica fosse descritta da una funzione sinusoidale:

$$Q(t) = A \sin(\omega t + \phi) \quad (2.10)$$

Calcolando la derivata seconda rispetto al tempo e sostituendo il tutto all'interno della (2.9) si ottiene:

$$0 = -A\omega^2 \sin(\omega t + \phi) + A\omega^2 \sin(\omega t + \phi) \quad (2.11)$$

Dimostrando, in modo autoevidente, che tale relazione è verificata indipendentemente dal valore dell'ampiezza  $A$  e della fase  $\phi$ , lasciando libertà alle condizioni iniziali di fissare il loro valore.

Per convenzione la carica  $Q(t)$  (2.10) è da intendersi come quella sulle armature del condensatore, massima a  $t = 0$ . Da tali considerazioni si deducono le seguenti condizioni iniziali:

$$\begin{cases} A = Q_0 \\ \phi = \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (2.12)$$

Dove  $Q_0$  rappresenta la carica libera massima sulle armature del condensatore. Di conseguenza la (2.10) prende forma:

$$Q(t) = Q_0 \cos(\omega t) = Q_0 \cos\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right) \quad (2.13)$$

La quale derivata temporale offre l'andamento della corrente:

$$I(t) = -\frac{Q_0}{\sqrt{LC}} \sin\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right) \quad (2.14)$$

Grandezze entrambe rappresentate a seguito nella Figura 6.

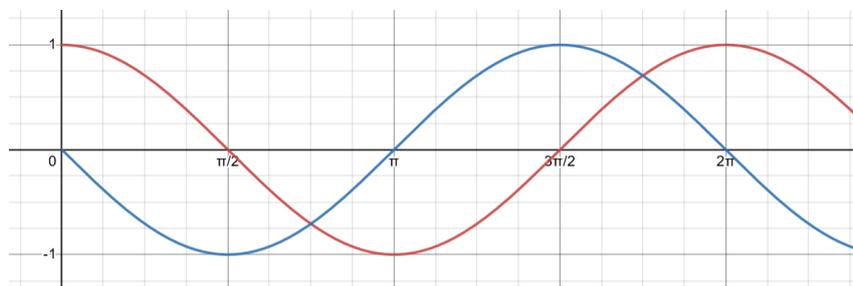


Figura 6: Andamento della carica (rosso) e corrente (blu) tra le armature del condensatore (ampiezza delle curve normalizzata all'unità per facilità di lettura).

## 2.1.2 Soluzione forzante sinusoidale

Inserendo la relazione (2.8) nella (2.4) si ottiene un importante punto di partenza per l'analisi del nostro sistema:

$$V_0 \sin(\Omega t) = L\ddot{Q}(t) + \frac{Q(t)}{C} \quad (2.15)$$

nella quale può essere messa in evidenza la presenza della pulsazione di risonanza  $\omega$  (2.6).

$$\frac{V_0 \sin(\Omega t)}{L} = \ddot{Q}(t) + \omega^2 Q(t) \quad (2.16)$$

Al fine di procedere con il conto per la risoluzione dell'equazione precedente si ha la necessità di distinguere due set di soluzioni distinte.

Tali set di soluzioni si distinguono in base al valore numerico della fase della forzante  $\Omega$  e di quello della pulsazione del sistema  $\omega$ .

Procediamo prima con il caso in cui queste quantità **non** coincidano.

**Primo caso: se  $\Omega \neq \omega$ .**

Partendo con una "guess iniziale" si può pensare che l'andamento della carica sia di natura periodica, data la natura della forzante. Ci si accorge in seguito che, ipotizzato un andamento del tipo

$$Q(t) = A \sin(\Omega t - \phi) \quad (2.17)$$

(con ampiezza  $A$  e fase  $\phi$  da determinare) e sostituendo tale funzione e la sua derivata seconda rispetto al tempo nell'equazione (2.16), essa soddisfa la relazione proposta. Da tale sostituzione si ottiene la seguente uguaglianza:

$$\frac{V_0 \sin(\Omega t)}{L} = A(\omega^2 - \Omega^2) \sin(\Omega t - \phi) \quad (2.18)$$

Eguagliando le ampiezze e fasi delle due parti si ottiene:

$$\begin{cases} A = \frac{V_0}{L(\omega^2 - \Omega^2)} \\ \phi = 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

Infine, inserendo la (2.19) all'interno della (2.17) si ottiene la soluzione particolare:

$$Q(t) = \frac{V_0}{L(\omega^2 - \Omega^2)} \sin(\Omega t) \quad (2.20)$$

Come dalla teoria si è soliti esprimere la soluzione di una equazione differenziale tramite la somma della soluzione particolare con quella dell'omogenea (discussa precedentemente, che qui viene riportata):

$$Q(t) = C_1 \cos(\omega t) + C_2 \sin(\omega t) + \frac{V_0}{L(\omega^2 - \Omega^2)} \sin(\Omega t) \quad (2.21)$$

con  $C_1$  e  $C_2$  costanti da determinare, date le condizioni iniziali.

Per completezza, derivando la relazione precedente rispetto al tempo, si ottiene la seguente relazione per la corrente:

$$I(t) = -\omega C_1 \sin(\omega t) + \omega C_2 \cos(\omega t) + \frac{V_0 \Omega}{L(\omega^2 - \Omega^2)} \cos(\Omega t) \quad (2.22)$$

Tali relazioni soddisfano l'ipotesi iniziale secondo la quale la carica  $Q(t)$  gode di natura periodica.

Si noti come il termine relativo alla soluzione particolare sia trascurabile nel caso in cui la differenza tra  $\Omega$  e  $\omega$  sia sufficientemente grande.

**Secondo caso: se  $\Omega = \omega$ .**

Procedendo come nel caso precedente si ipotizza una "guess iniziale" tale che la carica  $Q(t)$  segua un andamento del tipo:

$$Q(t) = At \cos(\omega t - \phi) \quad (2.23)$$

Ipotesi convalidata da considerazioni fisiche in quanto, se una forzante periodica viene fatta agire su un sistema con pulsazione pari a quella di risonanza del sistema stesso, ci si aspetta un aumento temporale dell'ampiezza di oscillazione. Si può velocemente calcolare la derivata seconda della carica  $Q(t)$  rispetto al tempo:

$$\ddot{Q}(t) = -2A\omega \sin(\omega t + \phi) - A\omega^2 t \cos(\omega t + \phi) \quad (2.24)$$

Sostituendo la (2.23) e la (2.24) all'interno della (2.16) imponendo che  $\Omega = \omega$ , si trova:

$$-2A\omega \sin(\omega t + \phi) - \cancel{A\omega^2 t \cos(\omega t + \phi)} + \cancel{A\omega^2 t \cos(\omega t + \phi)} = \frac{V_0 \sin(\omega t)}{L} \quad (2.25)$$

Eguagliando le ampiezze e fasi delle due parti si ottiene:

$$\begin{cases} A = -\frac{V_0}{2L\omega} \\ \phi = 0 \end{cases} \quad (2.26)$$

Secondo lo stesso procedimento adottato in precedenza si sostituisce la (2.26) all'interno della (2.23) ottenendo la soluzione particolare:

$$Q(t) = -\frac{V_0 t}{2L\omega} \cos(\omega t) \quad (2.27)$$

Di conseguenza la soluzione generale avrà forma:

$$\boxed{Q(t) = C_1 \cos(\omega t) + C_2 \sin(\omega t) - \frac{V_0 t}{2L\omega} \cos(\omega t)} \quad (2.28)$$

La quale, derivata rispetto al tempo, offre l'espressione della corrente nel circuito:

$$\boxed{I(t) = \left(\omega C_2 - \frac{V_0}{2L\omega}\right) \cos(\omega t) - \omega C_1 \sin(\omega t) + \frac{V_0 t}{2L} \sin(\omega t)} \quad (2.29)$$

Come nel caso precedente le costanti  $C_1$  e  $C_2$  vanno determinate tramite le condizioni iniziali.

Si noti come, in regime di risonanza, la carica  $Q(t)$  e la corrente  $I(t)$  sono destinate ad aumentare nel tempo con un andamento simile a quello proposto nella Figura 7, data la presenza del tempo nel coefficiente dell'ultimo termine a destra.

Si noti che, nel caso di risonanza, l'allontanamento della grandezza in esame dalla posizione di equilibrio è sempre verificata a prescindere dal valore delle condizioni iniziali.

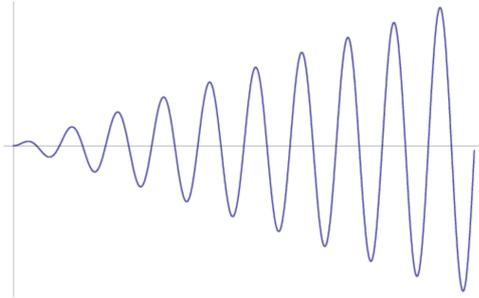


Figura 7: *Esempio di oscillazione in presenza di risonanza.* [7]

### **Frequenza di risonanza**

Nell'analisi dei tre casi precedenti è stata sottolineata più volte la presenza del termine  $\omega$ , la pulsazione naturale del sistema. Spesso si preferisce lavorare con la "frequenza naturale"  $\nu$ , ottenuta da un semplice riscalamento:

$$\omega = 2\pi\nu \implies \nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.30)$$

Come già sottolineato, la frequenza di risonanza, svolge un ruolo fondamentale nella descrizione temporale del sistema e svolge un ruolo altrettanto importante nel funzionamento della bobina di Tesla, per ragioni che saranno chiare nella sezione successiva (2.2).

## 2.2 Analisi e funzionamento

In questa sezione verrà analizzato il puro funzionamento della bobina di Tesla dal punto di vista circuitale facendo riferimento alla Figura 8, senza prestare attenzione alla descrizione delle componenti che concorrono al funzionamento della stessa. Per tale analisi si rimanda alla sezione (3).

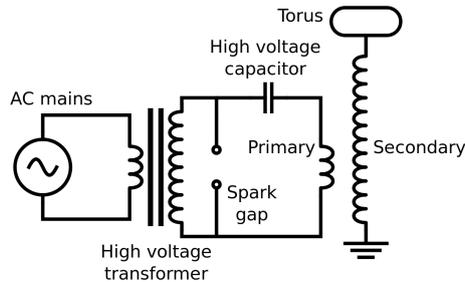


Figura 8: *Rappresentazione minimale dello schema della bobina di Tesla.* [3]

In primo luogo è d'obbligo sottolineare la motivazione per la quale, nella sezione precedente, si sia affrontato nel dettaglio il circuito LC.

Si può notare la presenza di due maglie all'interno del circuito che hanno in comune il ramo con il condensatore e l'induttore: la prima maglia comprende il trasformatore mentre, la seconda, comprende lo "spark gap", o "spinterometro".

Dovrebbe essere evidente la differenza tra le due maglie data dalla presenza o dalla mancanza di un generatore sinusoidale di tensione, come precedentemente descritto nella sezione (2.1).

Si definisce "primario" la parte di circuito costituita dall'unione delle due maglie di cui sopra e "secondario" il circuito caratterizzato dal secondo induttore e dal toro installato ad un suo estremo. Fondamentalmente il funzionamento della bobina può essere schematizzato in due momenti principali: [8]

1. la carica del condensatore, con conseguente aumento della differenza di potenziale ai capi dello spinterometro, Figura 9,
2. chiusura del circuito tramite lo spinterometro con passaggio di energia tra il primario e il secondario per induzione elettromagnetica, Figura 10.

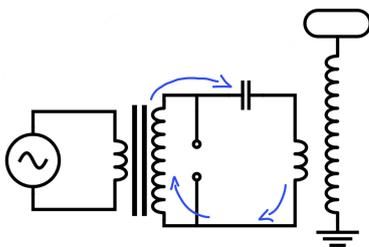


Figura 9: *Carica del condensatore del primario.*

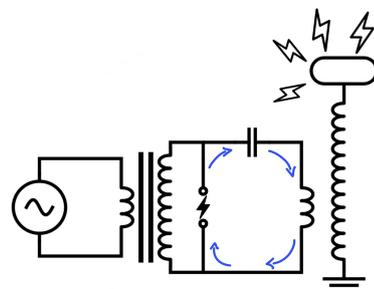


Figura 10: *Trasferimento energia accumulata nel condensatore al secondario, con generazione di fulmini.*

## 2.2.1 Primo momento: carica condensatore

Facendo riferimento a quanto appena illustrato e all'analisi del circuito LC svolta nella sezione precedente (2.1) si trova che il momento di carica del condensatore coincide con l'analisi del circuito LC con forzante sinusoidale (2.16).

Come già discusso in precedenza esistono due set di soluzioni, distinte e incompatibili fra loro, che dipendono interamente dal valore della pulsazione della forzante  $\Omega$  e di quella naturale  $\omega$  del sistema. È necessario, al fine di preservare lo stato del circuito, che le correnti rimangano all'interno di un range di intensità nota e controllata in modo da non surriscaldare la strumentazione, rovinandola e modificandone le caratteristiche.

Tali considerazioni suggeriscono di scegliere valori della capacità  $C$  e induttanza  $L$  in modo da ottenere una pulsazione naturale  $\omega$  sufficientemente diversa da quella della forzante  $\Omega$  in modo da evitare fenomeni di risonanza (2.22).

In Sparky di ha una capacità  $C$  di circa 15 nF e una induttanza  $L$  di circa 20  $\mu$ H in modo tale da avere  $\omega \approx 293$  kHz, che risulta significativamente diversa dalla forzante con frequenza  $\Omega \approx 50$  Hz.

Il processo di carica del condensatore termina nel momento in cui la tensione ai capi dello spinterometro è tale da indurre l'aria circostante a ionizzarsi, prendendo le parti di un buon conduttore di corrente. Una ripetuta serie di scintille rende, in analogia, lo spinterometro riconducibile a una resistenza, chiudendo il circuito.

A tale resistenza si associano le perdite dovute all'azione di ionizzazione dell'aria circostante e al calore per effetto Joule dato dal passaggio di corrente in aria, quantità non trascurabili.

## 2.2.2 Secondo momento: trasferimento dell'energia

A seguito dell'azionamento dello spinterometro, la corrente che attraversa l'induttore del primario vede una brusca variazione di frequenza. Prima della formazione delle scintille, la corrente seguiva un andamento del tipo simile a quello della relazione (2.22) mentre, a seguito della chiusura della seconda parte del circuito, la corrente ha un andamento descritto dalla relazione (2.14).

Grazie alla stretta vicinanza dell'avvolgimento primario e secondario e all'accoppiamento magnetico tra gli stessi, la corrente presente nel primario induce una corrente nell'avvolgimento del secondario.

Si rimanda la lettura dell'Appendice: "Guadagno di tensione e trasferimento energetico" per maggiori dettagli sul trasferimento di energia e sul voltaggio massimo raggiunto nel secondario (A.1).

L'energia è gradualmente trasferita in questo modo dal primario al secondario e, nel giro di alcuni cicli di oscillazione, l'ampiezza della corrente nel primario tende ad annullarsi a vantaggio di quella nel secondario, che tende al suo valore massimo.

Ipotizzato il funzionamento ideale della bobina di Tesla tutta l'energia verrebbe immagazzinata nel secondario la quale, tramite scariche elettriche, si potrebbe disperdere nell'aria circostante colpendo eventuali oggetti conduttori posti in prossimità della bobina.

In realtà questo non si verifica e la realtà delle cose è molto più simile a quanto è rappresentato in Figura 11, che sarà ora descritta nel dettaglio.

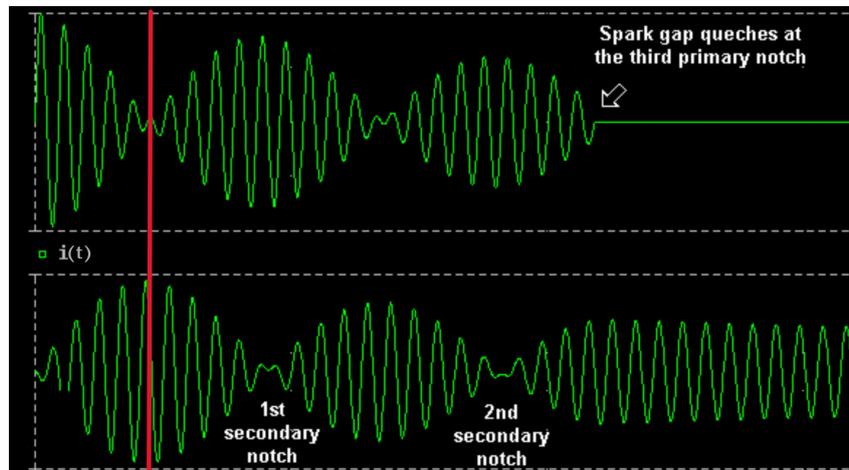


Figura 11: *Simulazione dell'andamento della corrente nel primario (sopra) e secondario (sotto) in funzione del tempo.*

Il funzionamento ideale appena descritto coincide con l'andamento della corrente nel tempo fino all'intersezione con la linea rossa verticale, dopo la quale ci si aspetterebbe che la corrente fosse nulla nel primario e continui il suo moto oscillatorio nel secondario, fino alla totale dissipazione dell'energia trasferita.

Nella realtà bisogna tenere presente che, per far scoccare la scintilla nello spinterometro, è necessaria una certa differenza di potenziale fra i capi di quest'ultimo mentre, una volta ionizzata l'aria, è necessario un voltaggio minore per tenere "viva" la scintilla.

Nel momento in cui l'energia si è trasferita dal primario al secondario si ha, data la simmetria del sistema, un processo inverso in cui l'energia ritorna dal secondario al primario.

Questo scambio di energia tra i due circuiti è permesso fin tanto che lo spinterometro è in azione.

Per la massima comprensione dell'esempio riportato in Figura 11 è bene chiarire che questo processo avviene per tre volte, dopo le quali lo spinterometro gode di un potenziale troppo basso per sostenere il passaggio di corrente in aria e si "spegne" (istante indicato con una freccia nel grafico superiore). Il suo spegnimento è collegato all'apertura del circuito primario, annullando così il valore della corrente in tale maglia e interrompendo il passaggio di energia tra il primario e il secondario.

Si noti, infine, come la massima oscillazione della corrente diminuisca col tempo. Questo fenomeno è dovuto principalmente alla perdita di energia per la ionizzazione delle molecole in aria, radiazione elettromagnetica emessa dall'accelerazione delle cariche in gioco, effetto Joule. Si esclude che tale dispersione di energia sia causata dalla generazione di fulmini in quanto si vedrebbe un calo meno regolare dell'andamento della corrente, che andrebbe rapidamente verso il valore nullo.

# 3 Concezione e costruzione

## 3.1 Schema del circuito

La trattazione seguente, basata sulla descrizione accurata delle componenti della bobina di Tesla, sarà sempre svolta in riferimento alla Figura 12. Questa immagine deve essere interpretata come l'estensione dello schema già riportato in Figura 8, in cui sono state evidenziate le componenti essenziali (caratteri maiuscoli) e le componenti aggiuntive (caratteri minuscoli).

La distinzione tra "essenziale" e "aggiuntivo" ha la funzione di dividere le componenti della bobina indispensabili al funzionamento della stessa rispetto a quelle che sono state introdotte solamente per aumentarne il rendimento (riscontrabile nella grandezza dei fulmini generati a parità di energia fornita) e la sicurezza.

Il discorso legato al rendimento e sicurezza risulta abbastanza complesso da apprendere a pieno. Infatti, mentre per la sicurezza, esiste un certo "punto di vista comune" che rende le informazioni online chiare e coerenti fra loro questo non è più vero quando si tratta del rendimento.

A questo proposito chiunque può controllare, documentandosi autonomamente, che esistono informazioni e punti di vista molto diversi rispetto a quale sia la componente a cui prestare maggiore attenzione (leggasi bibliografia (B)). Dall'esito delle ricerche eseguite risulta chiaro che esistono diverse tipologie di bobine di Tesla e, associata ad ognuna di esse, si rilevano diversi tipi di problematiche inerenti al loro rendimento.

Le componenti che destano maggiore preoccupazione ai costruttori di bobine di Tesla, in generale sono: il valore del condensatore nel primario, la tensione di attivazione dello spinterometro, la geometria del carico superiore (qui toroidale) e la corretta induttanza dell'avvolgimento del primario, in quanto sono componenti fortemente interagenti fra loro. Da queste considerazioni si deduce il motivo per il quale è dedicata grossa attenzione alla descrizione del circuito e dell'apparecchiatura usata, in modo da definire nel modo più chiaro possibile a quale tipologia di bobina si sia fatto riferimento nella costruzione di Sparky.

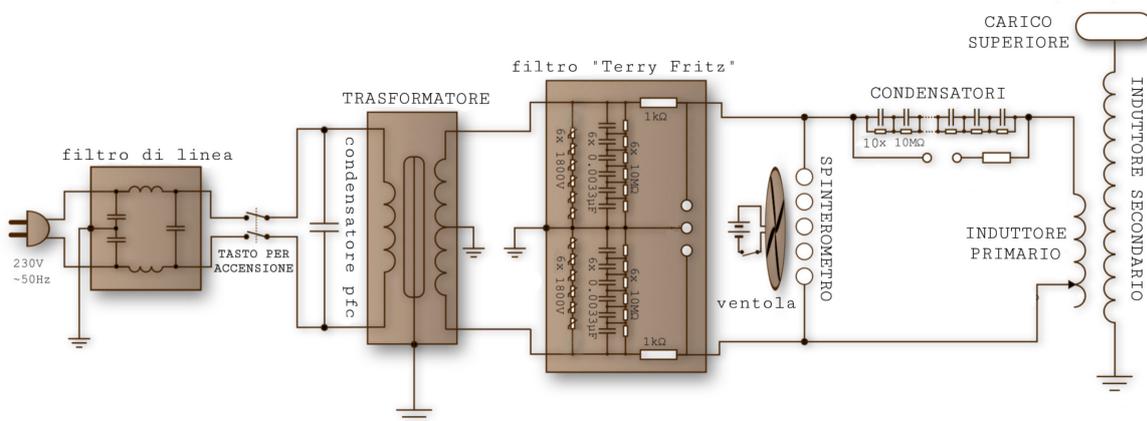


Figura 12: Schema dettagliato del circuito di Sparky.

## 3.2 Trasformatore HV

Il trasformatore ad alta tensione è probabilmente la componente più fragile all'interno di tutta la bobina. Ha il solo ruolo di caricare il condensatore del circuito primario ed è molto importante la sua "robustezza" intrinseca in quanto è soggetto a condizioni anomale, se paragonate a quelle per la quale viene normalmente utilizzato un trasformatore di questo tipo.

In genere i trasformatori HV (tradotto: alta tensione), per bobine di Tesla, vengono divisi in tre macro-categorie e sono utilizzabili in alternativa l'uno rispetto all'altro:

1. I cosiddetti "Pole Pigs" (Figura 13) rappresentano un'alternativa per esperti costruttori di bobine di Tesla. Offrono la più alta tensione in uscita rispetto a qualsiasi altro trasformatore presente in commercio (al di fuori di quelli per fabbriche) e sono difficilmente reperibili in Europa. Offrono tensioni che possono arrivare a 20 kV, senza sistemi integrati di limitazione di corrente, il che li rende potenzialmente mortali sotto questo punto di vista se non tenuti sotto controllo.
2. Alternativa spesso usata è quella dei "Neon Sign Transformers" (o NST) (Figura 14), i quali sono generalmente meno potenti dei precedenti. Offrono tra i 5 kV e i 15 kV e contengono un sistema integrato di limitazione di corrente che può variare dai 20 mA ai 60 mA.

In genere risultano più fragili dei Pole Pigs e possono disporre di un sistema di sicurezza che nega ogni utilizzo per bobine di Tesla. Spesso questi sistemi di salvavita possono essere smontati in modo da non dover interrompere il flusso di corrente ad ogni azionamento dello spinterometro (il quale succede numerose decine di volte al secondo).

3. L'ultima alternativa, caratterizzata dal costo minore, è rappresentata dai trasformatori per forni a microonde (o MOT) (Figura 15). Come i Pole Pigs non contengono sistemi di limitazione di corrente e, quindi, andranno limitati dall'esterno. Spesso vengono utilizzati dai 2 ai 4 trasformatori di questo tipo in parallelo per fornire un adeguato amperaggio, prevenendo il surriscaldamento del singolo trasformatore.



Figura 13: Esempio di trasformatore Pole Pig.



Figura 14: NST utilizzato in Sparky.

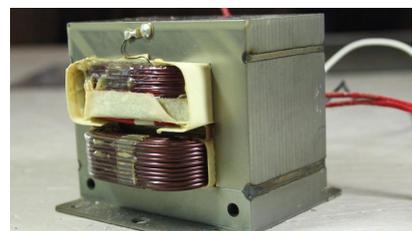


Figura 15: Esempio di trasformatore del microonde.

Il trasformatore utilizzato in Sparky consiste in un singolo NST con queste caratteristiche:

Voltaggio = 8 kV
Corrente = 25 mA
Frequenza di lavoro = 50 Hz

Dalle quali è possibile calcolare la potenza del trasformatore:

$$P = VI = 200 \text{ W}$$

e la sua impedenza, utilizzando la legge di Ohm:

$$Z = \frac{V}{I} = 320 \text{ k}\Omega \quad (3.1)$$

### 3.2.1 Lunghezza fulmini prodotti

Il fenomeno della ionizzazione di un gas è estremamente complesso e la lunghezza massima di un fulmine prodotto dipende da molti fattori, a parte che dalla tensione raggiunta dal carico superiore. Esiste una relazione empirica che lega la lunghezza  $L$  massima del fulmine (espressa in centimetri) e la potenza  $P$  del trasformatore (in Watt):

$$L \approx 4.32\sqrt{P} \approx 60 \text{ cm} \quad (3.2)$$

Ci sono altre formule più precise che tengono anche conto della tensione massima raggiunta nel secondario e della frequenza risonante del secondario ma, non riuscendo a riportare una dimostrazione di come siano state ricavate, risulta poco sensato affidarsi a questi approcci empirici.

Basti pensare che la lunghezza  $L$  stimata con la relazione (3.2) rappresenterebbe il limite massimo di lunghezza del fulmine raggiungibile, l'unica informazione realmente importante al fine di tutelare eventuali spettatori della bobina in funzionamento.

Particolare attenzione si dedica al valore proposto da JavaTC [9] e TeslaMap [10], programmi affidabili per la costruzione di bobine di Tesla di media e piccola grandezza (ovvero con trasformatori di tipo NST o MOT). Questi software hanno contribuito sotto ogni aspetto alla costruzione della bobina, riportando stime delle più importanti componenti del circuito (quali il condensatore e l'induttore primario e secondario) partendo da considerazioni geometriche fornite dall'utente. Si rimanda all'Appendice "TeslaMap e JavaTC" (4.4) per maggiori dettagli sul loro utilizzo.

In media Sparky produce fulmini di 45 cm (Figura 16) e, in rari casi, sono stati osservati fulmini di lunghezza maggiore.

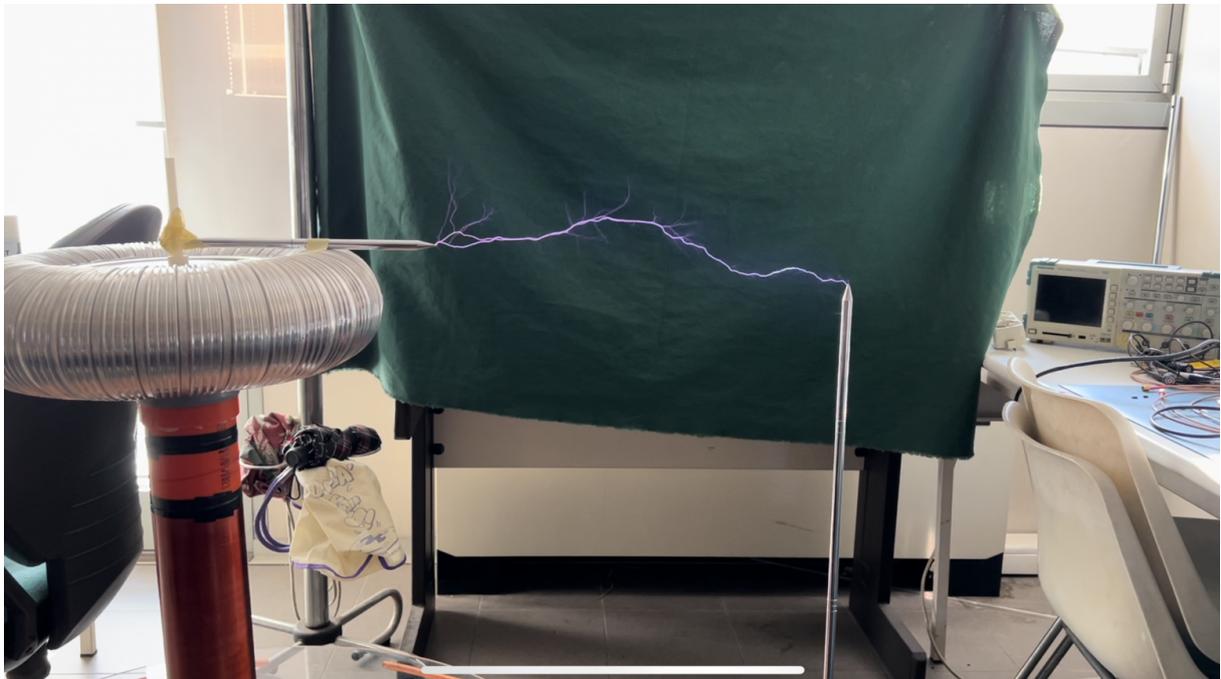


Figura 16: *Fulmine di 45 cm.*

### 3.3 Condensatori del primario

Il ruolo del condensatore del primario è quello di immagazzinare energia (che verrà a seguito trasferita al secondario) e di fornire le condizioni ideali per l'attivazione dello spinterometro.

Questo condensatore deve godere di proprietà specifiche che lo rendono resistente alle dure condizioni alla quale viene sottoposto durante i suoi cicli di lavoro, quali:

1. alte variazioni di corrente e tensione;
2. brevi istanti di carica e scarica delle proprie armature;
3. bassa perdita di energia e dissipazione nel dielettrico.

Per le ragioni sopra esposte risulta complesso costruire un condensatore che rispetti queste restrizioni e risulta consigliato l'utilizzo di un condensatore industriale.

In Sparky si è optato per una serie di condensatori "Cornell Dubilier 942C20P15K-F" [11] (Figura 17) che rappresentano la soluzione spesso utilizzata per costruire bobine di medie dimensioni.

Questi condensatori supportano differenze di potenziale di circa 2 kV e hanno una capacità pari a  $0.15 \mu\text{F} \pm 10\%$ .

Dalla teoria [12] è utile stimare il valore della capacità equivalente che i condensatori devono avere. Utilizzando l'impedenza del trasformatore (3.1) e ipotizzando che l'impedenza dell'induttore sia trascurabile si ottiene:

$$C_{teorica} = \frac{1}{\Omega Z} = \frac{1}{2\pi\nu_{\Omega}Z} = 9.95 \text{ nF} \quad (3.3)$$

In cui si è evidenziata la frequenza  $\nu_{\Omega}$  della fonte energetica del trasformatore (pari a 50 Hz). Da una serie di 10 condensatori si ottengono i seguenti valori:

$C_{equivalente} = (15.07 \pm 0.03) \text{ nF}$
$V_{tollerata} = 20 \text{ kV}$

I valori forniti da TeslaMap e JavaTC sono i seguenti:

$$C_{TeslaMap} = 16.1 \text{ nF}$$
$$C_{JavaTC} = 14.9 \text{ nF}$$

Si noti come i valori proposti dai due programmi sovrastimino il valore ottenuto tramite la teoria. Questo è dato dalla volontà di non ottenere un circuito in risonanza con il trasformatore per motivazioni di sicurezza già affrontate in precedenza.

Per evitare che il condensatore lavori in risonanza col trasformatore si utilizza il termine "larger-than-resonance capacitor" per indicare l'effettivo valore che deve avere. Tale valore oscilla tra 1.5-2 volte il valore  $C_{teorica}$  precedentemente ottenuta, spesso utilizzando il coefficiente 1.618 (approssimazione della sezione aurea) come compromesso.

In Sparky si ottiene:  $C_{teorica} \cdot 1.618 = 16.09 \text{ nF}$ , valore prossimo a quello della capacità  $C_{equivalente}$  effettivamente installata.

Un'importante caratteristica di un condensatore è rappresentata dalla massima variazione

temporale di tensione ai suoi capi che può sostenere senza alterare le proprie caratteristiche. Tale quantità è riportata nella scheda tecnica, pari a:  $dV/dt = 2879 \text{ V}/\mu\text{s}$ .

La massima tensione ottenibile dal trasformatore è pari a  $V_{max} = \sqrt{2}V_{rms} = \sqrt{2} \cdot 8 \text{ kV} = 11313 \text{ V}$ . Con 10 condensatori in serie, ognuno sarà esposto a un decimo della tensione totale. Facendo riferimento all'andamento della tensione del sistema  $V = V_{max} \sin(\omega t)$  e calcolata la sua derivata temporale  $dV/dt = V_{max}\omega \cos(\omega t)$  si ottiene:

$$\left(\frac{dV}{dt} \cdot \frac{1}{N_C}\right)_{max} = \frac{V_{max}\omega}{N_C} = \frac{V_{max}2\pi\nu_\omega}{N_C} \approx 2080 \text{ V}/\mu\text{s} \quad (3.4)$$

Ottenendo un valore inferiore di quello riportato nel datasheet. Nel conto precedente si è utilizzata la frequenza  $\nu_\omega = 1/\sqrt{LC} \approx 293 \text{ kHz}$  che è la frequenza di risonanza del secondario.

## DETTAGLI COSTRUTTIVI

Come riportato nello schema circuitale in Figura 12, si hanno delle resistenze da  $10 \text{ M}\Omega$  in parallelo a ogni condensatore. La loro funzione è quella di prevenire la possibilità che possano trattenere una carica tra le loro armature, permettendo che si scarichino a terra allo spegnimento della bobina.

Data la fragilità di questa componente del circuito si preferisce accoppiare uno spinterometro alla serie di condensatori (Figura 18). Il suo ruolo è quello di interrompere il periodo di carica nel momento in cui la tensione raggiunge valori troppo alti. Tale situazione può avvenire nel caso in cui un fulmine colpisca il circuito del primario o nel caso di mancato azionamento dello spinterometro principale.

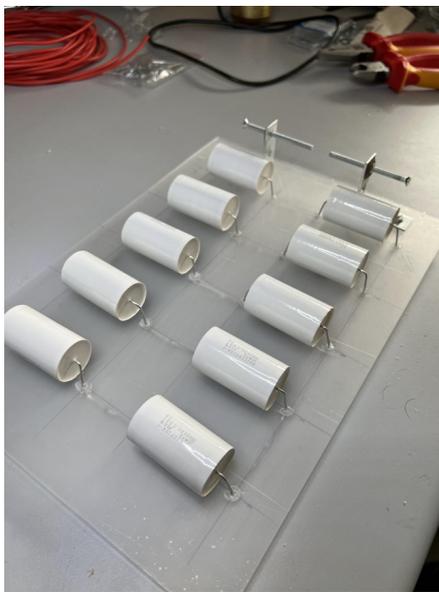


Figura 17: Condensatori del primario.

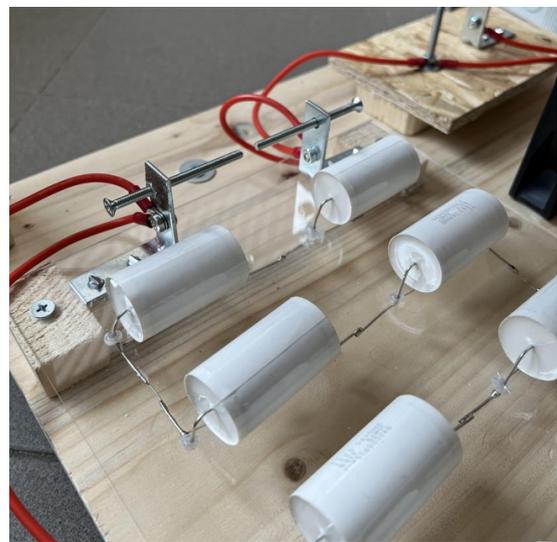


Figura 18: Spinterometro a protezione dei condensatori.

## 3.4 Spinterometro: tipologia e funzionamento

Il ruolo dello spinterometro è quello di essere ricondotto a un "tasto aperto" quando sottoposto a basse differenze di potenziale e ad una "resistenza" ad alte tensioni. Nella sezione (2.2) sono stati già affrontati diversi aspetti riguardanti questa componente della bobina e rimane da definire nel dettaglio quali modelli di spinterometri possano o meno essere usati nelle varie tipologie di bobine di Tesla.

Indipendentemente dal modello, la funzione comune di tutti gli spinterometri è quella di azionarsi in prossimità del momento in cui il condensatore del primario risulta completamente carico oltre che di "spegnersi" non appena l'energia si sia trasferita al secondario tramite la coppia di induttori. Come precedentemente accennato il processo appena descritto è solo ideale e, per questo, bisogna scegliere se utilizzare uno spinterometro "statico" o "rotativo", in base alle proprie esigenze.

### **Prima tipologia: spinterometro statico**

In generale si presenta come un sistema costituito da due o più elettrodi posti a una distanza fissata fra loro (Figura 19). Il numero di elettrodi, disposti in serie, non modifica le proprietà dello spinterometro quanto piuttosto la sua erosione e la sua "vita" (dividendo lo stress su un valore maggiore di superfici esposte). A modificare la proprietà di attivazione dello spinterometro è la distanza fra gli elettrodi (o la somma delle distanze, nel caso siano più di due), in quanto risulta proporzionale alla tensione necessaria per ionizzare una tale lunghezza di aria. Per un funzionamento ottimale la superficie esposta degli elettrodi deve risultare liscia e priva di punte, la distanza ottimale tra questi può essere trovata tramite un processo a tentativi.

Nel caso in cui gli elettrodi dovessero essere troppo lontani, lo spinterometro, non verrà mai in funzione, riconducendosi a un tasto aperto. Nel caso opposto si avrà l'azionamento dello spinterometro in un istante precedente alla totale carica del condensatore del primario, riducendo la lunghezza dei fulmini prodotti.

Importante è la scelta del giusto metallo utilizzato per gli elettrodi in quanto la presenza costante di scintille nell'ambiente vedrà l'ossidazione e produzione di polveri sulle superfici degli stessi, modificandone profondamente le proprietà. Sconsigliato l'uso di ottone e consigliato l'uso di: rame, nickel e tungsteno [13].

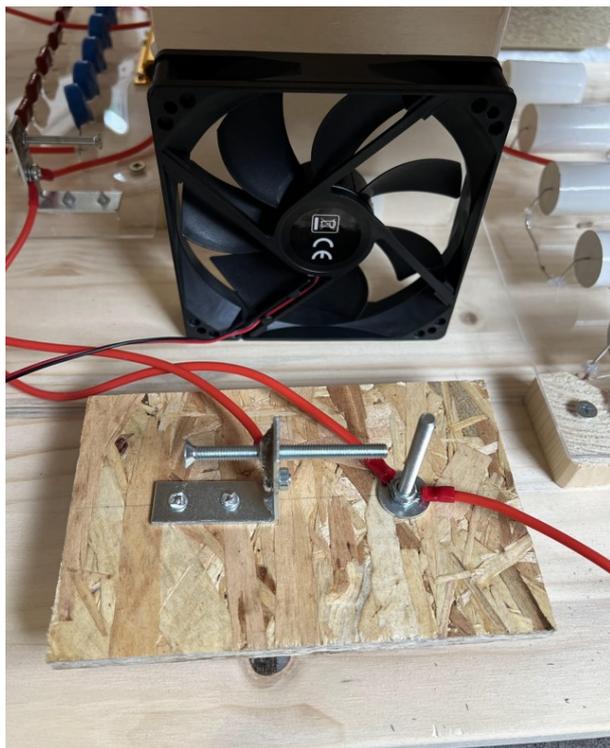


Figura 19: *Spinterometro statico in Sparky, con ventola di raffreddamento.*

### **Seconda tipologia: spinterometro rotativo**

In questo secondo modello non è più la tensione a far scoccare la scintilla ma è un avvicinamento degli elettrodi ai terminali e il loro successivo allontanamento.

Esistono due tipologie principali di spinterometri rotativi: a disco (Figura 20) e ad elica (Figura 21). In entrambi i casi si ha la presenza di un motore (sincrono o asincrono) che mette in rotazione un componente conduttore che a sua volta ha il compito di chiudere il circuito con una cadenza ben definita.

Se l'oggetto messo in rotazione è un disco si preferisce montare su di esso (ad angoli uguali fra loro) un certo numero di elettrodi che, ruotando, sfiorano i due terminali del circuito provocando la scintilla. Nel secondo caso viene fatta ruotare una sbarretta metallica con due soli elettrodi (gli estremi) attorno a una base con numerosi terminali.

Riassumendo si può dire che in uno spinterometro rotativo si ha la presenza degli elettrodi e dei terminali e, in base allo stile adottato, si sceglie quale dei due componenti mettere in rotazione.

Questo tipo di spinterometro presenta punti di forza rispetto alla sua controparte statica in quanto risulta più semplice interrompere la scintilla una volta generatasi. Questo in quanto è sufficiente che gli elettrodi e i terminali siano sufficientemente distanti per interromperla. Inoltre, nella controparte statica, si ha la necessità di far diminuire il potenziale sotto una certa soglia (effetto non controllabile direttamente).

Uno svantaggio è rappresentato invece dalla difficoltà di costruire correttamente uno spinterometro con queste simmetrie e che i terminali si incontrino con gli elettrodi nel preciso momento in cui i condensatori risultino carichi, per massimizzare il passaggio di energia.

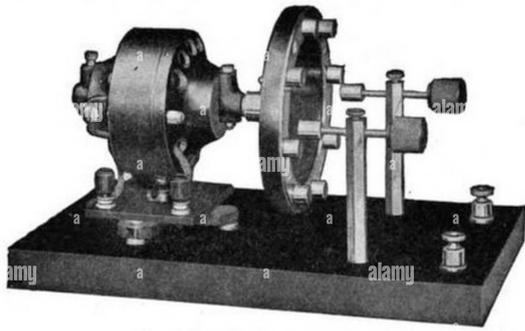


Figura 20: *Esempio di spinterometro rotativo a disco.*

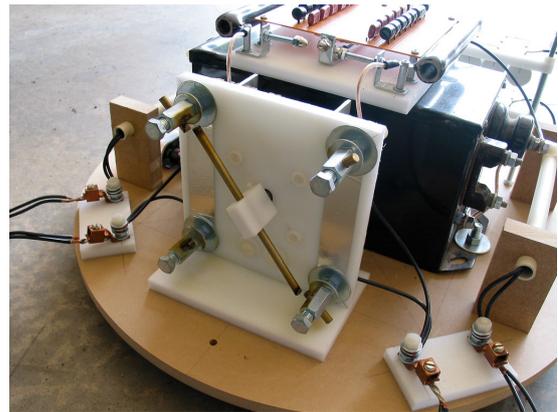


Figura 21: *Esempio di spinterometro rotativo ad elica.*

## DETTAGLI COSTRUTTIVI

### Prima versione

Il primo tentativo di costruzione di uno spinterometro statico è stato riportato in Figura 22 e viene spesso fatto riferimento a questo particolare tipo di design con il nome del suo ideatore: Richard-Quick.

Il suo design consiste in una serie di elettrodi metallici a forma cilindrica (di diametro esterno 1 cm, lunghezza 7 cm e spessi 1 mm) fissati agli estremi su due guide di materiale isolante e disposti in modo tale da avere distanza uguale fra loro.

Una delle due guide è fissata al telaio della bobina mentre l'altra risulta mobile e costruita in modo tale che una sua traslazione sia riconducibile a un aumento o diminuzione della distanza degli elettrodi.

Tale design non è stato implementato in Sparky in quanto, con i materiali a disposizione, non è stato possibile fissare gli elettrodi a una distanza tale da attivare lo spinterometro. Infatti, tra due cilindri, si è riusciti a sviluppare una scintilla solo nel momento in cui questi erano a distanza approssimativamente pari a 3 mm mentre, la distanza minima tra i cilindri nel design in questione, era pari a 3.5 mm.

Si sottolinea che questo design è probabilmente il migliore che si possa installare nella propria bobina e la scelta di non utilizzarlo in Sparky è solamente dovuta alla nostra impossibilità di costruirlo con i materiali a disposizione.

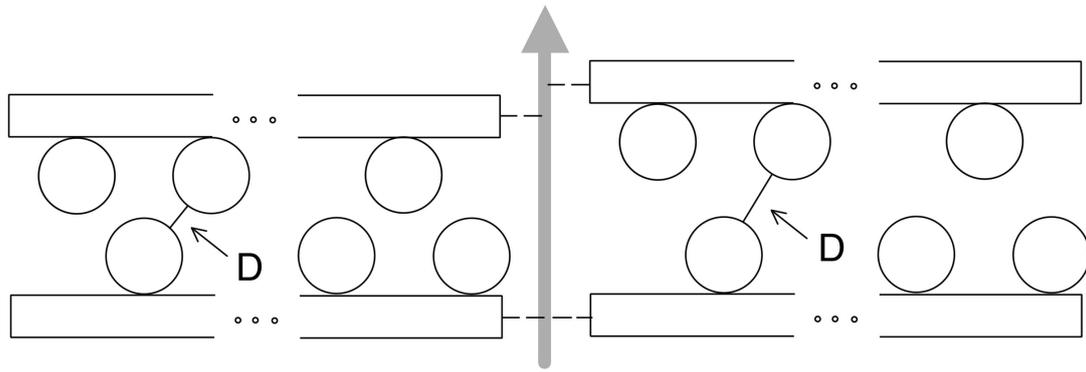


Figura 22: *Rappresentazione schematica della taratura dello spinterometro.*

### Seconda versione

In questo design si è scelto di eliminare i cilindri e di sfruttare il teorema delle punte (sezione (3.8.1)) per tenere gli elettrodi a distanza maggiore fra loro.

Lo spinterometro risulta così costituito da due viti di ferro zincato poste a distanza regolabile fra loro. In questo design si riescono a produrre scintille di lunghezza pari a 9 mm rendendo molto semplice la calibrazione della distanza ottimale al suo funzionamento.

Come si può notare nella Figura 19 è presente una ventola che ha la funzione di raffreddare lo spinterometro e di eliminare l'aria ionizzata generata dalle scintille. Il raffreddamento è utile per evitare che le dimensioni degli elettrodi varino a causa delle alte temperature, diminuendo sia la distanza fra loro sia il potenziale per innescare le scintille. L'eliminazione dell'aria ionizzata, come precedentemente sottolineato, serve a facilitare lo spegnimento dello spinterometro.

### 3.5 Bobina del primario: induttore

Facendo riferimento alle Figure 23- 24- 25 si può osservare la differenza tra le tre tipologie di induttore del primario, rispettivamente: piatto (o a pancake), a cono e a cilindro.



Figura 23: *Bobina a pancake di Sparky.*



Figura 24: *Esempio di bobina conica.*



Figura 25: *Esempio di bobina cilindrica.*

Le tre bobine non presentano significative differenze se non per la direzione spaziale in cui vengono direzionati gli avvolgimenti. Questa caratteristica è però fondamentale per il valore dell'induttanza ottenuta e soprattutto per il coefficiente di accoppiamento tra il primario e il secondario.

Come approfondito nell'Appendice (A.1) si cerca di tenere il coefficiente di accoppiamento  $k \approx 0.2$ , valore che risulta piuttosto basso rispetto al coefficiente  $k \approx 1$  dei moderni trasformatori.

Questo in quanto il coefficiente è collegato alla velocità di trasferimento dell'energia tra i due circuiti. Bobine di piccole dimensioni potranno, quindi, optare per un primario a cilindro; bobine di grosse dimensioni vedono invece come unica soluzione le bobine a pancake, al fine di evitare pericolose scariche tra il primario e il secondario date da un rapido e consistente trasferimento di energia.

#### DETTAGLI COSTRUTTIVI

L'induttore primario in Sparky è caratterizzato da 10.5 giri di rame posto ad una altezza di 35 cm dal suolo. Ha diametro interno di 11 cm ed esterno di 51 cm, il tubo di cui è formato ha un diametro esterno di 1 cm e spessore 1 mm (sufficienti per rispettare le condizioni poste dall'effetto pelle, sezione (3.5.1)), tra un giro e quelli adiacenti si è scelta una distanza di 1 cm.

### 3.5.1 "Effetto pelle" alle alte frequenze

L'obiettivo di questa sezione è solamente quello di giustificare la scelta dell'utilizzo di un tubo cavo per la costruzione dell'induttore del primario di spessore di solo 1 mm, in alternativa ad un tubo pieno, date le condizioni di alta intensità di corrente e alta frequenza. Verrebbe logico pensare che un tubo pieno di materiale conduttore sarebbe stato più adatto alla costruzione di questa componente ma, da un'analisi approfondita dell'andamento della corrente alle alte frequenze nei conduttori (svolta in seguito), ci si renderebbe subito conto che la scelta di un tubo pieno risulta solamente una spesa ulteriore senza apporto di benefici. Inoltre, per costruire l'induttore, si è utilizzata una piega-tubi solamente nella regione interna a curvatura maggiore ed un tubo pieno sarebbe stato decisamente più difficile da piegare con andamento regolare.

La seguente trattazione sarà basata sul contenuto del seguente riferimento: [14].

Si può dimostrare che, in un conduttore cilindrico, la densità di corrente  $J(r)$  (con  $r$  distanza dall'asse del conduttore) segue un andamento del tipo:

$$J(r) = J_S e^{-\frac{(R-r)}{\delta}} \quad (3.5)$$

dove  $J_S$  è la densità di corrente sulla superficie,  $R$  è il raggio del conduttore e  $\delta$  è un parametro specifico del materiale. Quest'ultimo parametro viene determinato sperimentalmente e ha il significato di rappresentare la profondità alla quale la densità di corrente  $J(r)$  è 0.37 ( $1/e$ ) volte la densità superficiale.

Fissato il materiale è possibile estrarre dai dati sperimentali una relazione che lega il parametro  $\delta$  con la pulsazione  $\omega$  della corrente nel conduttore:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \sqrt{\sqrt{1 + (\rho\omega\epsilon)^2} + \rho\omega\epsilon} \quad (3.6)$$

dove  $\rho$  è la resistività del materiale,  $\mu$  e  $\epsilon$  sono rispettivamente la permeabilità magnetica e costante dielettrica del materiale. Nella relazione (3.6) è stato messo in evidenza il primo termine in quanto il secondo, rappresentato dalla seconda radice, risulta vicino all'unità per basse frequenze (rispetto al valore  $1/\rho\epsilon \approx 10^{18}$  Hz) e può essere trascurato. In Sparky  $\omega \approx 0.3$  MHz rispettando le condizioni per l'approssimazione appena proposta, da cui:

$$\delta \approx \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \approx 0.3 \text{ mm} \quad (3.7)$$

dove  $\rho_{rame} = 1.68 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$  e  $\mu_{rame} = 1.25 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$ .

Per verificare la correttezza della relazione precedente è possibile fare anche riferimento alla Figura 26 in cui sono riportati i valori del parametro  $\delta$  in funzione della frequenza  $\nu$  ( $\omega = 2\pi\nu$ ) per alcuni materiali, tra cui il rame, utilizzato in Sparky.

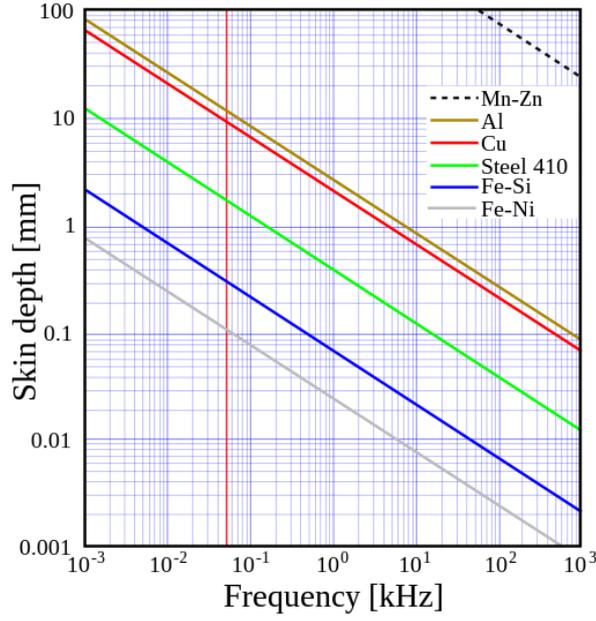


Figura 26: *Studio dell'effetto pelle in funzione della frequenza della corrente nei conduttori di forma cilindrica.*

Tramite un conto diretto è anche possibile calcolare il rapporto della corrente che scorre in un conduttore cilindrico attraverso una corona circolare rispetto a quella dell'intera circonferenza. Le dimensioni della corona circolare sono le stesse del tubo del primario già riportate nella sezione precedente (3.5), dove si è utilizzata la variabile  $s$  per parametrizzare il raggio minore della corona circolare.

$$I_{cerchio} = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^R r J_S e^{-\frac{(R-r)}{\delta}} dr \quad (3.8)$$

$$I_{corona} = \int_0^{2\pi} d\theta \int_s^R r J_S e^{-\frac{(R-r)}{\delta}} dr \quad (3.9)$$

Dividendo la (3.9) con la (3.8) si ottiene:

$$\begin{aligned} \frac{I_{corona}}{I_{cerchio}} &= \frac{2\pi J_S \delta \left[ (r - \delta) e^{-(R-r)/\delta} \right]_{r=s}^{r=R}}{2\pi J_S \delta \left[ (r - \delta) e^{-(R-r)/\delta} \right]_{r=0}^{r=R}} \\ &= \frac{(R - \delta) - (s - \delta) e^{-(R-s)/\delta}}{(R - \delta) + \delta e^{-R/\delta}} \\ &\approx 0.97 \end{aligned}$$

Tale rapporto esplicita come la maggioranza della corrente scorra in prossimità della superficie del conduttore e che l'utilizzo di un tubo cavo non modifica in maniera consistente le proprietà conduttrici dell'induttore.

## 3.6 Altri contributi al primario

Nel paragrafo (3) e in Figura 12 sono state riportate e inserite, con un nome in caratteri minuscoli, le componenti aggiuntive della bobina di Tesla, con l'intento di aumentarne il rendimento o la sicurezza. Tra queste sono presenti: il condensatore PFC, un sistema di sicurezza "Terry Fritz's filter", un filtro di linea per corrente alternata e due sistemi di protezione rispettivamente per i condensatori e l'induttore del primario. Non segnalato nell'immagine (in quanto esterno alla bobina) può essere usato un variac. Nelle seguenti sezioni verranno descritti nel dettaglio.

### 3.6.1 Limitatore di potenza: il Variac

Il variac è un componente supplementare che consente di trasformare la tensione di rete da 220 V AC in una tensione variabile fra 0 – 220 V AC. Spesso utilizzato per fornire alla bobina i 220 V in maniera graduale.

Non ha una vera e propria utilità se non quella di modulare la potenza dell'alimentazione. Spesso si opta per un utilizzo del variac alle prime accensioni della bobina, ovvero quando si è più incerti sullo stato del lavoro effettuato.

Diminuire la potenza in entrata è utile per salvaguardare eventuali componenti elettroniche e verificare se sono presenti archi elettrici tra le varie parti della bobina.

### 3.6.2 Condensatore PFC ("correttore di fase")

Questo condensatore, come riportato nella Figura 12, non fa parte del circuito primario, in quanto è posto direttamente tra la fonte energetica (rappresentata con un generatore di tensione sinusoidale) e il trasformatore (Figura 27). Ha il ruolo di aumentare la potenza media erogata dal trasformatore, espressa tramite la relazione:

$$\langle P \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V(t)I(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T V_0 \cos(\omega t + \phi) I_0 \cos(\omega t + \psi) dt \quad (3.10)$$

dove la differenza di potenziale  $V(t)$  e la corrente  $I(t)$  sono rappresentate da funzioni periodiche di stessa pulsazione ma differente fase iniziale.

Rielaborando la relazione precedente utilizzando una delle formule di Werner:

$$\cos(\alpha) \cos(\beta) = \frac{\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)}{2}$$

si ottiene:

$$\begin{aligned} \langle P \rangle &= \frac{V_0 I_0}{2T} \int_0^T \cos(2\omega t + \phi + \psi) + \cos(\phi - \psi) dt \\ &= \frac{V_0 I_0}{2T} \int_0^T \cancel{\cos(2\omega t + \phi + \psi)} dt + \frac{V_0 I_0}{2T} \int_0^T \cos(\phi - \psi) dt \\ &= \frac{V_0 I_0}{2} \cos(\phi - \psi) \end{aligned}$$

Dove si è eliminato il termine che media il valore di una funzione periodica sul suo periodo, in quanto porta contributo nullo. È evidente come la potenza media assuma valori maggiori nel caso in cui le due fasi  $\phi$  e  $\psi$  coincidano o siano simili fra loro. Il ruolo

del condensatore PFC (o "factor correction capacitor") è quello di diminuire il ritardo di fase tra la tensione e la corrente dato dalla componente induttiva del trasformatore, aumentando la potenza erogata dallo stesso.

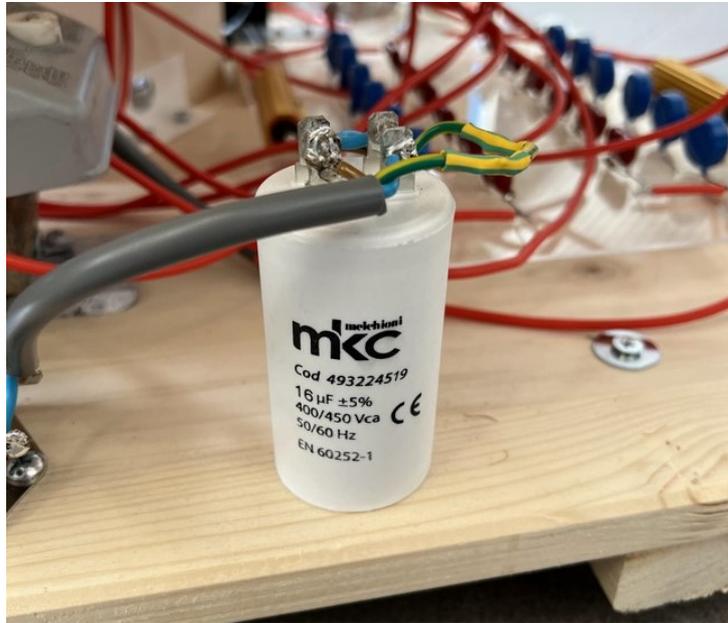


Figura 27: Condensatore PFC.

Il condensatore dovrà essere di tipo "run-type" e non di tipologia "start-type" in quanto questi ultimi sono progettati per lavorare per brevi intervalli di tempo. È possibile stimare il valore del condensatore PFC tramite l'analisi della potenza  $P$  del trasformatore. Ricordando che la potenza è data dal prodotto tra tensione e corrente  $P = VI$  e che queste ultime sono legate fra loro tramite il valore dell'impedenza  $Z = 1/\omega C$  secondo la relazione  $V = ZI$ , si ottiene:

$$P = VI = V(V/Z) = V^2(\omega C) \implies C = \frac{P}{\omega V^2} = \frac{P}{2\pi\nu V^2}$$

$$\approx 13 \mu\text{F}$$

dove  $\nu$  è la frequenza della fonte energetica (50 Hz in Italia) e  $V$  la corrispondente tensione (220 V in Italia). Nel seguente riquadro sono riportate le caratteristiche del condensatore PFC utilizzato in Sparky.

Capacità = 16  $\mu\text{F}$   $\pm$  5%  
 Tensione di lavoro massima = 450 V  
 Frequenza di lavoro = 50 Hz

### 3.6.3 Sistema di sicurezza: filtro di Terry Fritz

Questo tipo di filtro è composto da 3 parti principali: uno spinterometro, una serie di varistori e un filtro passa-basso. Ha il compito di proteggere il trasformatore sia da eventuali picchi di tensione sia da ritorni di corrente a frequenza elevata.

Deve il nome al suo ideatore che ha progettato questo sistema appositamente per bobine di Tesla che utilizzano un trasformatore per Neon, per proteggerlo dalle dure condizioni a cui è sottoposto.

Il filtro va adattato alle proprie esigenze, in funzione delle caratteristiche del trasformatore. Successivamente lo si analizza per il caso specifico di Sparky.

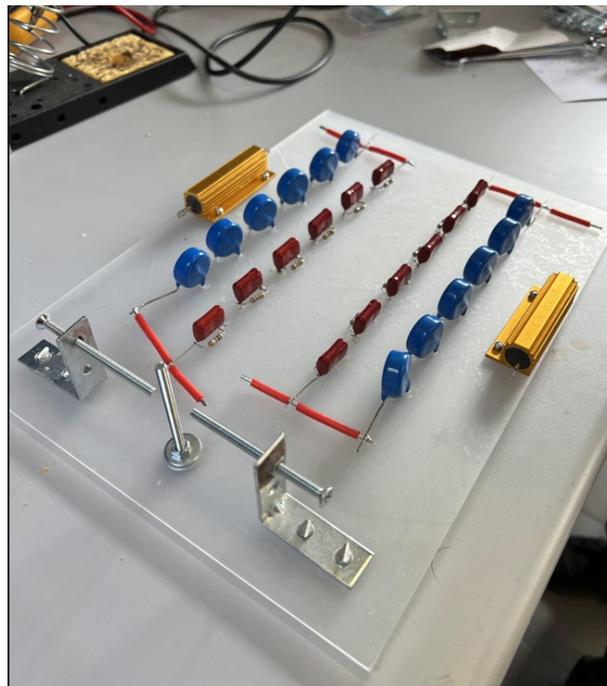


Figura 28: *Filtro di Terry Fritz utilizzato in Sparky.*

Il filtro è composto da:

- **SPINTEROMETRO:** è possibile che, nonostante i sistemi di sicurezza, un fulmine colpisca il primario, alzando la tensione nel circuito e rovinando le componenti elettroniche. Lo spinterometro in questione è composto da 2 elettrodi collegati a un terminale posto fra essi, il quale è direttamente collegato a terra. Nel caso la tensione salga al di sopra di una soglia critica è possibile che venga in tal modo generata una scintilla, scaricando la corrente a terra e diminuendo il rischio elettrico per il trasformatore e i condensatori.
- **VARISTORI:** nel caso lo spinterometro di cui sopra non si attivi, è presente una serie di 6 varistori a scaricare la corrente a terra (nel caso la tensione salga sopra la soglia critica). Un varistore è un componente non lineare che vede la sua resistenza calare bruscamente se sottoposto ad una tensione superiore a una soglia definita dal costruttore. I varistori utilizzati sono della tipologia S20K1000 [15] con una tensione di soglia di 1800 V in continua o 1000 V in alternata.

La tensione massima normalmente raggiungibile nel circuito rispetto alla terra è pari a  $V_{max}/2 = \sqrt{2}V_{rms}/2 = \sqrt{2}/2 \cdot 8 \text{ kV} \approx 5650 \text{ V}$ . Una serie di 6 varistori ha quindi una resistenza elevata che cala bruscamente al superamento dei 6000 V, valore superiore dei 5650 V che normalmente circolano nel circuito.

I varistori rappresentano, insieme allo spinterometro del Terry Fritz, gli unici sistemi di scarica del primario nel caso la tensione salga pericolosamente all'interno del circuito.

- **FILTRO PASSA-BASSO:** in parallelo ai 6 varistori sono presenti una serie di 6 condensatori da 3.3 nF. Ai capi di ogni condensatore è stata posta una resistenza da 10M $\Omega$ , 0.5 W, al fine di evitare che si accumulino cariche tra le loro armature e possano scaricarsi allo spegnimento della bobina. Il filtro passa-basso è caratterizzato dai 6 condensatori di cui sopra (con una capacità totale di  $C_{eq} = C/6 = 3.3/6 \text{ nF} = 0.55 \text{ nF}$ ) e una resistenza da 1k $\Omega$ , 100W. Si può dimostrare che vale la seguente relazione:

$$\nu_c = \frac{1}{2\pi RC} \approx 289 \text{ kHz} \quad (3.11)$$

dove  $\nu_c$  è la frequenza di cut-off, ovvero un limite superiore al possibile valore della frequenza della corrente del circuito.

All'attivazione dello spinterometro la frequenza del primario varia da 50 Hz a 293 kHz e, anche nel caso dovesse aumentare ulteriormente, non si avrebbero problemi al trasformatore, in quanto il filtro passa-basso bloccherebbe tali interferenze a maggior frequenza.

### 3.6.4 Sistema di sicurezza: filtro di linea per corrente alternata

Il ruolo del filtro di linea (Figura 29) è quello di proteggere gli apparecchi elettrici connessi allo stesso impianto della bobina di Tesla da eventuali ritorni di corrente o tensione dovuti a scariche elettriche che potrebbero colpire il circuito del primario. In genere questa tipologia di filtro viene utilizzata per proteggere delicati circuiti dalle alte tensioni della linea principale mentre, per la bobina, questo ruolo risulta invertito. Numerose sono le fonti (riportate in bibliografia) che citano questo oggetto ma in poche forniscono informazioni sulla corretta direzione in cui debba essere installato. Ci sono pareri che suggeriscono di montarlo al contrario, dovendo proteggere la linea principale dalla presenza della bobina, e altri pareri che suggeriscono che i due versi siano invertibili in maniera pressoché arbitraria. In Sparky si è scelto di montarlo in maniera convenzionale (non al contrario).

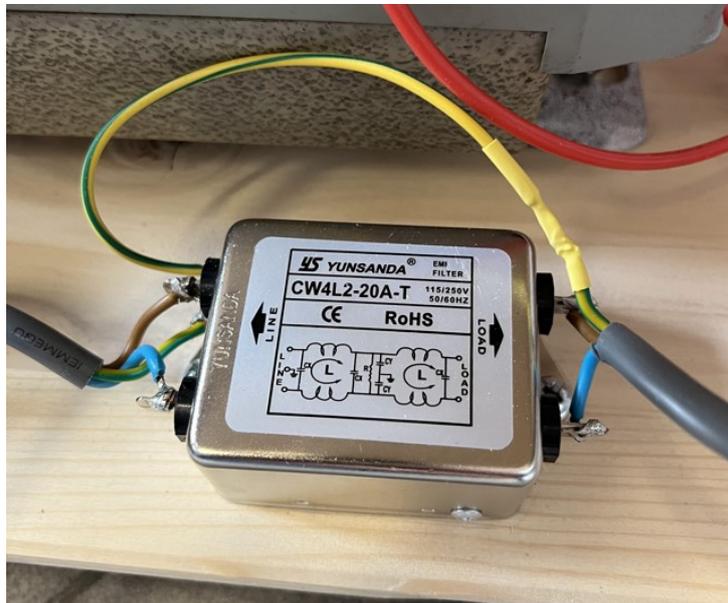


Figura 29: *Filtro di linea per corrente alternata.*

### 3.6.5 Sistema di sicurezza: protezione condensatori

Questo sistema di sicurezza è già stato presentato in Figura 18 all'interno della sezione (3.3) e consiste in uno spinterometro del tutto simile a quello principale, con la sola particolarità di necessitare di una differenza di potenziale maggiore per azionarsi. Nella Figura 30 sono riportate alcune forme che sottolineano la posizione degli spinterometri, di cui è spiegato a seguito l'ordine di attivazione. L'ordine è determinato dal valore del potenziale di attivazione rispettivamente minimo per il primo spinterometro e massimo per il terzo.

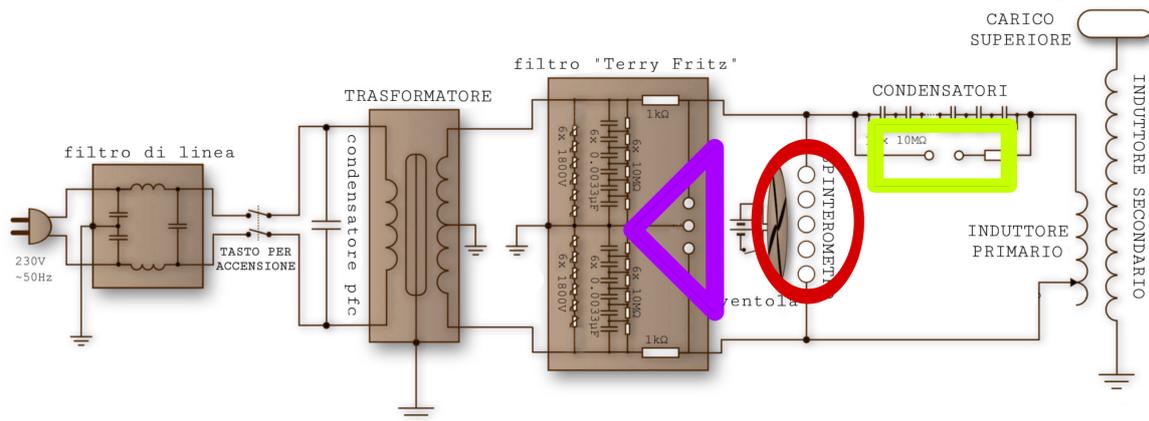


Figura 30: *Ordine di attivazione degli spinterometri presenti in Sparky. In ordine rispettivamente: cerchio rosso, rettangolo verde e triangolo viola.*

Il primo spinterometro ad azionarsi è quello che ha il ruolo di chiudere il circuito del primario e avviare il processo di trasferimento di energia verso il secondario (in figura evidenziato da un cerchio rosso); il secondo a partire è quello a protezione dei condensatori (evidenziato da un rettangolo verde); il terzo, è quello presente all'interno del filtro di Terry Fritz (evidenziato da un triangolo viola).

Il metodo utilizzato per imporre un ordine di azionamento è simile a quello descritto nello schema in Figura 22 in quanto consiste nella semplice azione di taratura degli elettrodi a distanze differenti (aumentando la distanza nel caso si voglia aumentare il potenziale di attivazione).

### 3.6.6 Sistema di sicurezza: protezione induttore primario

L'induttore del primario è probabilmente la componente del circuito che necessita di maggiore attenzione rispetto alla protezione dai fulmini prodotti dal carico superiore a causa della sua posizione così ravvicinata a questo terminale.

Il sistema di protezione è rappresentato da due componenti principali.

La prima è rappresentata da una lastra rotonda di plexiglass di raggio 70 cm e spessore 0.5 cm posta 9 cm sopra l'induttore del primario al fine di schermarlo.

La seconda componente è caratterizzata da un anello dello stesso tubo cavo dell'induttore primario disposto in prossimità della lastra e ha il compito di portare a massa la corrente generata da un eventuale fulmine diretto verso l'induttore primario.

L'anello dispone di una apertura di 15 cm in modo da rappresentare un circuito aperto e negare la formazione di correnti parassite e indotte dalla variazione di flusso del campo magnetico attraverso la sua sezione, dissipando energia.

Entrambi i sistemi sopra descritti sono riportati in Figura 31.

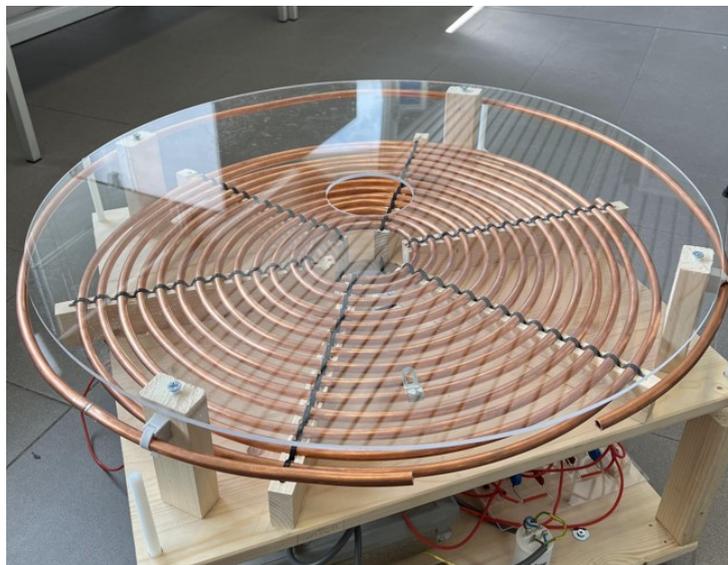


Figura 31: *Lastra e tubo a protezione dell'induttore del primario.*

### 3.7 Bobina del secondario: induttore

La funzione principale dell'avvolgimento nel secondario è quella di fornire una componente induttiva, in modo da formare un secondo circuito LC che rappresenti il terminale finale della bobina di Tesla, luogo in cui verranno generati i fulmini. In genere è costituito da un supporto cilindrico con un numero di avvolgimenti  $N$  compreso tra 900 e 1500 di un unico filo conduttore di diametro  $d$  compreso tra 0.679 mm (22 AWG) e 0.322 mm (29 AWG) [10].

Esistono delle regole empiriche che tutti i costruttori di bobine di Tesla tendono a rispettare che vincolano il diametro  $D$  del supporto cilindrico con l'altezza dell'avvolgimento secondario:

$$H = Nd \tag{3.12}$$

Il rapporto che si tende a rispettare è rappresentato da  $H/D$  che vede come limite superiore il numero 5. Tale valore non è fissato secondo un approccio rigoroso, quanto piuttosto come valore indicativo e finalizzato a costruire una bobina di "belle proporzioni estetiche". Tuttavia, diversi costruttori [16] affermano che un rapporto  $H/D$  maggiore di 5 diminuisce il rendimento del passaggio di energia tra primario e secondario con successiva diminuzione dei fulmini prodotti.

Dalla teoria risulta che l'induttanza  $L$  di una bobina cilindrica può essere ottenuta nel seguente modo:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{H} \tag{3.13}$$

in cui  $\mu$  è la permeabilità magnetica del mezzo ( $\approx 4\pi \cdot 10^{-7} H/m$  per l'aria),  $N$  il numero di giri del solenoide,  $H$  l'altezza e  $A$  l'area dell'avvolgimento. Sostituendo i valori adatti a Sparky si ottiene:

$$L_{teorica} = 20.88 \text{ mH}$$

che risulta essere dello stesso ordine di grandezza del valore ottenuto sperimentalmente:

$$L_{sperimentale} = (15.72 \pm 0.04) \text{ mH}$$

I valori forniti da JavaTC e TeslaMap sono i seguenti:

$$L_{JavaTC} = 17.0 \text{ mH}$$

$$L_{TeslaMap} = 15.68 \text{ mH}$$

Inoltre, in Figura 32 è riportato il secondario di Sparky con un avvolgimento di 40 cm, 1050 giri e un filo di rame di sezione 0.35 mm.



Figura 32: *Bobina secondaria di Sparky.*

## DETTAGLI COSTRUTTIVI

Come primo accorgimento si sottolinea che, per evitare archi all'interno del supporto del secondario, è buona norma non porre gli estremi dell'avvolgimento lungo l'asse della bobina. In tal caso un fulmine potrebbe generarsi direttamente all'estremità superiore e attraversare il supporto cilindrico con grande facilità.

Tale azione non solo contribuirebbe a rovinare irrimediabilmente i terminali del secondario, ma potrebbe portare una scarica direttamente sul primario, apportando stress all'intero circuito. La presenza del Terry Filter mitigerebbe i danni di quest'ultimo effetto ma non si avrebbe comunque una protezione totale.

Un ulteriore sistema di sicurezza è rappresentato dai numerosi strati di materiale spray isolante che ricoprono l'avvolgimento secondario e lo proteggono dagli urti. Il rivestimento di materiale non conduttore ha, inoltre, il ruolo di prevenire la formazione di archi tra il primario e il secondario e di prevenire l'ossidazione del secondario nel caso la protezione naturale del cavo non risultasse integra.

### 3.8 Carico superiore: geometria e dimensioni

Il carico superiore è posto nella parte finale dell'avvolgimento del secondario e rappresenta una delle due armature del condensatore che caratterizza il secondo circuito LC (dove l'altra armatura può essere rappresentata da un parafulmini collegato a massa o dall'ambiente circostante).

È possibile che molte bobine di Tesla non presentino questa componente, la mancanza della quale è dovuto alla diversa volontà del costruttore di produrre effetti diversi con la propria bobina.

Le diverse geometrie hanno, come caratteristica principale, un differente raggio di curvatura che, come spiegato nella sezione (3.8.1), è il parametro più importante per determinare il potenziale di rottura del dielettrico (e conseguente generazione di un fulmine).

Segue l'analisi successiva:

- **ESTREMO LIBERO:** Nel caso in cui il costruttore opti per la mancanza di tale componente è segnale della volontà di produrre una fitta densità di piccoli fulmini nell'estremo finale (lasciato libero) del secondario.

La dispersione di energia nell'ambiente (tramite scariche elettriche) si ha nel caso in cui l'estremo lasciato libero del secondario risulti ben ventilato. In caso contrario l'energia potrebbe dissiparsi tramite calore per effetto Joule nell'avvolgimento stesso modificando le sue caratteristiche.

In genere è raro che un costruttore propenda per questa soluzione in quanto non offre vantaggi particolari rispetto alle ben più scenografiche alternative descritte a seguito.

- **ASTA CON GLOBO:** Più comune, con effetti simili a quelli descritti nel punto precedente, è la scelta di un'asta conduttrice al cui estremo è fissato un globo metallico. Per il potere delle punte, come nel caso precedente, si ha una generazione ad alta cadenza di fulmini ma, grazie alla presenza del globo, a frequenza minore e con lunghezze maggiori.

La differenza fondamentale tra questa e la soluzione del punto precedente è rappresentata dalla possibilità di accumulare cariche elettriche prima di liberarle nell'aria. Nel primo caso il terminale del secondario (lasciato libero) non ha tale possibilità, disperdendole immediatamente nell'aria circostante, generando scariche di piccola taglia. Nel secondo caso la presenza del globo permette alle cariche di accumularsi per un breve istante sulla sua superficie (prima della generazione del fulmine) generando archi di maggiore energia e lunghezza.

Non è inoltre proibito montare l'asta col globo a seguito di un secondo carico superiore di geometria qualsiasi in modo da accumulare una quantità maggiore di cariche, generando archi di lunghezza maggiore.

- **GEOMETRIA REGOLARE:** Per ultimo è il caso precedentemente accennato di montare un carico superiore di geometria qualsiasi senza l'asta col globo.

Questa soluzione vede la maggior lunghezza di fulmini prodotti in quanto si ha il massimo accumulo di cariche sulla superficie del carico superiore prima del loro rilascio nell'aria tramite scarica elettrica.

Per ragioni che saranno più chiare nella sezione successiva (3.8.1) si opta per un carico di geometria sferica o toroidale. Quest'ultima risulta essere la più adatta ma

risulta anche la più complessa da costruire e, per tali ragioni, in base alle proprie disponibilità, si può scegliere quale geometria adottare (Figura 33).



Figura 33: *Carico superiore: toro.*

In Sparky si è montato un carico superiore toroidale di diametro totale pari a 35 cm e diametro della sezione pari a 10 cm.

La capacità del secondario è una quantità non misurabile direttamente in quanto profondamente influenzata dalla presenza di oggetti vicini. Nell'appendice (4.1) viene spiegato il metodo per misurare la frequenza di risonanza  $\nu$  del secondario dalla quale, secondo la relazione  $\nu = 1/\sqrt{LC}$  è possibile stimare un valore della capacità  $C$  del secondario.

Seguendo tale approccio si trova:

$$C_{teorica} = \frac{1}{4\pi^2\nu^2L} = 18.76 \text{ pF}$$

Valore che, oltre all'ordine di grandezza, risulta compatibile ai valori teorici forniti da TeslaMap e JavaTC:

$$C_{TeslaMap} = 21.48 \text{ pF}$$

$$C_{JavaTC} = 18.99 \text{ pF}$$

## DETTAGLI COSTRUTTIVI

Ci sono diverse regole empiriche che regolano le proporzioni tra la distanza  $h$  del toro dall'avvolgimento secondario, del diametro  $d$  della sezione del toro e del diametro  $D$  esterno del toro (Figura 34).

Come nel caso relativo alle proporzioni tra diametro e altezza dell'induttore del secondario, anche in questo caso si hanno sostenitori che tali proporzioni non influiscano sulla grandezza dei fulmini prodotti, mentre altri costruttori sostengono che la variazione di proporzioni sia legata alla modifica dei valori delle componenti circuitali (quali l'induttanza  $L$  e la capacità  $C$ ) che, a loro volta, modificano il rendimento della bobina. Questo secondo approccio trova le proporzioni geometriche come principale causa del rendimento della bobina.

Le relazioni sono le seguenti:

$$h \approx 0.8d \quad D \approx 4h$$

In Sparky si è scelto un distanziamento  $h = 8$  cm, una sezione di diametro  $d = 10$  cm e un diametro maggiore  $D = 35$  cm.

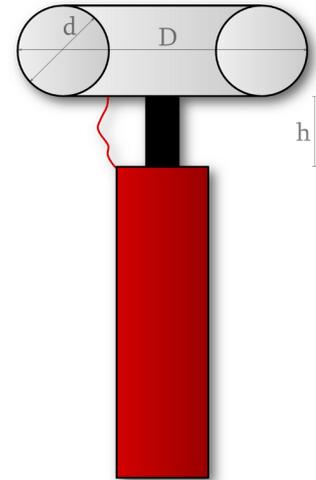


Figura 34: Rapporti geometrici del toro.

### 3.8.1 Potere delle punte

Il potere delle punte riguarda la tendenza dei conduttori carichi di accumulare una maggiore densità superficiale di cariche in presenza di regioni a raggio di curvatura minore. Di conseguenza si avrà un campo elettrico più intenso in prossimità delle regioni "più appuntite" del conduttore in esame [17].

Per fissare i concetti chiave si faccia riferimento alla Figura 35 in cui sono presenti due sfere di raggi  $R_1$  e  $R_2$  ( $R_1 > R_2$ ) carichi rispettivamente di una carica elettrica  $Q_1$  e  $Q_2$ . Le due sfere sono collegate tra loro tramite un conduttore di lunghezza indefinita tale da rendere minima l'interazione elettrostatica tra i due oggetti.

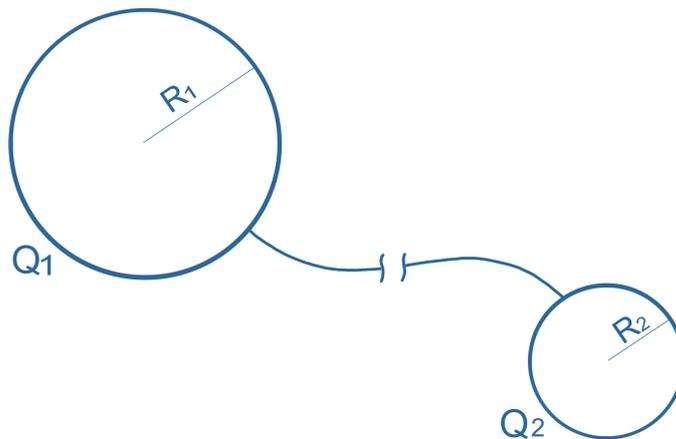


Figura 35: Studio del potere delle punte tramite sfere conduttrici.

Il sistema è lasciato isolato in modo da poter raggiungere una situazione di equilibrio in cui risulta nulla la corrente nel conduttore tra le sfere (redistribuzione delle cariche sulle superfici). Una volta raggiunta la situazione di equilibrio si può calcolare il potenziale elettrostatico a contatto con le superfici delle due sfere (inteso come differenza di potenziale tra la superficie e un punto all'infinito):

$$V_1 = V_{R_1} - V_\infty = \int_{R_1}^{\infty} E dr = \int_{R_1}^{\infty} \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = \left[ -\frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 r} \right]_{R_1}^{\infty} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 R_1} \quad (3.14)$$

Analogamente per la seconda sfera:

$$V_2 = \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 R_2} \quad (3.15)$$

Essendo in una situazione di equilibrio si ha l'uguaglianza dei due potenziali appena calcolati, da cui:

$$V_1 = V_2 \implies \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 R_1} = \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 R_2} \implies \frac{Q_1}{R_1} = \frac{Q_2}{R_2} \quad (3.16)$$

Definendo la densità di carica superficiale  $\sigma$  come rapporto tra la carica  $Q$  e la superficie  $\Sigma$  del conduttore sferico ( $\sigma = Q/\Sigma$ ) si trova:

$$\begin{aligned} \frac{Q_1}{R_1} = \frac{Q_2}{R_2} &\implies \frac{\sigma_1 \Sigma_1}{R_1} = \frac{\sigma_2 \Sigma_2}{R_2} \implies \frac{\sigma_1 4\pi R_1^2}{R_1} = \frac{\sigma_2 4\pi R_2^2}{R_2} \\ &\implies \sigma_1 R_1 = \sigma_2 R_2 \implies \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{R_2}{R_1} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Dimostrando che la carica elettrica tende a disporsi lungo le superfici di raggio di curvatura minore. Tale dimostrazione risulta avere validità generale e non solamente per casi particolari come sfere isolate distanti fra loro, trovando riscontro anche in casi generali come quello rappresentato in Figura 36.

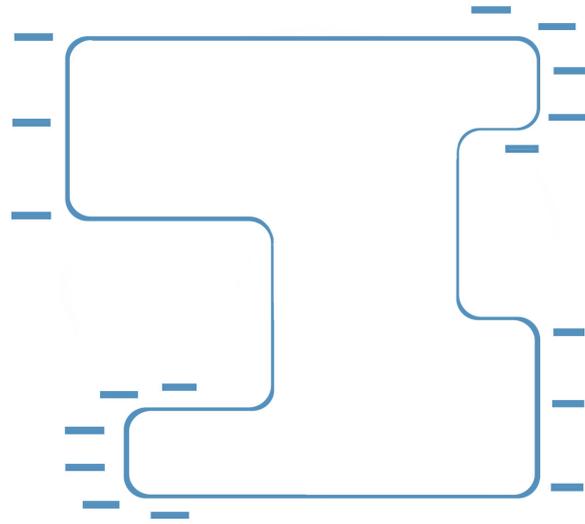


Figura 36: *Caso generale riguardante lo studio del potere delle punte.*

### 3.9 Messa a terra

Mettere a terra le varie componenti circuitali della bobina è importante sia per una questione di sicurezza che per l'effettivo funzionamento della stessa.

Sparky, come ogni altra bobina di medie dimensioni, ha due terre separate: la messa a terra della linea principale e la messa a terra RF. La prima è offerta dalla fonte energetica di alimentazione della tensione 220 V, la seconda va costruita in autonomia. [29]

Esistono diversi metodi per costruire una messa a terra, ordinati dalla maggiore alla minore efficacia del metodo:

- L'opzione migliore è quella di impiantare un'asta metallica verticalmente nel terreno il più vicino possibile alla bobina e il più lontano possibile dalla messa a terra principale. L'asta deve essere inserita nel terreno ad una profondità di almeno 180 – 240 cm.
- Nel caso non fosse possibile inserire l'asta a tale profondità è possibile inserire verticalmente una serie di aste a profondità minore 100 – 160 cm.
- In ultimo luogo, nel caso di terreno roccioso o nel caso di difficoltà a penetrare il suolo con eventuali aste, è valida alternativa seppellire l'asta (o le aste) sotto 30 – 50 cm di terra in posizione orizzontale.
- Nel caso non fosse possibile inserire aste nel terreno (ad esempio in presenza di cemento) è possibile stendere sul terreno grandi fogli metallici o reti per bestiame. La dimensione di queste superfici deve essere di lato almeno pari all'altezza della bobina (ad ogni modo maggiore sono le dimensioni, migliore sarà l'efficacia di questa soluzione).

In tutti i metodi precedentemente descritti è possibile applicare una soluzione di acqua e sale per aumentare localmente la conduttività del terreno. Tuttavia si sconsiglia tale manovra per ragioni di sicurezza, nonostante possa essere una valida risorsa per il corretto funzionamento della messa a terra.

Non esiste una regola che vincola gli apparati della bobina ad essere collegati preferibilmente ad una messa a terra rispetto che all'altra. In genere si tende a collegare alla terra principale tutte le componenti che lavorano con i 220 V e alla messa a terra RF tutti gli apparati che potrebbero essere colpiti da un arco elettrico o che subiscono grandi transienti di tensione.

Di conseguenza la situazione, in Sparky, è la seguente:

- Alla terra principale sono collegati: l'alimentazione a 220 V, il variac, il pulsante di accensione, il filtro di linea, il trasformatore NST, la ventola di raffreddamento dello spinterometro.
- Alla terra RF sono collegati: lo spinterometro del filtro di Terry Fritz e i varistori, l'induttore del secondario e l'anello di protezione del primario.

## 4 Risultato finale e Misure

### 4.1 "Accordare" la bobina: la frequenza di risonanza

Il trasferimento energetico tra il primario e il secondario (A.1) non è dato da un alto coefficiente di accoppiamento tra i due induttori, ma dalla stessa frequenza di risonanza dei due circuiti. Esistono diversi metodi per studiare la frequenza della propria bobina di Tesla, a seguito sarà descritta la procedura adottata in Sparky.

#### Variabili di interesse

Dalla teoria (2.30) è noto che la frequenza in esame dipende solamente da due parametri: la capacità e l'induttanza. Di conseguenza, considerando i due circuiti, si hanno quattro grandezze sulla quale è possibile operare per ottenere la corretta "accordatura" della bobina: le capacità e induttanze rispettivamente del primario e secondario.

Nella realtà le variabili non sono quattro ma una sola: l'induttanza del primario. A seguito è spiegata la motivazione per la quale le altre tre grandezze risultano non modificabili:

- L'induttanza del secondario è fissata dalle dimensioni del tubo su cui si è avvolto l'induttore. Come riportato nel paragrafo (3.7) esistono regole empiriche che regolano le sue dimensioni e in Sparky si è scelto di non violare questo standard.
- La capacità del secondario è una quantità variabile con estrema facilità e (come approfondito nel paragrafo (A.3)) dipende non solo dalla geometria del carico superiore e dall'isolamento del filo del secondario, ma anche dalla geometria degli oggetti presenti nell'ambiente attorno alla bobina. Tali considerazioni dovrebbero essere sufficienti per sottolineare l'impossibilità di accordare la bobina modificando tale parametro.
- La capacità del primario, infine, risulta pressoché fissata dall'impedenza del trasformatore secondo la relazione (3.3) e, per questo, non si opta per la modifica di tale grandezza.

#### Metodo per una corretta accordatura

Spesso si fa riferimento a questo processo con il termine "tuning".

Esistono diversi metodi per accordare i due circuiti sulla stessa frequenza di risonanza:

- Il primo metodo è dettato da un "processo a tentativi" e consiste nel chiudere (processo di "tapping") il circuito in punti diversi del primario e osservare la lunghezza dei fulmini prodotti. Il processo ha fine nel momento in cui l'osservatore giudica che i fulmini abbiano raggiunto la lunghezza maggiore rispetto ai tentativi precedenti. Questo metodo non offre un valore numerico della frequenza della bobina, si basa solo sull'effetto estetico di generazione dei fulmini ed è possibile utilizzarlo solo durante il funzionamento della bobina.
- Il secondo metodo risulta più complesso e presenta profonde differenze con il processo a tentativi precedentemente descritto. Questo metodo consiste nello studiare la frequenza di risonanza del secondario e, successivamente, la frequenza del primario.

Occorre poi modificare la frequenza di quest'ultimo in modo tale che le due coincidano.

La prima differenza col metodo precedente è data dalla possibilità di studiare la frequenza del circuito senza apportare un'alimentazione esterna, fornisce un valore numerico preciso delle due frequenze di risonanza e necessita di strumentazione adeguata per essere eseguita.

La seguente analisi sarà fatta in riferimento alla Figura 37.

Grazie a un generatore di funzioni e ad un oscilloscopio si studia in primo luogo la frequenza di risonanza del secondario. Per farlo si collega il generatore di funzioni all'estremo libero dell'induttore del secondario, si configura una funzione sinusoidale di ampiezza 1 V e frequenza vicina alla frequenza che si pensa sia vicina a quella di risonanza.

Successivamente si accende un oscilloscopio al quale è collegata un'antenna e lo si pone ad una distanza pari a 3-5 volte l'altezza del secondario.

Variando la frequenza sul generatore di funzioni si dovrebbe notare un aumento rapido del segnale percepito dall'oscilloscopio laddove la frequenza del generatore e del secondario sia la stessa. Cercando di massimizzare l'ampiezza dell'onda elettromagnetica sull'oscilloscopio si può stimare con precisione la frequenza di lavoro del secondario e, a valore ottenuto, si accorda il primario su quel valore.

Per imporre la stessa frequenza di lavoro sul primario si cortocircuita lo spinterometro come in Figura 37 (simulando il suo azionamento) e si varia l'induttanza del primario chiudendo il circuito in tratti diversi della sua lunghezza. Quello che si cerca è di ottenere l'amplificazione massima di un segnale di 1 V, sinusoidale, alla stessa frequenza precedentemente ottenuta con lo studio del secondario.

Sperimentalmente quello che si osserva è che, per variare significativamente l'ampiezza del segnale misurato, bisogna variare la lunghezza dell'induttore di diversi giri. Si consiglia di conseguenza di costruire l'induttore del primario con un numero sovrabbondante di giri e di tagliare il tubo alla giusta lunghezza solo a seguito dell'operazione di tapping.

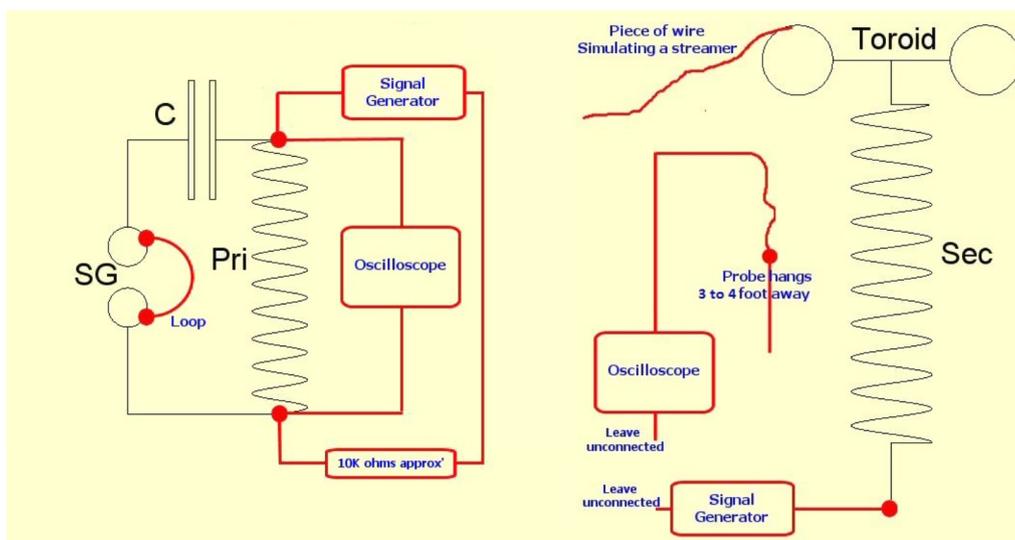


Figura 37: Schema operativo per il processo di tuning: a destra studio della frequenza del secondario e, a sinistra, studio della frequenza del primario. [18]

Data la profonda differenza dei due metodi di accordo della bobina si suggerisce di adottare il secondo metodo (qualora fosse disponibile la strumentazione) per conoscere l'ordine di grandezza della frequenza di risonanza e, solo in seguito, di adottare il primo metodo per verificare che la lunghezza dei fulmini prodotti sia effettivamente quella massima.

Per bobine di Tesla di grandi dimensioni si ha un aumento della capacità del secondario durante la produzione dei fulmini dal carico superiore. Di conseguenza sarebbe opportuno accordare il primario con una frequenza minore, pari al 95~97% di quella del secondario, in modo tale che le due possano coincidere all'attivazione di un fulmine.

## 4.2 Misura delle componenti della bobina

Le misurazioni prese durante l'esperienza sono state quasi interamente incentrate sullo studio dei rapporti geometrici delle componenti della bobina di Tesla, le quali sono state discusse precedentemente e separatamente nei vari sottocapitoli relativi alle varie componenti in questione.

Tra i risultati più importanti si possono citare le misurazioni dirette e indirette delle componenti circuitali della bobina di Tesla. Tra queste si ha la misura della capacità del primario, della induttanza del secondario e della frequenza di risonanza di entrambi i circuiti oltre che le misurazioni indirette dell'induttanza del primario e della capacità del secondario.

Le grandezze sopra riportate sono riportate a seguito. In particolare sono riportate con un'incertezza sperimentale quelle misurate direttamente e senza incertezza le grandezze fisiche stimate indirettamente.

$$\text{Capacità primario: } \implies C_P = (15.07 \pm 0.03) \text{ nF}$$

$$\text{Induttanza primario: } \implies L_P \approx 20 \text{ } \mu\text{H}$$

$$\text{Capacità secondario: } \implies C_S \approx 19 \text{ pF}$$

$$\text{Induttanza secondario: } \implies L_S = (15.72 \pm 0.04) \text{ mH}$$

$$\text{Frequenza di risonanza: } \implies \nu_{ris} = (293 \pm 1) \text{ kHz}$$

### 4.3 Misura del segnale elettromagnetico

Il sistema di tuning precedentemente descritto (4.1) sottolinea come al passaggio di corrente all'interno dell'induttore del secondario, si generino onde elettromagnetiche in prossimità della bobina di Tesla. Tramite un'antenna è possibile rilevare questo segnale e misurare la sua ampiezza e frequenza nel tempo. Nella Figura 38 si riporta il segnale elettromagnetico prodotto dalla bobina in regime di funzionamento.

L'andamento sinusoidale ha periodo  $T$  approssimativamente pari a  $3.2 \mu\text{s}$  (ovvero frequenza  $\nu = \frac{1}{T} = 312 \text{ kHz}$ ) e corrisponde al segnale relativo all'andamento della corrente nel secondario.

In prossimità dei massimi e minimi della sinusoide sono presenti numerose oscillazioni dovute alla presenza dei fulmini sul carico superiore (Figure 39-40). I fulmini, attirando gli ioni nell'aria circostante, porteranno un piccolo contributo di capacità al sistema e, essendo questa quantità a denominatore della frequenza di risonanza (2.30), si avrà una misurazione di un segnale variabile con grande rapidità (alta frequenza).

Si stima che tale segnale abbia una frequenza dell'ordine di grandezza delle prime decine dei MegaHertz ( $\approx 25 \text{ MHz}$ ).

Il segnale risulta visibile fin tanto che la tensione sul carico superiore sarà sufficiente a ionizzare l'aria. Quando la tensione risulta essere sotto tale livello si ha l'interruzione dei fulmini in aria e il ritorno dell'andamento sinusoidale del segnale, privato delle interferenze.

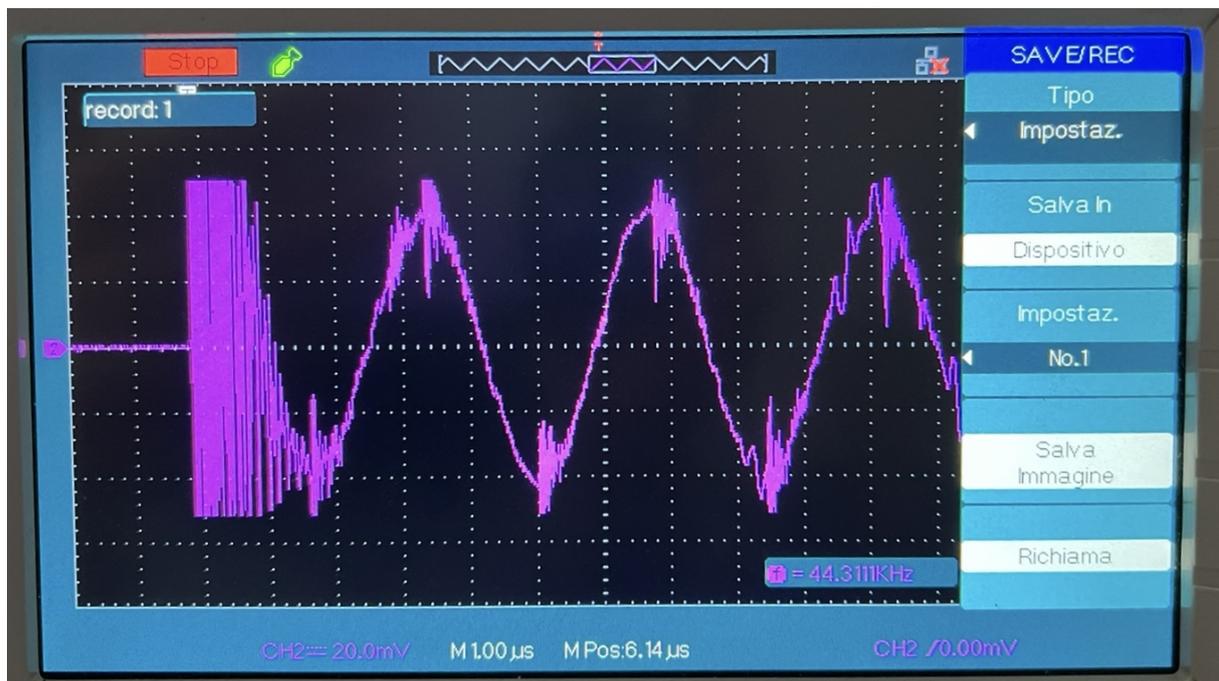


Figura 38: Segnale elettromagnetico prodotto dalla bobina in regime di funzionamento.



Figura 39: *Perturbazione dell'andamento della tensione sul carico superiore prodotta dai fulmini (prima foto).*

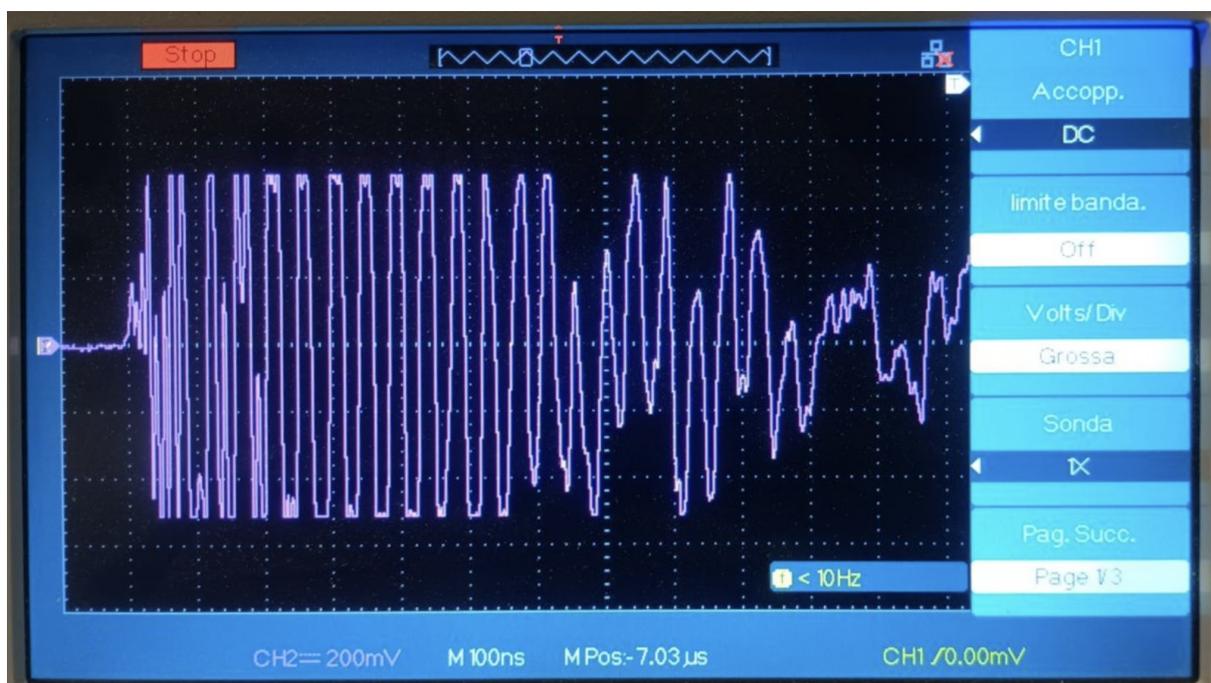


Figura 40: *Perturbazione dell'andamento della tensione sul carico superiore prodotta dai fulmini (seconda foto).*

## 4.4 TeslaMap e JavaTC

TeslaMap [10] e JavaTC [9] sono due programmi che si occupano di calcolare molti parametri della bobina di Tesla dato l'inserimento di alcune grandezze geometriche e circuitali (come lo spessore del filo del secondario e il valore della capacità del primario).

Per la costruzione di Sparky si sono utilizzati entrambi i programmi, facendo più affidamento agli output di JavaTC che a quelli di TeslaMap, ritenuto meno attendibile.

La scelta di preferire un programma rispetto all'altro è solamente data dal fatto che JavaTC richiede più parametri di TeslaMap e questo induce a pensare che possa in qualche modo portare a una trattazione più specifica e affidabile. Solamente a lavoro terminato si è convalidata questa ipotesi, confermata dal fatto che i dati in output da TeslaMap risultano meno precisi di quelli forniti da JavaTC (i quali sono in maggiore accordo con i valori sperimentali).

Si è comunque controllato che i programmi forniscano valori simili delle grandezze circuitali, indicando l'affidabilità di entrambi.

Si sottolinea che Sparky non è stata costruita in un singolo tentativo ma a seguito di numerose ricerche dei materiali, spesso difficili da reperire in tempi brevi. Questo ha portato a dover modificare il progetto in svariate occasioni. In alcuni casi i due programmi fornivano valori in output profondamente diversi e, in mancanza di punti di riferimento univoci, si è reso necessario rivedere alcuni aspetti del progetto.

Nelle seguenti Figure (41 - 44) sono riportati alcuni screen-shot riguardanti l'interfaccia utente dei due programmi con i dati relativi a Sparky.

A conferma della maggiore affidabilità di JavaTC si noti come la frequenza di lavoro della bobina, secondo TeslaMap, sia dell'ordine di 263 kHz mentre, quella di JavaTC, sia pari a 292 kHz, la quale si avvicina maggiormente ai 293 kHz misurati sperimentalmente.

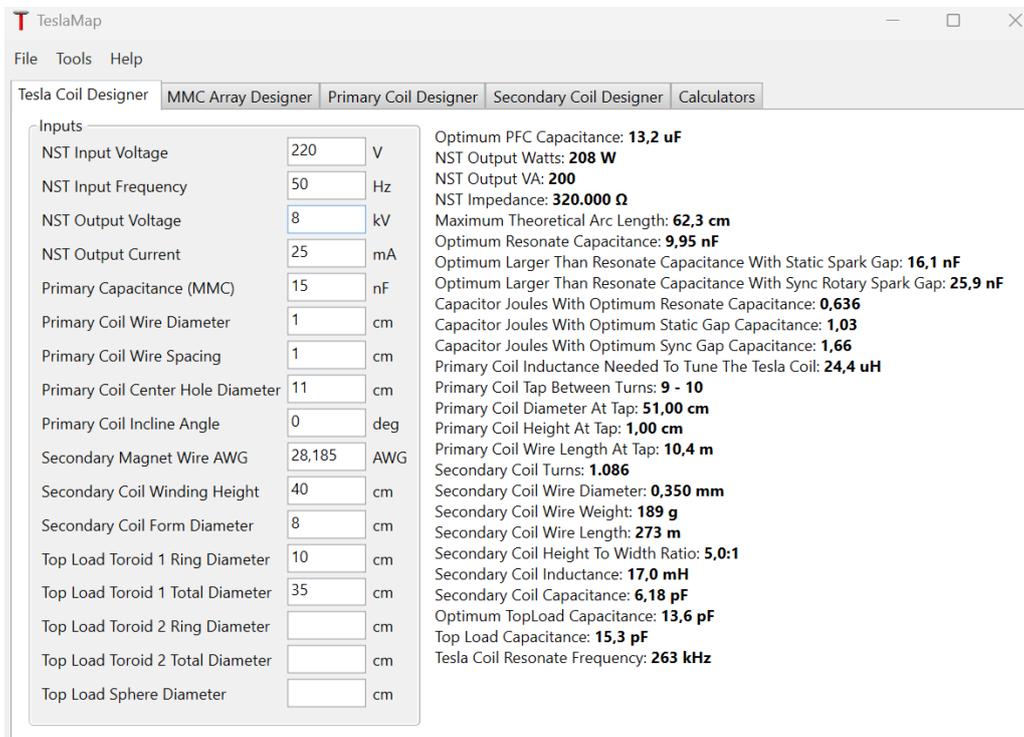


Figura 41: *Interfaccia utente TeslaMap (input-output).*

Select options for the model

Select Units:  Ambient Temperature:  Centigrade

Secondary Wire Material: Copper:  Aluminum:  Primary Wire Material: Copper:  Aluminum:  Primary Wire Type: Round:  Ribbon:  Primary Capacitor (uF):

Insert values for Ground Plane and optionally if coil is inside an enclosed space

Ground Radius:  Wall Radius:  Ceiling Height:

Insert values for the Secondary Coil

Radius 1 (LV end):  Radius 2 (HV end):  Height 1 (LV end):  Height 2 (HV end):  Turns:  AWG:  Wire Dia:

Insert values for the Primary Coil

Radius 1 (LV end):  Radius 2 (HV end):  Height 1 (LV end):  Height 2 (HV end):  Turns:  AWG:  Wire Dia:  Ribbon Height:  Ribbon Thickness:  Total Lead Length:  Lead Wire Diameter:

TOROID OBJECTS

Toroid Minor Diameter:  Toroid Major Diameter:  Toroid Center Height:  Connection: Topload:  Ground:

Count: 1

#1: minor=10, major=35, height=94, topload  
#2: \_\_\_\_\_  
#3: \_\_\_\_\_

Figura 42: Interfaccia utente JavaTC (input dati geometrici).

POWER CALCULATIONS (not for DRSSTC)

Rated Vin:  Rated Vout:  Rated mA:  Hertz:  Applied Vin:  Ballast Current Amps (optional):

Rated Transformer VA	200	volt*amps	Static Gap LTR Cap Size	0.0149	µF
Transformer Impedence	320000	Ohms	SRSB LTR Cap Size	0.0259	µF
Effective Output Voltage	8000	rms volts	Voltage Across Cap	11314	peak volts
Effective Input Current	0.91	rms amps	Recommended Cap Rating	28284	peak volts
Transformer Output Current	0.025	rms amps	Primary Cap Energy	0.96	joules
Effective Input VA	200	volt*amps	Primary Instantaneous Current	311	peak amps
Resonant Cap Size	0.0099	µF	Spark Length	51.9	cm
Power Factor Cap Size-PFC	13	µF	Sec Base Current	11.8	peak amps

Figura 43: Interfaccia utente JavaTC (input dati trasformatore).

SECONDARY COIL OUTPUT DATA			PRIMARY COIL OUTPUT DATA		
Secondary Resonant Frequency	291.69	kHz	Primary Resonant Frequency	291.69	kHz
Angle of Secondary	90	deg°	Percent Frequency is Detuned	0	%
Length of Winding	42	cm	Angle of Primary	0	deg°
Turns Per Unit	25	cm	Length of Wire	830.98	cm
Space Between Turns (e/e)	0.08572	mm	DC Resistance	1.82	mOhms
Length of Wire	263.89	m	Average Space Between Turns (e/e)	1.349	cm
H/D Aspect Ratio	5.25	:1	Proximity Between Coils	0.984	cm
DC Resistance	58.1721	Ohms	Minimum Proximity Between Coils	2.06	cm
Reactance at Resonance	26760	Ohms	Primary Inductance-Ldc	19.952	μH
Weight of Wire	0.182	kg	Cap Size Required for Resonance (reference)	0.015	μF
Effective Series Inductance- <b>Les</b>	14.601	mH	Primary Lead Inductance	0	μH
Equivalent Energy Inductance-Lee	15.678	mH	Mutual Inductance	73.174	μH
Low Frequency Inductance-Ldc	15.423	mH	Coupling Coefficient	0.132	k
Effective Shunt Capacitance- <b>Ces</b>	20.39	pF	Recommended Coupling Coefficient	0.126	k
Equivalent Energy Capacitance-Cee	18.989	pF	Energy Transfer	7.58	1/2 cycle
Low Frequency Capacitance-Cdc	31.348	pF	Total Energy Transfer Time	12.84	μs
Topload Effective Capacitance	14.959	pF			
Skin Depth	0.1466	mm			
Fraga AC Resistance	119.1966	Ohms			
Secondary Q	225				

Figura 44: *Interfaccia utente JavaTC (output dati).*

# Conclusioni

Il primo importante risultato è dato dal successo nella costruzione e nel funzionamento stesso di Sparky (Figure 45-46).

Questa bobina di Tesla, unitamente alla tesi, rappresentano il risultato di otto mesi di lavoro di ricerca delle fonti e di studio dei relativi risultati di ricerca. L'attività, inoltre, non si è fermata neppure a obiettivo raggiunto, ovvero successivamente alla prima accensione della bobina di Tesla, poiché sono seguiti ulteriori mesi di approfondimento e miglioramento dei materiali e delle tecniche utilizzate per la costruzione.

In particolare è stato oggetto d'interesse e di maggiore studi l'accoppiamento tra i due induttori e le frequenze di risonanza rispettivamente dei due circuiti. Si è, inoltre, studiato il comportamento dello spinterometro in presenza e assenza della ventola, vedendo pressoché invariata la lunghezza dei fulmini prodotti.



Figura 45: *Fulmini prodotti da Sparky con carico superiore toroidale*

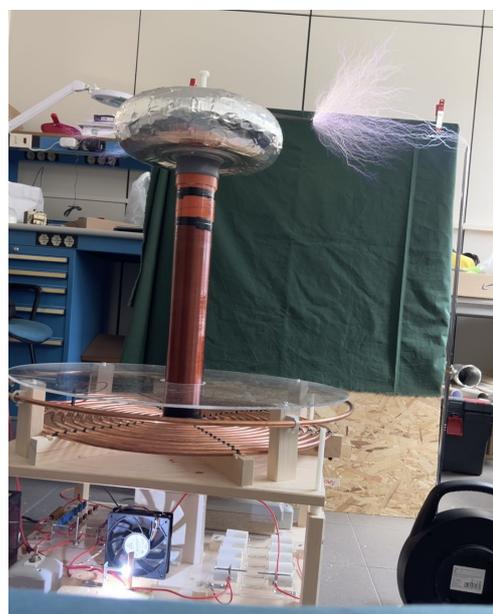


Figura 46: *Fulmini prodotti da Sparky con carico superiore toroidale con asta*

Legato a questo primo importante risultato e al successo nella sua costruzione si ha il successo di aver costruito una delle bobine di Tesla più grandi che il comune di Bologna avesse mai avuto e, al momento, Sparky è disposta in una teca nei corridoi del dipartimento di Fisica. Quanto appena discusso è fonte di grossa soddisfazione che sottolinea come, progetti del genere, siano affrontabili da studenti della triennale di Fisica e che, tali percorsi di studio, siano effettivamente formativi per gli studenti.

Tra i risultati più importanti si possono citare: le misurazioni dirette della capacità del primario, della induttanza del secondario e della frequenza di risonanza di entrambi i circuiti oltre che le misurazioni indirette dell'induttanza del primario e della capacità del secondario.

Le grandezze finali che caratterizzano Sparky sono riportate a seguito. In particolare sono riportate con un'incertezza sperimentale quelle misurate direttamente e senza incertezza le grandezze fisiche stimate indirettamente.

$$\text{Capacità primario: } \implies C_P = (15.07 \pm 0.03) \text{ nF}$$

$$\text{Induttanza primario: } \implies L_P \approx 20 \text{ }\mu\text{H}$$

$$\text{Capacità secondario: } \implies C_S \approx 19 \text{ pF}$$

$$\text{Induttanza secondario: } \implies L_S = (15.72 \pm 0.04) \text{ mH}$$

$$\text{Frequenza di risonanza: } \implies \nu_{ris} = (293 \pm 1) \text{ kHz}$$

Un ulteriore risultato che merita essere considerato è rappresentato dall'analisi del segnale elettromagnetico prodotto dalla bobina in regime di funzionamento (Figura 38). Una preliminare analisi del segnale permette di visualizzare la sinusoide principale di frequenza approssimativamente pari a 300 kHz e delle perturbazioni del segnale in prossimità dei picchi della sinusoide. Il disturbo è causato dalla variazione della frequenza di lavoro causata dalla presenza dei fulmini sul carico superiore della bobina.

# A Appendice

## A.1 Guadagno di tensione e trasferimento energetico

L'obiettivo principale di questa sezione è quello di ottenere una stima della tensione  $V_s$  sul carico superiore in funzione dei parametri circuitali della bobina. Prima di affrontare il calcolo di questa quantità è bene affrontare nel dettaglio le analogie e differenze che una bobina di Tesla ha nei confronti di un normale trasformatore (Figura 47). Queste saranno oggetto di discussione in relazione alla disposizione spaziale dell'avvolgimento primario e secondario dei due rispettivi sistemi elettronici.

### Bobina di Tesla e trasformatore: analogie e differenze

L'unica analogia presente tra una bobina di Tesla e un trasformatore è legata al funzionamento in quanto entrambi i sistemi hanno l'obiettivo di trasferire energia tra due circuiti elettrici senza collegamenti fra loro. In tal modo, viene sfruttata la mutua induzione di due avvolgimenti.

Le differenze sono legate al modo in cui l'obiettivo, ovvero il trasferimento energetico, viene raggiunto.

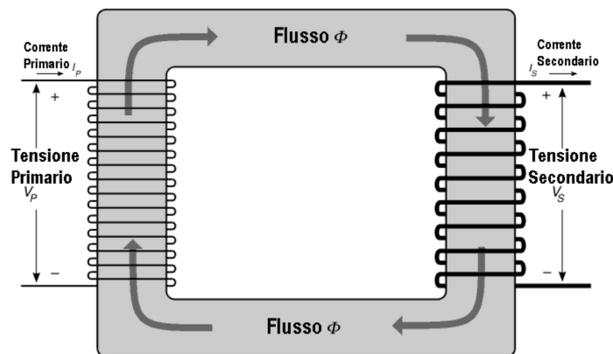


Figura 47: *Schema semplificato di un trasformatore.*

Esiste una grandezza, il "coefficiente di accoppiamento"  $k$ , che rappresenta la frazione di campo magnetico prodotto dagli avvolgimenti del primario accoppiati al secondario dove, col termine "accoppiamento", si intende la frazione di campo che è causa del trasferimento di energia. Essa è una quantità definita dalla geometria del sistema e non da quantità dinamiche quali correnti o differenze di potenziale. In un generico trasformatore, per minimizzare le perdite energetiche, si cerca di far tendere all'unità il coefficiente di accoppiamento  $k$  e, per farlo, si sceglie di avvolgere le spire a un traferro che funge da mezzo per il trasferimento di energia.

In una bobina di Tesla, come già descritto dai capitoli precedenti, si opta per una soluzione geometricamente svantaggiosa e ciò comporta l'abbassamento del coefficiente  $k$  in un range di valori compresi tra 0.13 e 0.22 [17]. A seguito del minore valore di questo coefficiente la bobina sfrutta un ulteriore sistema (non usato nei trasformatori) per il passaggio di energia: la risonanza. La bobina di Tesla è costruita (e poi accordata (3.8.1)) in modo tale che il passaggio di energia non sia dovuto all'alto flusso di campo magnetico

nelle spire, ma alla stessa frequenza di risonanza del circuito primario e secondario:

$$\nu_p = \nu_s \implies \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C_p}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \implies L_p C_p = L_s C_s \quad (\text{A.1})$$

Si hanno, infine, ulteriori ragioni che giustificano la scelta di costruire una bobina di Tesla in maniera così diversa da un trasformatore.

In primo luogo, facendo riferimento allo schema in Figura 47 si nota come il secondario sia totalmente avvolto al traferro e, una situazione simile, risulterebbe inaccettabile per una bobina di Tesla. Infatti sarebbe richiesto un traferro di grandi dimensioni e sarebbe impossibile montare un carico superiore da cui liberare i fulmini. Di conseguenza si preferisce abbandonare l'utilizzo del traferro e utilizzare l'aria come mezzo di propagazione del campo magnetico e trasporto dell'energia tra i due circuiti.

Il coefficiente di accoppiamento  $k$  non sarebbe possibile tenerlo prossimo all'unità in quanto si dovrebbe ridurre la distanza tra gli avvolgimenti al di sotto di una distanza critica, causando ponti elettrici tra loro, rovinandoli entrambi. Modificare le frequenze proprie dei due circuiti risulta, quindi, l'unico reale parametro sul quale operare e che sarà la soluzione del problema del passaggio di energia.

### Guadagno di tensione

Avendo chiarito la motivazione della scelta di mettere in risonanza il primario col secondario è ora possibile analizzare il guadagno di tensione sul carico superiore.

Ipotizzando un regime in cui l'energia viene conservata (ovvero trascurando le perdite descritte nella sezione (A.2)) si può dire che l'energia accumulata nei condensatori del primario  $E_p$  sia interamente trasferita nel secondario, sotto forma di accumulo di cariche elettriche sul carico superiore, assumendo valore  $E_s$ .

Dall'uguaglianza di queste energie si ottiene:

$$E_p = E_s \implies \frac{1}{2}C_p V_p^2 = \frac{1}{2}C_s V_s^2 \implies \frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{C_p}{C_s}} \quad (\text{A.2})$$

Sostituendo la (A.1) nella (A.2) si ottiene:

$$\frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{L_s}{L_p}} \quad (\text{A.3})$$

Quindi è possibile stimare che, in presenza di un induttore primario di una decina di avvolgimenti e un secondario di circa mille spire,  $V_s$  può ottenere un valore dell'ordine di 0.1 MV fino all'ordine di 1 MV per bobine di maggiori dimensioni.

Nella trattazione precedente si è fatto uso della relazione (3.13) per stimare il valore di  $L_s$  e della (A.6) per la  $L_p$ , assumendo  $V_p$  pari alla tensione in uscita del trasformatore nel primario.

Nel caso particolare di Sparky si ipotizza di raggiungere una tensione pari a  $V_s \approx 224$  kV

## A.2 Perdite energetiche

Nella stima della tensione  $V_s$  del carico superiore, nel paragrafo precedente, si è assunto che le perdite di energia possano essere trascurate. Questa sezione serve a sottolineare quali semplificazioni sono state apportate in tale dimostrazione e quali realmente siano le dissipazioni di energia in una bobina di Tesla come Sparky.

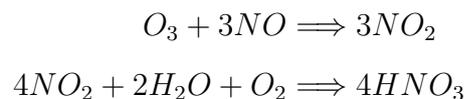
Il seguente elenco raccoglie le perdite più significative:

- Uno fra gli effetti dissipativi più conosciuti è quello dell'effetto Joule. L'energia persa su unità di tempo è pari a  $P = RI^2$  dove  $R$  rappresenta la resistenza dei cavi conduttori utilizzati nella bobina e  $I$  la corrente che ci scorre attraverso. In Sparky sono stati utilizzati diversi tipi di cavi (da quelli adatti a lavorare a tensioni di 10 kV a quelli più sottili dell'avvolgimento secondario) che presentano resistenze differenti date dalla seconda legge di Ohm:

$$R = \rho \frac{l}{\Sigma} \quad (\text{A.4})$$

dove  $\rho$  è la resistenza specifica del materiale (spesso utilizzato il rame),  $l$  la sua lunghezza e  $\Sigma$  la sua sezione.

- Lo spinterometro rappresenta una grossa perdita di energia per il sistema in quanto, ad ogni suo azionamento, si ha un notevole aumento di temperatura dell'aria circostante (energia termica) e produzione di rumore (energia sonora). In aggiunta non sono da trascurare l'energia per ionizzare le molecole dell'aria e quella utilizzata per ossidare gli elettrodi dello spinterometro stesso (energia chimica).
- I condensatori del primario presentano un dielettrico all'interno dello spazio tra le loro armature e, in presenza di correnti alternate, una frazione di energia viene dissipata dalla sua polarizzazione in direzioni alternate, riscaldando il condensatore.
- Il secondario è in buona approssimazione assimilabile a un'antenna emittente di onde elettromagnetiche a 293 kHz, rilasciando energia sotto forma di radiazione.
- L'"effetto corona" è rappresentato da un continuo passaggio di cariche elettriche da un conduttore ad alta tensione a un fluido circostante. È un effetto simile alla ionizzazione dell'aria nello spinterometro ma presente, in questo caso, nel carico superiore toroidale. Si manifesta come una sottile e debole aurora violacea in prossimità della superficie del toro e risulta visibile solamente in ambienti poco illuminati. Nonostante risulti poco visibile alla luce diurna non significa che non abbia effetti significativi sull'ambiente circostante, poichè sulla superficie del toro, date queste condizioni, si verifica la seguente reazione chimica:



Il prodotto  $HNO_3$  non solo risulta corrosivo per i materiali, rendendoli più fragili nel tempo, ma è tossico per la maggior parte degli esseri viventi e per l'ambiente. Di questo si parlerà nel dettaglio nella sezione (A.4).

Si può facilmente capire che tutti gli effetti elencati ai punti precedenti non possono essere trascurati in generale e la trattazione del paragrafo (A.1) è da intendersi come "limite superiore" della tensione raggiungibile, alla quale bisogna sottrarre un contributo energetico pari a quello di tutte le perdite appena descritte.

### A.3 Relazioni empiriche e stime delle grandezze circuitali

Documentandosi in modo autonomo, in rete, riguardo metodologie e procedimenti necessari alla stima dei valori delle componenti circuitali della bobina, è inevitabile incontrare un certo numero di relazioni empiriche [19]. Tra tutte le relazioni ne esistono quattro di fondamentale importanza che stimano diverse delle più importanti grandezze della bobina (quali le induttanze e le capacità) [20].

Le seguenti formule sono state teorizzate a seguito di considerazioni geometriche e, per quanto non sia consigliato utilizzare una relazione senza sapere come sia stata ricavata (in modo da sapere i limiti effettivi della teoria), si è scelto di dedicare loro un sezione a parte. Questo è stato fatto per sottolineare la possibilità di fare appello a tali relazioni senza, però, attribuire loro una profonda validità scientifica.

Il coefficiente numerico  $f_c = 0.3937$  presente nelle relazioni (A.5) - (A.8) ha il ruolo di convertire le quantità geometriche da "pollici" a "centimetri". Sono stati inseriti i valori per numerici per il caso specifico di Sparky.

#### Induttore secondario e primario

Nel caso si voglia stimare l'induttanza  $L_s$  (in mH) dell'avvolgimento cilindrico del secondario è possibile utilizzare la seguente relazione:

$$L_s = f_c \left[ \frac{(NR)^2}{9R + 10H} \right] \approx 71 \text{ mH} \quad (\text{A.5})$$

Nella quale  $N$  è il numero di giri,  $R$  è il raggio della bobina e  $H$  la sua altezza (entrambe misurate in cm) (Figura 48).

Di natura simile è la relazione che lega le variabili geometriche per stimare l'induttanza  $L_p$  (in  $\mu\text{H}$ ) dell'avvolgimento del primario:

$$L_p = f_c \left[ \frac{(NR)^2}{8R + 11W} \right] \approx 89 \mu\text{H} \quad (\text{A.6})$$

In cui  $N$  è il numero di giri,  $R$  è il raggio medio dell'induttore ( $R = (R_{Max} + R_{min})/2$ ) (in cm) e  $W$  è lo "spessore" dell'induttore ( $W = R_{Max} - R_{min}$ ) (in cm). Si faccia riferimento alla Figura 49 per avere una spiegazione più intuitiva del significato di queste grandezze geometriche.

Entrambe le relazioni sopra proposte offrono un corretto ordine di grandezza delle quantità misurate, senza però offrire valori compatibili con i reali valori delle corrispettive componenti circuitali (al termine del paragrafo, nella pagina successiva, sono stati riportati i valori sperimentali di riferimento).

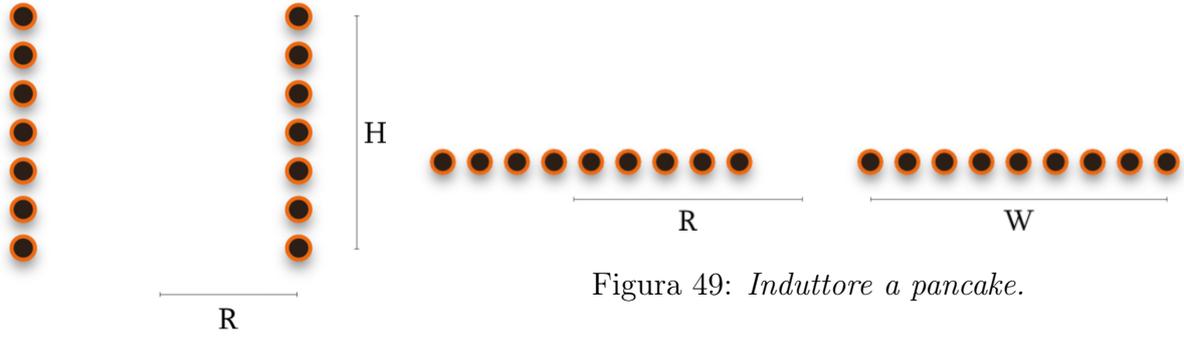


Figura 49: *Induttore a pancake.*

Figura 48: *Induttore cilindrico.*

### Capacità secondario e toroide

Tra le altre quantità di difficile stima si ha la capacità  $C_{is}$  propria dell'induttore del secondario. Si suppone che, in un induttore sottoposto a differenze di potenziale, la tensione si equipartisca tra le spire di cui è composto. Questa equipartizione di potenziale dà luogo a un fenomeno fisico molto simile a quello necessario alla formazione di condensatori. I condensatori in questione vedono come armature i fili di due avvolgimenti adiacenti e come dielettrico la loro sottile protezione in materiale isolante. Di conseguenza l'induttore del secondario vedrà la formazione di capacità parassite lungo tutta la sua estensione. Il valore di tale capacità è dato dalla:

$$C_{is} = f_c \left( 0.29H + 0.41R + 1.94 \sqrt{\frac{R^3}{H}} \right) \approx 8.6 \text{ pF} \quad (\text{A.7})$$

Dove le grandezze  $R$  e  $H$  sono rispettivamente il raggio e l'altezza dell'avvolgimento secondario (in cm) (Figura 48). Inoltre è possibile calcolare la capacità  $C_t$  del toroide posto sul carico superiore secondo la seguente relazione:

$$C_t = f_c \left[ 1.4 \left( 1.2781 - \frac{d}{D} \right) \sqrt{\pi d(D-d)} \right] \approx 15.3 \text{ pF} \quad (\text{A.8})$$

Dove  $d$  e  $D$  sono rispettivamente il diametro della sezione del toro e il suo diametro maggiore (in cm) (Figura 34). La capacità efficace  $C_s$  del secondario può essere ottenuta facendo la somma di queste due capacità trattandole in serie:

$$C_s = C_{is} + C_t \approx 24 \text{ pF} \quad (\text{A.9})$$

Anche in questo caso la relazione offre un corretto ordine di grandezza fornendo una stima relativamente accettabile della capacità efficace del secondario. Si ricorda che si tratta solo di un'approssimazione, in quanto la capacità efficace della bobina non è solamente una quantità geometrica ma dipende anche dall'ambiente circostante.

## Valori effettivi delle grandezze circuitali

Per offrire un paragone immediato con i valori effettivi delle componenti circuitali di Sparky si è scelto di riportarli a seguito:

$$\text{Capacità primario: } \implies C_P = (15.07 \pm 0.03) \text{ nF}$$

$$\text{Induttanza primario: } \implies L_P \approx 20 \text{ }\mu\text{H}$$

$$\text{Capacità secondario: } \implies C_S \approx 19 \text{ pF}$$

$$\text{Induttanza secondario: } \implies L_S = (15.72 \pm 0.04) \text{ mH}$$

## A.4 Avvertenze e precauzioni: cosa NON fare con la bobina

Nelle sezioni precedenti si è sottolineata diverse volte la presenza dei diversi sistemi di protezione la cui presenza, tuttavia, non deve far pensare che la bobina di Tesla sia un oggetto "sicuro". Tutt'altro.

Esistono diverse problematiche che si possono riscontrare a seguito di un errato utilizzo di questo dispositivo e sono diverse tra loro per entità del danno prodotto e per rischio di produrlo [21]. A seguito si è riportata una lista dei potenziali rischi in cui si potrebbe incorrere in presenza di una bobina di Tesla.

- La bobina di Tesla non è un "generatore Van de Graaff" [22] e, questa, è una differenza fondamentale alla quale spesso non vi si dedica sufficiente attenzione [23]. Dal punto di vista circuitale sono oggetti totalmente diversi tra loro e, sfortunatamente, sono spesso confusi in sede di divulgazione per le masse poiché spesso realizzati con design simili. Entrambi gli oggetti vedono come obiettivo principale quello di portare un carico superiore a tensioni maggiori rispetto al potenziale degli oggetti circostanti. La differenza è rappresentata dal metodo (lento) di ricarica di un generatore Van de Graaff e dalla possibilità di toccarne la sfera posta sul carico superiore. Un esempio divulgativo è rappresentato dall'immagine riportata in Figura 50.



Figura 50: *Immagine divulgativa tipo di un generatore Van de Graaff.* [22]

Una bobina di Tesla è caratterizzata da una ricarica e scarica molto più rapida rispetto a quella del "Van de Graff" e questo è sinonimo della sua pericolosità. Sebbene i due oggetti appaiano simili, hanno effetti totalmente diversi su un eventuale soggetto intenzionato ad avere un contatto fisico con il carico superiore di ognuno di essi. Mentre il Il "Van de Graaff" non presenta particolari rischi, la bobina di Tesla, dal canto suo, può causare danni anche di grossa entità, che saranno meglio approfonditi nei seguenti punti.

- Come ogni oggetto potenzialmente pericoloso è bene che venga maneggiata solamente da coloro che conoscono nei dettagli il funzionamento della bobina e che saprebbero modificarne opportunamente lo stato. Si consiglia quindi di evitare qualsiasi contatto con minorenni o con persone che potrebbero accidentalmente causare danni al circuito e a se stessi, non conoscendo nel dettaglio una bobina di Tesla [24].
- I fulmini prodotti dalla bobina possono causare diversi tipi di lesioni. La più pericolosa riguarda la potenziale interferenza di natura elettro-magnetica con apparecchi medici pacemaker che potrebbe causarne una modifica della frequenza di funzionamento e potrebbe avere immediati effetti negativi sulla salute del portatore del dispositivo medico.
- Il funzionamento continuo dello spinterometro, la sua ventola e la generazione di fulmini del carico superiore rappresentano le principali fonti di rumore della bobina. Tutte queste fonti hanno contribuito a produrre un rumore misurato equivalente a 89.7 dB. Raccomandato l'uso di cuffie di protezione.
- Come già anticipato nella sezione (A.2) si ha, sulle regioni ad alta tensione, produzione di  $HNO_3$ . La sua produzione rappresenta un evidente problema per la salute di chiunque sia in prossimità della bobina, soprattutto se prodotto in locali chiusi [25]. La presenza nella bobina del sistema di ventilazione contribuisce alla diffusione di tale composto chimico, aumentando la probabilità di contatto diretto. Sebbene l'acido nitrico risulti nocivo in forma liquida in concentrazioni maggiori del 60% è comunque possibile riscontrare alcuni effetti in presenza gassosa:
  - Inalazione: Tosse, mal di gola, sensazione di bruciore, respiro affannoso, difficoltà respiratoria.
  - Occhi: Arrossamento, dolore, gravi ustioni.
- Nella sezione (3.5.1) si è dimostrato che la corrente, in regime alternato alle alte frequenze, scorre solamente sulle superfici dei conduttori ma, nonostante questo studio, non è da intendersi che i danni causati da una scarica elettrica siano di entità limitata. Il fatto che la corrente non interessi l'intera sezione del conduttore non fornisce alcuna informazione sull'entità del danno causato a quest'ultimo. Un ipotetico tessuto organico attraversato da questa corrente, anche se solo superficialmente, potrebbe alterare le proprie caratteristiche chimico-biologiche, comportando lesioni ben più importanti di una semplice ustione. Si consiglia di tenere sempre la mano sinistra in tasca per evitare che una scarica occasionale attraversi il corpo tramite il percorso "braccio destro - torace - braccio sinistro". In tal modo si proteggerà il cuore dalla corrente che scorrerà lontano, verso il piede destro, tramite la linea "braccio destro - gamba destra".
- Eventuali apparecchi elettronici (computer, telefoni cellulare, etc...) potrebbero smettere di funzionare per essere stati raggiunti da un fulmine prodotto dalla bobina. In particolare, sono stati documentati casi di esplosione della batteria al litio presente nei telefoni portatili a causa del surriscaldamento oltre la "temperatura critica" e a causa dell'esposizione all'ossigeno dell'atmosfera.

- Nel caso la bobina non sia stata costruita con cura o con materiali di basso costo potrebbe verificarsi una dissaldatura tra i vari componenti causata dalle alte correnti o tensioni. L'entità del danno prodotto varia in base alla componente interessata dal fenomeno in quanto se la dissaldatura avvenisse a seguito del trasformatore si avrebbe l'interruzione immediata della corrente nella bobina con effetto simile al suo spegnimento.  
Nel caso, ben più grave, in cui la dissaldatura avvenisse nei terminali dei condensatori del primario si potrebbe verificare una esplosione di questi ultimi causata dal loro sovraccaricamento [26].
- Lo spinterometro e il carico superiore non sono solo fonti di onde elettromagnetiche visibili ma si ha anche una notevole produzione di luce ultravioletta. Questa luce ha la proprietà di rovinare e bruciare irrimediabilmente la retina a chiunque tenti di osservare queste regioni ad occhio nudo per prolungati periodi di tempo. Si consiglia l'utilizzo di occhiali protettivi con filtro ultravioletto.
- La presenza di oggetti infiammabili nelle circostanze della bobina aumenta la probabilità di fuochi occasionali o combustione. Si raccomanda di tenere a portata di mano un estintore.
- Per quanto in Sparky si siano adoperati numerosi accorgimenti di sicurezza è possibile che rimanga della carica residua accumulata nei condensatori. Si consiglia di lasciar riposare (scaricare) la bobina per una decina di secondi prima di avvicinarsi, a seguito di ogni azionamento.
- Nel caso la bobina non dovesse fare fulmini non significa che non passi corrente nel suo circuito. Si consiglia di non avvicinarsi nei momenti in cui si sospetta che possa passare della corrente all'interno del circuito in quanto la presenza di qualcuno potrebbe modificare la capacità del secondario ed entrare in risonanza, scatenando un fulmine che potrebbe colpire il soggetto [27].

## A.5 Piccoli esperimenti e curiosità

La bobina di Tesla, oggi, non ricopre particolari ruoli all'interno di sistemi elettronici complessi e vede la sua maggiore utilità nella divulgazione scientifica per le masse. Tra i vari utilizzi didattici di una bobina di Tesla si può menzionare:

1. Possibilità di accensione dei tubi al neon a breve distanza, senza che questi siano collegati ad alcuna fonte energetica e la cui accensione è dovuta allo sfruttamento della radiazione elettromagnetica prodotta dalla bobina.
2. Attivazione della fluorescenza di tubi o sostanze che presentano tali caratteristiche fisico-chimiche.
3. Dimostrazione di come il plasma sia un buon conduttore elettrico facendo attraversare una fiamma a un fulmine che raggiungerebbe archi di maggiore portata.
4. Studio dell'effetto pelle proteggendo con una gabbia di Faraday un LED o un tubo a neon e verificare che non si accende (a parità di distanza in confronto al "punto 1" di questa lista).
5. Variazione della frequenza di risonanza della bobina al fine di studiare il significato di "onde sonore". In quanto i fulmini produrrebbero suoni aventi frequenza diversa e leggermente variabile in funzione della frequenza della tensione della fonte energetica. [28]

## B Bibliografia

1. Wikipedia italiano, United States Patent and Trademark Office,  
[https://it.wikipedia.org/wiki/United\\_States\\_Patent\\_and\\_Trademark\\_Office](https://it.wikipedia.org/wiki/United_States_Patent_and_Trademark_Office)
2. Wikipedia italiano, Bobina di Tesla,  
[https://it.wikipedia.org/wiki/Bobina\\_di\\_Tesla#Storia](https://it.wikipedia.org/wiki/Bobina_di_Tesla#Storia)
3. Wikipedia Inglese, Tesla coil,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla\\_coil#History](https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_coil#History)
4. Wikipedia Inglese, Nikola Tesla,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Nikola\\_Tesla](https://en.wikipedia.org/wiki/Nikola_Tesla)
5. Wikipedia Inglese, History of the Tesla coil,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_the\\_Tesla\\_coil](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_Tesla_coil)
6. Wikipedia Inglese, Tesla coil, Reference n.12,  
[https://hazardousphysics.christophergerekos.eu/main/zeus/The\\_Zeus\\_Tesla\\_Coil\\_1.html](https://hazardousphysics.christophergerekos.eu/main/zeus/The_Zeus_Tesla_Coil_1.html)
7. Extrabyte,  
<https://www.extrabyte.info/2017/03/17/la-risonanza-in-un-oscillatore-armonico-ideale/>
8. Richie's Tesla Coil Web Page,  
<http://www.richieburnett.co.uk/operation.html#operation>
9. Javascript Tesla Coil Designer,  
<http://www.tesla.nu/programs/javatc/javatc.html>
10. TeslaMap,  
<https://www.TeslaMap.com/>
11. Octopart,  
<https://octopart.com/datasheet/942c20p15k-f-cornell+dubilier-4030345>
12. Tesla Coil Design,  
[http://www.teslacoildesign.com/design.html#design\\_primarycap](http://www.teslacoildesign.com/design.html#design_primarycap)
13. NGK Spark-gap,  
<https://www.ngk.com/ngk-spark-plug-metal-types>
14. Wikipedia Inglese, Skin effect,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Skin\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Skin_effect)
15. Digchip,  
<https://digchip.com/datasheets/parts/datasheet/919/S20K1000.php>
16. Hvtesla,  
<http://www.hvtesla.com/design.html>

17. YouMath,  
<https://www.youmath.it/lezioni/fisica/elettricit%C3%A0/4881-potere-disperdente-delle-punte.html>
18. Hvtesla,  
<http://www.hvtesla.com/tuning.html>
19. The ultimate Tesla coil design and construction guide,  
<https://ia902701.us.archive.org/22/items/TheUltimateTeslaCoilDesignAndConstructionGuide/The%20Ultimate%20Tesla%20Coil%20Design%20and%20Construction%20Guide.pdf>
20. YouTube, Retroci\u00eancia,  
<https://www.youtube.com/watch?v=PmWCO2UKILA&t=666s>
21. Sistemieconsulenze: differenza tra rischio e pericolo,  
<https://www.sistemieconsulenze.it/le-differenze-rischio-e-pericolo/>
22. Wikipedia Inglese, Van de Graaff generator,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Van\\_de\\_Graaff\\_generator](https://en.wikipedia.org/wiki/Van_de_Graaff_generator)
23. Spectrumscientifics,  
<https://spectrumscientifics.wordpress.com/2016/08/16/making-electricity-van-de-graaff-generators-and-tesla-coils/>
24. Onetesla, Safety Warnings  
<https://onetesla.com/oneteslats-manual/safety>
25. International Chemical Safety Cards  
[https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_lang=it&p\\_card\\_id=0183&p\\_version=2](https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=it&p_card_id=0183&p_version=2)
26. Tesla Coil Safety Warnings  
<https://www.eltem.fi/safety.html>
27. Tesla Coil Hazards and Safety  
<https://donklipstein.com/tcsafe.html>
28. Onetesla, Tesla Coils - Frequently Asked Questions  
<https://onetesla.com/tesla-coil-faq>
29. Tesla Coil Design,  
[http://www.teslacoildesign.com/construction.html#construction\\_grounding](http://www.teslacoildesign.com/construction.html#construction_grounding)