

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Augusto Righi”
Corso di Laurea in Fisica

STUDIO, PROGETTAZIONE E
COSTRUZIONE DI UNA BOBINA DI
TESLA A SPARK GAP

Relatore:
Professore
Gabrielli Alessandro

Presentata da:
Garelli Martino

Correltore:
Professore
Franchini Matteo

Anno Accademico 2024-25

Introduzione

Il progetto qui esposto è la progettazione e costruzione di un dispositivo noto come *Tesla Coil* oppure in italiano *Bobina di Tesla*. Questa tesi è frutto di mesi di lavoro, sia pratico che di ricerca, mio e del mio collega Naglieri Simone.

Questo progetto non sarebbe stato possibile senza il supporto della RENCO SPA di Pesaro <https://www.renco.it/>.

La costruzione si è svolta all'interno del laboratorio OPH (*Open Physics Hub*), link alla newsletter:

https://apps.difa.unibo.it/files/people/Str957-cluster/oph/OPH_Newsletter_09_July2024.pdf.

L'obiettivo dei nostri elaborati è duplice: esporre il funzionamento teorico dell'apparecchio al lettore e al contempo riuscire a spiegarne le caratteristiche costruttive in modo tale che rimanga un utile dispositivo dimostrativo per il dipartimento e le generazioni future di studenti. Verrà approfondito il funzionamento di ogni parte del circuito e i principi che ne sono alla base con particolare attenzione alla giustificazione delle nostre scelte costruttive. Speriamo quindi che queste tesi possano essere un'utile guida sia per i futuri utilizzatori di "Sparky" (nome proprio del progetto) sia per tutti coloro che si vorranno cimentare in progetti simili. Speriamo quindi di contribuire alla già ricchissima libreria di informazioni gratuite presenti su internet a riguardo visto che è stata proprio questa condivisione dei saperi ad ispirarci in primo luogo.

Inoltre desideriamo che la bobina rimanga a disposizione del dipartimento per esperimenti, studi e dimostrazioni future; a beneficio della comunità studentesca tutta. A tale scopo questa tesi conterrà anche approfondite istruzioni di utilizzo e sicurezza del dispositivo.

Indice

Introduzione	1
1 Cos'è una Bobina di Tesla?	4
1.1 Storia	4
1.2 Significato moderno	5
1.3 SPARKY!	6
2 Il funzionamento	8
2.1 Principi generali	8
2.2 Circuiti LC	8
2.2.1 Soluzione omogenea	10
2.2.2 Soluzione con forzante	10
2.2.3 Frequenza di Risonanza	13
2.3 Analisi Circuitale	13
2.3.1 Prima fase: Caricamento dei condensatori	14
2.3.2 Seconda fase: Trasferimento energetico	15
3 Progettazione e Costruzione	16
3.1 Trasformatore	16
3.2 Condensatori	19
3.3 Spinterometro o Spark Gap	22
3.4 Avvolgimento primario	23
3.4.1 Effetto pelle	24
3.5 Elementi circuitali "secondari"	26
3.5.1 Condensatore PFC	26
3.5.2 Variac	28
3.5.3 Filtro Terry Fritz	28
3.5.4 Filtro di linea per corrente alternata	30
3.5.5 Protezioni Primario	31
3.6 Avvolgimento Secondario	31
3.7 Carico Superiore o Top Load	33

3.7.1	Toro di Sparky	35
3.8	Messa a terra	36
4	Risultati e Utilizzo	38
4.1	"Tuning" della bobina	38
4.1.1	Procedimento pratico di tuning: tapping	39
4.1.2	Procedimento pratico di tuning : valutazione frequenze di risonanza	39
4.2	Misure delle componenti di Sparky	41
4.3	Analisi segnali in uscita	42
4.4	Programmi di simulazione: TeslaMap e JavaTC	44
5	Conclusioni	47
6	Utilizzo e SICUREZZA	49
A	APPENDICI	53
A.1	Alta tensione	53
A.2	Corona Discharge	53
A.3	Trasformatori	54
7	Ringraziamenti	58

Capitolo 1

Cos'è una Bobina di Tesla?

Questa tesi ripercorrerà la costruzione di un dispositivo noto come "Tesla Coil". Questo famoso dispositivo ha un posto speciale nella storia della fisica sperimentale, soprattutto a causa del suo inventore dal quale prende il nome: Nikola Tesla, in serbo Никола Тесла.

Tesla fu un grande inventore vissuto a cavallo tra 800 e 900. I suoi studi hanno portato enormi contributi alla conoscenza delle correnti alternate e dei circuiti basati su di essa. Una parte importante delle sue ricerche si concentrò sul trovare un modo per trasmettere energia a distanza senza collegamenti fisici tra dispositivi. Tra questi dispositivi il più noto è di certo il "Tesla Coil", in italiano Bobina di Tesla. Questo progetto all'apparenza molto semplice nasconde nel suo funzionamento interessanti principi fisici.

1.1 Storia

Nikola Tesla è, oggi come al suo tempo, considerato un personaggio al contempo geniale ed eccentrico. I suoi lavori in ambito scientifico, sia pratico che teorico, spaziano tra moltissimi ambiti, noi ci concentreremo sulle ricerche che Tesla sperava potessero portarlo alla scoperta della trasmissione di elettricità senza fili. Nonostante oggi sappiamo che questo metodo di trasmissione dell'energia sia profondamente inefficiente per l'utilizzo che Tesla ricercava, i suoi studi sono stati fondamentali per la comprensione delle complesse interazioni tra campi elettromagnetici e materia. Il primo riferimento diretto al progetto che poi sarebbe divenuto famoso con il nome di "Tesla coil" è nel 23 giugno 1891 quando al *United States Patent and Trademark Office* Tesla depositò un brevetto dal titolo *System Of Electric Lighting* [1]. Nonostante gli innumerevoli brevetti simili depositati in quel periodo dallo scienziato questo è il primo in cui possiamo identificare alcuni elementi essenziali: un trasformatore primario ad alto voltaggio, condensatori e uno spark gap. Il 20 maggio dello stesso anno Tesla tenne una conferenza al *Columbia College of New York City* dal titolo "*Experiments with Alternate Currents of Very High*

Frequency and their Application to Methods of Artificial Illumination [2]. Questi furono i primi passi verso lo studio di quella che Tesla chiamava al tempo "energia senza fili".

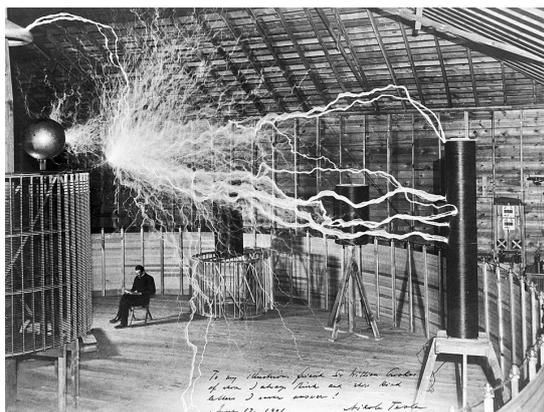


Figura 1.1: Nikola Tesla nel suo laboratorio a Colorado Springs attorno al 1899

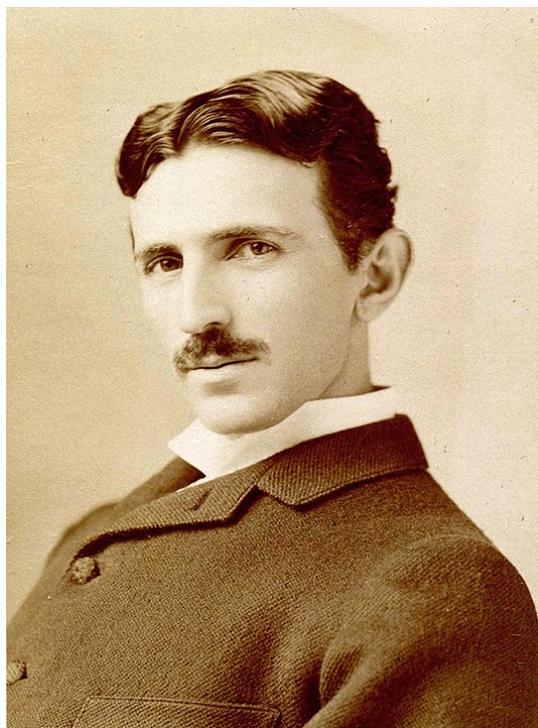


Figura 1.2: Fotoritratto di Nikola Tesla nel 1890

1.2 Significato moderno

Oggigiorno la bobina di Tesla è uno dei progetti che più famosi nelle comunità di appassionati su internet. Pur non essendo banale nella sua progettazione vedremo che il funzionamento fisico è sufficientemente semplice.

In linea generale è corretto descrivere una bobina di Tesla come un doppio trasformatore risonante che lavora ad altissime tensioni A.1. Si compone infatti di due circuiti RLC accoppiati, ovvero in grado di indurre correnti l'uno sull'altro. A causa della popolarità di questo dispositivo su internet, negli anni sono state ideate e realizzate molte versioni di questo strumento. Ne elenchiamo qui alcuni esempi a solo scopo esemplificativo, hanno tutti in comune lo stesso principio di funzionamento basato sull'induzione di due circuiti RLC, le maggiori differenze tra essi risiedono in come vengono gestite le frequen-

ze di oscillazione dei due circuiti, in particolare del primario (approfondiremo questo argomento nella parte riguardante il funzionamento).

- **Spark Gap Tesla Coil (SGTC)**: si tratta della tipologia utilizzata nel nostro caso per Sparky. È caratterizzata dalla presenza di uno *spark gap*. A loro volta gli spark gap tesla coil posso dividersi in static (come Sparky), triggered e rotary.
- **Solid State Tesla Coil (SSTC)**: caratterizzate dall'utilizzo di transistor e altri componenti a semiconduttori. A loro volta si possono dividere in Single resonant solid state Tesla coil (SRSSTC) e Dual Resonant Solid State Tesla Coil (DRSSTC).
- **Vacuum Tube Tesla Coil (VTTC)**: caratterizzate dall'utilizzo valvole a vuoto.

Come detto questi vari modelli di bobine si basano tutti sugli stessi principi base ma il loro effettivo funzionamento può variare sensibilmente, e complicarsi altrettanto, da una tipologia all'altra. Per questioni brevità ci limiteremo a spiegare il funzionamento della prima tipologia di bobina: ovvero le bobine di Tesla a spark gap.

1.3 SPARKY!



Figura 1.3: Foto bobina.

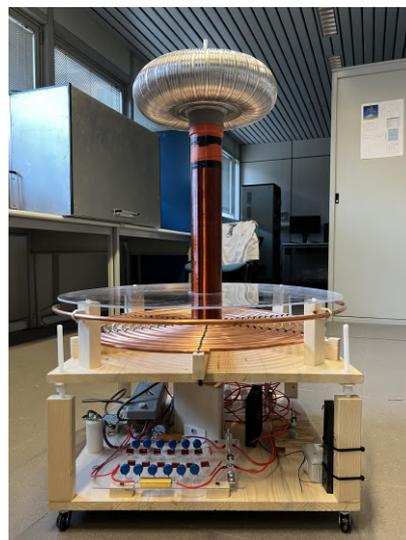


Figura 1.4: Foto bobina.

La bobina da noi costruita, nome proprio *Sparky*, è una bobina di medie dimensioni. Ha richiesto circa 8 mesi tra lavoro teorico, per lo studio e la progettazione, e lavoro pratico di costruzione. Ciò è stato possibile anche grazie all'interesse e alla sponsorizzazione

dell'azienda RENCO SPA di Pesaro che ha fornito finanziamenti e moltissimo materiale per il progetto.

Nella figura 1.3 è possibile vedere il progetto finito.

La bobina ha una potenza di circa 200W, molto bassa rispetto a ad alcuni progetti più professionali, ciononostante questa potenza ridotta permette di rendere più sicuro il dispositivo. L'idea base che ha dettato il design della bobina è stata quella di rendere semplici future riparazioni e/o migliorie. Difatti il circuito è scoperto e completamente visibile al di sotto del piano del tubo del primario, come visibile nella foto, con il beneficio aggiunto di rendere evidenti le varie sezioni indipendenti per fini didattici 1.4.

Capitolo 2

Il funzionamento

2.1 Principi generali

In linea generale è corretto descrivere una bobina di Tesla come un doppio trasformatore risonante che lavora ad alte tensioni. Si compone infatti di due circuiti RLC accoppiati, ovvero in grado di indurre correnti l'uno sull'altro. Nella sezione teorica si affronteranno argomenti quali: circuiti LC, induzione e frequenza di risonanza. Altri argomenti importanti per della fisica delle alte tensioni quali rotture del dielettrico, effetto pelle, *corona discharge* e teorema delle punte verranno affrontati in sezioni apposite.

2.2 Circuiti LC

Il primo argomento da trattare è il *Circuito LC* che qui tratteremo in breve. Dall'analisi teorica di questo modello di circuito ideale potremo estrarre fondamentali leggi che dettano il comportamento anche dell'analogo reale.

Un circuito LC è composto da un condensatore C e un induttore L collegati tra loro in serie o in parallelo. Per rendere evidenti le proprietà del circuito lo studieremo in presenza di un generatore di corrente alternata o generatore di tensione sinusoidale. Nel caso di una bobina di Tesla la configurazione prevede i 3 elementi posti in serie tra loro come mostrato in figura 2.1, l'ordine è in questo caso indifferente.

partiremo dalla legge di Kirchoff per le correnti, di immediata applicazione in un circuito così elementare, che ci dimostra che le correnti attraverso C e L sono le stesse. Di seguito la legge di Kirchoff per le tensioni ci suggerisce che la somma delle cadute di potenziale ai capi degli elementi circuitali deve in ogni momento eguagliare la differenza di potenziale generata dal generatore.

Da qui la relazione 2.1:

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

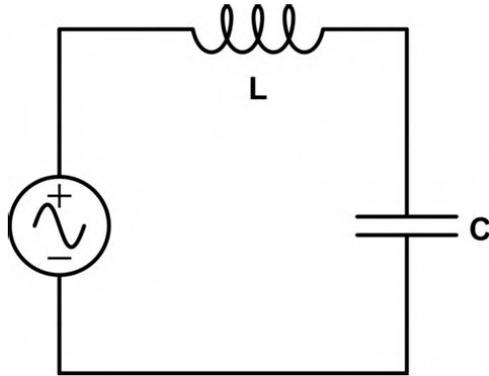


Figura 2.1: Schema minimale circuito LC

L'analisi del comportamento ideale dell'induttore e del condensatore ci permette di esprimere le differenze di potenziale in funzione della carica e delle sue derivate:

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

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

Seguendo la convenzione più diffusa C indica la *capacità* del condensatore e L l'*induttanza* dell'induttore. Sostituendo otteniamo l'equazione differenziale del circuito LC in serie:

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

Definiamo ora un'utile quantità: ω detta *pulsazione di risonanza* o *naturale* del sistema.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.5)$$

Cerchiamo ora di trovare le prime soluzioni alla equazione differenziale 2.4, troveremo così le equazioni che indicano l'andamento della carica $Q(t)$ e della corrente $I(t)$. Queste possono assumere forme molto diverse a seconda dell'andamento della *forzante* $V_{gen}(t)$. Analizzeremo il caso con forzante nulla, detta soluzione *omogenea* 2.6, e con forzante sinusoidale 2.7. La teoria delle equazioni differenziali ci dice infatti che possiamo esprimere le soluzioni di una equazione differenziale come somma della soluzione omogenea e una particolare.

$$V_{gen}(t) = 0 \quad (2.6)$$

$$V_{gen}(t) = V_0 \sin(\Omega t) \quad (2.7)$$

2.2.1 Soluzione omogenea

Sostituendo ω nella 2.4 e ponendo la forzante uguale a 0 otteniamo:

$$0 = \ddot{Q}(t) + \omega^2 Q(t) \quad (2.8)$$

Ricerchiamo una soluzione che abbia una forma sinusoidale. Ad esempio:

$$Q(t) = A \cos(\omega t + \phi) + B \sin(\omega t + \alpha) \quad (2.9)$$

Possiamo eliminare il seno imponendo che per $t = 0$ si abbia il massimo della carica sulle armature del condensatore. Sostituendo quindi solo la parte del coseno all'interno della 2.8 otteniamo:

$$A\omega^2 \cos(\omega t + \phi) = A\omega^2 \cos(\omega t + \phi) \quad (2.10)$$

Che ci conferma che abbiamo trovato una soluzione, a prescindere dal valore della fase ϕ e quello dell'ampiezza A .

Determiniamo il valore di A e ϕ imponendo delle semplici condizioni iniziali: chiamiamo la massima carica presente sulle armature del condensatore Q_0 che, come detto, equivale al valore all'istante $t = 0$. Ciò ci da:

$$\begin{cases} A = Q_0 \\ \phi = 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

Inserendo poi tutto nella 2.9 ottengo per la carica:

$$\boxed{Q(t) = Q_0 \cos(\omega t) = Q_0 \cos\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right)} \quad (2.12)$$

Per la corrente è sufficiente fare la derivata:

$$\boxed{I(t) = -\frac{Q_0}{\sqrt{LC}} \sin\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right)} \quad (2.13)$$

Questi andamenti sono sfasati di $\pi/2$ com'è evidente dalla figura 2.2:

2.2.2 Soluzione con forzante

Inserendo ora una forzante sinusoidale nella 2.4, nella forma della 2.7, e sostituendo direttamente ω otteniamo:

$$V_0 \frac{\sin(\Omega t)}{L} = L\ddot{Q}(t) + \omega^2 Q(t) \quad (2.14)$$

Distinguiamo ora due sottocasi notevoli: il caso in cui il valore numerico della fase della forzante Ω sia diverso da quello della pulsazione del circuito ω ed il caso in cui sia lo stesso.

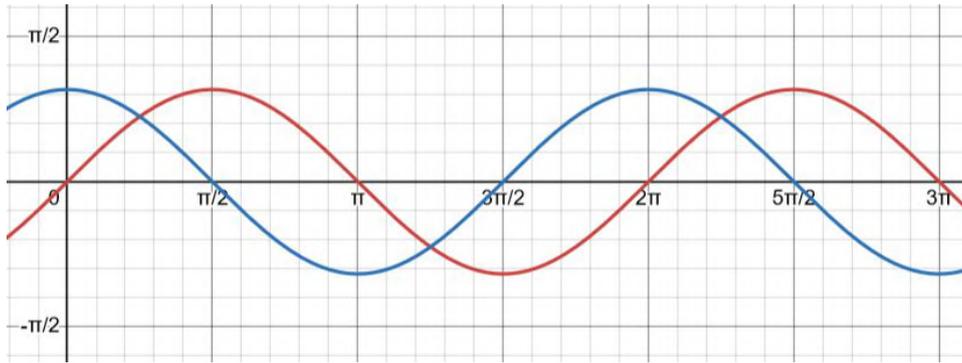


Figura 2.2: Andamenti di corrente (blu) e carica (rosso) normalizzati.

Caso in cui $\Omega \neq \omega$

In questo caso un andamento della carica del tipo

$$Q(t) = A \sin(\Omega t - \psi) \quad (2.15)$$

soddisfa la 2.14. Sostituendo infatti la 2.15 all'interno di 2.14 si ottiene:

$$\frac{V_0 \sin(\Omega t)}{L} = A(\omega^2 - \Omega^2) \sin(\Omega t - \psi) \quad (2.16)$$

Sapendo che le ampiezze e le fasi devono coincidere.

$$\begin{cases} A = \frac{V_0}{L(\omega^2 - \Omega^2)} \\ \phi = 0 \end{cases} \quad (2.17)$$

Ora, per trovare finalmente la soluzione particolare associata a questo caso, sostituiamo il sistema 2.17 all'interno della 2.15.

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

Come detto precedentemente nella trattazione ora esprimiamo la soluzione generale come la somma della soluzione dell'omogenea con quella particolare:

$$Q(t) = C_1 \cos(\omega t) + C_2 \sin(\omega t) + \frac{V_0}{L(\omega^2 - \Omega^2)} \sin(\Omega t) \quad (2.19)$$

C_1 e C_2 sono due costanti che rimangono da determinare imponendo le condizioni iniziali.

Facendo la derivata rispetto al tempo della 2.19 otteniamo l'andamento della corrente:

$$I(t) = -C_1\omega\sin(\omega t) + C_2\omega\cos(\omega t) + \frac{V_0\Omega}{L(\omega^2 - \Omega^2)}\cos(\Omega t) \quad (2.20)$$

È interessante notare come, per differenze tra ω e Ω sufficientemente grandi, il termine derivante dalla soluzione particolare possa essere trascurato.

Caso in cui $\omega = \Omega$

Procediamo con lo stesso procedimento del punto prima aggiungendo una dipendenza lineare dal tempo poiché i sistemi con forzante in fase con la frequenza di risonanza del sistema stesso tendono a crescere in energia. Ipotizzando quindi un andamento del tipo:

$$Q(t) = A\cos(\omega t - \psi) \quad (2.21)$$

Calcolando la derivata seconda e sostituendo all'interno della 2.14 con la condizione $\omega = \Omega$ si ottiene:

$$\frac{V_0\sin(\omega t)}{L} = -2a\omega\sin(\omega t + \psi) - \cancel{A\omega^2 t \cos(\omega t + \psi)} + \cancel{A\omega^2 t \cos(\omega t + \psi)} \quad (2.22)$$

Eguagliando, come nel punto precedente, le ampiezze e le fasi dalle 2 parti si ottiene $\phi = 0$ e $A = -\frac{V_0}{2L\omega}$.

Procediamo sostituendo tutto nella 2.21 otteniamo la soluzione detta *particolare*:

$$Q(t) = -\frac{V_0 t}{2L\omega}\cos(\omega t) \quad (2.23)$$

Che ci fornisce una soluzione generale con la forma seguente:

$$Q(t) = C_1\cos(\omega t) + C_2\sin(\omega t) - \frac{V_0 t}{2L\omega}\cos(\omega t) \quad (2.24)$$

In cui le costanti C_1 e C_2 sono determinate a partire dalle condizioni iniziali.

Ricaviamo dalla 2.24 anche l'andamento della corrente $I(t)$ semplicemente derivando per il tempo:

$$I(t) = \left(\omega C_2 - \frac{V_0}{2L\omega}\right)\cos(\omega t) - \omega C_1\sin(\omega t) + \frac{V_0 t}{2L}\sin(\omega t) \quad (2.25)$$

Come possiamo vedere dall'andamento di $Q(t)$ e $I(t)$ hanno un andamento crescente per quanto riguarda l'ampiezza delle oscillazioni nel tempo. Questo è la caratteristica principale dei sistemi oscillanti in condizioni di risonanza. Sebbene in questo caso teorico questo fenomeno non sia limitato, nella realtà la conservazione dell'energia pone dei limiti all'ampiezza delle oscillazioni. Sfrutteremo comunque questa condizione per ottimizzare il trasferimento di energia tra diverse parti del circuito.

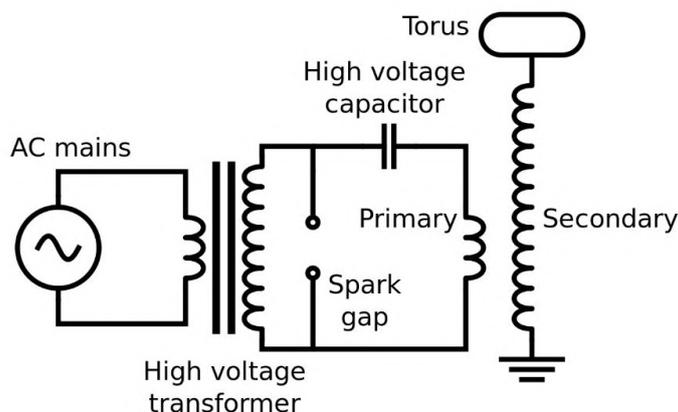


Figura 2.3: Rappresentazione del circuito minimale del tipo di bobina detto a *spark gap*.

2.2.3 Frequenza di Risonanza

Come detto il fenomeno della risonanza è centrale in questo tipo di applicazioni. Di conseguenza vale la pena approfondirne alcuni aspetti. In particolare analizziamo meglio il fattore ω che fino ad adesso è stato denominato *pulsazione naturale* del sistema. Per motivi pratici spesso ci si riferisce alla frequenza associata a tale pulsazione: ν detta *frequenza naturale* o *frequenza di risonanza* del sistema. Tra ω e ν il rapporto è una semplice riscalatura: $\omega = 2\pi\nu$.

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.26)$$

2.3 Analisi Circuitale

Ora analizziamo uno schema base del circuito. Come vedremo il circuito reale di Sparky risulta leggermente più complesso, in particolare sono state aggiunte alcune componenti legate più che altro alla sicurezza. Ciononostante vedremo che questo circuito minimale è essenzialmente la definizione di *Spark Gap Tesla Coil*

Iniziamo ad analizzare le varie parti del circuito in foto. Per prima cosa si può immediatamente notare che il circuito non ha un cavo unico che arriva dall'inizio alla fine ma è sostanzialmente composto da tre parti fisicamente separate: questo perché sfrutta in più componenti il principio dell'*induzione* per trasferire energia da una parte all'altra del circuito. Analizzando la parte centrale del circuito la quale comprende: lo *spark gap*, il *condensatore* e l'*induttore* detto *primario*. Possiamo individuare una utile separazione in due *maglie* di questa parte centrale immaginando lo spark gap come un

interruttore chiuso oppure aperto.

Abbiamo detto all'inizio che possiamo immaginare questo circuito come formato da 2 trasformatori, ed in effetti possiamo notare che la parte centrale comprende l'induttore che funge da "secondario" al primo trasformatore e l'induttore che funge da "primario" al trasformatore che si forma accostandolo all'altro induttore. Normalmente il primario e il secondario del secondo trasformatore vengono semplicemente chiamati *Primario* e *Secondario*, utilizzeremo questa nomenclatura indicando anche il primo trasformatore come semplicemente *il trasformatore* per motivi costruttivi.

Schematizziamo il ciclo di funzionamento del circuito dividendolo in 2 momenti:

1. In un primo momento lo spark gap si comporta come un interruttore aperto e il circuito lavora come se tale elemento non fosse presente, in particolare in questa fase i condensatore (o *i condensatori* come vedremo) si caricano storando energia.
2. La seconda fase inizia quando la differenza di potenziale ai capi dello spark gap diventa sufficientemente alta. Raggiunta infatti una certa soglia, modificabile agendo sullo spark gap come vedremo nelle prossime sezioni, lo spark gap si "chiude" a seguito dello scoppio di una scintilla tra i due capi. Analizzeremo meglio questo fenomeno detto di *rottura del dielettrico*.

Vediamo ora nel dettaglio che accade in queste due fasi.

2.3.1 Prima fase: Caricamento dei condensatori

In questa prima fase il circuito ignora la presenza dello spinterometro, altro modo per riferirsi allo spark gap, e si comporta come un circuito LC con forzante sinusoidale analizzato nella sezione 2.2.2. Questo ci porta a poter utilizzare le equazioni già ricavate dividendo i due possibili casi: ovvero se Ω , la pulsazione della forzante, e ω , pulsazione naturale del circuito, coincidono o meno. Da un punto di vista strettamente costruttivo è importante considerare che, se i valori delle due pulsazioni sono troppo vicini, si possono verificare picchi di tensione e/o di corrente difficilmente controllabili e potenzialmente pericolosi per le componenti circuitali. È quindi necessario valutare attentamente tali grandezze, agendo su la capacità e l'induttanza del nostro circuito in fase di progettazione, in modo renderle sufficientemente distanti.

Nel caso specifico di Sparky la capacità è di $15nF$ e una induttanza intorno a $20\mu H$ così da dare una frequenza teorica intorno a $\omega \approx 290kHz$ che risulta sufficientemente diversa dalla frequenza della forzante che risulta $\Omega \approx 50Hz$.

Come dicevamo il passaggio dalla fase 1 alla fase 2 avviene quando la differenza di potenziale è sufficiente a ionizzare l'aria tra i due capi dello spinterometro creando così un canale in cui gli elettroni posso muoversi molto più facilmente, rendendo brevemente l'aria in quel punto un buon conduttore. Tale fenomeno prende il nome di *rottura del dielettrico*, volgarmente si può dire che si forma una "scintilla" o "spark" da qui infatti

il nome di "spark gap".

2.3.2 Seconda fase: Trasferimento energetico

Quando lo spinterometro è "chiuso" da una scarica tra i due capi si comporta, per un lasso di tempo molto ridotto, come una resistenza disperdendo energia per effetto Joule. In questa fase la corrente segue un andamento descritto dalla 2.25 questo permette all'avvolgimento presente nella maglia centrale del circuito, che abbiamo nominato "primario", di indurre corrente nell'avvolgimento "secondario" intorno al quale è fisicamente accoppiato. Ovvero: i due avvolgimenti sono coassiali e sufficientemente vicini in modo da potersi accoppiare magneticamente, difatti la geometria della struttura è pensata affinché la giusta quantità di linee di campo magnetico generato dal primario rientri nella superficie del secondario.

Si rimanda all'approfondimento in appendice riguardante il guadagno di tensione e il trasferimento energetico, principi fondanti dei trasformatori A.3.

Nel giro di pochi periodi di l'energia del primario tende a trasferirsi al secondario. In questo regime il funzionamento ideale è leggermente diverso da quello reale. Idealmente tutta l'energia presente nel primario, che prima della chiusura dello spinterometro era quindi immagazzinata nei condensatori, viene trasferita al secondario che può poi disperderla nell'ambiente tramite scariche. In realtà non possiamo ignorare alcuni fattori fondamentali: a causa delle caratteristiche del fenomeno della rottura del dielettrico è necessaria una elevata differenza di potenziale per far "scoccare" la scintilla e una differenza molto più ridotta, ma comunque diversa da zero, per *mantenerla*. Nel caso reale inoltre non si può ignorare anche un altro fenomeno: ovvero il fatto che anche la variazione, indotta dal primario, di voltaggio nel secondario induce una ddp nel primario. Questa condivisione di energia tra primario e secondario è possibile fintanto che lo spinterometro ha i suoi capi una differenza di potenziale sufficiente a rimanere chiuso.

Capitolo 3

Progettazione e Costruzione

In questo capitolo tratteremo la fase di progettazione e di costruzione del progetto. Lo schema in 3.1 è da considerarsi il più completo. È immediato notare molte differenze dal circuito minimale 2.3 , ciò è dovuto alla presenza di diverse componenti che potremmo definire "non essenziali" al funzionamento della bobina ma che hanno diverse funzioni, principalmente di sicurezza, che analizzeremo negli specifici paragrafi. Per facilità le componenti essenziali sono segnate in maiuscolo e quelle accessorie in minuscolo.

Una considerazione si rende a questo punto necessaria: durante la progettazione ci si è resi conto che un certo grado di arbitrarietà in alcune scelte risulta inevitabile. Ciò è dovuto non solo alla complessità del progetto ma anche all'esistenza di tantissimi tipi di bobine di Tesla che abbiamo già accennato. Quindi nell'affrontare diverse decisioni costruttive non si può davvero individuare una soluzione del tutto ottimale. Qui di seguito elenchiamo alcune caratteristiche che hanno un grande impatto sul progetto finale che devono essere determinate a partire dalla fase di progettazione. Ovvero: le dimensioni e le geometrie del primario, del secondario e del carico superiore e la tensione di chiusura dello spark gap. Nei prossimi capitoli ogni singola componente verrà analizzata e verrà data una breve giustificazione alle scelte costruttive di quel segmento di circuito. È importante specificare fin da ora il significato con cui i termini "efficienza" e "rendimento" saranno utilizzati: consideriamo infatti l'obiettivo e lo scopo del nostro dispositivo quello di produrre scariche elettriche attraverso l'aria più lunghe possibile. Di conseguenza qualsiasi accortezza che "migliori il rendimento" della bobina concorre a perseguire questo obiettivo.

3.1 Trasformatore

Una delle parti più importanti all'interno della bobina, e spesso una delle più pericolose, è il trasformatore ad alta tensione. Ha il ruolo di operare un primo innalzamento

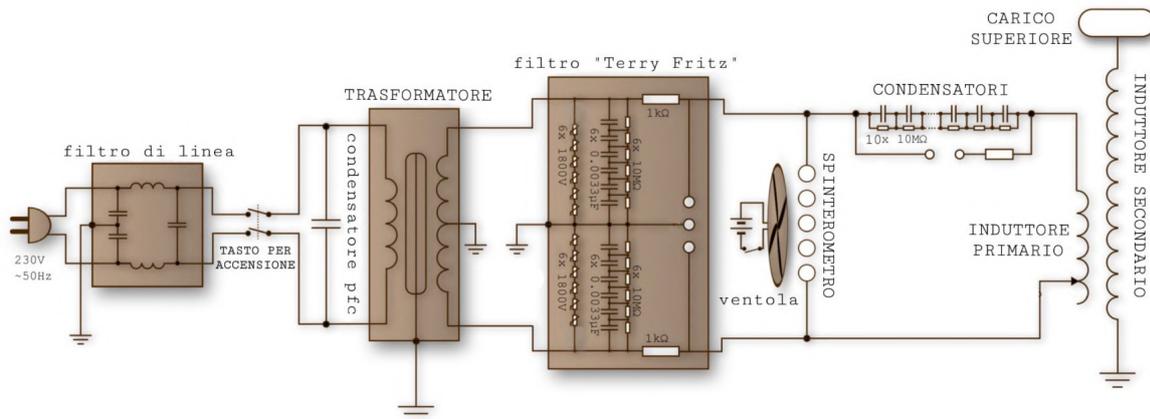


Figura 3.1: Schema completo circuito di Sparky

della tensione e caricare i condensatori. Spesso i condensatori sono componenti molto sensibili a regimi anomali nel circuito, ciò è particolarmente problematico per una bobina di tesla che non opererà quasi mai in regimi di correnti e tensioni "canonici". Frequenze tensioni e correnti estremamente variabili possono rovinare questo componente che quindi necessita di una certa "resilienza costruttiva".

Si possono individuare tre principali categorie di trasformatori particolarmente adatti ad una bobina come Sparky.

1. **Pole Pigs**. 3.2 Di solito utilizzati per grosse bobine. Possono arrivare a tensioni difficilmente raggiungibili con altri tipi di trasformatori in commercio. Anche se difficilmente reperibili possono arrivare a 20kV. Sono sprovvisti di limitatori di corrente e, per questo, da ritenersi particolarmente pericolosi.
2. **Neon Sign Transformer** o **NST**. 3.3 Sono un'alternativa efficacissima ai Pole Pigs sebbene possano raggiungere tensioni inferiori, solitamente tra 5kV e 15kV. Sono solitamente provvisti di un sistema di limitazione di corrente integrato che limita la corrente in uscita solitamente ad un valore massimo tra i 20 e i 60mA. Possono inoltre essere integrati con altri sistemi di sicurezza che mal si adattano ad un utilizzo in bobine di Tesla e devono essere disattivati.
3. **Trasformatori per Microonde** o **MOT**. 3.4 Sono la categoria più popolare tra i neofiti nonostante la loro pericolosità. Sono sprovvisti di sistemi per la regolazione della corrente e di sistemi per l'isolamento esterno. La struttura metallica infatti deve essere connessa a terra correttamente.

I trasformatori possono essere utilizzati anche in serie o in parallelo per modificare le caratteristiche del circuito. Detto questo il trasformatore più adatto a determinate



Figura 3.2: Trasformatore Pole Pig



Figura 3.3: Trasformatore NTS di Sparky



Figura 3.4: Trasformatore da microonde

esigenze di design può non rientrare tra le categorie elencate. Per particolari tipi di bobine, ad esempio, si possono trovare su internet dettagliati progetti che utilizzano enormi valvole a vuoto in grado di raggiungere potenze di lavoro elevatissime.

Per quanto riguarda il caso di Sparky il trasformatore utilizzato è un singolo **NST** con:

- Voltaggio = 8kV
- Amperaggio = 25mA (è limitato in corrente)
- Frequenza di lavoro ottimale = 50Hz

Questi dati ci indicano una potenza di lavoro di 200W.

Scariche

Le cariche che si sprigionano dal *top load* sono dovute estrema differenza di potenziale e quindi all'accumulo di cariche che arrivano a ionizzare l'aria. Tale fenomeno nel caso reale è molto complesso e per questo riportiamo qui una formula empirica estremamente generica per le bobine di tesla di questo tipo:

$$L \approx 4.32\sqrt{P} \approx 60cm \quad (3.1)$$

È evidente che questa formula è molto generica e non tiene conto di moltissimi fattori. In un certo senso, se definiamo lo scopo della bobina "produrre scariche più lunghe possibile", la formula 3.1 ci da una indicazione sull'efficienza di questo macchinario. Nella stima di questo limite massimo teorico sono state anche estremamente utili le

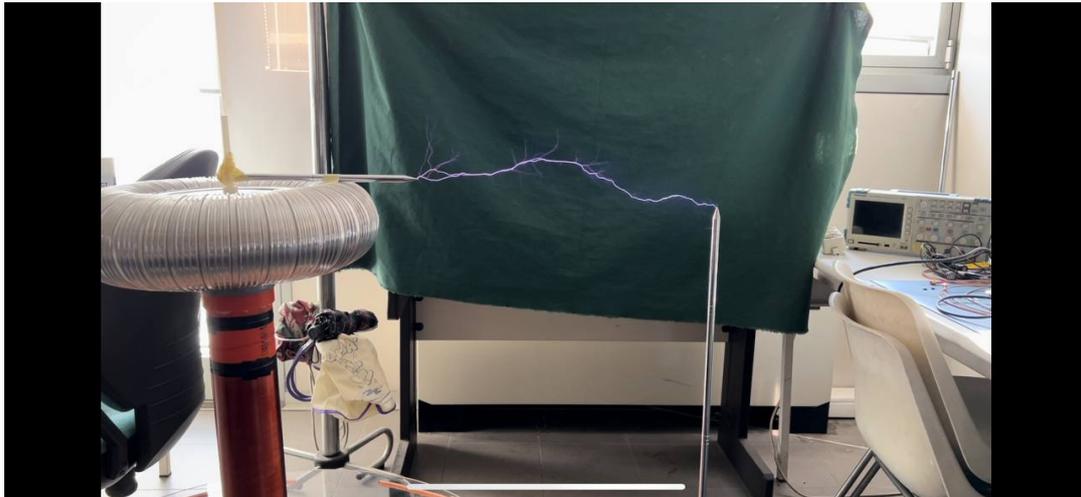


Figura 3.5: Fulmine di 45cm

simulazioni effettuate con i programmi JavaTC[4] e TeslaMap[3]. Questi sono programmi particolarmente affidabili per bobine di piccole e medie dimensioni e potenze. Maggiori approfondimenti su questo aspetto e questi programmi nella sezione 4.4.

I fulmini prodotti da Sparky toccano sporadici picchi di mezzo metro, con una lunghezza media di 45 cm 3.5.

3.2 Condensatori

Il condensatore nel circuito del circuito primario ha, come abbiamo visto nella parte teorica, il compito di immagazzinare energia prima della chiusura dello spark gap e del conseguente trasferimento di energia al secondario.

Sono necessarie alcune accortezze nel scegliere questo componente poiché è sottoposto a condizioni non standard per un condensatore. I fattori di rischio più impattanti sono:

1. regime di carica e scarica molto rapido;
2. grandi variazioni di corrente;
3. grandissime variazioni di tensione;

In generale sono noti alcuni metodi "fai da te" per costruire condensatori con questo tipo di caratteristiche ma per ragioni di sicurezza e affidabilità è consigliabile spendersi per cercare un condensatore industriale con le caratteristiche necessarie. Per questo Sparky funziona con un gruppo di condensatori in serie, modello "Cornell Dubilier 942C20P15K-F" 3.6 [16]



Figura 3.6: Condensatori di Sparky, collegamento in serie.

Questi condensatori possono facilmente sopportare tensioni di lavoro di $2kV$ e hanno una capacità di $0.15\mu F \pm 10\%$. Abbiamo visto nella sezione possiamo calcolare la capacità equivalente che i nostri condensatori devono avere:

consideriamo l'impedenza del trasformatore: $Z = \frac{V}{I} = 320K\Omega$;

consideriamo poi l'impedenza dell'induttore trascurabile e otteniamo:

$$C_{teorica} = \frac{1}{\Omega Z} = \frac{1}{2\pi\nu Z} = 9.95\mu F \quad (3.2)$$

Abbiamo indicato con ν la frequenza della fonte energetica; dato che Sparky è progettata per funzionare collegata ad un normale impianto elettrico questa risulta $\nu = 50Hz$. Mettendo in serie 10 trasformatori otteniamo:

Simulando invece i valori della capacità con i programmi TeslaMap e JavaTC si ottengono i seguenti valori:

$$C_{TeslaMap} = 16.1nF$$

$$C_{JavaTC} = 14.9nF$$

Maggiori analisi sul funzionamento e l'affidabilità di questi programmi verranno svolte nella sezione 4.4.

È facile notare come i valori ottenuti sovrastimino notevolmente il valore teorico 3.2, questa precauzione è essenziale. In generale nelle bobine di Tesla è importante non lavorare esattamente alla frequenza di risonanza del trasformatore per evitare spike molto importanti (e potenzialmente pericolosi) di corrente e tensione. In genere si utilizza la regola costruttiva "larger-than-resonance capacitor", difatti sarebbe bene utilizzare un valore di C circa $1.5 - 2$ rispetto a $C_{teorica}$. In generale si utilizza il coefficiente 1.618 per regola empirica. In Sparky infatti $C_{teorica} \cdot 1.618 = 16.09nF$ che è un valore molto vicino a quello installato.

Come abbiamo detto è importante anche considerare la massima *variazione temporale* di tensione ai suoi capi che il componente può sopportare. Per il nostro caso la scheda tecnica riporta: $dV/dt = 2879V/\mu s$.

Se calcoliamo tale valore nel circuito di Sparky: consideriamo la massima tensione ottenibile dal trasformatore $V_{max} = \sqrt{2}V_{rms} = \sqrt{2} \cdot 8kV = 11313V$. Avendo posto i 10 condensatori in serie questo permette di distribuire la differenza di tensione su ognuno di essi che quindi sarà esposto ad un decimo della tensione. Considerando un andamento della tensione sinusoidale e derivando rispetto al tempo otteniamo:

$$\left(\frac{dV}{dt} \cdot \frac{1}{N_C}\right)_{max} = \frac{V_{max}\omega}{N_C} = \frac{V_{max}2\pi\nu_\omega}{N_C} \approx 2080V/\mu s \quad (3.3)$$

In cui $\nu_\omega = 1/\sqrt{LC} \approx 293kHz$ ovvero la frequenza di risonanza del secondario. Come speravamo il valore è sufficientemente al di sotto di quello che possono sopportare in nostri condensatori.

Note Costruttive, trasformatori

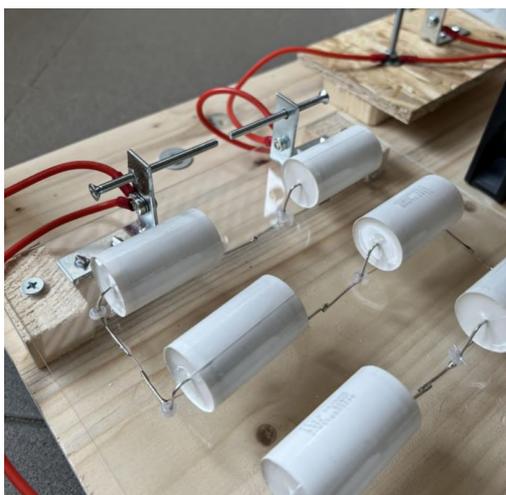


Figura 3.7: Spinterometro a protezione dei condensatori

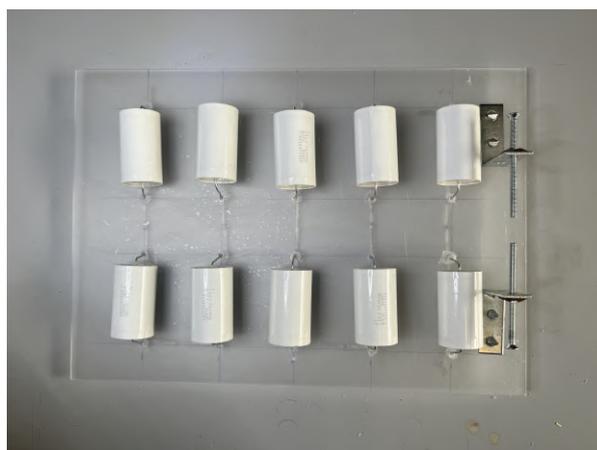


Figura 3.8: Vista del modulo dei condensatori prima del montaggio

In fase di costruzione sono state aggiunte anche *features* di sicurezza, come visibile nello schema in figura 3.1. In particolare: ogni condensatore ha in parallelo a sé una resistenza da $10M\Omega$ che impedisce che i condensatori rimangano carichi a lungo dopo lo spegnimento della bobina. Dal punto di vista della sicurezza il gruppo di condensatori rappresenta il componente più rischioso in caso di malfunzionamento: un eventuale sovraccarico o "ritorno" di correnti a frequenze eccessivamente alte potrebbe sfociare in

surriscaldamenti, scintille, piccoli incendi o, in casi estremi, lo scoppio di uno o più dei condensatori. È di conseguenza essenziale proteggere adeguatamente questa parte del circuito. Difatti, accoppiato ai condensatori, è installato anche un altro spark gap con apertura leggermente maggiore di quello "principale", lo si può chiaramente vedere nelle immagini 3.7 e 3.8 . Il suo ruolo è quello di scaricare a terra qualsiasi picco di tensione eccessivo prima che abbia modo di rovinare i condensatori. Uno dei malfunzionamenti peggiori che possono avvenire con questo tipo di dispositivi è che un fulmine colpisca la zona dei condensatori del primario, come vedremo questo spinterometro aggiuntivo non è l'unico dispositivo di protezione atto ad evitare questo.

3.3 Spinterometro o Spark Gap

Lo spinterometro, o spark gap, è un elemento circuitale scopo è quello di chiudere il circuito solo nel momento in cui ai suoi due capi si raggiunge una differenza di potenziale sufficientemente elevata. Abbiamo già definito il suo ruolo nel funzionamento del circuito primario nella sezione 2.3 di conseguenza ora ci concentreremo sui possibili design di questo componente. Esistono 2 tipi di spinterometri per le bobine più comuni: spinterometri statici e spinterometri rotativi.

Spinterometri rotativi

Con questo tipo di design non è propriamente la variazione di differenza di potenziale a far scoccare la scintilla, ma invece la distanza tra gli elettrodi che varia grazie ad un disco che ruota ad una velocità fissa e adatta alla frequenza che si vuole ottenere.

Un vantaggio non indifferente di questo design è il fatto che non sia necessario che il voltaggio scenda sotto una certa soglia per interrompere la scintilla. Ciononostante può risultare complesso costruire un dispositivo con le corrette simmetrie e che eviti pericolose vibrazioni.



Figura 3.9: esempio di spark gap rotativo.

Spinterometro statico

Nel caso di uno spinterometro statico, a differenza di quello rotativo, è proprio la variazione di differenza di potenziale ad innescare la scintilla; senza che siano presenti parti mobili. Per questioni di praticità Sparky utilizza questo tipo di spark gap. Questo

design è molto più semplice ma deve essere accuratamente posto alla giusta distanza: se i due elettrodi vengono messi troppo distanti la scintilla non riuscirà mai a scoccare o lo farà in modo non affidabile, se invece fossero troppo vicini si rischia di non dare al ciclo una durata ottimale e quindi non far caricare completamente i condensatori riducendo così la lunghezza dei fulmini.

È inoltre fondamentale la scelta del metallo corretto: la presenza quasi costante di scariche rischia di sciogliere saldature a stagno, coprire con strati di ossido poco conduttivo molti metalli eccetera. Il primo design per la nostra bobina, in foto 3.10, utilizzava viti di acciaio che però ossidavano estremamente velocemente e limitavano la conduzione. Il problema è stato risolto sostituendo il secondo elettrodo con un tubo in rame.

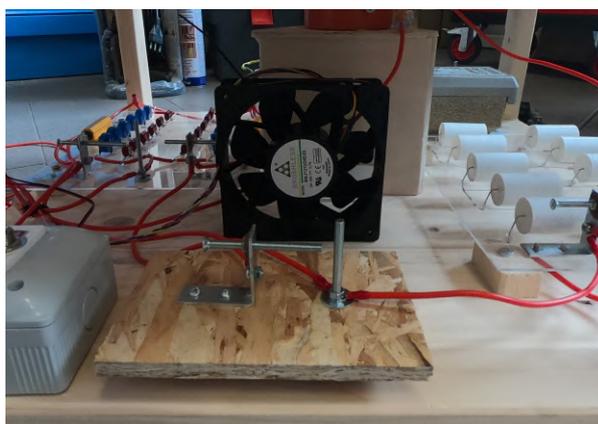


Figura 3.10: Spark Gap di Sparky con ventola di raffreddamento

3.4 Avvolgimento primario

Per costruire il "secondo trasformatore", ovvero semplicemente due circuiti accoppiati, abbiamo bisogno di due avvolgimenti detti *primario* e *secondario*.

Come si può vedere dalle immagini sottostanti la geometria del primario può essere varia. L'immagine 3.11 mostra una configurazione planare, la 3.12 una conica e la 3.13 una cilindrica.

Queste diverse configurazioni hanno ognuna i propri vantaggi e svantaggi. Innanzitutto, per aumentare l'efficienza del trasferimento energetico è essenziale che più linee di campo del primario possibile passino all'interno dell'avvolgimento secondario. Detto ciò l'avvolgimento cilindrico sembrerebbe di conseguenza il migliore ma presenta alcune problematiche: innanzitutto l'avvicinare avvolgimenti primari alla cima della bobina e quindi alle scariche e, non meno problematica, la necessità di un buon isolamento tra primario e secondario. La geometria inclinata risulta un ottimo compromesso ma è più

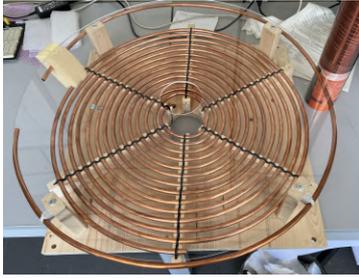


Figura 3.11: Avvolgimento primario di Sparky, configurazione planare



Figura 3.12: Avvolgimento primario inclinato

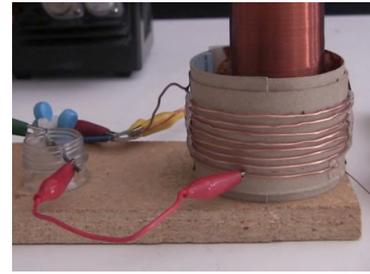


Figura 3.13: Avvolgimento primario cilindrico

difficile da costruire. Nel caso di Sparky quella piana è stata più che sufficiente, anche considerando che è meglio non alzare eccessivamente il coefficiente di accoppiamento tra primario e secondario.

Per entrare nello specifico della costruzione di Sparky: L'induttore primario è composto da 10.5 giri concentrici di tubo di rame. Ha un diametro interno di 11cm ed un diametro esterno di 51cm. Il tubo ha uno spessore di 1mm e un diametro interno di 1cm. Ogni giro è distanziato a 1cm dal precedente e dal successivo. È importante utilizzare qualcosa di più spesso di un semplice cavo di rame a causa dell'*effetto pelle* di cui parleremo nella prossima sezione 3.4.1 .

3.4.1 Effetto pelle

La comprensione dell'effetto detto "effetto pelle" o "skin effect" è necessaria per comprendere le motivazioni dietro l'uso di un tubo di rame di spessore non molto importante, ricordiamo che è spesso solo 1mm. Intuitivamente un tubo pieno o un avvolgimento di cavi avrebbe molto più senso fisico in condizioni di alte tensioni, correnti e frequenze. Purtroppo proprio le alte frequenze rendono questo accorgimento innecessario.

La seguente dimostrazione presa dal riferimento [5]. Consideriamo un conduttore cilindrico, in esso scorre una densità di corrente $J(r)$ che dipende da r distanza dal centro. L'andamento della corrente sarà del tipo:

$$J(r) = J_S e^{-\frac{R-r}{\delta}} \quad (3.4)$$

Con J_S densità di corrente sulla superficie, R raggio del cilindro conduttore e δ parametro dipendente dal materiale determinato sperimentalmente. Dal punto di vista fisico questo parametro rappresenta la profondità alla quale la densità di corrente vale $J_s(1/e) \approx 0.37J_S$. Possiamo calcolare questo parametro, e la sua dipendenza da ω ovvero

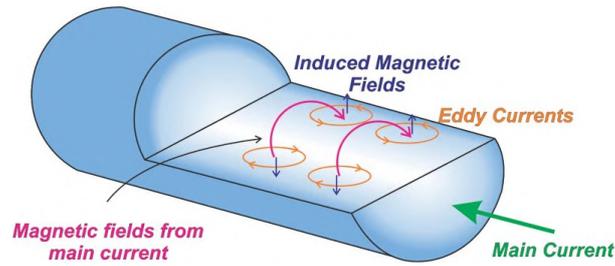


Figura 3.14: Visualizzazione grafica del fenomeno fisico dell'effetto pelle.

la pulsazione della corrente, conoscendo ρ (resistività del materiale).

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \sqrt{\sqrt{1 + (\rho\omega\epsilon)^2} + \rho\omega\epsilon} \quad (3.5)$$

Per "basse" frequenze (basse se paragonate al termine $1/\rho\epsilon \approx 10^{18} Hz$) il termine nella seconda radice può essere trascurato. In Sparky abbiamo infatti $\omega \approx 0.3 MHz$ che giustifica abbondantemente l'approssimazione e quindi abbiamo che:

$$\delta \approx \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \approx 0.3mm \quad (3.6)$$

In cui ricordiamo i valori per il rame [7]:

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

Quindi possiamo notare che, anche considerando l'andamento esponenziale, non avrebbe senso avere un conduttore di spessore molto maggiore di $1mm$ visto che la maggior parte della corrente scorre nel primo mezzo millimetro circa. Nell'immagine 3.14 è possibile vedere uno schema qualitativo di come la variazione di corrente spinga le cariche verso gli strati esterni del conduttore. Nell'immagine 3.15 sono graficati gli andamenti della penetrazione al variare della frequenza per vari materiali.

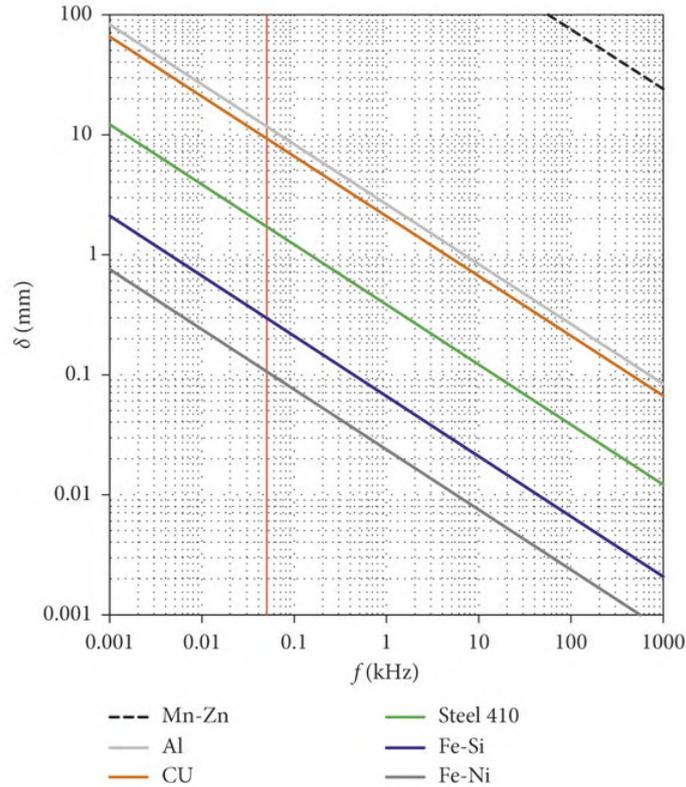


Figura 3.15: Grafico dell'andamento del fattore δ in funzione della frequenza, a temperatura ambiente, per vari materiali.

3.5 Elementi circuitali "secondari"

In questa sezione analizzeremo gli elementi circuitali presenti in Sparky, e quindi visibili in figura 3.1, che possono essere considerati non essenziali al suo funzionamento. Vedremo che nella maggior parte dei casi si tratta di aggiunte atte a migliorare la sicurezza del dispositivo e limitare i danni in caso di malfunzionamento.

3.5.1 Condensatore PFC

Questo condensatore è posto direttamente prima del trasformatore. Ha il ruolo di "correttore di fase" in modo da aumentare la potenza media erogata dal trasformatore. Consideriamo infatti la relazione:

$$\langle P \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V(t)I(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T V_0 \cos(\omega t + \phi) I_0 \cos(\omega t + \psi) dt \quad (3.7)$$

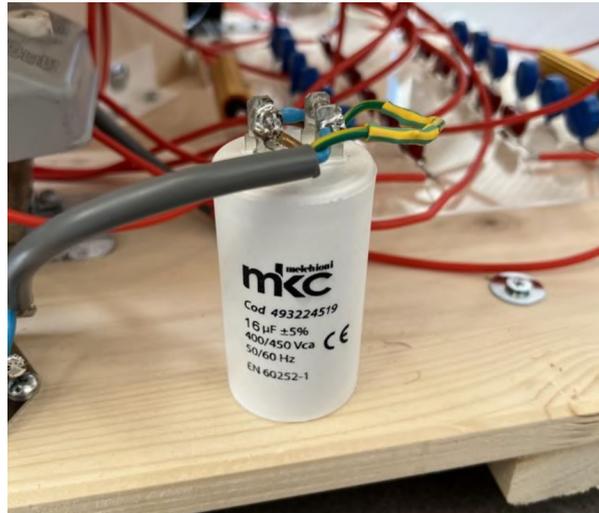


Figura 3.16: Condensatore PFC installato su Sparky.

Utilizzando ora la formula di Werner:

$$\cos(\alpha) \cos(\beta) = \frac{\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)}{2} \quad (3.8)$$

Otteniamo:

$$\langle P \rangle = \frac{V_0 I_0}{2T} \int_0^T \cos(2\omega t + \phi + \psi) + \cos(\phi - \psi) dt \quad (3.9)$$

$$= \frac{V_0 I_0}{2T} \int_0^T \cos(2\omega t + \phi + \psi) dt + \frac{V_0 I_0}{2T} \int_0^T \cos(\phi - \psi) dt \quad (3.10)$$

$$= \frac{V_0 I_0}{2} \cos(\phi - \psi) \quad (3.11)$$

Dalla 3.11 è possibile notare come la potenza erogata sia massima quanto le fasi di corrente e tensione sono uguali. Questo è un risultato generale per i circuiti a corrente alternata in cui, nel caso di carichi lineari come resistenze, induttanze o condensatori, coincide con la differenza di fase tra corrente e tensione.

Il condensatore PFC, da "Factor Corrector Capacitor" ha quindi il compito di avvicinare il più possibile le fasi della corrente e della tensione.

È importante che questo condensatore sia del tipo "run-type" e non "start-type" così da lavorare meglio su brevi intervalli di tempo. Per stimare la capacità che il condensatore deve avere possiamo considerare la formula dell'impedenza per carichi capacitivi $Z = 1/\omega C$, la potenza $P = VI$ e la relazione $V = ZI$ da cui:

$$P = VI = V(V/Z) = V^2(\omega C) \implies C = \frac{P}{\omega V^2} = \frac{P}{2\pi\nu V^2} \quad (3.12)$$

Considerando la frequenza e la tensione della rete elettrica in Italia, pari a $220V$ a $50Hz$, il valore per Sparky è di circa $\approx 13\mu F$. Le caratteristiche tecniche del condensatore installato su Sparky, figura 3.16, sono:

Capacità = $16\mu F \pm 15\%$
Tensione massima = $450V$
Frequenza di lavoro = $50Hz$

3.5.2 Variac



Non presente in figura 3.1 poichè non presente nel circuito finale della bobina è il Variac. Un dispositivo utilizzato nelle prime accensioni della bobina che permette di variare, tramite l'azionamento di una manopola, la tensione che posta in ingresso al dispositivo 3.17. In questo modo eventuali collegamenti malfatti o altri tipi di problemi si sarebbero verificati a tensioni minori così da non danneggiare nessuna componente.

Figura 3.17: Esempio di variac

3.5.3 Filtro Terry Fritz

Si tratta di un componente di sicurezza. Ha molteplici ruoli ma principalmente serve a proteggere il trasformatore e i condensatori da sbalzi in frequenza e/o picchi di tensione. Viene comunemente chiamato *Terry Fritz* dal nome del suo ideatore che per primo ha pubblicato il progetto di tale filtro proprio affinché venisse installato in bobine di Tesla con NST considerata la "fragilità" di questo tipo di trasformatori.

Ovviamente le specifiche del filtro vanno variate in base al proprio design, vedremo ora il caso specifico di Sparky 3.18.

Il filtro si compone di:

- **SPARK GAP:** anche in questo caso, come abbiamo già visto nel modulo dei condensatori 3.2 anche in questo caso abbiamo uno spark gap aggiuntivo collegato a terra e tarato per "partire" molto dopo quello primario. In questo caso è composto da 2 terminali che puntano verso un elettrodo che va a terra.

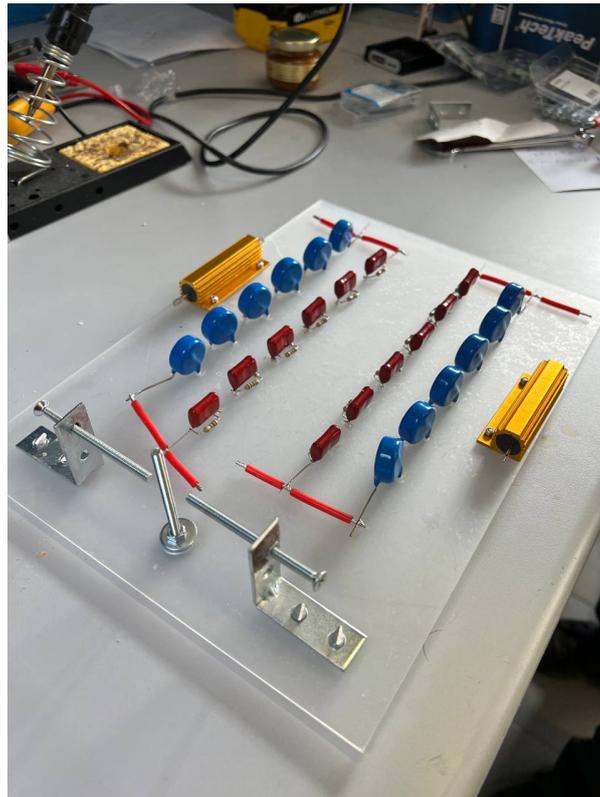


Figura 3.18: Foto del filtro Terry Fritz prima dell'installazione.

- **VARISTORI:** (componenti blu nelle foto 3.18) in modo sostanzialmente ridondante allo spinterometro sono presenti anche dei *varistori*. Essi sono componenti non lineari che operano come altissime resistenze in caso la tensione sia sotto una soglia critica, idealmente come interruttori aperti, e come resistenze quasi nulle per tensioni oltre una soglia critica. Servono anch'essi quindi a scaricare a terra i picchi eccessivi di tensioni, nella remota ipotesi che né lo spinterometro dei condensatori né lo spinterometro del Terry Fritz funzionino correttamente (o siano stati tarati in modo errato).

Sono stati utilizzati varistori modello 20K1000 [6] con una tensione di soglia indicata di 1800 V DC oppure 1000 V AC. Per Sparky ci si aspetta una tensione massima rispetto alla terra di:

$$\frac{V_{max}}{2} = \frac{\sqrt{2}}{2} V_{rms} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 8kV \approx 5650V \quad (3.13)$$

Una serie di 6 varistori è quindi adatta, avendo una tensione di soglia di 6000 V la quale è sufficientemente superiore a quella di normale operazione del circuito da non attivare questo sistema se non in caso di reale bisogno.

- **FILTRO PASSA-BASSO:** (Componenti rossi nella foto 3.18) In parallelo ai varistori sono presenti 6 condensatori da 3.3 nF, ognuno di essi ha a sua volta una resistenza da 10 MΩ, 0.5 W in parallelo come sistema di scarica (sistema analogo a 3.2). A comporre il *filtro passa-basso* vero e proprio sono: i condensatori disposti in serie tra loro, quindi con una capacità equivalente di $C_{eq} = C/6 = 0.55 nF$; e una resistenza da 1 kΩ, 100 W. Si può dimostrare che un filtro di questo tipo "taglia" le frequenze al di sopra di una determinata soglia data da:

$$\nu_c = \frac{1}{2\pi RC} \approx 289kHz \quad (3.14)$$

Alla attivazione dello spinterometro principale la frequenza di oscillazione del circuito primario passa da 50 Hz a 293 Hz in un tempo che consideriamo istantaneo. Il trasformatore potrebbe danneggiarsi se in diretto contatto con queste alte frequenze ed il compito del filtro è proprio quello di evitare questa interazione bloccando queste frequenze e altre possibili interferenze anche più elevate.

3.5.4 Filtro di linea per corrente alternata

Il filtro di linea è il primo componente del circuito, in diretto contatto con la linea elettrica. Serve a proteggere principalmente la linea a cui la bobina è collegata, soprattutto in caso di ritorni di tensione o risonanze impreviste. Per maggiore sicurezza degli operatori il filtro è contenuto in un involucro di metallo collegato a terra 3.19.



Figura 3.19: Filtro di linea di Sparky montato e collegato

3.5.5 Protezioni Primario

Come abbiamo già detto uno dei rischi maggiori per i componenti contenuti nel circuito primario è il *ritorno* di un fulmine ad altissima tensione. Dal punto di vista progettistico questa eventualità non è ignorabile e bisogna aggiungere alcune componenti allo scopo di schermare la parte più esposta: l'avvolgimento primario. Per Parky sono stati costruiti: un disco circolare di *Plexiglass* trasparente con al centro un'apertura di 15 cm per far passare il primario; e una circonferenza quasi completa di tubo di rame posizionata leggermente più all'esterno e decisamente più in alto dell'avvolgimento primario in da fungere da parafulmine una volta collegata a terra. Queste soluzioni sono visibili nelle figure 3.20 e 3.11

3.6 Avvolgimento Secondario

Come detto il circuito primario e secondario devono essere accoppiati tramite i 2 avvolgimenti che costituiscono il "secondo trasformatore". Difatti l'operazione di innalzamento della tensione avviene proprio in funzione del diverso numero di avvolgimenti tra primario e secondario. Generalmente nelle bobine di Tesla questo componente è composto da un avvolgimento fitto di cavo di rame attorno ad un supporto cilindrico con un numero variabile di avvolgimenti: solitamente tra i 500 e i 1500. Deve essere composto da un unico filo conduttore con un diametro adatto alla potenza della bobina: solitamente tra 0.679 mm (22 AWG) e 0.322 mm (29 AWG). È ovviamente essenziale che il cavo sia isolato.

Molte fonti consigliano l'uso di alcune regole empiriche per decidere le dimensioni di que-

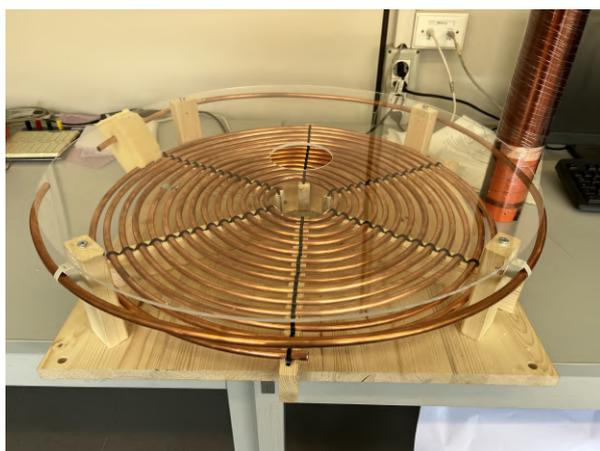


Figura 3.20: Avvolgimento primario con strato di plexiglass e tubo parafulmini prima del montaggio

sta componente. Ad esempio: detto D il diametro del supporto cilindrico del secondario e H l'altezza alla quale arrivano gli avvolgimenti si usa $H = nD$ con $n \leq 5$. Non esiste una spiegazione teorica rigorosa per tale valore ma molte fonti affermano che valori più alti per il rapporto H/D risultano in una minore efficienza e fulmini di lunghezza ridotta.

Analisi induttanza secondario

Risulta utile ed interessante il confronto con i valori dell'induttanza del circuito secondario ottenuti tramite predizione teorica, simulazione con programmi e misura sperimentale.

Dalla teoria possiamo scrivere l'induttanza L di un avvolgimento cilindrico:

$$L_{teorica} = \frac{\mu N^2 A}{H} \quad (3.15)$$

Con μ permeabilità magnetica del mezzo (per l'aria circa $4\pi \cdot 10^{-7} H/m$). Iserendo i dati di Sparky otteniamo:

$$L_{teorica} = 20.88 \text{ mH} \quad (3.16)$$

I valori che i programmi JavaTC e TeslaMap forniscono sono:

$$L_{JavaTC} = 17.00 \text{ mH} \quad (3.17)$$

$$L_{TeslaMap} = 15.68 \text{ mH} \quad (3.18)$$

Infine la misurazione sperimentale ci fornisce un valore molto vicino alle simulazioni e dello stesso ordine di grandezza del valore teorico:

$$L_{sperimentale} = (15.72 \pm 0.04) \text{ mH} \quad (3.19)$$



Figura 3.21: Avvolgimento secondario in fase di asciugatura dell'isolante.

L'avvolgimento secondario di Sparky è stato arrotolato a mano ed è successivamente stato coperto da uno strato di isolante spray per protezione e per diminuire la dispersione di cariche. L'immagine 3.21 immortala il processo. Successivamente, in fase di test, si è reso necessario ricoprire i primi centimetri dal basso del secondario (la zona spazialmente più vicina al primario) con del nastro isolante per evitare scariche dirette tra secondario e primario.

3.7 Carico Superiore o Top Load

In cima all'avvolgimento secondario è presente un componente caratteristico delle bobine di Tesla: il *carico superiore* detto in genere *top load*. Esso ha il compito di accumulare sulla sua superficie le cariche tra un picco e l'altro di tensione e rappresenta la prima armatura del condensatore immaginario che completa il circuito, in questa visione la seconda armatura sarebbe rappresentata da tutto l'ambiente circostante in cui le cariche si disperdono durante i fulmini.

Questa componente può essere estremamente variabile da bobina a bobina e può addirittura essere assente. Le geometrie più comuni sono quella toroidale e quella sferica.

La caratteristica più importante è il raggio di curvatura verso l'esterno a causa del teorema delle punte, si rimanda alla sezione apposita 3.7.1.

La geometria di questa parte "finale" della bobina ha una enorme influenza sulle forme, la frequenza, la lunghezza e l'intensità dei fulmini prodotti come si può vedere dalle immagini 3.22 e 3.23.



Figura 3.22: Foto a lunga esposizione dei fulmini prodotti senza una punta.

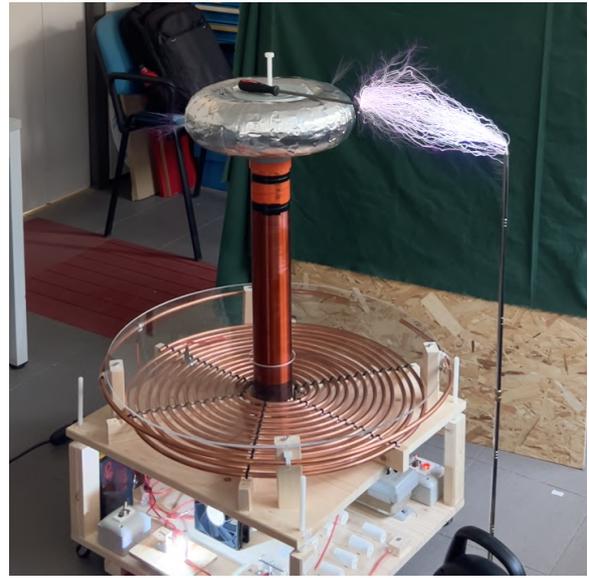


Figura 3.23: Foto a lunga esposizione dei fulmini prodotti con una punta.

Per ragioni di possibilità costruttive per Sparky si è utilizzato un tubo corrugato per fare da carico superiore. Non è la scelta ideale poiché proprio gli stretti angoli di curvatura dei corrugamenti tendono a disperdere cariche inficiando sulla lunghezza dei fulmini prodotti.

Si può stimare la capacità del circuito secondario anche se questa è fortemente influenzata dall'ambiente circostante: in particolare dalla presenza di oggetti nelle vicinanze e parametri come umidità dell'aria. Questa stima viene fatta basandoci sulla frequenza di risonanza. La misura di quest'ultima viene analizzata nel dettaglio nella sezione 4.1. Una volta stabilita la frequenza naturale del circuito secondario ν si utilizza la relazione $\nu = 1/\sqrt{LC}$ in cui l'induttanza L è stata misurata con un apposito strumento, quindi possiamo ricavare il valore della capacità che risulta essere:

$$C_{calc} = \frac{1}{4\pi^2\nu^2L} = 18.76pF \quad (3.20)$$

I programmi di simulazione TeslaMap e JavaTC permettono una stima della capacità a partire dal materiale e dalle dimensioni del toro:

$$C_{TeslaMap} = 21.48pF \quad (3.21)$$

$$C_{JavaTC} = 18.99pF \quad (3.22)$$

Valori che risultano confrontabili con quello da noi stimato.

3.7.1 Toro di Sparky

Come è già stato detto esistono innumerevoli regole di natura empirica per quanto concerne le dimensioni fisiche di questa parte della bobina e soprattutto le proporzioni tra esse. Le dimensioni più importanti sono: i due diametri del toro, interno d ed esterno D , e la distanza h dall'ultimo avvolgimento del secondario.

Ci sono pareri molto discordanti per quanto riguarda l'importanza di mantenere queste proporzioni. Non potendo misurare questi effetti con molteplici design e prove sperimentali di questa parte per Sparky abbiamo deciso di seguirle. In generale queste regole empiriche suggeriscono $h \approx 0.8d$ per la distanza dall'ultimo avvolgimento e $D \approx 4h$.

Per Sparky le dimensioni sono:

- $h = 8cm$;
- $d = 10cm$;
- $D = 35cm$.

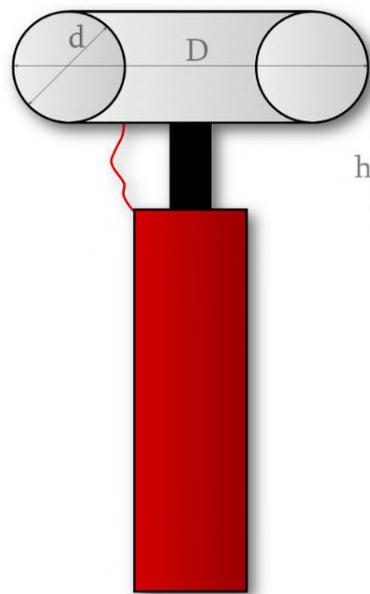


Figura 3.24: Rappresentazione schematica delle dimensioni più rilevanti per il top load toroidale.

Potere Dispersivo delle punte

Risulta molto utile analizzare un fenomeno fisico noto come *potere dispersivo delle punte* per comprendere al meglio il comportamento di conduttori caricati ad altissime tensioni. Questo fenomeno descrive la tendenza delle zone del conduttore con raggio di curvatura minore ad accumulare una densità di carica maggiore. In termini più ingegneristici: abbiamo una tendenza significativa nelle aree "appuntite" o "affilate" di materiali conduttori ad avere una densità di carica maggiore, che porta quindi a maggiori dispersioni per effetto corona e maggiore facilità che si verifichi una scarica [8].

La dimostrazione fisica di questo fenomeno è abbastanza semplice: partiamo dal considerare 2 sfere conduttrici di raggio R_1 e R_2 con $R_1 > R_2$. Queste due sfere sono collegate tra loro da un cavo conduttore, la lunghezza del collegamento può essere arbitraria così da trascurare ogni interazione elettrostatica. Una volta che il sistema ha raggiunto l'equilibrio e possiamo considerare le cariche statiche si può misurare il potenziale

elettrostatico:

$$V_1 = V_{R_1} - V_\infty = \int_{R_1}^{\infty} E dr = \int_{R_1}^{\infty} \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = \left[-\frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 r} \right]_{\infty}^{R_1} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 R_1} \quad (3.23)$$

Applicando lo stesso ragionamento per la seconda sfera:

$$V_2 = \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 R_2} \quad (3.24)$$

Abbiamo assunto nulle tutte le correnti, quindi tutti gli spostamenti di carica, quindi possiamo eguagliare i potenziali:

$$V_1 = V_2 \implies \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 R_1} = \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 R_2} \implies \frac{Q_1}{R_1} = \frac{Q_2}{R_2} \quad (3.25)$$

Possiamo comprendere meglio il significato di questa proporzione ottenuta definendo σ *densità di carica superficiale* come rapporto tra la carica Q e la superficie sferica Σ del conduttore.

$$\frac{Q_1}{R_1} = \frac{Q_2}{R_2} \implies \frac{\sigma_1 \Sigma_1}{R_1} = \frac{\sigma_2 \Sigma_2}{R_2} \implies \frac{\sigma_1 4\pi R_1^2}{R_1} = \frac{\sigma_2 4\pi R_2^2}{R_2} \quad (3.26)$$

Semplificando:

$$\implies \sigma_1 R_1 = \sigma_2 R_2 \implies \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (3.27)$$

La 3.27 dimostra come densità di carica e raggio di curvatura sono inversamente proporzionali.

3.8 Messa a terra

Come si può vedere in figura 3.1 diverse parti del circuito necessitano una connessione *a terra*. Questo collegamento, solitamente banale nei circuiti più comuni, diventa molto importante e degno di un certo approfondimento quando si alzano parametri quali tensione, corrente e frequenza. In particolare c'è la possibilità che diverse parti del circuito, che non devono assolutamente entrare in contatto diretto, possano far passare cariche attraverso la terra entrando in collegamento invece che disperderle semplicemente. Per questa ragione Sparky ha 2 collegamenti a terra separati, 3 se si considera anche quello di un eventuale parafulmini esterno. In particolare i collegamenti a terra di Sparky sono così distribuiti:

- **Terra principale:** questo collegamento scarica direttamente nel cavo di terra offerto dalla linea elettrica a cui è collegata la bobina (che di conseguenza è necessario che sia presente nell'impianto elettrico, fortunatamente questo è lo standard

costruttivo in Italia).

A questa terra sono collegati: l'alimentazione a 220V, il variac (quando presente), il filtro di linea e il trasformatore NST

- **Terra RF**: questa terra va tenuta sperata dalla principale. Nella prossima sezione verranno approfonditi possibili design per questa terra. A questa terra sono collegati: lo spinterometro di sicurezza del Terry fritz e dei trasformatori, i varistori, l'induttore del secondario e l'anello parafulmine del primario.

Nota sperimentale per le terre

Come detto è, in teoria, molto importante che le diverse terre siano separate e non in contatto. Ciononostante sperimentalmente non sono state rilevate considerevoli differenze nel funzionamento di Sparky variando il posizionamento delle terre, anche quando esse venivano collegate alla stessa linea elettrica.

Inoltre, durante le fasi di test della bobina, sono stati rilevati forti disturbi provenienti dalla terra su tutti i dispositivi collegati alla stessa linea elettrica della bobina. Di conseguenza seguire uno dei design per la terra rf presentati nella prossima sezione è comunque consigliabile 3.8.

Costruzione terra RF

Elenchiamo i migliori metodi per fabbricare una migliore Terra RF in ordine di efficacia:

- L'approccio migliore è utilizzare una barra metallica (possibilmente non cromata e non verniciata) e inserirla in un substrato terroso per almeno 150 – 250 *cm* ad una distanza sostanziale dalla terra principale
- Si può ottenere un risultato paragonabile con una serie di barre metalliche inserite nel terreno a profondità migliori (può aiutare distanziarle parecchio)
- Può essere utile seppellire qualsiasi tipo di conduttore prestando attenzione ad aumentare il più possibile la superficie di contatto tra il conduttore e il terreno
- Infine, in caso in cui non fosse proprio possibile scavare il terreno (es cemento o altri tipi di pavimentazioni) , è possibile utilizzare fogli metallici o reti metalliche appoggiate il più possibile al terreno. Maggiore l'area di contatto migliore sarà l'efficacia di questa terra.

In ogni caso può sempre aiutare bagnare le superfici che devono dissipare le cariche con acqua molto salata in modo da aumentare la conduttività del sistema. Questo tipo di design per le terre è particolarmente adatto anche a quella collegata ad un eventuale parafulmine.

Capitolo 4

Risultati e Utilizzo

4.1 "Tuning" della bobina

Come spiegato nella sezione 2 il trasferimento di energia tra circuito primario e secondario è strettamente legato alla differenza tra le due frequenze di risonanza $\nu_{primario}$ e $\nu_{secondario}$. Per rendere questo trasferimento più efficiente possibile dobbiamo fare in modo che $\nu_{primario} \approx \nu_{secondario}$. A livello costruttivo questo non è banale soprattutto per la grande dipendenza di $C_{secondario}$ dall'ambiente circostante e dal tipo di materiali utilizzati per il top load 3.7.1. Per questo motivo è molto conveniente prevedere, già in fase di progettazione, un metodo per "accordare" la bobina variando parametri utili alla modifica di ν .

La scelta più comune è quella di lavorare su $L_{primario}$. In linea di principio si potrebbe operare su una (o anche più di una) qualsiasi delle grandezze da cui dipendono le frequenze di risonanza di primario e secondario. Ovvero induttanze e capacità di primario e secondario. Analizziamo le problematiche legate ad ognuna delle grandezze menzionate: L'induttanza del secondario è legata dalle dimensioni del tubo attorno al quale è avvolto il cavo. Non è quindi possibile una variazione "immediata" di questo parametro che non preveda la sostituzione totale dell'avvolgimento.

La capacità del secondario è un parametro estremamente variabile e molto difficile da controllare precisamente. Ha infatti dipendenze importanti dall'umidità dell'aria circostante, dalla conduttività e geometria degli oggetti nelle vicinanze ecc...

La capacità del primario è fissata in modo rigido dall'impedenza del trasformatore 3.2. Rimane, come detto, un solo parametro facilmente modificabile: l'induttanza del primario. Esistono due metodi per accordare tra loro i due circuiti, per Sparky sono stati utilizzati entrambi per ragioni che verranno spiegate nel dettaglio. Nelle figure 4.1 e 4.2 è possibile vedere la notevole differenza nella lunghezza dei fulmini prodotti prima e dopo il tuning.



Figura 4.1: Immagine delle scariche prodotte PRIMA del tuning dei due circuiti.



Figura 4.2: Immagine delle scariche prodotte DOPO il tuning dei due circuiti.

4.1.1 Procedimento pratico di tuning: tapping

Il metodo più comunemente utilizzata per accordare la bobina è il "tapping", sia per la sua immediatezza sia perché non richiede particolare strumentazione. Questo processo è detto solitamente "tapping", consiste nel variare gradualmente la posizione del punto di chiusura del circuito sull'avvolgimento primario osservando ad ogni iterazione la variazione di lunghezza dei fulmini. Come è facilmente comprensibile è possibile utilizzare questo metodo solo dopo che la bobina è completa e funzionante. Per questo per il caso di Sparky si è usato anche un altro metodo per prevedere l'accordamento necessario prima dell'assemblaggio finale.

4.1.2 Procedimento pratico di tuning : valutazione frequenze di risonanza

Le principali differenze dal metodo precedente sono: la possibilità di avere valori numerici per le frequenze di risonanza dei due circuiti e la possibilità di trovare questi valori senza connettere la bobina all'alimentazione principale (aumentando notevolmente la sicurezza del procedimento).

Questo procedimento necessita inoltre di strumentazione adeguata: un generatore di funzioni e un oscilloscopio.

Partiamo dallo studio del secondario, faremo riferimento allo schema in figura 4.3 .

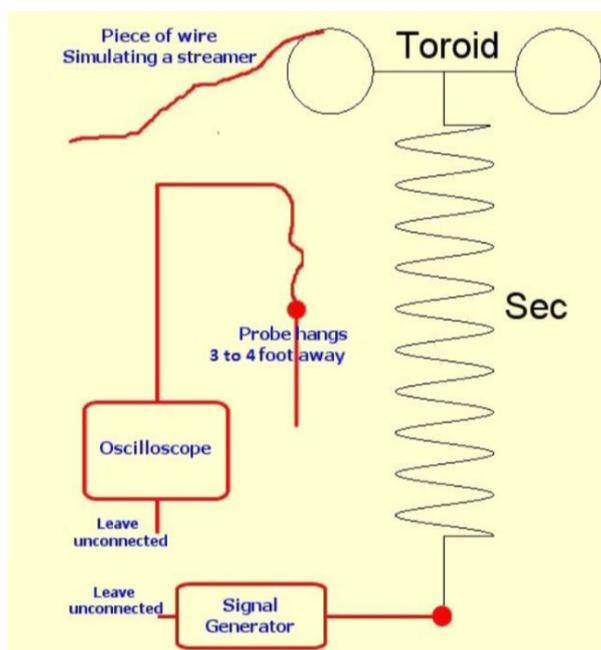


Figura 4.3: Schema circuito di tuning secondario

Si collega il generatore di funzioni all'estremo libero dell'avvolgimento, si imposta nel generatore di funzioni un segnale sinusoidale di ampiezza $1V$ e una frequenza "guess" vicina a quella che si pensa sia la frequenza di risonanza. Si procede con il collegamento di un piccolo loop di cavi, che fungerà da antenna, all'oscilloscopio. Ora si procede a variare la frequenza della funzione generata monitorando l'ampiezza del segnale ricevuto dall'oscilloscopio posto ad almeno una distanza pari a $3 - 5$ volte l'altezza del secondario. Una volta trovata la frequenza che massimizza l'ampiezza trasmessa avremo trovato la frequenza di risonanza del secondario e accorderemo il primario su di essa.

Per settare sul primario la stessa frequenza di risonanza del secondario si collegano i due capi dello spinterometro, cortocircuitandolo. Lo schema è rappresentato in figura 4.4. Il circuito primario viene "alimentato" con un segnale di $1V$ alla frequenza di risonanza del secondario che abbiamo misurato al punto prima. Si modifica l'induttanza del primario spostando il punto di collegamento lungo la spirale che costituisce l'avvolgimento primario cercando di massimizzare l'ampiezza del segnale letto sull'oscilloscopio. In questo modo si può ottenere una stima abbastanza accurata del numero di giri che l'avvolgimento primario necessiterà. Per Sparky infatti si è deciso di tagliare il tubo, con un numero sovrabbondante di giri, basandosi sulla misura ottenuta con questo metodo.

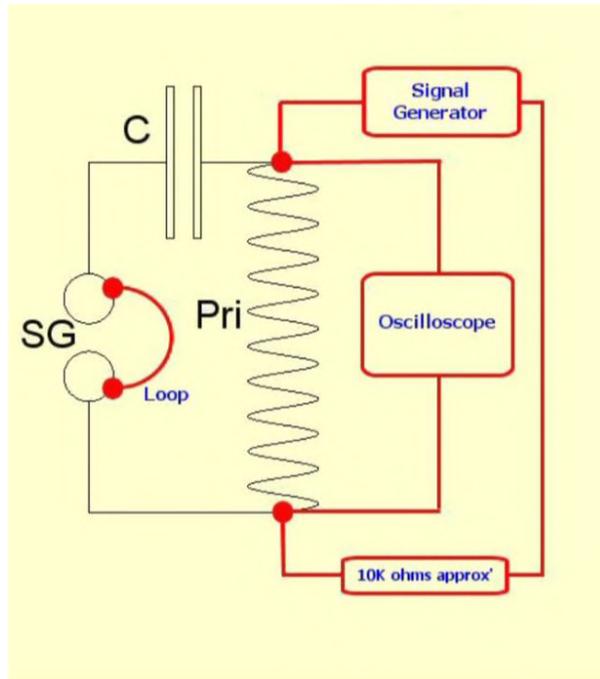


Figura 4.4: Schema circuito di tuning del primario

4.2 Misure delle componenti di Sparky

Abbiamo fino ad ora trattato le proporzioni che si è deciso di utilizzare tra le varie componenti e i metodi per stimare, in modo anche indiretto, vari valori fondamentali per la bobina. Qui di seguito sono riportati i valori più importanti, alle grandezze misurate direttamente con strumenti appositi è associato un errore sperimentale preciso che non è invece riportato per le grandezze stimate in modo indiretto:

- Capacità circuito primario: $\implies C_p = (15.07 \pm 0.03) nF$
- Induttanza circuito primario: $\implies L_p \approx 20 \mu H$
- Capacità circuito secondario: $\implies C_s \approx 19 pF$
- Induttanza circuito secondario: $\implies L_s = (15.72 \pm 0.04) mH$
- Frequenza di risonanza: $\implies \nu_{ris} = (293 \pm 1) kHz$



Figura 4.5: Segnale prodotto dalla bobina in funzione.

4.3 Analisi segnali in uscita

Risulta intuitivo comprendere come, al passaggio di correnti nel circuito secondario, si generino in prossimità della bobina onde elettromagnetiche che si disperdono nell'ambiente. È possibile analizzare questo segnale utilizzando un'antenna e un oscilloscopio. In figura 4.7 è riportato il segnale ottenuto durante questo tipo di misurazione. Analizzando questo segnale è possibile individuare un andamento generale di tipo sinusoidale. Questo segnale dalla variazione più "lenta" ha un periodo T di circa $3.2\mu s$ a cui corrisponde una frequenza $\nu = 1/T = 312 kHz$ che corrisponde all'andamento della tensione nel secondario.

Se la bobina non producesse delle scariche l'andamento sarebbe semplicemente sinusoidale con l'andamento appena descritto invece queste rapidissime scariche producono effetti considerevoli sul segnale in uscita. Come si può notare dalla foto 4.5 i fulmini si verificano negli istanti in cui la tensione è al suo massimo in valore assoluto, ovvero nei massimi e nei minimi. Le scariche sono, da un punto di vista fisico, canali con atomi ionizzati; questo porta ad un aumento temporaneo della capacità del sistema che a sua volta porta ad un improvviso aumento della frequenza di risonanza. Analizzando più nel dettaglio questi brevi intervalli temporali è possibile calcolare una frequenza di oscillazione nell'ordine dei Megahertz, circa di $\approx 25 MHz$. Confrontando le figure 4.6 e 4.7 si può notare la grande variabilità che introducono le scariche.



Figura 4.6: Analisi del segnale durante una scarica elettrica.

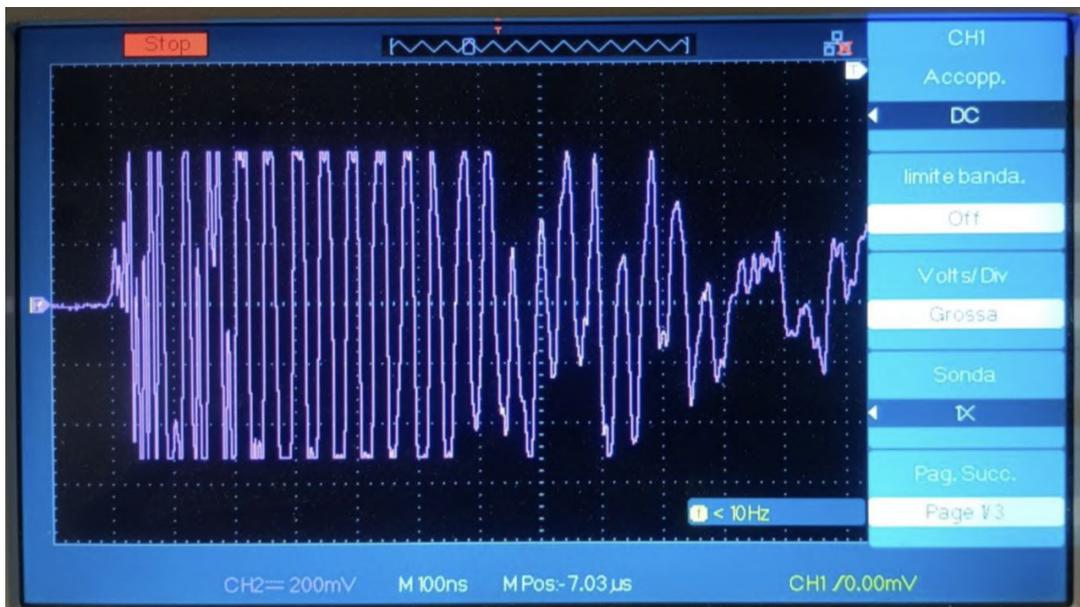


Figura 4.7: Analisi del segnale durante una scarica

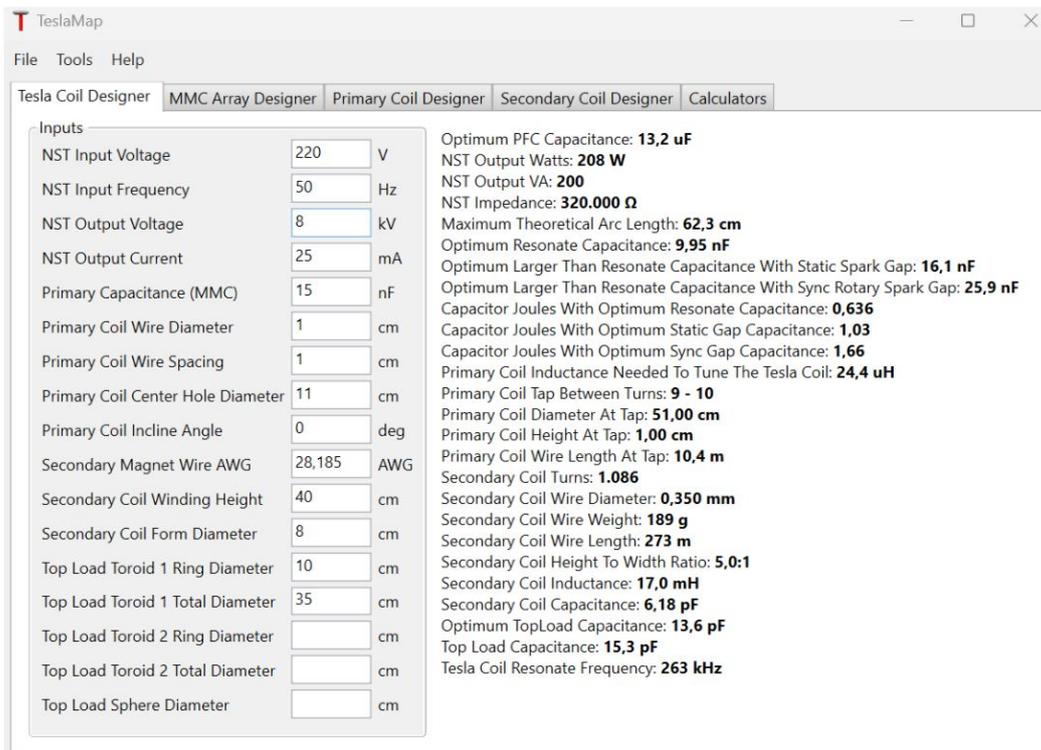


Figura 4.8: Interfaccia del programma TeslaMap con i dati di Sparky inseriti.

4.4 Programmi di simulazione: TeslaMap e JavaTC

Durante tutte le fasi del progetto i programmi per il calcolo dei parametri di bobine di Tesla sono stati fondamentali: sono stati utilizzati i programmi *TeslaMap* e *JavaTC*. In generale entrambi richiedono l'inserimento di un discreto numero di parametri per poi finire in output i valori attesi specifici della bobina. Dalla nostra esperienza il programma *JavaTC* si è rivelato più affidabile nonostante entrambi forniscano risultati molto simili. Qui di seguito si riportano alcune immagini dell'interfaccia dei due programmi. Si noti in questo caso come la stima della frequenza di risonanza di *TeslaMap* (263 kHz) sia più lontana da quella sperimentalmente (293 kHz) misurata rispetto alla frequenza predetta da *JavaTC* (292 kHz).

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 4.9: Interfaccia del programma JavaTC, sezione dei dati dimensionali con i dati di Sparky inseriti

POWER CALCULATIONS (not for DRSSCT)

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 Impedance	320000	Ohms	SRSR 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	0.0089	µF	Spark Length	51.9	cm
Power Factor Cap Size-PFC	13	µF	Sec Base Current	11.8	peak amps

Figura 4.10: Interfaccia del programma JavaTC, sezione dati relativi al trasformatore con i dati di Sparky inseriti.

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- Les	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- Ces	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 4.11: Interfaccia del programma JavaTC, sezione dei valori previsti con i valori predetti dal programma per Sparky.

Capitolo 5

Conclusioni

Il progetto aveva come scopo quello di costruire una bobina di Tesla di medie dimensioni al fine di approfondire i fenomeni fisici dietro il suo funzionamento, aumentare le competenze relative alla progettazione e costruzione di circuiti e fornire al DIFA, *Dipartimento di Fisica e Astronomia*, un utile apparato dimostrativo da utilizzare sia a fini divulgativi e didattici negli anni a venire. Dati questi obiettivi iniziali il progetto può dirsi un successo. La bobina Sparky e le tesi mia e del mio collega Naglieri Simone sono il punto di arrivo di oltre otto mesi, e più, di lavoro tra studio, progettazione e costruzione. Anche a progetto terminato i lavori sono continuati al fine di testare nuove soluzioni e operare nuove misurazioni con strumenti precedentemente non disponibili.

Speriamo che questo progetto ispiri altri studenti della laurea triennale in Fisica a cimentarsi in progetti molto pratici e altamente formativi in contrasto con la tendenza a considerare lo studio della fisica, in particolar modo quella fondamentale, come estremamente lontano dalla pratica.

Ricordo inoltre che questa tesi è da considerarsi anche un punto di riferimento per chiunque volesse fare uso della bobina, a tal fine ci tengo a ribadire l'importanza di adottare le giuste misure di sicurezza e considerare in ogni momento Sparky come un oggetto fragile e pericoloso.

Per chiunque desideri metter mano al progetto in futuro la sezione 6 è di vitale importanza.

Capitolo 6

Utilizzo e SICUREZZA

Nelle sezioni precedenti si è indicata molteplici volte la presenza di sistemi *di sicurezza*, sia per quello che concerne la protezione della bobina da eventuali danni, sia per quello che concerne la protezione dell'utente e delle persone intorno dai danni che questo dispositivo può causare. Nonostante la presenza di questi accorgimenti **è assolutamente errato considerare la bobina di Tesla un oggetto esente da rischi**. Infatti è in grado di causare danni, potenzialmente anche estremamente gravi, se utilizzata in modo scorretto.

L'utilizzo pratico di della bobina è molto semplice, qui di seguito sono elencati alcuni punti per procedere al suo utilizzo:

1. Spostare la bobina in un luogo ampio e lontano da materiali conduttori o infiammabili, è consigliabile avere un raggio di almeno un paio di metri liberi attorno alla bobina. Prestare particolare attenzione durante il suo spostamento per evitare rotture di collegamenti o altri componenti.
2. Una volta posizionata collegare per primo il cavo rosso alla linea elettrica (si tratta della terra RF)
3. Azionare la ventola dello spinterometro (opzionale).
4. Collegare il cavo della bobina alla prolunga con il doppio interruttore e il misuratore di tensione e assicurarsi che TUTTI gli interruttori siano posizionati su "off" (i due interruttori posizionati sulla prolunga e l'ultimo interruttore di sicurezza posizionato sulla bobina 6.1). NOTA: di fianco all'interruttore di sicurezza della bobina è presente un led rosso che indica la presenza di tensione a monte dell'interruttore, NON ATTIVARE L'INTERRUTTORE SE IL LED È ACCESO.
5. posizionare si "on" l'interruttore di sicurezza e allontanarsi dalla bobina.



Figura 6.1: Interruttore di sicurezza posizionato su Sparky

6. Collegare la prolunga alla linea elettrica, ora dovrebbe comparire il valore della tensione tra i due interruttori della prolunga. La bobina è progettata per funzionare con linee a 220 V , non accendere attivare gli interruttori se il display indica un altro valore di tensione (es. 380 V).
7. Ora è possibile accendere la bobina. Per farlo entrambi gli interruttori devono essere contemporaneamente su "on".

Qui di seguito invece elencheremo alcuni comportamenti da evitare e, in generale, punti da a cui prestare attenzione riguardanti la sicurezza delle persone:

- **MAI TOCCARE LA BOBINA MENTRE È IN FUNZIONE.** A seconda del componente con cui si entra a contatto i danni possono variare molto e arrivare ad essere potenzialmente letali
- Non fare maneggiare la bobina a persone che non ne abbiano studiato il funzionamento specifico. Personale inesperto potrebbe arrecare danni al circuito o a se stesso. Inoltre le bobine di Tesla possono avere funzionamenti estremamente vari, non è sufficiente aver maneggiato altri tipi di bobine per evitare tutti i rischi legati all'utilizzo di Sparky.
- La bobina è particolarmente rumorosa. Durante il funzionamento è stato registrato un livello sonoro intorno ai 90 dB . È quindi raccomandato l'utilizzo di cuffie di protezione e limitare i periodi di accensione al di sotto dei 30 s per volta.

- In prossimità della bobina gli apparecchi elettronici subiscono una forte interferenza elettromagnetica. Durante le fasi di test non sono stati riportati danni permanenti, ciononostante si consiglia di allontanare qualsiasi apparecchiatura sensibile ad almeno una decina di metri dalla bobina.
- Gli apparecchi elettronici che contengono batterie al litio devono assolutamente essere tenuti lontani dalla portata dei fulmini prodotti. Sono noti casi in cui il contatto tra una scarica e un dispositivo a con una batteria al litio sia risultato nell'esplosione della batteria.
- Prestare particolarmente attenzione nel caso di presenza di persone con apparecchi elettronici per particolari condizioni mediche come pacemaker o impianti cocleari. L'interferenza dovuta al forte campo elettromagnetico potrebbe avere effetti negativi sulla salute.
- A causa della forte ionizzazione dell'aria, nello spinterometro e sul toro si verificano le seguenti reazioni chimiche:



La prima di queste è in assoluto la più preponderante, mentre si opera la bobina è bene arrieggiare costantemente l'area evitare i luoghi stretti per il suo utilizzo. La tossicità dell'ozono è bene nota alla comunità medica ma esposizioni brevi, non ripetute e a basse concentrazioni sono relativamente sicure. La seconda e la terza reazione sono molto meno presenti in ambienti non altamente inquinati. Ciononostante i loro prodotti sono tossici e l'acido nitrico può risultare irritante per gola e occhi in forma gassosa.

- Il toro e lo spinterometro, in particolare quest'ultimo, non sono solo fonte di radiazione elettromagnetica visibile ma producono anche una notevole quantità di luce ultravioletta. Non sono in grado di causare danni immediati ma si sconsiglia di mantenere a lungo lo sguardo sullo spinterometro al fine di evitare danni alla vista.
- Allontanare tutti gli oggetti infiammabili dalla bobina.
- Anche se la bobina non dovesse produrre fulmini non significa che nel circuito non scorra corrente. Non toccare mai nessuna componente circuitale con la spina inserita nella corrente, anche se con gli interruttori su "off".
- Non accendere la bobina subito dopo urti, controllare sempre tutti i collegamenti circuitali prima di una sessione di utilizzo.

- Non esporre la bobina a intense fonti di calore. Nel caso meno grave queste potrebbe sciogliere in parte l'isolamento di alcuni cavi con potenziale pericolo di incendi. Nei casi più gravi, come nel caso in cui alcune parti del circuito si dissaldassero, alcuni componenti potrebbero rovinarsi irrimediabilmente o persino portare all'esplosione di uno o più dei condensatori.

Appendice A

APPENDICI

A.1 Alta tensione

Non esiste una definizione precisa, e soprattutto univoca, di cosa si intenda per alta e altissima tensione. Dipende infatti dagli ambiti di lavoro. Considerando l'ambito ambito puramente normativo: in Italia si considerano i seguenti valori per le correnti alternate: Bassa tensione fino ai 1000V, Media tensione fino ai 30.000V, Alta tensione fino ai 150.000V ed Altissima tensione al di sopra.

A.2 Corona Discharge

Il *Corona Discharge* o *scarica a corona* è un fenomeno elettrico che si verifica a causa della ionizzazione di un fluido, come l'aria, intorno a un conduttore che trasporta alta tensione. Essa rappresenta una regione localizzata in cui l'aria (o un altro fluido) ha subito una rottura dielettrica, diventando conduttiva e permettendo al carico elettrico di disperdersi continuamente dal conduttore nell'ambiente circostante. La scarica a corona si verifica in aree dove l'intensità del campo elettrico (gradiente di potenziale) attorno a un conduttore supera la rigidità dielettrica dell'aria. Questo fenomeno è spesso visibile come un bagliore bluastrò nelle vicinanze di conduttori metallici appuntiti sotto alta tensione. Le scariche a corona possono verificarsi anche in condizioni meteorologiche particolari, come durante i temporali, quando oggetti come alberi di navi o ali di aeroplani accumulano una carica molto diversa rispetto all'aria circostante (un esempio noto è il "fuoco di Sant'Elmo").

In molti casi, la scarica a corona rappresenta un effetto collaterale indesiderato. Nel caso delle linee di trasmissione di energia elettrica ad alta tensione, le scariche a corona comportano una perdita di energia economicamente rilevante per le compagnie elettriche. In apparecchiature ad alta tensione, come televisori a tubo catodico, trasmettitori radio, macchine a raggi X e acceleratori di particelle, le perdite di corrente causate dalla corona

possono rappresentare un carico indesiderato per il circuito. Inoltre, nell'aria, le scariche a corona generano gas come ozono (O_3), ossido di azoto (NO) e, successivamente, biossido di azoto (NO_2) e acido nitrico (HNO_3) in presenza di vapore acqueo. Questi gas sono corrosivi, possono degradare e indebolire i materiali circostanti e sono tossici per l'uomo e per l'ambiente.

A.3 Trasformatori

In questa sezione verrà approfondito il funzionamento di un trasformatore. Un trasformatore è un componente elettronico passivo che trasferisce energia elettrica da un circuito a un altro. Una corrente variabile in una delle bobine, o "avvolgimenti", del trasformatore genera un flusso magnetico variabile nel nucleo del trasformatore, il quale induce una forza elettromotrice variabile nell'altra bobina avvolta attorno allo stesso nucleo. L'energia elettrica può essere trasferita tra bobine separate senza la necessità di una connessione conduttiva diretta tra i due circuiti.

Il principio alla base di questo fenomeno è la legge dell'induzione di Faraday, scoperta nel 1831, che descrive l'effetto della tensione indotta in una bobina a causa di un flusso magnetico variabile che la attraversa.

I trasformatori sono utilizzati per modificare i livelli di tensione in corrente alternata, classificandosi come trasformatori "step-up" (aumenta-tensione) o "step-down" (riduci-tensione). Esistono molteplici tipologie di trasformatori, progettate per applicazioni elettroniche e per la distribuzione di energia elettrica. La loro dimensione varia da trasformatori RF di pochi millimetri cubi a enormi unità di centinaia di tonnellate utilizzate per collegare reti di distribuzione dell'energia elettrica.

Analizziamo il funzionamento di un trasformatore ideale: partendo dalla legge di Faraday avremo che

$$\begin{cases} V_p = -N_p \frac{d\Phi}{dt} \\ V_s = -N_s \frac{d\Phi}{dt} \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

Dove V è il voltaggio istantaneo, N il numero di avvolgimenti, Φ il flusso del campo magnetico attraverso la superficie racchiusa dagli avvolgimenti e i pedici p e s indicano rispettivamente la parte primaria e secondaria.

Dalle equazioni A.1 otteniamo il rapporto:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (\text{A.2})$$

Imponendo la conservazione dell'energia, ovvero $E = IV = \text{const}$ per entrambi i circuiti, otteniamo:

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

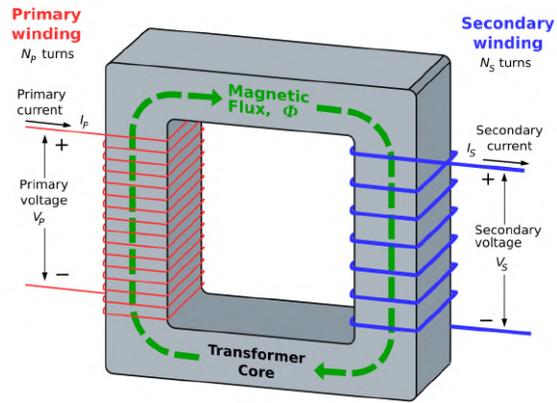


Figura A.1: Schema di un trasformatore generico.

In cui sono state utilizzate anche le leggi dei circuiti LC imponendo $v_p = v_s$.
 nel caso reale, per aumentare le linee di campo, e quindi il flusso, che passa attraverso le spire si utilizza un "core", un nucleo, metallico A.1.

Bibliografia

- [1] *Brevetto del 1891*; <https://patents.google.com/patent/US454622>
- [2] *Trascrizione della conferenza del 20 maggio 1891*; <https://ieeexplore.ieee.org/document/5570149>.
- [3] *Programma di simulazione TeslaMap* <https://teslamap.com>
- [4] *Programma di simulazione JavaTC* <https://www.classictesla.com/java/javatc3d/javatc3d.html>
- [5] *wikipedia: Skin Effect* https://en.wikipedia.org/wiki/Skin_effect
- [6] *Datasheet varistori, Digchip* <https://digchip.com/datasheets/parts/datasheet/919/S20K1000.php>
- [7] *Tabella resistività materiali, (EN) David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker, Fundamentals of Physics Extended, 8^a ed., Wiley, 2008, p. 689, ISBN 978-0-471-75801-3*
- [8] *Trattazione teorica del potere dispersivo delle punte:* https://it.wikipedia.org/wiki/Potere_disperdente_delle_punte
- [9] *Trattazione matematica del fenomeno della risonanza:* <https://en.wikipedia.org/wiki/Resonance>
- [10] *Wikipedia Italiano, bobine di Tesla* https://it.wikipedia.org/wiki/Bobina_di_Tesla
- [11] *Wikipedia inglese, Tesla coils* https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_coil
- [12] *Programma visualizzazione campi EM* <https://www.falstad.com>
- [13] *Progetto di SGTC* <https://www.richieburnett.co.uk/tesla.shtml>
- [14] *Progetto di costruzione e analisi di Tesla coil* <http://www.hvtesla.com/index.html>

- [15] *Wikipedia inglese: transformer* <https://en.wikipedia.org/wiki/Transformer>
- [16] *Datasheet condensatori:* <https://octopart.com/it/datasheet/942c20p15k-f-cornell+dubilier-4030345>
- [17] *Indicazioni generali per costruzione Tesla coils:* <https://www.teslacoildesign.com/index.html>
- [18] *Indicazioni generali di sicurezza:* <https://onetesla.com/oneteslats-manual/safety>
- [19] *Indicazioni generali di sicurezza:* <https://donklipstein.com/tcsafe.html>
- [20] *Frequently Asked Questions about Tesla coils:* <https://onetesla.com/tesla-coil-faq>

Capitolo 7

Ringraziamenti

Ho vissuto tutto il periodo della triennale dando completa priorità alle mille cose che mi appassionavano piuttosto che a tutto quello che mi sarebbe convenuto da un punto di vista accademico. Non è mai interessato il rendimento universitario e mi fa rabbrivire la parola eccellenza. Tutti i complimenti e i riconoscimenti che ho ottenuto grazie a questa tesi sono la dimostrazione che le competenze e il valore nel mondo scientifico non si misurano solo con la media degli esami.

Voglio ringraziare chi mi ha supportato in questo percorso, non esattamente convenzionale, senza mai smettere di credere nelle mie scelte e supportandomi nonostante tutto: In primis mia madre e mio padre la cui fiducia in me è stata come minimo essenziale e in ogni momento e continuerà ad esserlo.

Il mio collega Simone Naglieri, che mi ha dato la possibilità di unirmi a lui per questo progetto così importante per me.

Il mio relatore prof. Alessandro Gabrielli e correlatore prof. Matteo Franchini per essersi fatti carico di questo progetto non convenzionale e per averci reso disponibile il laboratorio OPH.

Il corpo docenti del DIFA che nella quasi totalità dei casi ha dimostrato di essere attento alle esigenze delle studentesse e degli studenti e genuinamente interessato a far crescere le loro competenze in un ambiente inclusivo e non competitivo.

Silviano Gallian, INFN sezione di Torino, per i suoi preziosi consigli pratici.

Infine tutti gli amici che ho incontrato in questo percorso, in particolare il supergruppo, per essermi stati sempre vicini.

L'ultima menzione va all'associazione Link Bologna e i suoi membri, per avermi permesso di spendermi dal punto di vista politico e sociale, parte essenziale della mia vita in questi ultimi tre anni.