

# Uma Bobina de Tesla de alta potência para o ensino de física

A high-power Tesla Coil for physics teaching

Luiz Henrique Martins Arthur<sup>\*1</sup>, Eduardo Paganelli<sup>1</sup>,  
Leopoldo Gorges Neto<sup>2</sup>, Egon Henrique Dums<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Jaraguá do Sul, SC, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

Recebido em 17 de fevereiro de 2022. Revisado em 10 de março de 2022. Aceito em 13 de março de 2022.

Uma Bobina de Tesla pode ser um dispositivo bastante chamativo e didático para se ilustrar e experimentar fenômenos do eletromagnetismo em aulas de física. Contudo, as bobinas artesanais que temos visto em feiras de ciências, aulas e demonstrações, costumemente têm apresentado uma eficiência bem abaixo do que é possível de se conseguir, se atentarmos a alguns aspectos teóricos e, sobretudo, práticos. Apresentamos neste artigo o resultado de nossos extensos ensaios experimentais e construções, sugerindo possíveis usos didáticos de uma Bobina de Tesla de alta potência com grande potencial motivador para uso em aulas e demonstrações.

**Palavras-chave:** Bobina de Tesla, Eletromagnetismo, Experimentos no Ensino de Física.

A Tesla Coil can be a very flashy and didactic device to illustrate and experience electromagnetism phenomena in physics classes. However, the handmade coils that we have seen in science fairs, classes and demonstrations, have usually presented an efficiency well below what is possible to achieve, if we pay attention to some theoretical and, above all, practical aspects. We present in this article the results of our extensive experimental tests and constructions, suggesting possible didactic uses of a high-power Tesla Coil with great motivating potential for use in classes and demonstrations.

**Keywords:** Tesla Coil, Electromagnetism, Experiments in Physics Teaching.

## 1. Introdução

O transformador ressonante conhecido como Bobina de Tesla é um dos dispositivos mais didaticamente impactantes que existem para ilustrar fenômenos eletromagnéticos. Contudo, observando alguns trabalhos acadêmicos voltados ao tema, verificamos uma escassa quantidade de sugestões para sua efetiva construção, deixando a cargo do leitor muitos procedimentos “ocultos” que facilmente podem colocar todo o projeto em risco. O resultado acaba sendo uma estrutura que até pode chamar uma certa atenção, produzindo algumas pequenas faíscas e ionizando algumas lâmpadas fluorescentes, mas bem distante do que seria possível atendendo-se a alguns cuidados práticos.

Pretendendo usar uma Bobina de Tesla de alta potência no ensino de física, constituindo-se em um experimento bastante chamativo e, portanto, com um grande potencial motivador, tivemos que ensaiar e aperfeiçoar inúmeras versões do equipamento, chegando em um resultado ótimo de transferência de energia, superior às bobinas que temos visto em eventos e demonstrações diversas. Ainda, em diversos trabalhos correlatos, pouca

atenção é dada aos cuidados práticos e de segurança para um projeto eficiente e confiável. É nossa intenção discutir esses aspectos, para que outros professores possam tirar proveito de nosso trabalho.

É importante enfatizar que os fundamentos teóricos envolvidos em um projeto desse tipo são vastíssimos, envolvendo praticamente toda a extensão de conhecimentos do eletromagnetismo [1]. Portanto não será de nosso interesse, nesse artigo, aprofundar esses fundamentos, do que deprenderia múltiplos outros trabalhos. Naturalmente apresentaremos alguns fundamentos teóricos associados, mas enfatizamos que nosso foco é apresentar a efetiva construção da bobina e ilustrar seus usos possíveis em situações didáticas.

## 2. O Circuito

No final do séc. XIX, Nikola Tesla, entre seus diversos inventos de dispositivos elétricos, projetou e produziu aparelhos que produziam uma alta tensão para diferentes fins, como o próprio estudo de suas propriedades e uso em possíveis transmissores de energia elétrica sem fio e à distância. Esses aparelhos também foram usados em transmissores de radiofrequência, que se utilizavam de arcos voltaicos para produzir ondas eletromagnéticas [2].

\* Endereço de correspondência: [luizarthury@gmail.com](mailto:luizarthury@gmail.com)

A ideia de se transmitir eletricidade sem fio à distância acabou se mostrando problemática e, com a evolução dos dispositivos de radiofrequência ao longo do séc. XX, essa tecnologia inicial de Tesla entrou em desuso em relação a essas aplicações. Mas nunca deixou de ser produzida, tendo agora outras finalidades, entre aplicações industriais, médicas [3], didáticas ou para entretenimento em geral. Essas “Bobinas de Tesla”, como vieram a ser conhecidas justamente por incluírem bobinas condutoras entre seus principais componentes, podem produzir arcos voltaicos de dezenas de centímetros ou mesmo metros de comprimento.

Um arco voltaico é produzido quando se dispõe de um campo elétrico de cerca de 30 mil volts por centímetro, no caso do ar [4]. Para conseguirmos tensões dessa magnitude, seria possível usar um transformador simples, com uma relação entre o enrolamento primário e o secundário que chegasse nesses valores. Mas se pretendermos construir um transformador desse tipo, rapidamente perceberemos que ficará um tanto inviável produzir uma bobina secundária que produza um arco voltaico de poucos milímetros. Como nossa intenção é produzir um arco de dezenas de centímetros, deveremos então seguir outro caminho. E aqui entra o transformador ressonante, que é a própria Bobina de Tesla.

Um transformador ressonante, como o nome sugere, utiliza-se do fenômeno da ressonância para se conseguir tensões da ordem de dezenas de milhares de volts (nosso projeto apresentado aqui pode chegar a tensões da ordem de centenas de milhares de volts). Para compreendermos melhor o que acontece num transformador desse tipo, precisamos desde já apresentar o circuito elétrico básico de nossa Bobina (Figura 1).

Existem outras formas de se obter os resultados que apresentaremos, particularmente envolvendo circuitos eletrônicos específicos, que exigem um bom conhecimento na área. O circuito que apresentamos aqui é um dos mais simples existentes, e com resultados excelentes para demonstrações didáticas. Como se percebe no circuito, que é bem simples do ponto de vista técnico, temos um transformador inicial T1, que eleva a tensão da rede a valores necessários para se alimentar uma ressonância de alta tensão entre a bobina primária L1 (um indutor) e o capacitor C1 (na sequência explicitaremos os valores

referentes ao nosso projeto, com todas as informações práticas associadas). De modo geral, temos um circuito LC cuja oscilação, associada ao arco voltaico que é produzido no faiscador (SG<sup>1</sup>), produz pulsos alternados de alta corrente em L1. É essa alta corrente em L1 que produzirá uma corrente induzida na bobina secundária L2, que por sua vez estará associada à altíssima tensão produzida no capacitor C2, o terminal de descarga. Este capacitor C2 consiste em uma estrutura toroidal ou esférica metálica, responsável em acumular cargas elétricas que por sua vez constituirão o arco voltaico de altíssima tensão.

Esse arco, diferentemente do que se costuma pensar, não está associado apenas à tensão obtida. É resultado de uma frequência<sup>2</sup> de descarga que ioniza o ar, resultando por sua vez em um caminho menos resistivo à propagação do arco, que continua então por esse caminho por uma distância maior do que percorreria em uma única descarga. É por isso que o comprimento desse arco é bastante afetado pela frequência com que fazemos oscilar o circuito.

Também diferentemente do que se costuma pensar, a alta tensão produzida em L2 (e conseqüentemente no terminal de descarga, C2) não está associada apenas à relação entre os enrolamentos de L1 e L2, como em um transformador convencional [3]. O que o circuito faz é levar o sistema a oscilar próximo a uma frequência de ressonância que otimiza a transmissão de energia entre as duas bobinas.

Temos duas oscilações em ressonância nesse circuito. Temos o circuito oscilador L1C1, mas também temos um outro circuito, formado por L2C2, que possui uma frequência natural de ressonância, isto é, uma frequência intrínseca aos valores de L2 e C2. A maior transferência de energia entre esses dois sistemas (L1C1 e L2C2) ocorrerá quando as frequências de ambos estiverem próximas entre si [3].

Poderíamos determinar numericamente esses valores<sup>3</sup> mas, em um projeto como o que apresentamos aqui, temos outras determinações mais centrais para o funcionamento do sistema, conforme veremos nas seções seguintes. De modo geral, como o mais importante é conseguirmos a transferência de energia entre L1C1 e L2C2, temos alguns ajustes práticos que não apenas contornam a necessidade de obtermos os valores específicos de indutância e capacitância, como também acabam por

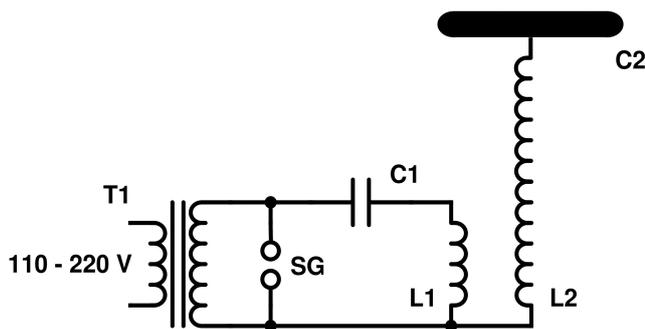


Figura 1: Circuito da Bobina de Tesla. Fonte: Adaptado de [5].

<sup>1</sup> Usamos aqui a terminologia mais usada internacionalmente, *Spark Gap* (SG), que são eletrodos de arco, ou simplesmente *faiscadores*. Veremos adiante como se dá sua construção.

<sup>2</sup> Com os parâmetros específicos de nosso projeto, em torno de dezenas de kHz. É importante mencionar que esses valores dependem bastante dos ajustes do sistema, que pode funcionar sob uma ampla gama de valores. Por isso não consideramos central, em nossa proposta, apontar valores exatos em algumas situações, uma vez que qualquer determinação teórica a esse respeito implica tão somente numa possibilidade dentro de um espectro de valores possíveis. Mas naturalmente apresentaremos alguns valores de referência que podem ser obtidos com o sistema.

<sup>3</sup> Ver, por exemplo, [1, 3] e [5].

serem mais determinantes em relação ao funcionamento ótimo do sistema específico a ser construído.<sup>4</sup>

Mas de modo a se conseguir a maior eficiência possível, existem conhecimentos práticos que foram exaustivamente testados por entusiastas da alta tensão e atestados por nosso projeto. São a esses conhecimentos que atentaremos a seguir, onde detalharemos os elementos do sistema.

### 3. O Projeto

Para que possamos transmitir uma ideia clara e segura dos aspectos que devem ser atentados na construção da Bobina de Tesla, teceremos nossas considerações sobre cada um dos elementos da bobina, progressivamente chegando ao sistema como um todo. Como cada elemento se relaciona com os demais (resultando em anacronismos inevitáveis em nossa apresentação), caso qualquer professor esteja utilizando essas informações para seu próprio projeto, sugerimos que somente se comece qualquer atividade prática após uma primeira leitura integral do artigo, o que é fundamental também pelas condutas de segurança sugeridas para um uso consciente e otimizado de todo o sistema.

Existem diversas maneiras de se conseguir os resultados propostos, e pretendemos ilustrar brevemente algumas alternativas possíveis para cada elemento do sistema, apesar do foco de nosso trabalho ser em nosso projeto. E como esse texto pode servir de aporte ao professor de física desejoso em construir seu próprio projeto, precisamos enfatizar que, assim como a tensão presente na tomada elétrica em qualquer residência ou laboratório, estaremos lidando com um contexto que pode ser perigoso se não for tratado com a devida cautela.

Do mesmo modo que a famigerada “guerra das correntes” na virada do séc. XX, quando Edison e Tesla se lançaram em demonstrações (algumas bem bizarras, como matar animais com alta tensão) sobre os riscos e potencialidades do uso da eletricidade [6], pensamos que o problema é menos a eletricidade em si, mas, sim, nosso desconhecimento da situação. Insistiremos nos riscos envolvidos em cada etapa, e os cuidados para se evitar qualquer consequência indesejada.

#### 3.1. O transformador T1

Existem basicamente duas opções<sup>5</sup> para essa etapa. Um transformador de microondas (na verdade é necessário

mais de um, como veremos na sequência), ou um transformador utilizado em painéis luminosos de neon. Este último é o mais indicado em termos de segurança (já veremos o porquê), mas como limitação é mais caro (algumas centenas de reais) e também mais sensível: “queima” com mais facilidade, principalmente se não forem tomadas algumas precauções, como também veremos.

O transformador de microondas é bem mais barato (algumas dezenas de reais) e bem mais resistente. Como limitação, temos justamente o fator segurança: é um transformador mais perigoso de ser manuseado (também já veremos o porquê). Ambas as opções produzirão os resultados pretendidos: arcos voltaicos de dezenas de centímetros. Cabe ao projetista fazer essa escolha, apesar de deixarmos algumas sugestões também nesse sentido.

Vamos começar pelo transformador de neon, justamente o escolhido no projeto relatado aqui. É um transformador de alta tensão que eleva os 110 ou 220 volts da rede elétrica para alguns milhares, a depender do modelo, com o intuito de ionizar o gás neon em painéis e letreiros luminosos (é fácil encontrar esse transformador em vendas on-line). Tipicamente, as tensões de saída desse transformador variam entre 5 mil e 15 mil volts, com uma corrente de saída que varia entre 10 e 30 mA (em nosso projeto usamos um transformador de 15 kV e 30 mA). Pode-se escolher qualquer modelo entre essas características, mas essa escolha terá impacto nas especificações dos outros elementos, como veremos. Essa corrente, de poucas dezenas de mA, associada ao circuito da Bobina de Tesla, torna o equipamento bastante seguro para a maioria das situações de demonstração, conforme discutiremos. Por esta razão preferimos relatar aqui nosso projeto baseado nessa opção.

Muito importante: a maioria dos transformadores de neon vendidos hoje são transformadores eletrônicos, tipo que não irá funcionar em Bobinas de Tesla. Os transformadores eletrônicos (chaveados eletronicamente) possuem dispositivos de segurança que interrompem seu funcionamento quando submetidos ao tipo de circuito que propomos aqui. Precisa-se adquirir necessariamente um transformador linear, isto é, fabricado conforme os transformadores convencionais, com enrolamento primário e secundário. Esse tipo de transformador tem uma aparência mais robusta (Figura 2) e é bem mais massivo, chegando facilmente aos 10 kg.

Quanto maior for a potência de saída, maior será o arco obtido. Mas quanto maior a tensão de saída do transformador, naturalmente maior deverá ser a tensão suportada por C1, e isso pode se tornar um problema, como detalharemos na seção sobre esse capacitor (na verdade um banco de capacitores). De modo geral, uma grande potência e um grande arco necessitarão de um banco de capacitores mais oneroso, em função de precisarmos de mais capacitores para suportar as tensões envolvidas.

<sup>4</sup> Como veremos, é bem mais fácil fazer o sistema funcionar a partir dos parâmetros iniciais (C1 e número de espiras nos enrolamentos e dimensões associadas, por exemplo), do que projetar esses a partir de considerações teóricas de ressonância. De todo modo, para mais detalhes sobre essas considerações teóricas, ver [3].

<sup>5</sup> Se formos rigorosos, sempre haverá mais opções do que aquelas que apresentaremos. Mas iremos nos limitar àquelas mais factíveis e/ou adequadas considerando o que normalmente temos disponível em nosso país. Para qualquer aprofundamento, basta consultar as referências apresentadas.



**Figura 2:** O transformador de neon. Fonte: Os autores.

Como dissemos anteriormente, esse tipo de transformador possui uma limitação quanto à sua sensibilidade. Devido ao fenômeno de ressonância, o transformador fica exposto a tensões maiores que sua própria saída, podendo facilmente ultrapassar o dobro do pico senoidal dessa tensão (voltaremos a isso). Como o enrolamento secundário desse transformador é muito fino e sensível, devemos obrigatoriamente providenciar um mecanismo que proteja o transformador contra essa sobretensão. A maneira mais simples é adicionando um faiscador de segurança: um par de terminais ligados diretamente em paralelo com os terminais do transformador, de modo que a distância entre seus eletrodos esteja no limite da produção do arco associado apenas à tensão da saída. A ideia é termos uma região que “dispare” um arco caso a tensão no enrolamento secundário de T1 ultrapasse um certo valor, de modo a não permitir o crescimento dessa tensão para valores danosos ao transformador.

Esse faiscador pode ser confeccionado de diversas maneiras, bastando que se monte uma estrutura com dois eletrodos ajustáveis, para se calibrar a distância entre eles. Em nosso projeto, utilizamos um dispositivo que é essencialmente igual a outro dispositivo do sistema, o faiscador principal do qual discutiremos mais adiante. Sua função é distinta (o faiscador principal participa da oscilação do circuito, e esse de segurança só serve à função de permitir uma descarga excedente em T1), mas sua construção é praticamente a mesma.

Para ajustar esse faiscador de segurança, basta escolher uma distância entre os eletrodos que, ao mesmo tempo em que esteja próximo da iminência de produzir um arco, também não permita seu surgimento com o transformador ligado, porém com o circuito ainda não conectado. Por exemplo, utilizando um transformador de 10 kV, e lembrando da rigidez dielétrica do ar em torno de 30 kV/cm, percebemos que a distância entre os eletrodos deverá estar em torno de 3,3 mm. Contudo, na prática, esse faiscador não deve disparar sob o regime normal de funcionamento do transformador. Conseguimos isso efetuando o seguinte procedimento: uma vez com o faiscador devidamente ligado aos terminais do transformador (ver Figura 1), devemos ajustar progressivamente

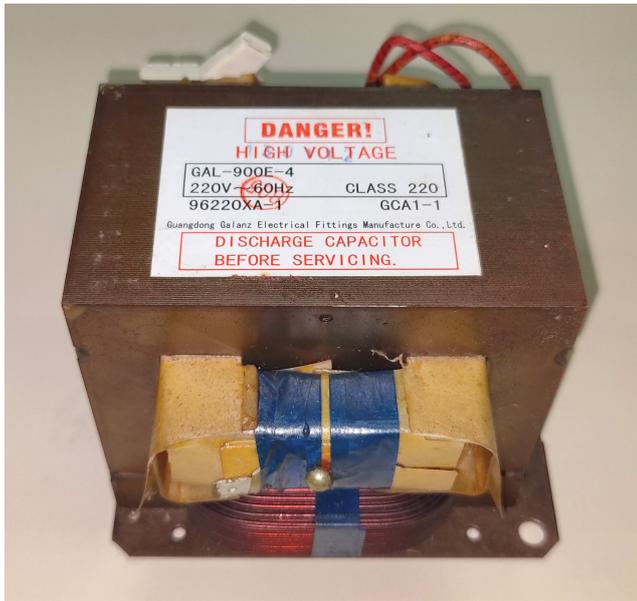
a distância entre seus eletrodos de modo a iniciar o arco voltaico entre eles (começando de um valor bem espaçado, e diminuindo progressivamente a distância). Tão logo esse arco seja produzido, ajusta-se a distância para um valor imediatamente anterior, de modo que o arco não mais se forme.<sup>6</sup> É assim que sabemos que o sistema irá operar dentro de seus limites sem causar uma sobretensão no transformador, uma vez que uma possível sobretensão ocasionará um disparo do faiscador de segurança, diminuindo em decorrência a ressonância no circuito LC.

Ainda assim, é importante enfatizar que esse dispositivo de segurança, apesar de obrigatório, não garante totalmente qualquer problema de sobrecarga. As frequências associadas ao circuito LC (voltaremos a isso) juntamente com o fenômeno de arco não ocorrendo sempre da mesma forma (depende de outros fatores como a umidade presente no ar e movimentações de corrente de ar) podem produzir uma sobrecarga no sistema mesmo com esse dispositivo de segurança. Como todo dispositivo desse tipo, assim como um fusível, é uma maneira de se evitar, mas jamais extinguir por completo os riscos associados. Então apenas enfatizamos que ainda assim podem haver problemas de sobrecarga (o mesmo valerá para o banco de capacitores), e se deve sempre estar ciente dessa possibilidade (quanto maior for o cuidado com as sugestões apresentadas aqui, menores as chances de uma sobrecarga).

Concentremo-nos agora na outra opção, o transformador de microondas (pode-se conseguir itens usados em lojas de manutenção de microondas, ou adquirir novos em sites de venda ou lojas especializadas). Diferentemente do transformador de neon, o de microondas tem uma tensão muito baixa para produzir o arco em SG, por sua vez necessário para produzir os picos de corrente em L1. Para contornar esse problema, precisaremos usar alguns transformadores em série, tipicamente três ou quatro. Não recomendamos usar mais que quatro transformadores em série. Isso levará a valores de tensão muito instáveis para a confiabilidade do sistema, deixando tudo mais difícil de controlar, produzindo diversos arcos indesejáveis (e perigosos) ao longo de toda a construção.

O transformador de microondas (Figura 3) tem uma tensão típica de saída em torno de 2,1 kV. Dissemos anteriormente que essa tensão é muito baixa para a produção do arco voltaico em SG, mas obviamente é alta o bastante para exigir muita atenção do projetista. Mas há um grande agravante em relação à segurança: diferentemente do transformador de neon, que possui uma corrente de saída de algumas poucas dezenas de miliampères, o transformador de microondas tem uma

<sup>6</sup> Esse procedimento precisa ser feito em etapas: naturalmente o ajuste só deve ser feito com o transformador desligado, ligando-o em seguida de cada ajuste para verificar, a uma distância segura, se o arco se forma ou não. A cada novo ajuste, deve-se desligar o transformador e repetir o processo. Jamais deve-se proceder a nenhum ajuste e nenhuma intervenção sobre o circuito ou suas partes com o sistema energizado.



**Figura 3:** O transformador de microondas. Fonte: Os autores.

corrente de saída em torno de meio ampere. Essa corrente, associada aos 2,1 kV, torna esse dispositivo um artefato verdadeiramente perigoso.

Embora, como já sugerimos, o risco maior é sempre o nosso desconhecimento da situação, não recomendamos que se projete uma Bobina de Tesla com transformadores de microondas.<sup>7</sup> A razão por tecermos algumas sugestões com essa possibilidade residem na factibilidade dessa opção, que inclusive pode produzir arcos voltaicos ainda maiores do que a opção com o transformador de neon. E com os devidos cuidados na construção e uso da Bobina de Tesla, conforme reiteradamente insistiremos ao longo de todo o projeto, todos os riscos ficarão contidos em um espaço inacessível pelos participantes de qualquer demonstração. Como discutiremos mais ao final desse trabalho, os vistosos e impactantes arcos produzidos são bem mais inofensivos (ou bem menos perigosos).

Mas pela corrente perigosa em seus terminais, deixamos o alerta para que somente professores com uma boa experiência em projetos envolvendo eletricidade efetivamente desenvolvam essa opção.

Para esses, e porque não gostaríamos de nos eximir de tecer sugestões também para essa possibilidade (uma vez que desenvolvemos diversas versões de Bobinas e temos contribuições nesse sentido), seguem os devidos cuidados.

Primeiramente, para contornar o problema da (relativa) baixa tensão, precisaremos então ligar alguns transformadores em série. Sugerimos que a melhor relação “custo x benefício x segurança” se dá com três

ou, no máximo, quatro transformadores. Para se ligar os transformadores em série, seus enrolamentos primários deverão estar ligados em paralelo (que por sua vez deverão ser ligados posteriormente à rede), atentando cuidadosamente às fases das associações, do contrário não conseguiremos uma soma de tensões nos secundários. Naturalmente, serão os enrolamentos secundários que serão ligados em série, de modo que cada terminal principal esteja ligado na carcaça do outro (como visto na Figura 3, esse tipo de transformador tem um terminal do enrolamento secundário ligado ao conector principal – o conector entre as fitas azuis, na figura – e outro ligado diretamente à carcaça metálica). Três transformadores resultarão em cerca de 6,3 kV, com os habituais 0,5 A mencionados, fornecendo uma potência de pouco mais de 3 kW. Essa potência determinará o valor de C1 e os parâmetros físicos das boninas L1 e L2, conforme apresentaremos na seção sobre esses elementos.

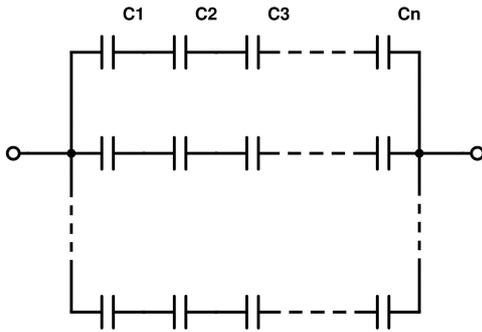
Nunca é demais alertarmos sobre o manuseio desses dispositivos e as ligações elétricas a serem realizadas: deve-se estar sempre atento para que nenhum manuseio seja realizado antes de se garantir que não há nada ligado à rede, e mesmo nesse caso deve-se observar que alguns elementos podem reter uma energia perigosa, como veremos na próxima seção. Naturalmente todas as ligações, em todas as partes do circuito, devem ser feitas com o sistema desligado, e qualquer teste só poderá ser conduzido após se certificar de que se está a uma distância segura dos elementos do circuito (recomendamos ao menos um metro).

Conforme ilustraremos, uma vez montado todo o sistema, os riscos estarão devidamente confinados e idealmente inacessíveis aos participantes, mas durante a construção da Bobina de Tesla o projetista estará efetivamente lidando com situações que podem ser perigosas, se não forem observados os cuidados em relação a seu funcionamento. Por isso sugerimos enfaticamente que se siga a todo instante um protocolo básico de segurança: a cada vez que se aproxime do circuito para promover sua construção ou substituição de seus elementos, atente-se cuidadosamente para o que se está fazendo, garantindo-se que não há nada energizado antes de manusear qualquer elemento do circuito. E, uma vez que o circuito esteja energizado, que não se aproxime e não se proceda nenhuma intervenção sobre esse.

### 3.2. O banco de capacitores

O capacitor principal do sistema (C1, no diagrama), responsável, juntamente com L1, em promover a oscilação necessária para se induzir a corrente em L2, exige diversos cuidados. O primeiro deles é em relação à tensão de operação. Devemos lembrar que qualquer capacitor precisa suportar ao menos o pico da tensão senoidal em seus terminais. Como estamos tratando de milhares de volts, naturalmente a maioria absoluta dos capacitores existentes no mercado não suportará essa condição de uso.

<sup>7</sup> Outra razão que pode afetar a decisão do possível projetista é o fato de que outro dispositivo necessário ao funcionamento da Bobina, o faiscador, exigirá maior complexidade e investimento (em contrapartida, o resultado será o melhor possível).



**Figura 4:** Diagrama do banco de capacitores. Fonte: Os autores.

Uma opção possível seria a construção de um capacitor artesanal com placas de vidro ou folhas de acetato como dielétrico, ou um banco de garrafas de Leiden (opção que o próprio Tesla usou inicialmente em suas bobinas). Apesar de serem opções que podem produzir resultados satisfatórios, esses capacitores são trabalhosos de serem montados, pouco duráveis, incorrem em muitas perdas de energia no sistema, e apresentam a desvantagem adicional de praticamente inviabilizar um experimento portátil, para se levar em diferentes ambientes. Se rendimento e portabilidade não forem um problema (afinal, muitas vezes apenas se quer ver “faíscas” saindo do terminal), podem ser opções didaticamente bastante interessantes de serem implementadas com alunos, e deixamos ao projetista explorar essas possibilidades (ver, por exemplo, a seção “Plans” em [2]). Mas se quisermos obter o maior arco possível com um sistema mais confiável, o melhor será utilizarmos capacitores comerciais, que são mais eficientes e duráveis que possíveis opções artesanais.

Mencionamos que os capacitores comerciais geralmente não suportam as tensões envolvidas<sup>8</sup> em uma Bobina de Tesla. Ora, mas sabemos como contornar isso: associando-se quantos capacitores forem necessários para se obter tanto a capacitância quanto a tensão desejadas! Vamos apresentar então um diagrama geral que servirá em todas as situações comentadas na sequência (Figura 4):

Cada linha de capacitores em série deverá observar o valor de segurança em relação à tensão aplicada em seus terminais. No nosso caso, com aproximadamente 21,2 kV de pico ( $15 \text{ kV} \cdot \sqrt{2}$ ), precisamos de um banco de capacitores que suporte ao menos o dobro desse valor, como segurança em função de a ressonância elevar a tensão para esse patamar [2]. Vamos supor que tenhamos adquirido capacitores de 1600 V, um valor típico beirando o limite superior de tensão entre os capacitores encontrados no mercado nacional. Naturalmente, precisaremos então efetuar a razão entre a tensão total,

<sup>8</sup> Existem capacitores comerciais de altíssima tensão (dezenas de milhares de volts), mas são muito onerosos e pouco acessíveis no mercado nacional. Se houver possibilidade de compra no exterior, é uma opção muito interessante, como veremos na sequência.

42,4 kV, por esse valor de 1600 V, chegando então a 27 capacitores, no mínimo (em nosso projeto usamos 28).

Se os capacitores forem de boa qualidade, poderemos manter essa quantidade em cada linha da associação, mas é sempre uma boa conduta promover um limite de segurança adicional. Sobre essa qualidade, é muito importante que se adquira capacitores de polipropileno, uma vez que é o dielétrico mais confiável para ser utilizado em alta tensão [7]. Deve-se insistir nessa informação com o vendedor, em lojas de eletrônica ou em sites de vendas. Alguns capacitores de poliéster, o tipo mais comum de capacitor não polarizado no mercado, podem suportar a tensão total por um tempo reduzido, a depender da qualidade, mas somente testando para saber. Para evitar gastos que podem resultar na completa destruição dos capacitores adquiridos, recomendamos enfaticamente que se busque pelos capacitores de polipropileno.<sup>9</sup> Já tivemos experiências bastante explosivas, literalmente, usando capacitores de poliéster.

Uma vez calculado o número de capacitores em série, precisaremos escolher seu valor de capacitância para determinar o número de linhas de capacitores, totalizando a capacitância total desejada. Para isso, naturalmente precisaremos determinar antes a capacitância total de C1 que, por sua vez, estará diretamente associada à potência fornecida pelo transformador escolhido. Podemos afirmar então que a potência do transformador é o fator que determinará todos os outros elementos do sistema.

Para aproveitar a maior quantidade possível de energia do transformador T1, sua reatância indutiva de saída ( $X_L$ ) deve ser idealmente igual à reatância capacitiva de C1 ( $X_C$ ) [4]. Essas reatâncias são dadas pelas equações:

$$X_L = 2\pi fL \quad (1)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2)$$

onde  $f$  é a frequência da rede, no nosso caso, 60 Hz. A partir das equações (1) e (2), e lembrando que a reatância indutiva ( $X_L$ ) pode ser dada também pela razão entre a tensão rms ( $V_T$ ) e a corrente ( $i_T$ ) de saída do transformador, chega-se a:

$$C = \frac{i_T}{2\pi fV_T} \quad (3)$$

Essa equação nos permite então determinar facilmente o valor da capacitância total C1, em qualquer caso escolhido para construção desse capacitor. No caso de nosso projeto, com 15 kV e 30 mA na saída do transformador, temos então:

$$C = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{2\pi 60 \cdot 15 \cdot 10^3} \cong 5,3 \text{ nF} \quad (4)$$

Mas esse valor é mais uma referência do que propriamente algo a ser necessariamente atingido: devido

<sup>9</sup> De modo geral, capacitores de polipropileno são mais “gordinhos” que os de poliéster, quando comparamos capacitores de mesma capacitância e tensão.

à ressonância, esse valor de capacitância pode levar inclusive a uma sobretensão no transformador, o que pode danificá-lo, principalmente se a escolha for pelo transformador de neon. Para evitar esse problema, existe uma orientação geral por parte dos “coilers”, os projetistas experientes de Bobinas de Tesla: a recomendação é que, uma vez que se calcule o valor da capacitância, aumente-se esse em torno de 50% para se evitar uma ressonância danosa ao transformador. Mas isso deve ser seguido para um funcionamento ótimo, com o maior arco possível. Porém, a depender do número de capacitores necessários para se atingir esse valor, o sistema poderá ficar inviavelmente oneroso.<sup>10</sup> Se isso for uma limitação, qualquer capacitância abaixo do valor calculado poderá ser usada, às expensas do tamanho do arco voltaico obtido.

Em nosso projeto construímos inicialmente um banco com linhas de 28 capacitores em série. Cada capacitor usado foi de 47 nF e 1600 V (enfatizamos para não usar os de poliéster) e usamos 5 linhas em paralelo, resultando numa capacitância total de 8,4 nF (Figura 5).

Esse banco possibilitou que a Bobina funcionasse muito bem, e enfatizamos que todo professor tem, portanto, à sua disposição, no mercado nacional, essa opção para construir seu próprio banco de capacitores, permitindo a construção de uma Bobina de Tesla eficiente e confiável. Mas, por razões unicamente de portabilidade, na sequência de nosso projeto conseguimos adquirir capacitores específicos para alta tensão. Infelizmente não encontramos essa opção no mercado nacional, e recorremos a sites de vendas internacionais para obter capacitores com especificações bem interessantes para nosso uso. No caso, adquirimos 10 capacitores de polipro-



Figura 5: Banco de capacitores 1. Fonte: Os autores.

<sup>10</sup> É importante mencionar que, no caso de se utilizar o transformador de neon, o banco de capacitores costumeiramente ficará menor em função das potências típicas desse transformador. Apesar disso incorrer em um arco final possivelmente menor, e também termos um sistema mais frágil (o enrolamento secundário do transformador de neon é muito fino), temos como vantagem um sistema mais simples (o faiscador, como veremos, fica bastante facilitado) e um banco de capacitores bem menor e menos oneroso, o que pode determinar a escolha do projetista. Enfatizamos novamente nossa recomendação por essa escolha.

pileno de 3 nF, mas com capacidade de tensão de 30 kV cada! Como nosso projeto envolve os 42,4 kV, ligamos, portanto, 2 capacitores em série, resultando num módulo de 1,5 nF, e ligamos 5 módulos desse em paralelo, totalizando um banco de 7,5 nF (Figura 6). Importante observar que não percebemos diferença nesta troca em relação ao arco obtido, com a importante vantagem da portabilidade.

Devido às altas tensões presentes nos capacitores, deve-se observar atentamente alguns cuidados que, do contrário, podem levar a arcos que podem danificar todo o banco. Placas de circuito impresso não devem ser usadas, pois as trilhas não suportarão os picos de corrente nos capacitores: eles devem ser montados em uma chapa isolante de modo que seus terminais sejam “torcidos” entre si e soldados. Se o projetista tiver acesso, chapas de policarbonato são uma boa ideia. No nosso caso, usamos uma placa padrão para eletrônica, de fibra de vidro, mas devidamente “corroída” para se ficar com uma chapa sem partes metálicas (Figura 7). Outro cuidado muito importante é quanto às distâncias envolvidas: os capacitores devem ser montados em “linha”, de modo que nenhuma distância seja menor que a distância entre os terminais de cada capacitor.

As extremidades de cada linha de capacitores serão naturalmente ligadas entre si de modo a termos os dois terminais de C1, que precisam ser bem soldados na



Figura 6: Banco de capacitores 2. Fonte: Os autores.

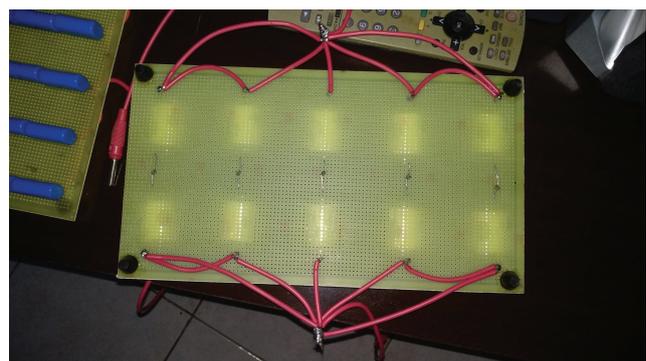


Figura 7: Ligações do banco de capacitores. Fonte: Os autores.

região intermediária das ligações (ver Figura 7). Isso deve ser observado em função de, devido às frequências e correntes envolvidas, outras configurações poderem levar a uma assimetria na distribuição de corrente, resultando em possíveis sobrecargas em partes do banco.

É muito importante atentar para que estamos lidando com um banco cuja energia acumulada pode ser perigosa. Assim, deve-se estar sempre alerta ao manusear o sistema, mesmo estando desligado da rede. O projetista precisa descarregar o banco de capacitores antes de manusear qualquer elemento do sistema, mantendo todo o cuidado para não entrar em contato elétrico com os terminais dos capacitores (usando um fio revestido preso a um cabo isolante, como um pedaço de PVC, por exemplo, sem nunca tocar ou mesmo se aproximar de suas partes metálicas).

Deve-se perceber pelo circuito (Figura 1) que, após montado todo o sistema, o banco de capacitores se descarregará naturalmente ao se desligar a Bobina, uma vez que o banco está ligado em um circuito fechado com L1 e o enrolamento secundário do transformador. Mas mesmo assim se deve observar os cuidados acima, uma vez que o sistema pode sofrer alguma falha (como ter o enrolamento do transformador rompido) e deixar o banco carregado.

Um investimento de segurança adicional pode ser providenciado para minimizar esses riscos: pode-se adicionar, no banco, um resistor em paralelo com cada capacitor, de modo a descarrega-lo quando não estiver em funcionamento. Recomendamos, para cada capacitor, um resistor em torno de 10 M $\Omega$  e 0,5 W.

### 3.3. As bobinas

Chegamos então às bobinas L1 e L2, que são praticamente a “marca registrada” das Bobinas de Tesla, dando inclusive seu nome e sua aparência típica. A bobina primária, L1, é um indutor de poucas espiras e relativa facilidade de construção. Já a bobina secundária, L2, exige maior atenção e empenho em sua construção, do que concentraremos nossa atenção a seguir.

De modo geral, a bobina secundária consiste em fio de cobre esmaltado enrolado em um tubo de PVC de forma contígua, ou seja, uma espira diretamente em contato com a seguinte.<sup>11</sup> Outros materiais podem ser utilizados para o tubo desde que não sejam condutores, mas deve-se evitar qualquer estrutura que possa absorver umidade do ar (papelão ou madeira estão fora de questão, portanto). As dimensões tanto do tubo quanto do fio de cobre estão diretamente associadas à

<sup>11</sup> Isso pode ser evidente para muitos, mas pensamos ser importante enfatizar uma informação aqui, uma vez que já nos deparamos com dúvidas desse tipo: esse contato entre as espiras não é elétrico, uma vez que o fio é recoberto por uma camada de esmalte isolante. Não poderíamos usar um fio de cobre comum, sem isolamento, pois haveria uma condução direta entre as espiras, o que descaracterizaria por completo o indutor, anulando-se o efeito de altíssima tensão.

**Quadro 1:** Padrão AWG.

AWG	Diâmetro (mm)	Secção (mm <sup>2</sup> )	No. de espiras espiras por cm
22	0,6438	0,33	14,4
23	0,5733	0,26	16,0
24	0,5106	0,20	18,0
25	0,4547	0,16	20,0
26	0,4049	0,13	22,8

Fonte: Adaptado de [8].

potência do transformador, sendo resultado ainda de experiências de muitos entusiastas da alta tensão, que acumularam conhecimentos práticos para se obter os melhores resultados [7]. Com base nesses conhecimentos, para uma ampla faixa de potência do transformador, entre 400 e 3000 W, sugerimos utilizar um tubo entre 7,5 e 10 cm de diâmetro, com um comprimento de cinco ou seis vezes o diâmetro escolhido<sup>12</sup> (mais os espaços das extremidades, ver a seguir). E sugerimos que se utilize um fio de cobre esmaltado entre 22 e 26 AWG<sup>13</sup> (ver Quadro 1).

O fio de cobre esmaltado pode ser facilmente encontrado em lojas de materiais elétricos ou em sites de vendas on-line. Basta informar o vendedor dessa medida, mas antes se deverá determinar a quantidade aproximada a ser usada, que dependerá do comprimento do tubo escolhido. Deixamos a cargo do projetista essa determinação em outros casos, mas ilustramos aqui o caso de nosso projeto. Utilizamos um tubo de 10 cm de diâmetro e um fio de 25 AWG, que propicia cerca de 20 espiras por centímetro (ver Quadro 1). Com um enrolamento total de 50 cm, temos:

$$20 \text{ esp/cm} \times 50 \text{ cm} = 1000 \text{ espiras}$$

Esse número de espiras é justamente a média recomendada pelos projetistas, do que se atesta as recomendações anteriores. É importante ter esse número como referência, mas uma tolerância em torno de 20% é geralmente aceita. Ou seja, se necessário, use esse número de espiras como referência para o dimensionamento de qualquer outra medida.

Calculando-se o comprimento de fio usado em cada espira ( $\pi \cdot D$ ) e multiplicando pelo número de espiras, chega-se então a 314 metros de fio para se preencher os 50 cm de enrolamento. Claro, deve-se observar as possíveis tolerâncias (por exemplo, existem fios com diferentes espessuras de esmalte no mercado) e o comprimento excedente que se deve garantir para o acabamento dos contatos. É importante ainda observar que muitos

<sup>12</sup> Esses valores admitem uma grande tolerância, sendo apenas recomendações gerais. O projetista pode experienciar diferentes medidas.

<sup>13</sup> *American Wire Gauge*, o padrão mais usado internacionalmente.

vendedores comercializam esse tipo de fio por massa (eles chamam de peso), mas costumam fazer a conversão desse valor para comprimento de fio, quando solicitados.

No caso do professor que possivelmente esteja usando as informações deste artigo para seu próprio projeto, recomendamos que, antes de iniciar o enrolamento propriamente dito, o tubo seja preparado conforme segue. Deve-se atentar à medida do enrolamento propriamente dito, que deve ter o valor observado em torno de cinco vezes seu diâmetro, desconsiderando as medidas das terminações que fecharão as extremidades do tubo (caps). O tubo deve ser fechado para se evitar formação de arcos em seu interior, o que pode facilmente inutilizar toda a estrutura. Ou seja, ao espaço destinado ao enrolamento, deve-se somar os espaços onde estarão os caps, para cortar o tubo na dimensão total necessária.

Uma vez cortado o tubo, deve-se lixar levemente toda a estrutura para se obter uma superfície que, além de estar livre de inscrições que podem ser levemente condutoras, fique também levemente áspera. Isso facilitará o enrolamento, não deixando que espiras fiquem se desfazendo a todo instante. Já é importante também fechar a estrutura, ou seja, colocando-se os caps em ambas as extremidades do tubo, preferencialmente já efetuando uma fixação definitiva, com adesivo específico para PVC. Antes ou após essa fixação, deve-se efetuar um pequeno furo em cada uma das tampas, caps, da estrutura, para se evitar qualquer problema de pressão no interior do tubo. Esses furos (em torno de 1 mm basta) devem ser feitos em uma região intermediária das tampas, ou seja, nem no meio da face da extremidade, uma vez que aí serão colocados os terminais da bobina, e nem no lado da tampa, onde se encontra o enrolamento. Para se ganhar confiança em todos os procedimentos, sugerimos que se observe atentamente todas as imagens e, se possível, que também se consulte os exemplos nas referências [7, 9–11], e [12].

Para iniciar o enrolamento, deve-se prender, com fita isolante, uma extremidade do fio de cobre esmaltado em um dos caps, deixando um excedente para as futuras ligações elétricas (cerca de 30 cm, enrolado no cap, é o suficiente). Para se efetuar o enrolamento, não se pode desenrolar o fio de seu carretel original, deixando-se o fio “espalhado”. Isso ocasionará dobras e possíveis rompimentos, que inviabilizarão o enrolamento. Se isso ocorrer, deve-se reiniciar todo o processo. Emendas devem ser evitadas ao máximo, uma vez que resultarão em perdas e, o que é muito pior, em arcos indesejados que podem se formar nessa região, podendo também inutilizar toda a bobina.

O processo de enrolamento deve ser feito de modo a fazer com que o fio seja retirado de seu carretel original como em um molinete de pesca, ao mesmo tempo em que é enrolado no tubo (Figura 8). Isso garante que o fio não seja dobrado, permitindo a continuidade do processo em toda a extensão do tubo. Esse enrolamento pode exigir um empenho contínuo de várias horas, do que



**Figura 8:** Enrolamento da bobina L2. Fonte: Os autores.

então recomendamos que se fracione o serviço ao longo de alguns dias. Alguns projetistas preferem montar uma estrutura motorizada para adiantar o tempo dessa execução, mas fica a critério do projetista explorar essas possibilidades. Nossas bobinas foram todas feitas “à mão”, com o devido cuidado de, cada vez que se pausasse o enrolamento, o fio fosse fixado no tubo com fita isolante, para posterior reinício do processo. Novamente, sugerimos que se consulte os exemplos nas referências, se houver necessidade de mais esclarecimentos. Mas sempre atente ao enrolamento de modo a não sobrepor as espiras. Sobreposições ou elevações quaisquer tendem a se tornar um foco preferencial de surgimento de arcos quando a Bobina estiver em operação, o que pode danificar todo o enrolamento.

Ao longo do enrolamento, deve-se colocar também um pedaço de fita isolante nas espiras já enroladas para se evitar que um possível desenrolamento afete o trabalho já executado. Sugerimos que sejam colocados pedaços de fita ao menos a cada 5 cm de enrolamento.

Uma vez finalizado todo o processo de enrolamento, com ambas as extremidades do fio fixas temporariamente nos caps, deve-se retirar cuidadosamente as fitas intermediárias de segurança para se aplicar verniz em todo o enrolamento. Toda a bobina deve ser recoberta por verniz<sup>14</sup> para garantir a fixação do enrolamento de modo a não produzir espiras soltas com o tempo, o que pode produzir arcos indesejáveis e posterior dano (os efeitos de dilatação térmica podem facilmente prejudicar todo o enrolamento). Essa camada isolante adicional, que evitará também arcos indesejáveis, trará ainda uma maior durabilidade para toda a bobina, algo essencial principalmente se a bobina se constituir em uma estrutura móvel, para demonstrações em diferentes ambientes (Figura 9).

Pode-se usar verniz marítimo comum, facilmente encontrado em lojas de materiais de construção (assim como o tubo de PVC e os caps). Usando-se um pincel apropriado, todo o enrolamento deve ser recoberto por uma camada fina e homogênea, cuidando-se para não haver acúmulo de verniz (pode ser necessário ficar

<sup>14</sup> Pode-se usar também resina epóxi.



**Figura 9:** A bobina L2 finalizada. Fonte: os autores.

girando a estrutura por alguns minutos, para evitar escorrimientos). Deve-se fazer todo o procedimento com a bobina na horizontal, pois o peso da camada de verniz pode ser suficiente para soltar ou sobrepor as espiras.

À essa primeira camada, ao menos outras duas deverão ser colocadas, espaçadas de um tempo de doze horas, necessário para um secamento mínimo entre as demãos. Após a última demão, a bobina deve passar por um tempo final de secagem de, no mínimo, vinte e quatro horas. Muito importante, jamais se deve deixar a

estrutura secar em um ambiente com incidência direta de luz solar. Deve-se garantir um ambiente bem ventilado, preferencialmente ao ar livre, mas jamais sob incidência da luz do Sol, uma vez que o aquecimento decorrente levará a uma dilatação catastrófica do fio, inutilizando toda a estrutura.

Após a secagem final, cada extremidade do fio deverá ser devidamente conectada: uma extremidade deverá ser emendada eletricamente ao fio que fará a ligação ao circuito. Para essa emenda, devemos lembrar que o fio de cobre precisa ter sua camada isolante removida. A melhor maneira, que evita rompimentos, é inicialmente queimar um pedaço da extremidade (dois a três centímetros) usando a chama de um palito de fósforo ou isqueiro, removendo-se a camada carbonizada com esponja de aço, com movimentos suaves e cuidadosos para não se romper o fio. Uma vez unido ao fio condutor que irá até ao circuito, deve-se prender a emenda feita ao cap com fita isolante.

A outra extremidade do enrolamento será, portanto, fixada à C2, o terminal de descarga. Para isso deve-se efetuar o mesmo processo já descrito, mas o fio será soldado a um terminal qualquer, no centro do cap, de modo a propiciar uma fácil conexão com a estrutura metálica de C2, a ser descrita a seguir.

Já a bobina primária, L1, consiste em um fio de cobre de grande espessura. Não existe um número que deva ser necessariamente seguido, mas esse fio precisa levar em consideração dois fatores, sendo que ambos levam à necessidade de uma grande bitola: devido aos pulsos de alta corrente, podendo chegar a centenas de amperes, esse fio precisa comportar o efeito joule decorrente (contudo, esses picos são de tempo bastante reduzido, por isso não vale aqui as recomendações tradicionais quanto às relações entre espessura e corrente). E como os picos de corrente têm uma frequência que pode chegar a centenas de Hertz, há ainda que se observar o “efeito skin”, com o fluxo de cargas elétricas tendendo a ocorrer nas regiões mais próximas à superfície do condutor [1].

Em nosso projeto usamos um fio de cobre rígido de 5 mm de diâmetro, perfazendo 12 espiras. A “afinação” da frequência de ressonância para o maior arco possível pode se dar com menos espiras, mas esse número é recomendável justamente para possibilitar diferentes posições do terminal que fará a ligação ao resto do circuito (veremos isso na sequência). Para se produzir o enrolamento de L1, há três possibilidades. Pode-se usar um enrolamento helicoidal paralelo ao enrolamento de L2. Esse enrolamento propicia um maior acoplamento eletromagnético entre L1 e L2. Contudo, o que em um primeiro momento poderia ser considerado algo desejável, essa opção traz alguns problemas quando estamos construindo uma Bobina de Tesla de alta potência. Esse acoplamento produz um excesso de transferência de energia que resultará em arcos incontroláveis (não ocorrerão apenas no terminal de descarga) e generalizados (poderão ocorrer em qualquer ponto dos enrolamentos).

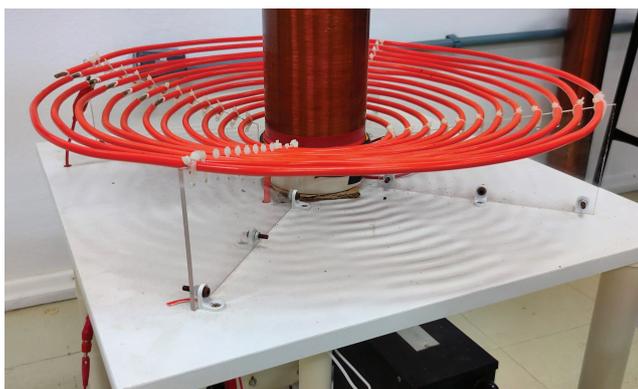
Isso é altamente danoso para todo o sistema. Esse tipo de enrolamento só deve ser utilizado em bobinas de baixa potência (dezenas ou poucas centenas de Watts), produzidas por outros meios que não o contexto que estamos discutindo nesse trabalho. Porém, a depender da potência envolvida, encorajamos o possível projetista a fazer ensaios a esse respeito.

Uma outra opção é se produzir uma bobina horizontal, cujo enrolamento, crescente radialmente, permanece na mesma elevação em relação à L2. Essa opção diminui ao máximo o acoplamento entre as duas bobinas, e costuma ser o preferido em sistemas de alta potência, de centenas ou milhares de Watts. A principal vantagem desta escolha é justamente a diminuição da possibilidade de ocorrer arcos indesejáveis, mantendo os mesmos em formação apenas no terminal de descarga (C1).

Nossa opção foi pela situação intermediária entre as duas citadas, que por sua vez resulta numa eficiência que é, ao mesmo tempo, melhor que a bobina plana, e menos suscetível a descargas generalizadas, como na helicoidal paralela. Essa opção consiste então em se elevar o enrolamento de forma helicoidal, ao mesmo tempo em que se afasta a espira imediatamente superior, produzindo um cone espiral (Figura 10). Os espaçamentos devem ser próximos à própria espessura do fio.

É muito importante que a estrutura escolhida para se suportar L1 seja isolante. Pode-se utilizar uma base de madeira ou outro material para se fundamentar a estrutura, mas os elementos que estarão diretamente em contato com o fio devem ser isolantes (no nosso projeto usamos placas de policarbonato, ver Figura 10). Nunca devemos esquecer que os valores de tensão existentes nesse tipo de sistema fazem com que muitas substâncias, que normalmente são tidas como isolantes, passem a ser perigosamente condutoras.

Uma vez com a bobina construída, deve-se propiciar uma ligação móvel entre o final da bobina e o circuito principal. A ligação da extremidade interior da bobina (a parte mais próxima de L2, na figura) é a parte que ficará ligada permanentemente ao circuito. A outra ligação ao circuito será feita por meio de uma conexão que possibilite efetuar o contato em diferentes espiras,



**Figura 10:** A bobina primária L1. Fonte: Os autores.

delimitando a parte efetiva de L1 que fará parte do circuito principal (Figura 1). Para isso, pode-se proceder da seguinte maneira: nas espiras mais externas, deve-se “descascar” um pedaço do fio de modo a permitir que uma garra “jacaré” ou qualquer outra ligação possa ser feita em diferentes espiras (atente ao detalhe na Figura 10, à esquerda da figura). Essa garra ou conector estará ligada ao circuito principal, e determinará que porção, qual espira, será efetivamente conectada a ele. Isso é necessário para que se “afine” a oscilação do circuito, contornando os diversos cálculos que precisariam ser feitos para se projetar um sistema já com a melhor eficiência.<sup>15</sup> Basta alternar a posição da garra nas expiras mais externas, e verificar em qual delas se consegue o maior arco no terminal de descarga.<sup>16</sup>

### 3.4. O terminal de descarga

Pode-se utilizar um simples eletrodo, um pedaço de fio qualquer, como terminal de descarga (C2), mas, para se produzir o maior arco possível, deve-se utilizar uma estrutura metálica que permita um acúmulo de cargas em sua superfície, ou seja, um efeito capacitivo. Pode-se usar uma estrutura esférica para esse fim, à semelhança dos Geradores de Van de Graaf, ou uma estrutura toroidal. Nossa opção foi por essa última, do que ilustramos então sua construção.

Inicialmente precisamos de algum cilindro flexível, de qualquer material, que será encurvado de modo a se obter o toroide. Nossa escolha foi por um tubo de alumínio flexível de calefação, que também pode ser obtido em lojas de materiais de construção. De modo geral, o diâmetro interno do toroide deve ser, no mínimo, igual ao diâmetro de L2. Não existe uma recomendação universal para o diâmetro do tubo flexível usado, mas sugerimos que não seja muito menor que o diâmetro do tubo de PVC. Pode-se testar diferentes tamanhos, e em uma situação didática pensamos que esses ensaios são bastante interessantes.

Nosso projeto chegou em um toroide feito com um tubo de cerca de 10 cm de diâmetro. Esse tubo foi encurvado de modo a se obter o toroide, fixando-se suas extremidades com fita isolante, com um posterior acabamento com fita metálica, conforme segue (Figura 11). Recobrimo toda sua superfície, utilizamos fita adesiva de alumínio (atenção para não usar fitas plásticas que apenas dão a aparência de serem metálicas). Essa fita não é necessária caso o tubo usado seja metálico, mas pode ajudar a se obter arcos mais uniformes (menos distribuídos). Se o professor projetista optar por sua utilização, recomendamos que o toroide seja recoberto por pedaços de fita metálica ao longo de seções retas ao cilindro que forma o toroide.

<sup>15</sup> Para um aprofundamento desses cálculos, ver, por exemplo, [1, 3] e [5].

<sup>16</sup> A não observância desse simples procedimento costuma ser a principal razão do mal aproveitamento energético de muitas Bobinas de Tesla construídas para fins didáticos.



**Figura 11:** O terminal de descarga C2. Fonte: Os autores.

Uma vez finalizada a estrutura, deve-se fixar eletricamente um fio condutor com comprimento de poucos centímetros, suficiente apenas para ir até à conexão de L2. Sugerimos que se desencape cerca de dez centímetros do fio para fixação na superfície condutora do toroide. Essa fixação pode ser feita com qualquer fita, mas sugerimos que se utilize a fita de alumínio para melhor contato e melhor estética. Para sustentar o toroide na extremidade superior de L2, pode-se aventar qualquer estrutura isolante que se apoie no cap superior e que suporte o toroide.

Finalmente, para se concentrar a formação do arco a partir de um único ponto, o que o deixa mais consistente e com maior tamanho, pode-se também fixar um pedaço de fio desencapado na superfície do toroide (ver Figura 11, no detalhe à esquerda). Ou, para diferentes usos da Bobina, pode-se ignorar esse elemento e colocar um pedaço de fio apenas apoiado no toroide, que faça essa função do terminal apenas quando desejado. Basicamente o que ocorre, quando não há esse terminal, é que são produzidos diversos arcos menores, em diferentes regiões do toroide.

### 3.5. O faiscador

Chegamos então ao último elemento do sistema, o faiscador ou *spark gap* (SG). Temos dois faiscadores no circuito: o principal e o de segurança, caso se opte pelo transformador de neon, justamente nosso caso. Vamos ao principal.

O faiscador principal pode ser de dois tipos: estático e rotativo. O estático é o mais simples, e pode ser o preferido em termos de facilidade de montagem. Já o rotativo traz um maior empenho em sua construção, mais itens a serem adquiridos e, portanto, é mais oneroso. Como vantagem imediata, temos sua eficiência: por possibilitar maiores frequências de oscilação do circuito, o arco voltaico produzido também aumenta. No caso de utilizarmos um transformador de neon, qualquer faiscador poderá ser utilizado. Já na opção pelo transformador de microondas, devido à sua alta

corrente, a escolha precisará recair no rotativo, uma vez que o arco produzido nos terminais do faiscador estático irá “subir” devido aos efeitos de aquecimento do ar por onde o plasma da descarga se formará, ao mesmo tempo em que resultará em um caminho de menor resistência justamente devido à ionização. Isso faz com que a descarga, não mais pulsada, impossibilite o funcionamento do oscilador LC, e consequentemente o funcionamento de toda a Bobina.<sup>17</sup>

O faiscador estático ainda pode ser de dois tipos. Um simples, envolvendo apenas dois eletrodos, e um mais complexo com múltiplos eletrodos. No caso de se utilizar um transformador de neon, o simples poderá ser utilizado com resultados satisfatórios. Mas o faiscador múltiplo é sempre mais vantajoso, pois permite mais regiões para se formar a faísca, levando a uma frequência de ressonância mais uniforme, o que resulta em arcos mais estáveis.

Em nossos ensaios experienciamos todos esses tipos, mas no presente projeto usamos um faiscador estático de múltiplos eletrodos, que possui uma eficiência intermediária entre o estático simples e o rotativo. Existem diversas maneiras de se produzir um faiscador rotativo, e deixamos a cargo do projetista experimentar essas possibilidades [10]. De modo geral, esse faiscador, como o nome sugere, tem uma parte móvel, motorizada. Isso não apenas melhora a consistência do faiscamento, e consequentemente a oscilação no circuito LC e o arco final, como também permite atingirmos maiores frequências, associadas agora à rotação do motor utilizado. Além dessas vantagens, a maior frequência conseguida por esse sistema praticamente elimina os problemas de superaquecimento dos transformadores de microondas, se for o caso.

Caso se opte pelo estático simples, qualquer estrutura que possibilite o ajuste entre dois terminais poderá ser aventada. Em nossos ensaios, usamos inicialmente o mostrado na Figura 12, construído com parafusos simples como eletrodos.

Esse faiscador resulta em arcos satisfatórios, podendo ser uma boa opção inicial ao professor projetista. Seu ajuste se dá basicamente aproximando os contatos<sup>18</sup> de modo a se escolher a distância que produza o maior arco possível no terminal de descarga C1.

Mas caso se opte por um melhor desempenho geral do sistema, e com um pequeno acréscimo na complexidade

<sup>17</sup> Uma possibilidade de se contornar esse problema, caso se insista por essa opção, é diminuir a corrente no transformador de microondas. Isso pode ser conseguido com a utilização de resistores de alta potência ou de indutores ligados em série com a saída de T1, mas um uso contínuo com duração maior que 10 ou 20 segundos acarretará em superaquecimento dos transformadores, que podem facilmente se danificar (o efeito joule em suas bobinas pode derreter a camada isolante, produzindo um efeito catastrófico em cadeia).

<sup>18</sup> Lembramos novamente que esse ajuste só pode ser efetuado em etapas, com todo o sistema desligado. A cada ajuste de aproximação ou afastamento dos eletrodos, liga-se a Bobina para aí sim, à distância, averiguar o resultado do ajuste.



**Figura 12:** Faiscador estático simples. Fonte: Os autores.



**Figura 13:** Faiscador estático de múltiplos eletrodos. Fonte: [11].

de construção, recomendamos que se use um faiscador com múltiplos eletrodos. Um exemplo possível é o da Figura 13, onde se pode aproveitar um pedaço de tubo de PVC para comportar os eletrodos, no caso, seções de tubos de cobre (os terminais finais do faiscador estão eletricamente ligados aos tubos das extremidades do conjunto). Pode-se obter um tubo de cobre para encanamento de gás em lojas especializadas, e então cortá-lo em pedaços. Cada pedaço deverá ser devidamente afixado com parafusos, de modo que cada um esteja a uma distância, um do outro, em torno de 1 mm ou menos.

Como regra geral para o número de eletrodos a serem usados, basta lembrar do dielétrico do ar e considerar a distância total para se permitir uma descarga associada à tensão do transformador utilizado (as distâncias entre cada eletrodo, somadas, devem perfazer a distância aproximada para um arco voltaico ser produzido com a tensão do transformador). O projetista pode ensaiar algumas possibilidades, sendo que diversas configurações são possíveis.

Em nosso caso utilizamos 6 tubos, em uma estrutura semelhante à da Figura 13. Mas, para diminuir os efeitos



**Figura 14:** O faiscador utilizado no sistema. Fonte: Os autores.

da ionização produzida por cada faiscamento entre os tubos (o que altera o pequeno arco produzido deixando o faiscamento geral instável com o tempo), elaboramos um sistema com ventiladores (“coolers”, usados em dispositivos eletrônicos) nas extremidades do sistema (Figura 14). Embora dispensáveis, ao soprarem ar continuamente nos eletrodos esses ventiladores aumentam a uniformidade das descargas. Se o projetista optar por sua utilização, naturalmente também deverá providenciar uma fonte de alimentação adequada para os ventiladores.

Como se percebe pela estrutura, a confecção desse faiscador exige um certo empenho, do que sugerimos que primeiro se utilize um faiscador simples (Figura 12), apenas para “contemplar” o resultado final, bastante satisfatório. Com o tempo, e já com todo o sistema funcionando, pode-se experimentar esses aperfeiçoamentos.

### 3.6. Abrigo do sistema e cuidados adicionais

Todo o sistema pode ser abrigado em uma estrutura de madeira ou compensados diversos, desde que se observe alguns cuidados. O primeiro deles, é em relação a todas as ligações elétricas presentes no circuito. Em nossos ensaios, tivemos diversos problemas com o uso de madeira crua. A madeira não é um material suficientemente isolante para ser usado como suporte direto de muitos elementos do sistema. Assim, se se insistir em seu uso, todos os condutores deverão ser devidamente isolados da madeira por elementos para esse fim. Existem opções comerciais, mas usar e abusar do acrílico, policarbonato e nylon é uma boa opção. Ou seja, todos os fios condutores usados e outras partes por onde passa corrente devem estar apoiados por estruturas isolantes, com essas fixadas nas partes de madeira. Uma solução satisfatória, que utilizamos na montagem final do sistema, é buscar por chapas de MDF ou outro compensado qualquer devidamente recobertas por substância isolante (em lojas específicas de laminados é possível obter essas chapas, bastando solicitar que os pedaços encomendados sejam recobertos por acabamento).

Além dos suportes isolantes, deve-se observar atentamente as distâncias envolvidas. Todos os condutores devem estar a uma distância, seja de outros condutores ou de qualquer outro elemento do sistema, que ultrapasse com segurança o valor associado à quebra da rigidez

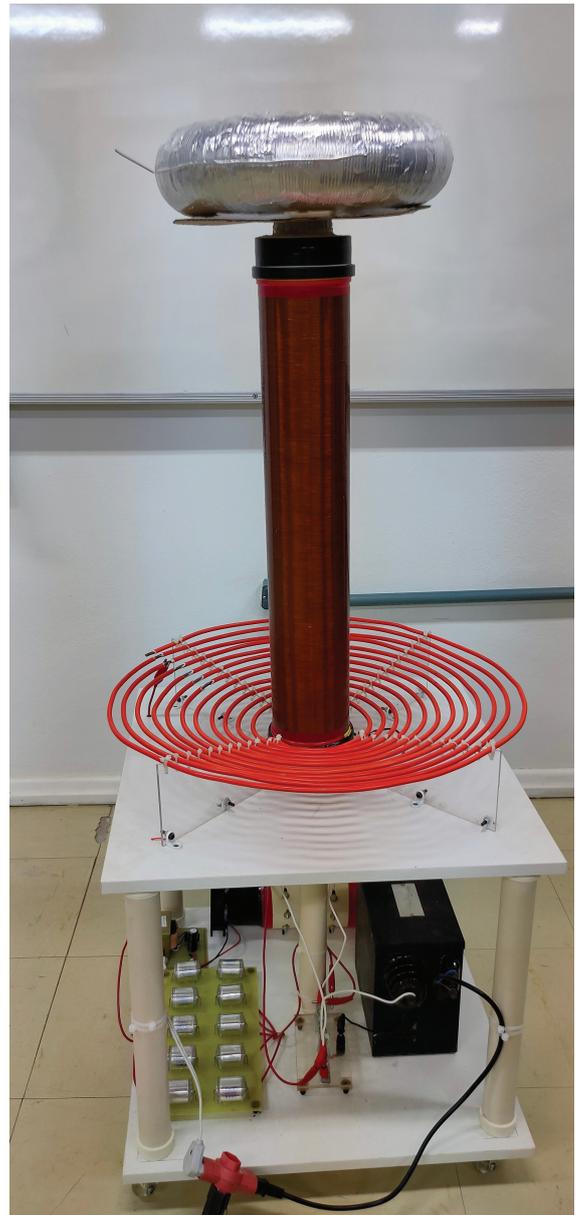
dielétrica do ar ( $30 \text{ kV/cm}$ ). Mas devido ao fenômeno de ionização do ar com o surgimento de qualquer arco (que pode sustentar a descarga a distâncias maiores que a associada a essa rigidez), sugerimos que essas distâncias sejam superdimensionadas. Por exemplo, se usarmos um transformador de  $10 \text{ kV}$ , poderíamos pensar que bastaria usar distâncias de  $1/3$  de centímetro. Nada mais enganoso e perigoso. Essa distância precisa ser maior que isso, não apenas pela razão apontada, mas porque as tensões reais existentes no sistema podem ultrapassar o dobro do pico senoidal, conforme mencionamos.

Façamos uma breve estimativa, para esse exemplo de  $10 \text{ kV}$ . As tensões podem chegar então a cerca de três vezes esse valor (o dobro do pico senoidal) [1]. Observando apenas essa tensão, teríamos então que garantir cerca de  $1 \text{ cm}$  entre todas as ligações. Mas para se garantir a distância de segurança devido ao fenômeno de ionização produzida por possíveis arcos, precisamos trabalhar com um valor ainda maior. Sugerimos assim que se separe todos os condutores e ligações de uma distância de ao menos  $5 \text{ cm}$ , e, muito importante, com os fios que saem do banco de capacitores jamais se aproximando de uma distância em torno do distanciamento entre seus próprios terminais (no caso do banco mostrado nas Figuras 6 e 7, uma distância não menor que a própria largura da placa).

Uma das estruturas mais usadas para abrigar todo o sistema consiste em duas placas de compensado qualquer, com os cuidados já mencionados acima. No nosso caso, o sistema final é mostrado na Figura 15, com a placa superior apoiada na inferior por tubos de PVC.

Recomendamos que sejam colocadas rodas na placa inferior, para facilitar a portabilidade. O fio condutor, que irá do transformador até à tomada da rede elétrica, deve passar por uma chave interruptora que permita que o professor demonstrador ligue e desligue a Bobina de Tesla sem estar perto dela (na próxima seção, sobre o uso do sistema, chamaremos atenção para outros aspectos associados à operação da Bobina). Deve-se usar um fio de razoável bitola, condizente com a potência do transformador usado, preferencialmente um fio de extensão recapado, ou seja, que além do isolamento habitual do fio condutor, possua uma cobertura adicional emborrachada. Esse tipo de fio, tipicamente usado em instalações externas, também é vendido em lojas de materiais elétricos. O interruptor deve ser colocado de modo que se possa ligar a Bobina a uma distância de segurança (sugerimos algo em torno de dois metros do sistema).

Essa chave pode ser um disjuntor ou qualquer outro interruptor que suporte com folga a tensão e a corrente utilizadas. No caso de nosso projeto, de cerca de  $450 \text{ W}$ , essa chave precisa suportar ao menos  $2 \text{ A}$  (considerando uma rede de  $220 \text{ V}$ ), com o cuidado adicional de lembrarmos que estaremos chaveando um dispositivo indutivo (o enrolamento primário do transformador). Isso pode produzir faiscamentos em seus contatos, do



**Figura 15:** O sistema completo. Fonte: Os autores.

que recomendamos enfaticamente superdimensionar os valores nominais desse interruptor. Em nosso caso, usamos uma chave interruptora com capacidade para  $10 \text{ A}$ . Não é uma boa opção prescindir desse interruptor usando apenas o plugue da extensão como “interruptor humano”, colocando ou tirando o plugue da tomada. Devido aos faiscamentos nesses contatos, tanto o plugue quanto a tomada se danificarão rapidamente.

Deve-se lembrar ainda que a potência do sistema construído deve ser observada para se ligar o mesmo à rede elétrica, com os devidos circuitos de proteção (disjuntores) dimensionados para esse valor. No caso de nosso projeto isso não é um problema, com a potência associada permitindo seu uso em tomadas comuns de  $10 \text{ A}$ . Essa informação deve sempre ser observada

quando se pretender usar a Bobina em outros ambientes, e isso talvez seja um elemento de decisão adicional para se usar o transformador de neon, uma vez que, devido à sua menor potência, permitirá o uso da Bobina em praticamente qualquer ambiente. O mesmo não seria possível com a opção pelos transformadores de microondas, cujos milhares de Watts exigem uma tomada com as especificações adequadas a essa potência.

No circuito de nosso projeto (Figura 1), há uma ligação física entre as bobinas L1 e L2. Essa ligação pode ser mantida, mas há aqui uma importante consideração. Essa ligação traz uma carga adicional aos transformadores e pode também fazer com que arcos indesejados surjam ao longo de suas ligações. Ao longo de nossas demonstrações observamos alguns poucos efeitos nesse sentido, mas, para evita-los, é recomendável que essa ligação seja substituída por um aterramento genuíno de L2. Ou seja, sugerimos que, sempre que possível, o fio condutor, que faria a ligação entre L2 e L1, seja levado de L2 até um fio aterrado (no solo mesmo) ou a uma estrutura metálica aterrada (como uma grade de janela ou torneira metálica na parede). Mas, muito importante, não se deve utilizar o fio terra da rede elétrica! Isso pode resultar em faiscamentos no interior da tomada.

Ou seja, é preferível sempre usar a Bobina em um lugar acessível ao solo, introduzindo uma barra condutora (pode ser um pedaço do fio usado para construir a bobina primária L1, por exemplo) e fazendo uma extensão com um fio entre essa barra e a extremidade inferior de L2. Na impossibilidade de se garantir essa configuração, pode-se manter a ligação original mostrada no circuito, mas atentando para os efeitos indicados.

Finalmente, sugerimos cuidar para que os únicos elementos expostos sejam as bobinas L1 e L2, e o terminal C2. No caso de nosso projeto mostrado na Figura 15, isso é facilmente conseguido com um isolamento mecânico nas laterais do sistema. Sugerimos usar placas de acrílico ou policarbonato (opção que estamos providenciando para nosso projeto), mas o professor projetista pode usar também outras placas de compensado para esse fim, com o cuidado de permitir uma abertura facilitada da estrutura para possíveis manutenções.

#### 4. Uso da Bobina de Tesla

A Bobina de Tesla pode ser usada em diversas situações, com diferentes objetivos. É possível ilustrar didaticamente diversos fenômenos eletromagnéticos, e a maioria dessas demonstrações envolve basicamente a mesma operação, com os mesmos cuidados de segurança. Vamos então a esses cuidados.

Antes de se ligar o sistema efetivamente à tomada, deve-se naturalmente se certificar que a chave interruptora esteja desligada, basicamente para se evitar sustos e faiscamentos na tomada. Com o plugue na tomada, e em qualquer situação, deve-se monitorar e preservar atentamente todo o perímetro do sistema (um raio aproximado

de dois metros é o suficiente), certificando-se que não existe nenhum aparelho eletrônico ou artefato externo qualquer nesse perímetro. É importante enfatizar que qualquer aparelho eletrônico como celulares, relógios e calculadoras podem facilmente ser danificados pelo arco. No caso de uma demonstração ao público, a Bobina deve ter esse perímetro demarcado, e as pessoas devem ser avisadas disso.

Uma vez garantido o perímetro de segurança e os presentes estarem devidamente avisados do iminente funcionamento da Bobina, pode-se então ligar o interruptor. Com as especificações de nosso projeto, arcos em torno de 40 cm serão formados, com um barulho característico bastante intenso<sup>19</sup> (mais uma razão para os participantes serem avisados disso, para se evitar sustos).

Principalmente em situações de demonstração para o público, sugerimos que a Bobina seja operada por duas pessoas: uma para fazer as demonstrações propriamente ditas, e outra para controlar o interruptor e acompanhar atentamente as demonstrações e interações com o público, atenta para desligar o interruptor em caso de qualquer inconformidade ou aproximação abrupta de algum participante. Mas, antes mesmo de detalhar melhor as consequências de se “levar um choque” devido ao arco, é interessante saber que, salvo algumas situações, como veremos, não se deve achar que seja algo perigoso. Como costumamos repetir, perigoso mesmo é não saber o que se está fazendo. O perímetro de segurança e o uso consciente da Bobina servem como mecanismos de prevenção a sustos desnecessários.

Um dos efeitos mais impactantes da Bobina é simplesmente seu funcionamento, ou seja, seus arcos voltaicos sendo constantemente produzidos, “saíndo” do toroide em diversas direções (ou a partir do fio de descarga, conforme mencionamos na construção de C2). Recomendamos que inicialmente se possa simplesmente mostrar esses arcos, preferencialmente em um ambiente pouco iluminado. Em uma sala escura é onde poderemos apreciar mais nitidamente os arcos produzidos (Figura 16).

Um detalhe que pode ser visto na Figura 16 é que os arcos produzidos, apesar de se concentrarem no fio colocado no toroide, também se formam em outras regiões desse (ver detalhe à direita do toroide, na figura). Isso significa que, em nosso caso, o terminal de descarga C2 pode ser aumentado, com uma superfície de maior área, de modo a obter um arco ainda maior.

Com a Bobina em funcionamento, pode-se proceder na sequência a uma das demonstrações mais tradicionais: “acender” uma lâmpada fluorescente com as mãos, apenas aproximando-a da Bobina (Figura 17). Esse efeito ocorre devido ao campo elétrico produzido pela Bobina ao seu redor, suficiente para ionizar o gás no interior da lâmpada [13]. Pode-se inclusive aproximar uma das

<sup>19</sup> A depender do ambiente e brisas de ar, um odor característico também poderá ser sentido. Esse odor é resultado da ionização das moléculas do ar pelo arco voltaico, o que produz ozônio [3].



**Figura 16:** A Bobina em ação 1. Fonte: Os autores.

extremidades da lâmpada no terminal de descarga (C2), situação onde a ionização é máxima (Figura 18).

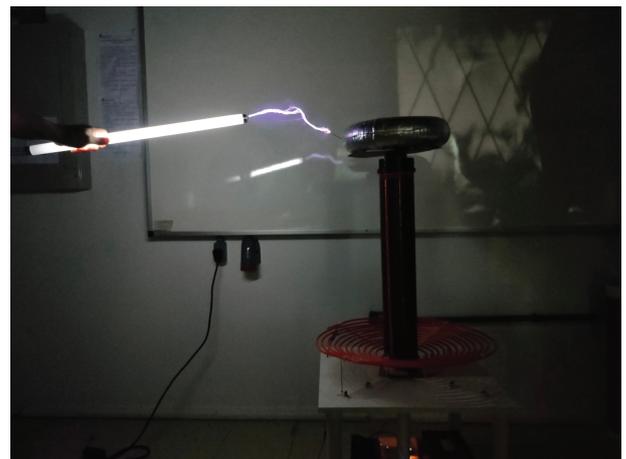
Nesse tipo de demonstração, não há problema algum em convidar alguém da plateia para segurar a lâmpada, porém sugerimos que a pessoa seja avisada de que sentirá um pequeno choque, totalmente inofensivo. Isso é mais para evitar que a pessoa largue a lâmpada de susto, o que não será interessante para a lâmpada. Também é importante avisar a pessoa para não segurar a lâmpada muito próximo à extremidade, onde estão os contatos metálicos, pois um arco pode saltar desse ponto até sua mão, e então o susto será maior. Segurar a lâmpada a uns 20 cm da extremidade é o suficiente.

É importante observar ainda que qualquer interação com o arco deve ser feita apenas em relação ao terminal de descarga. Recomendamos que não se aproxime a lâmpada ou qualquer outro objeto, conforme ilustrações seguintes, do enrolamento propriamente dito. Produzir arcos a partir do enrolamento de L2 produzirá falhas no isolamento do fio usado que, com o tempo, podem inutilizar a bobina.

O choque que se sente ao segurar a lâmpada é bem menor do que quando se coloca a mão diretamente no arco (situação aí sim mais problemática, como veremos). A corrente envolvida é tão pequena que torna a demonstração bastante inofensiva. Mas quem prefere não sentir nem mesmo um pequeno choque, ainda assim é possível ionizar o gás da lâmpada apenas a segurando



**Figura 17:** A Bobina em ação 2. Fonte: Os autores.

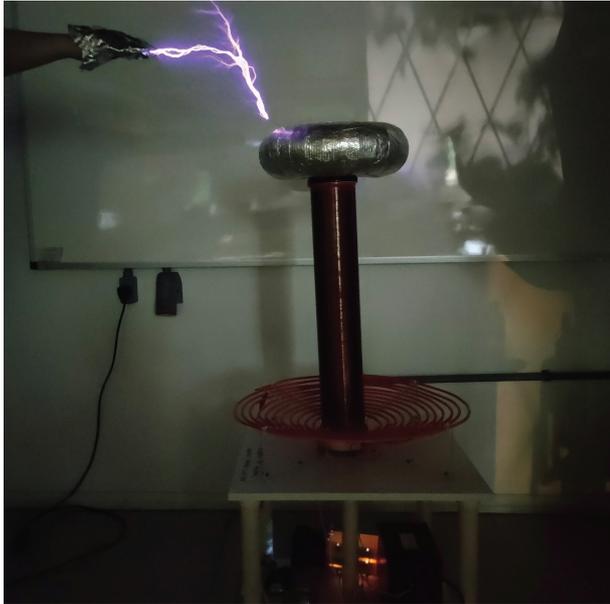


**Figura 18:** A Bobina em ação 3. Fonte: Os autores.

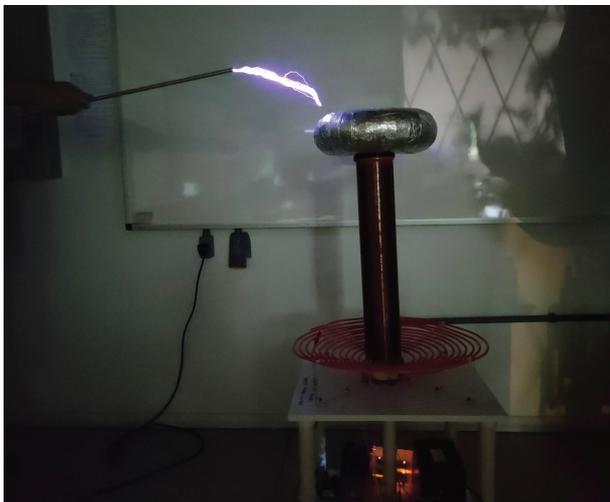
nas proximidades da Bobina, sem aproximar uma de suas extremidades (como mostrado na Figura 17).

Uma demonstração também bastante impactante consiste em providenciar uma luva metálica devidamente aterrada (com um fio que vá da luva até um terminal aterrado). De modo mais improvisado, pode-se mesmo construir uma luva apenas com papel alumínio moldado nas mãos. Uma vez com a luva aterrada, pode-se aproximá-la do toroide, formando um arco diretamente até ela (Figura 19). Diferentemente do que no caso da lâmpada, o demonstrador ou participante não sentirá nada nessa demonstração, ilustrando, portanto, um dos efeitos da “gaiola de Faraday”, onde toda a corrente é conduzida pela estrutura metálica (no caso a luva), isolando o que estiver em seu interior (no caso a mão do participante).

Para quem não tem problema em sentir um pequeno choque, pode-se mesmo usar a luva sem aterramento algum: como a corrente do arco (bem pequena, conforme discutiremos na sequência) irá se distribuir pela mão por uma área maior do que caso fosse atingida em um único ponto, o choque sentido será bastante reduzido.



**Figura 19:** A Bobina em ação 4. Fonte: Os autores.



**Figura 20:** A Bobina em ação 5. Fonte: Os autores.

O mesmo ocorre caso se aproxime um bastão de metal, conforme visto na Figura 20. A sensação de choque é bem pequena em ambas as situações<sup>20</sup> (se a luva ou a barra estiverem aterradas, nenhum choque será sentido).

O professor pode ainda construir uma pequena cabine de metal (devidamente aterrada), com madeira e grade

<sup>20</sup> De todo modo, não recomendamos que ninguém seja impelido a reproduzir essas situações de modo desavisado e, principalmente, enfatizamos que essa descrição se aplica somente para o caso de nosso projeto. Qualquer modificação que incorra em uma maior potência disponível (particularmente a substituição do transformador) produzirá outro contexto do qual não poderemos sugerir nada do que estamos descrevendo aqui. Precisamos enfatizar que, caso se adote transformadores de microondas no projeto, nenhuma dessas sugestões serão aplicáveis e o professor deverá considerar o sistema construído como um dispositivo a ser usado única e exclusivamente em demonstrações à distância.

simples, do tipo usado para se fazer viveiros (bastante comum em lojas de agropecuárias). Essa cabine ilustrará de modo ainda mais interessante o efeito da gaiola de Faraday, onde um participante pode sentar em seu interior (com a Bobina desligada até então), ligando-se a Bobina em seguida, com a gaiola devidamente fechada. Mesmo havendo a produção de um arco da Bobina até a gaiola (deve-se garantir que o arco seja produzido até uma de suas paredes metálicas), quem estiver em seu interior estará devidamente protegido de qualquer descarga, não sentindo nada mesmo se estiver em contato com a grade. Esse contexto é bem didático para se falar do efeito do chassi de um automóvel em uma tempestade, por exemplo.

Aumentando-se as possibilidades didáticas da Bobina, pode-se construir uma segunda bobina semelhante a L2, usando as recomendações anteriormente apresentadas. Uma vez que essa segunda bobina seja aterrada, pode-se induzir uma corrente a partir de L2, ilustrando, portanto, o fenômeno de indução. É claro que a própria Bobina de Tesla já é em si um transformador ressonante que se utiliza da indução, mas esse tipo de demonstração pode otimizar novos contextos didáticos.

Uma alternativa mais simples e imediata para visualizar os efeitos da indução é confeccionar uma pequena bobina simplesmente com algumas espiras de fio condutor encapado, ligando um LED em seus terminais (Figura 21). Ao se aproximar essas espiras da Bobina,



**Figura 21:** Bobina com fio e LED. Fonte: Os autores.



**Figura 22:** A Bobina em ação 6. Fonte: Os autores.

uma corrente será induzida, suficiente para acender o LED (Figura 22). O professor pode se utilizar dessa demonstração para falar sobre produção e recepção de ondas eletromagnéticas, sendo que a bobina com o LED ilustra também o funcionamento de uma antena.

Naturalmente o professor pode aventar diversas outras situações, a depender de seus objetivos. O simples funcionamento da Bobina já é bastante chamativo e didático para se falar sobre eletromagnetismo em geral, e pode representar um instrumento de grande valia para se ter em um laboratório de física.

## 5. Considerações Finais

Como reiteradamente sugerimos, deve-se estar atento nessas atividades de demonstração, do que recomendamos que a Bobina seja operada por alguém que cumpra a função de “operador do sistema”, ficando alerta a qualquer aproximação indevida da Bobina. Uma vez que o sistema esteja devidamente abrigado, uma pessoa teria que literalmente “meter as mãos” no circuito interno com o sistema em funcionamento para se estar em uma situação efetivamente perigosa, e por isso recomendamos o total isolamento do sistema. Apenas por razões de redundância de segurança é que repetimos que a Bobina deva ser operada de forma consciente desses riscos.

O professor, juntamente com possíveis alunos, bolsistas ou estagiários, deve estabelecer um protocolo básico de segurança com alguns itens a serem sempre atentados em qualquer atividade de demonstração, do que sugerimos os seguintes: **1.** Uma vez pronta para uso, porém ainda totalmente desligada, com a extensão fora da tomada, estabeleça um perímetro demarcado para a Bobina, com fitas ou marcas no chão, e instrua os participantes a observarem esses limites; **2.** Certificando-se que a chave interruptora esteja desligada, conecte o plugue na tomada; **3.** O operador do sistema deve ser a pessoa atenta a todos os passos e detalhes da demonstração, que esteja pronta para desligar a Bobina

ao menor sinal de inadequação, seja em relação ao próprio funcionamento do sistema ou em relação a algum participante; **4.** Somente se deve ligar a Bobina com o perímetro controlado, sem nenhum dispositivo eletrônico nas proximidades da Bobina, e após um aviso claro, com o demonstrador e participantes cientes disso; **5.** Por razões de redundância de segurança, prevenção de interferência e redução da poluição sonora que pode incomodar outras pessoas (algo que deve ser observado em uma feira de ciências, por exemplo), faça demonstrações curtas. Uma vez em funcionamento, é fácil constatar que basta um período em torno de 10 segundos para cada demonstração<sup>21</sup>; **6.** Deve-se ficar sempre atento ao banco de capacitores, que pode reter uma energia em níveis perigosos mesmo com a Bobina desligada, seguindo as recomendações comentadas na seção sobre esse elemento (mas é importante lembrar que, uma vez que o sistema esteja devidamente instalado em abrigo próprio, esse risco ficará restrito ao interior do sistema). Finalmente, além dessas sugestões, pensadas em um contexto de uso do equipamento pronto, precisamos repetir e enfatizar aqui um protocolo geral de segurança em relação à sua manutenção: *a cada vez que se aproxime do circuito para promover sua construção ou substituição de seus elementos, atente-se cuidadosamente para o que se está fazendo, garantindo-se que não há nada energizado antes de manusear qualquer elemento do circuito, particularmente o banco de capacitores. E, uma vez que o circuito esteja energizado, que não se aproxime e não se proceda nenhuma intervenção sobre esse.*

Recomendamos que o professor complementemente como achar melhor essas sugestões. Sobre os riscos com o arco voltaico em si, façamos algumas considerações e estimativas. Como alertamos anteriormente, não podemos simplesmente usar aqui a rigidez dielétrica do ar para estimar as tensões, porque o efeito de ionização do ar altera o comportamento do arco. Mas o que sabemos por certo é que esse efeito ocorre de modo a potencializar o arco com uma tensão menor do que seria necessária para se produzir o mesmo arco desprezando-se os efeitos da menor resistência do ar com a ionização. É assim que, para um arco em torno de 30 e 40 cm (caso de nossa Bobina), e desprezando os efeitos da ionização, precisaríamos de uma tensão em torno de 1 MV, observando a rigidez dielétrica de 30 kV/cm.

Mas o fenômeno de ionização faz com que um arco voltaico, uma vez iniciado, possa ser sustentado em distâncias maiores que a distância inicial de formação do arco. De modo essencialmente experimental, estimamos algo em torno de cinco vezes a distância inicial.<sup>22</sup> Assim, podemos dizer que as tensões em nossa Bobina estão na faixa das “poucas” centenas de milhares de volts.

<sup>21</sup> Isso também é importante para evitar a produção excessiva de ozônio, que pode ser prejudicial à saúde.

<sup>22</sup> Isso depende muito da umidade do ar, das correntes de ar, e fundamentalmente das frequências associadas, sendo tão somente uma estimativa para nosso sistema.

Usando a potência disponível de 450 W, e considerando uma situação ideal de transmissão da energia, poderíamos estimar uma corrente máxima, no arco, em torno de 2 mA. Mas temos muitas perdas no circuito, sendo as mais relevantes: **a)** a perda devido ao valor de C1 que, conforme discutido na seção correspondente, impositivamente leva o circuito a oscilar em uma frequência que não é propriamente a de ressonância, de modo a preservar o transformador. E **b)** a perda com a indução entre L1 e L2, também propositadamente colocada em uma situação de baixo acoplamento eletromagnético entre as bobinas, pelas razões apontadas na seção correspondente. Essas perdas certamente fazem com que a corrente final disponível no arco em si seja menor que os 2 mA inicialmente estimados. Observando apenas o valor de corrente, temos então um arco voltaico relativamente seguro,<sup>23</sup> sendo talvez interessante informarmos que já fomos por diversas vezes atingidos pelo arco, sem maiores consequências além do susto. Contudo, e obviamente, não recomendamos que se interaja diretamente com ele, e muito menos que se encoraje nenhum participante a fazê-lo, por redundância de segurança.

Mais perigoso que o choque elétrico em si, devido ao arco, são as possíveis queimaduras locais (e bastante superficiais) provocadas. Devido à frequência associada, que pode ser da ordem de dezenas de kHz, bem maior que a frequência da rede, temos um efeito que é menos o choque elétrico típico e mais a queimadura de alta frequência (em regiões diminutas da pele), uma vez que nosso sistema nervoso reage cada vez menos com o aumento da frequência associada [6]. Curiosamente, justamente pela sensação desagradável ao entrar em contato diretamente com o arco, é que também o possível efeito de queimadura fique bastante reduzido em função de quase instantaneamente nos afastarmos quando sentimos a descarga.<sup>24</sup>

Finalizando, apesar da relativa segurança em relação aos vistosos raios produzidos, lidar com a Bobina de Tesla, particularmente em sua montagem, pode ser perigoso. Mas trocar um chuveiro também o é. E, da mesma forma que trocar um chuveiro, o que é mais perigoso é o nosso desconhecimento da situação. Conhecendo-se o sistema o qual se está manuseando e respeitando os cuidados de segurança, pode-se contar seguramente com mais uma opção de demonstração que certamente pode contribuir com práticas didáticas valiosas para um maior incentivo à aprendizagem. Das diversas situações didáticas e demonstrações que já fizemos com inúmeros

instrumentos, sugerimos que a Bobina de Tesla está, juntamente com o telescópio, no topo dos instrumentos impactantes.

## Referências

- [1] M. Tilbury, *The Ultimate Tesla Coil Design* (McGraw-Hill, New York, 2007).
- [2] C. Prince, *Tesla Universe*, disponível em: <http://www.teslauniverse.com/>, acessado em 10/03/2021.
- [3] A.J. Chiquito e F. Lanciotti Jr, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **22**, 69 (2000).
- [4] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Fundamentos da Física* (LTC, Rio de Janeiro, 2014), v. 3, 10 ed.
- [5] J.M. Cvetic, em: *Sixth International Symposium Nikola Tesla* (Belgrade, 2006).
- [6] Shock and Awe: The Story of Electricity. Direção: Tim Usborne. Produção: Steve Crabtree. Companhia produtora: BBC Four, British Broadcasting Corporation (2011).
- [7] M. Barnkob, *Kaizer Power Electronics: Tesla Coils, High Voltage and Electronics*, disponível em: <https://kaizerpowerelectronics.dk/>, acessado em 12/03/2021.
- [8] <http://www.novacon.com.br/audiotabawg.htm>, acessado em 06/11/2021.
- [9] A.C.M. Queiroz, *Bobina de Tesla*, disponível em: <https://www.coe.ufrj.br/~acmq/tesla/BobinadeTesla.pdf>, acessado em 06/11/2021.
- [10] K. Wilson, *Tesla Coil Design, Construction and Operation Guide*, disponível em: <http://teslacoildesign.com/>, acessado em 06/11/2021.
- [11] P. Terren, *Tesla Downunder*, disponível em: <https://tesladownder.com>, acessado em 08/12/2021.
- [12] Mr. Tuck, *How Tesla Coils Work*, disponível em: <http://www.hvtesla.com/>, acessado em 12/02/2022.
- [13] G.M. EL-Aragi, *Journal of Physics & Astronomy* **5**, 123 (2017).
- [14] NIOSH, *The National Institute for Occupational Safety and Health. Worker deaths by electrocution*, disponível em: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/98-131/pdfs/98-131.pdf>, acessado em 12/12/2021.

<sup>23</sup> Precisaríamos de uma corrente cerca de dez vezes mais intensa para se ter algo efetivamente perigoso (ver, por exemplo, [14]). Obviamente isso pode se modificar para outras configurações do sistema.

<sup>24</sup> Quando estamos falando em queimaduras, no caso de nossa Bobina estamos nos referindo mais à sensação do que propriamente ao efeito em si. Em nossas experiências desavisadas a esse respeito, não percebemos nenhuma ação, ainda que localizada, no local onde fomos atingidos. Mas enfatizamos que tudo isso deverá ser revisto caso se opte por transformadores mais potentes.