

Bobina de Tesla

Antônio Carlos M. de Queiroz



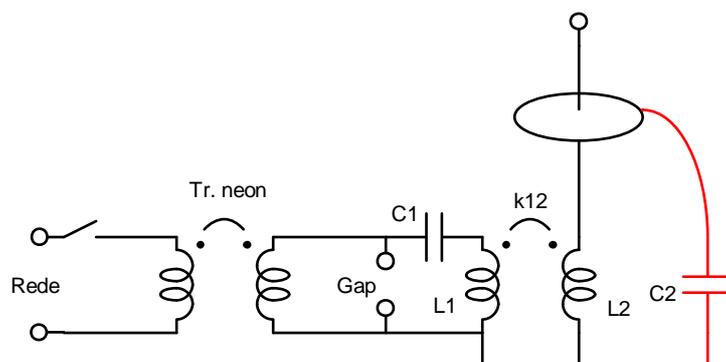
Vou descrever aqui uma bobina de Tesla que construí há algum tempo. Ela tem a característica não usual de ter sua sintonia feita pelo ajuste da capacitância do terminal, ao contrário do mais usual que é a sintonia pela variação da indutância da bobina primária. Foi tudo calculado precisamente, e o sistema funcionou como previsto. Tenho também algumas em inglês, que descrevem essa bobina e outras variações, a partir de:

www.coe.ufrj.br/~acmq/tesla/tefp.html.

O transformador de Tesla, ou bobina de Tesla, foi inventado por Nikola Tesla, no final do século XIX. Na forma mais usual, é formada por um transformador com núcleo de ar, com um capacitor primário carregado a uma tensão de alguns (5-30) kV se descarregando sobre a bobina primária através de um faiscador. A bobina primária possui poucas espiras de fio grosso (1-20), podendo ser cilíndrica, plana ou cônica, e é montada próxima à base da bobina secundária. O circuito secundário é formado por uma bobina secundária cilíndrica com por volta de 1000 espiras, montada centrada sobre a bobina primária, que ressona com sua própria capacitância

distribuída e com a capacitância de um terminal montado no topo da bobina. Estas capacitâncias distribuídas dependem apenas da geometria do sistema, e formam a capacitância secundária. A base da bobina secundária é ligada à terra, ou a um condutor com grande capacitância distribuída, que serve como "contrapeso". Os circuitos primário e secundário são ajustados para ressonar na mesma frequência, usualmente na faixa de 50 a 500 kHz. O coeficiente de acoplamento entre as bobinas é baixo, por volta de 0.1. O sistema opera de forma similar a dois pêndulos acoplados com massas diferentes, onde as oscilações a baixa tensão e alta corrente no circuito primário são gradualmente transferidas para o circuito secundário, onde aparecem como oscilações com baixa corrente e alta tensão. Com a sintonia dos dois circuitos na mesma frequência, e certos valores do coeficiente de acoplamento entre as bobinas, depois de alguns ciclos toda a energia o circuito primário é extraída, e a tensão de saída é máxima. Quando a energia oscila no circuito secundário, alimenta faíscas e corona de alta frequência. Bobinas de Tesla já foram usadas em transmissores de rádio primitivos, dispositivos de eletroterapia e geradores de alta tensão para aplicações em física de alta energia. A aplicação mais comum atualmente é para demonstrações sobre eletricidade em alta tensão, gerando faíscas elétricas que podem ter vários metros de comprimento.

Minha bobina segue o esquema abaixo: Um transformador de neon, de 5000 V, 30 mA, alimenta o circuito, sem circuitos ou filtros de proteção. Na saída do transformador é ligado um faiscador múltiplo, e em paralelo com ele o tanque primário formado pelo capacitor C_1 e o indutor L_1 . Acoplada magneticamente a L_1 , está a bobina secundária L_2 , que tem a base aterrada e um terminal na outra extremidade. A capacitância distribuída da bobina e a do terminal formam a capacitância secundária C_2 .



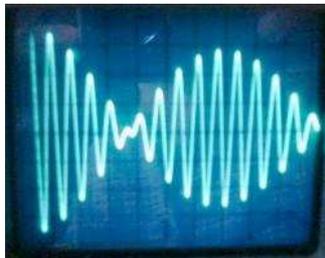
A operação é da seguinte forma: O transformador de neon carrega o capacitor primário quase que diretamente, através da bobina primária, de impedância desprezível na frequência da rede. Quando a tensão sobre o capacitor alcança a tensão de disparo do físcador, este entra em condução, passando a apresentar uma resistência efetiva baixa, de poucos Ohms, atuando como uma chave. Isso não causa danos ao transformador, pois esses transformadores têm propositalmente baixo coeficiente de acoplamento, e portanto uma alta indutância de saída, que limita a corrente de curto-circuito no valor especificado nos parâmetros do transformador (30 mA no caso). O capacitor primário então se descarrega sobre a bobina primária. A descarga é oscilatória, na frequência de ressonância do tanque LC primário, que no caso da minha bobina fica por volta de 300 kHz:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}}$$

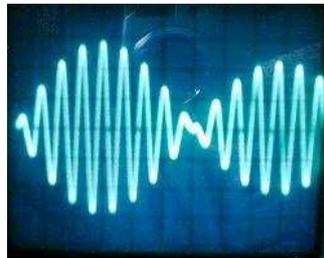
Como há um acoplamento com o circuito secundário, que também ressona nessa mesma frequência, há uma gradual transferência de energia entre os dois circuitos, com a tensão e a corrente primárias se reduzindo, enquanto a tensão e a corrente secundárias aumentam. Os circuitos primário e secundário são sintonizados para a mesma frequência de ressonância, separadamente, mas quando são acoplados passam a ressonar em duas frequências próximas, o que causa os batimentos. Os batimentos sempre existem, e são sempre completos no circuito secundário, mas a energia do circuito primário somente é completamente extraída se a sintonia estiver correta. Há ainda um requisito sobre o coeficiente de acoplamento k entre as bobinas, que somente transferem a energia completamente se k for da forma:

$$k = \frac{b^2 - a^2}{b^2 + a^2}$$

onde a e b são inteiros com diferença ímpar (mais usualmente inteiros sucessivos). Os dois inteiros dão também a razão $a:b$ entre as duas frequências de ressonância do sistema acoplado, que define o modo de operação. O maior possível vale $k = 0.6$, correspondendo ao modo 1:2 de operação. A energia é transferida em $b/2$ semiciclos. A figura abaixo corresponde ao modo 9:10, aproximadamente. O valor exato do coeficiente de acoplamento não é crítico em bobinas feitas para gerar faíscas, que operam em modos próximos deste, com transferência de energia em ~ 5 ciclos, e $k \approx 0.1$. É crítico apenas quando o modo é muito baixo, como 1:2 ($k = 0.6$) ou 2:3 ($k = 0.38$), mas esses modos tornam difícil a construção das bobinas com bom isolamento.



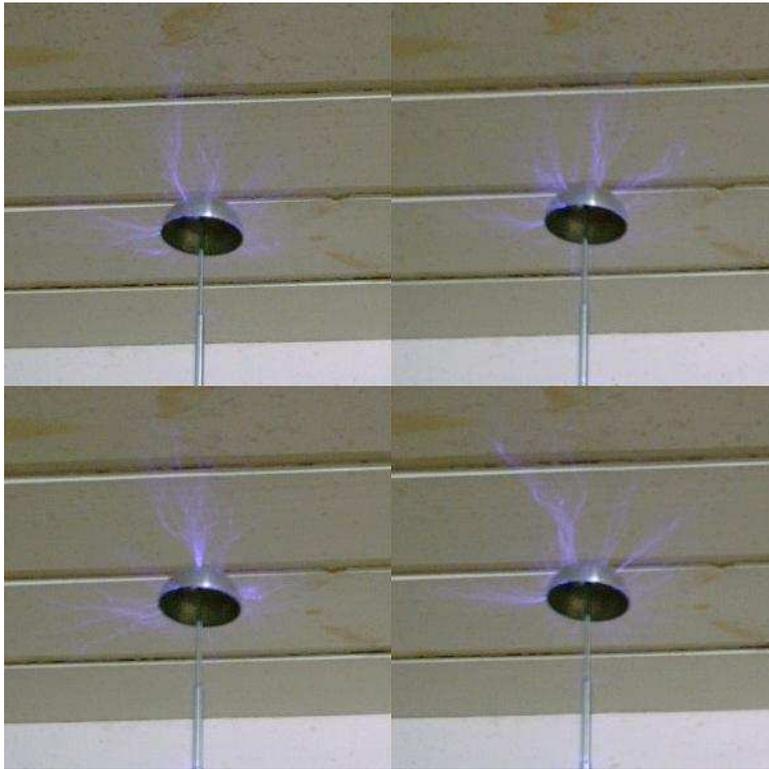
Tensão no primário



Tensão no secundário

Quando toda a energia do circuito primário é transferida para o circuito secundário, se o físcador continuar a conduzir, a energia retorna ao circuito primário em mais alguns ciclos. É comum, entretanto, que em um dos primeiros instantes em que não há energia no primário, o físcador deixe de conduzir e a energia fique presa no circuito secundário, até se dissipar. Como a energia inicial estava no capacitor primário, é, no máximo, a mesma energia acaba no capacitor secundário, igualando as energias nos dois capacitores obtém-se a máxima tensão possível de saída (ignorando perdas):

$$\frac{1}{2}C_1v_{1\max}^2 = \frac{1}{2}C_2v_{2\max}^2 \therefore v_{2\max} = v_{1\max} \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} = v_{1\max} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}$$



A segunda expressão decorre das ressonâncias na mesma frequência:

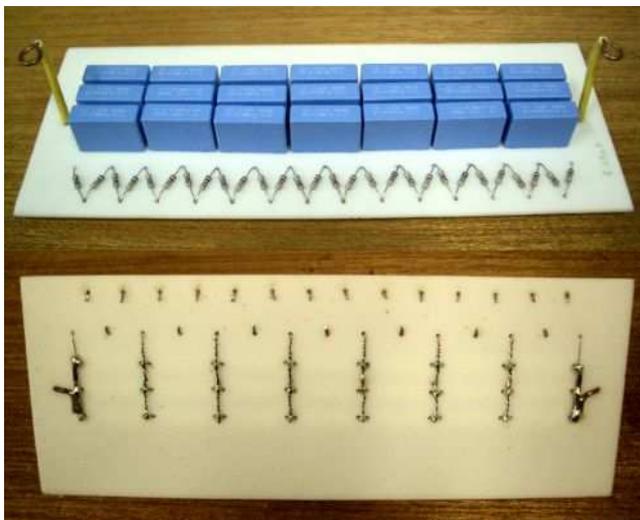
$$L_1 C_1 = L_2 C_2$$

A alta tensão em alta frequência no secundário pode gerar um campo elétrico alto o suficiente para ionizar o ar (30 kV/cm), e uma vez que a ionização se inicie, ela se propaga na forma de faíscas elétricas (se existir algum condutor próximo) ou corona. A corona de alta frequência se desenvolve em “streamers”, que parecem raios terminando no ar. O resultado depende da capacitância do terminal, que deve ser capaz de armazenar alguma energia para alimentar os “streamers”, e do raio de curvatura das superfícies, que controla com que tensão ocorre a ionização. Quando mais tensão e mais energia armazenada, mais impressionante é o efeito. A energia disponível é o fator mais importante, e ela depende da capacitância do

terminal. A energia que fica armazenada na capacitância distribuída da bobina secundária não é disponível imediatamente, e pouco contribui para os “streamers”.



O faiscador (spark gap) é formado por 6 tubos de latão de 9 mm, presos com parafusos a uma base de acrílico. Os contatos externos são ligados aos tubos das extremidades por tiras de folha de cobre. Os tubos podem ser girados, permitindo ajuste da tensão de disparo do faiscador, que é normalmente de ~5000 V. A placa com os tubos é suportada por isoladores de nylon sobre uma base de madeira. Um ventilador alimentado pela rede sopra sobre o faiscador, mantendo-o frio.



O capacitor primário foi construído com a associação de 21 capacitores de 12 nF, 1600 V, em 7 grupos de 3 em paralelo, em série, que teria idealmente o valor de $15 \times 3 / 7 = 5.14$ nF. Em paralelo com cada grupo de 3 capacitores, foram ligados 4 resistores de 10 MOhms em série, para evitar acúmulo irregular de carga e propiciar uma descarga segura. O conjunto foi montado sobre uma placa de acrílico perfurada, com as conexões feitas usando os próprios terminais dos componentes, torcidos juntos e soldados por baixo da placa, procurando-se não deixar pontas expostas para evitar corona. A placa foi então colocada dentro de um tubo de PVC com o diâmetro interno igual à largura da placa, onde são montados os terminais para conexão externa (veja as fotos do sistema completo). Resultou um

capacitor de 5.07 nF (medido), capaz de suportar 11200 V (inicialmente o valor era de 5.09 nF, mas o valor se estabilizou em 5.07 nF após algum uso). A montagem é sólida e segura.

Note-se que um transformador especificado como gerando a tensão V_s e a corrente I_s , operando na frequência da rede f_s , possui uma indutância de saída:

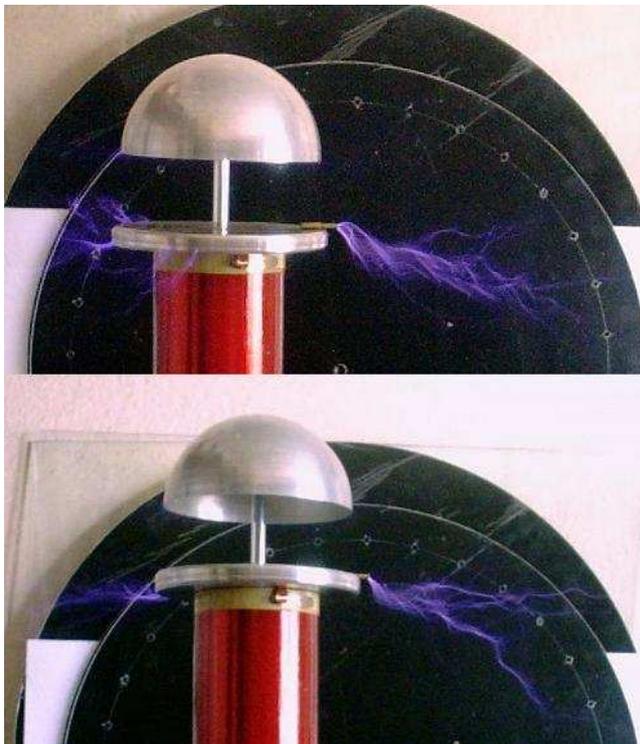
$$L_s = \frac{V_s}{2\pi f_s I_s}$$

e que o capacitor que ressona com essa indutância na frequência f_s vale:

$$C_s = \frac{1}{4\pi^2 L_s f_s^2} = \frac{I_s}{2\pi f_s V_s}$$

O maior capacitor que o transformador pode alimentar tem por volta desse valor, que também permite extrair bem mais energia do transformador de neon do que suas especificações normais permitem (embora isso possa danificar o transformador rapidamente). No caso, o capacitor ressonante, com $V_s = 5000$ V e $I_s = 30$ mA, seria de 15.9 nF. Pode-se ainda calcular qual seria o maior capacitor que o transformador poderia alimentar, ainda mantendo sua tensão de saída nominal, movendo a ressonância para uma frequência abaixo da frequência da rede. O resultado é o dobro desse valor. Minha bobina poderia usar bem mais capacitância primária, portanto.

A bobina secundária foi enrolada sobre um tubo de PVC de 3.5", usando fio #32 tirado de 5 bobinas de relés, com as emendas soldadas cuidadosamente, colocando os fios com 5 mm de superposição e soldando sem excesso de solda e sem deixar pontas. As superposições foram deixadas para fora, para não afetar o espaçamento entre as espiras. O enrolamento foi feito em um torno, girando lentamente (ou manualmente), com o tubo montado entre duas tampas de madeira encaixadas nas extremidades dele. Nas extremidades, foram coladas placas de latão onde as extremidades do fio foram soldadas. A bobina foi então envernizada com várias camadas de verniz de poliuretano, por fora, e com algumas mãos por dentro também. O tubo foi bem seco com calor antes da primeira mão. O verniz contribui para a isolamento, mas sua função principal é manter o fio no lugar e proteger contra arranhões. A bobina terminou com $N = 1152$ espiras em $l = 32$ cm, com raio das espiras $r = 4.4$ cm, resultando em 28.2 mH, pela fórmula de Wheeler para bobinas solenoidais (distâncias em metros):



$$L = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\pi r^2 N^2}{(l + 0.9r)}$$

O terminal superior foi feito com um disco de alumínio com bordas arredondadas, feito com duas peças de folha de alumínio de 6 mm moldadas pela técnica de repuxo (“metal spinning”). Poderia ser feito com duas pequenas fôrmas de pizza, unidas uma contra a outra. Sob o terminal existe um disco de acrílico que se encaixa na bobina secundária, e uma lingüeta de cobre que fica pressionada contra o terminal superior da bobina. No centro do disco foi fixada uma antena telescópica, que permite ajuste do valor da capacitância secundária com a variação de seu comprimento. Há um espaçador de madeira entre as duas metades do disco. Tudo é fixado com um parafuso inserido por baixo. O disco é também uma plataforma conveniente para experimentos, como apoiar uma vareta metálica para forçar “streamers” em uma direção. É possível também colocar objetos sobre o topo da antena, como uma meia-esfera de alumínio

grande, o que força os “streamers” a saírem das bordas do disco, em mais alta tensão. A capacitância distribuída da bobina secundária pode ser calculada pela fórmula de Medhurst, onde r é o raio e l o comprimento, em metros.

$$C_{L2} = \left(11.26l + 16r + 76.4\sqrt{\frac{r^3}{l}} \right) \times 10^{-12}$$

Com as dimensões da bobina, resultam 5.55 pF. O terminal adiciona mais 5 pF, completando a capacitância secundária, que fica ajustável em torno de 10.55 pF. A indutância da bobina primária então foi calculada como:

$$L_1 = \frac{L_2 C_2}{C_1} = \frac{28.2 \times 10^{-3} \times 10.55 \times 10^{-12}}{5.07 \times 10^{-9}} = 58.7 \mu H$$



A bobina primária foi feita plana, com $N = 14.7$ voltas de fio sólido isolado #18 (1 mm), com raio interno $r_1 = 7$ cm e raio externo $r_2 = 12.5$ cm (distâncias até o centro do fio). Foi construída “costurando” o fio sobre uma placa de acrílico circular com fio de silicone. Foi projetada para ter uma indutância de $58.7 \mu H$, de acordo com a fórmula de Wheeler para bobinas planas (distâncias em metros):

$$L = \frac{100 \times 10^{-6}}{2.54} \frac{(r_1 + r_2)^2 N^2}{(60r_2 - 28r_1)}$$

Ela é montada sobre um bloco de isopor circular, e no seu centro é montada a base da bobina secundária.

O coeficiente de acoplamento entre as bobinas foi projetado para ser de 0.105, para operação no modo 9:10, com transferência de energia em 5

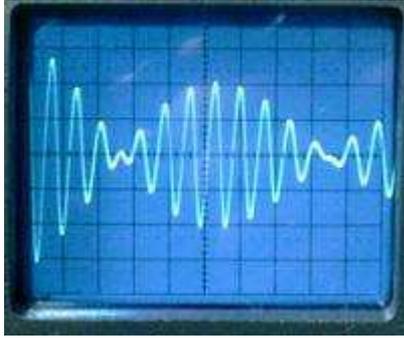
ciclos de 291.79 kHz.



Para suportar a bobina secundária, foi feita uma base da madeira com um terminal que fica pressionado através de uma arruela contra o terminal inferior, e com duas bolinhas plásticas pressionando pelo outro lado. A bobina fica encaixada firmemente nessa base, mas pode ser facilmente colocada ou removida com uma torção.

Todas as conexões são feitas com fios flexíveis #12 isolados, com terminais de olhal soldados, com cuidado para que os fios não encostem onde não devem, pois sua isolação não oferece proteção suficiente para os 5000 V do transformador de neon.

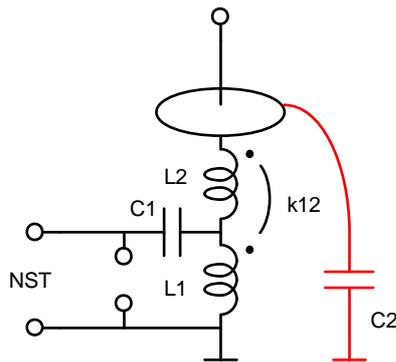
A conexão de terra foi feita pelo método do “contrapeso”. Já usei um balde de metal, uma placa grande de alumínio, e até uma cadeira de aço. Basta qualquer condutor com uma capacitância distribuída bem maior que a do terminal da bobina secundária. O aterramento do transformador de neon e do circuito primário (o transformador que usei não tem terminal de terra) foi feito no contrapeso também.



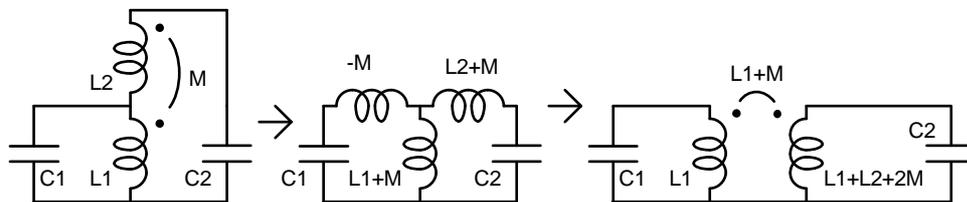
O circuito foi ajustado em baixa potência, aplicando-se um sinal em onda quadrada de baixa frequência (1 kHz) e baixa impedância (< 1 Ohm) em série com o circuito primário (basta ligar um resistor de 1 Ohm em paralelo com a saída de um gerador de sinais de 50 Ohms). Com isto, a cada transição da onda quadrada se observa o transiente de transferência de energia, e a sintonia correta é obtida quando a tensão sobre o indutor ou o capacitor primários mostra zeros periódicos completos. É simples ajustar o comprimento da antena até obter a sintonia correta. A capacitância C_2 deve ser ajustada para um pouco menos que o valor correto, pois a presença de “streamers” acoplados ao terminal aumenta a capacitância deste.

O resultado obtido mostrou que L_1 ficou um pouco maior que o projetado (a fiação externa não foi considerada no projeto, e aumenta a indutância primária em aproximadamente $1 \mu\text{H}$ por metro de fiação, incluindo o comprimento de C_1), e que o coeficiente de acoplamento ficou um pouco maior, em 0.12. Isto é consequência da corrente não uniforme em L_2 , que diminui gradualmente com a altura. O acoplamento com a parte inferior da bobina L_2 é então mais importante. O circuito L_1 - C_1 ressona em 289 kHz, e o sistema completo ajustado em 270 kHz e 305 kHz. O modo de operação obtido fica então entre 7:8 e 8:9. É simples ajustar o modo alterando a altura da bobina primária. Levantando menos de 1 cm a bobina secundária acima de sua posição normal, o modo 9:10 pode ser obtido também. As perdas observadas correspondem a uma resistência efetiva de 3 Ohms, concentrada no primário.

Uma substancial melhoria de desempenho foi obtida com a conexão direta entre as duas bobinas, formando a “bobina de Oudin” (proposta em 1892):



Esta conexão aumenta o coeficiente de acoplamento efetivo para o modo 6:7, reduzindo o tempo da transferência de energia, o que reduz perdas. O efeito da conexão pode ser analisado observando-se os equivalentes abaixo:



Resulta um transformador equivalente com os parâmetros:

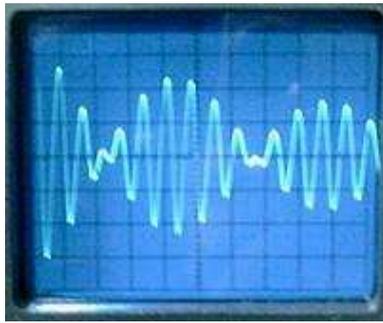
$$L_1' = L_1$$

$$L_2' = L_1 + L_2 + 2M$$

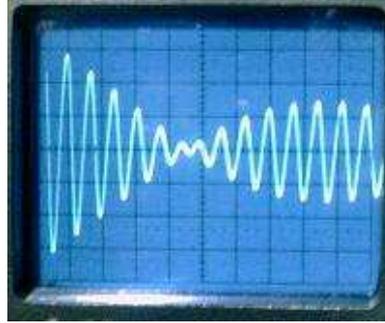
$$M' = L_1 + M$$

$$k_{12}' = \frac{L_1 + M}{\sqrt{L_1(L_1 + L_2 + 2M)}}$$

As indutâncias são quase as mesmas, mas o coeficiente de acoplamento aumenta para 0.16, ou é reduzido para 0.075 com a conexão de L_1 invertida, modo próximo de 12:13.

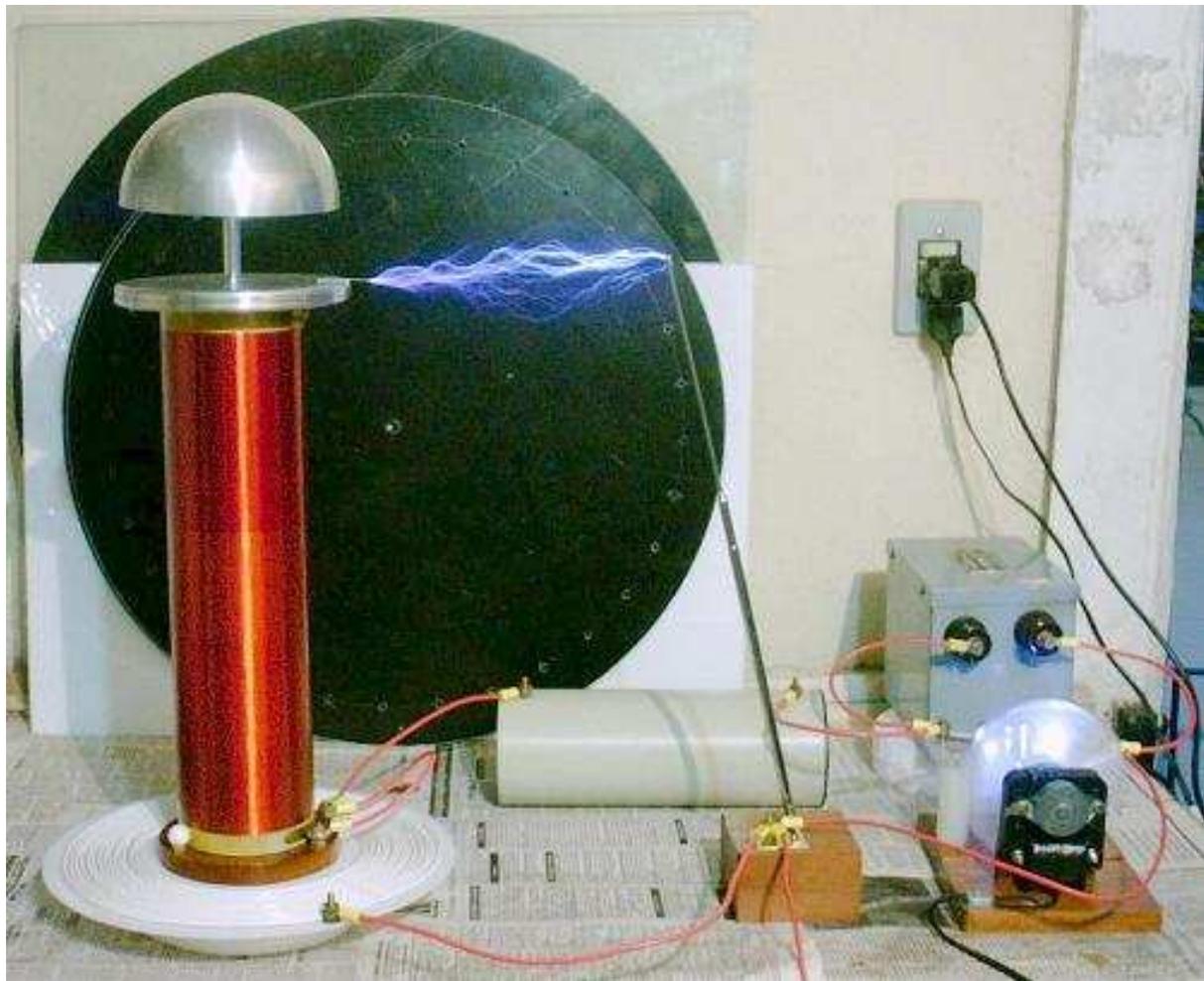


$k = 0.16$



$k = 0.075$

Operando em alta potência, a bobina gerou “streamers” e arcos com até 25 cm de comprimento. Uma outra antena, ligada à terra do circuito (o contrapeso), foi usada como alvo para arcos. Uma vareta de latão colocada sobre o terminal aumenta um pouco o comprimento dos arcos.



(Os discos vistos atrás nas fotos não têm relação com a bobina.)

Programas que podem projetar e simular o comportamento destes sistemas podem ser encontrados em:

<http://www.coe.ufrj.br/~acmq/programs>

Grande quantidade de material sobre bobinas de Tesla pode ser encontrada nos arquivos da Lista de Tesla:

<http://www.pupman.com>

Para algo mais avançado, veja os artigos sobre “multiple resonance networks”, em:

<http://www.coe.ufrj.br/~acmq/papers>

Advertência:

Este dispositivo é alimentado por uma fonte que tem voltagem e corrente suficientes para dar um choque fatal. O transformador de neon e todo o circuito primário não devem ser tocados em nenhuma circunstância com o sistema energizado. Os arcos de alta voltagem também não são seguros para se tocar. Embora a corrente de alta frequência não cause forte sensação de choque, devido à alta frequência, ela ainda é intensa o suficiente para causar queimaduras, externas e internas.

Criado: 1/8/2006

Última alteração: 24/8/2006

Antonio Carlos M. De Queiroz – acmq@ieee.org