

# Comentários sobre bobinas de Tesla

Por Antônio Carlos M. de Queiroz

Este documento complementa um outro que escrevi sobre bobinas de Tesla, descrevendo alguns aspectos sobre o funcionamento de bobinas de Tesla.

O documento principal está em: <http://www.coe.ufrj.br/~acmq/tesla/BobinadeTesla.pdf>

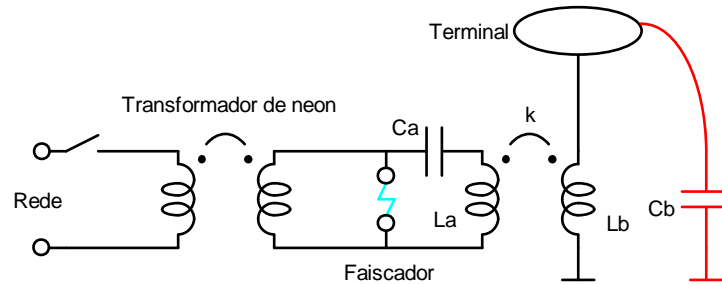
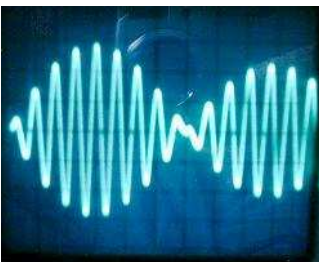
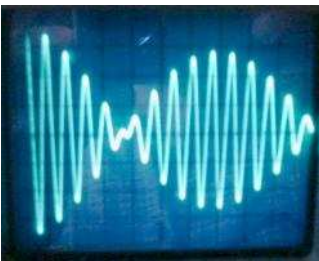


Diagrama esquemático de uma bobina de Tesla clássica. Um transformador com corrente limitada (transformador com baixo coeficiente de acoplamento, como um transformador de lâmpadas néon) carrega o capacitor primário  $C_a$  a uma média alta tensão, através da bobina primária, de baixa indutância,  $L_a$ . Quando a tensão atinge a tensão de disparo do faiscador, uns poucos kV, este se comporta como uma baixa resistência, e o capacitor primário se descarrega sobre a bobina primária produzindo oscilações de alta frequência. O ressonador secundário formado pela bobina secundária  $L_b$ , de alta indutância, acoplada à bobina primária com o coeficiente de acoplamento  $k$ , e pelo capacitor secundário distribuído  $C_b$ , ressona na mesma frequência, absorvendo energia do circuito primário. Com o sistema propriamente ajustado, essencialmente basta ter  $L_a C_a = L_b C_b$ , a maior parte da energia inicialmente armazenada no circuito primário é transferida para o circuito secundário, de muito maior nível de impedância, produzindo oscilações de muito maior tensão.

## Sintonia



O funcionamento da bobina de Tesla depende de os circuitos primário e secundário estarem corretamente sintonizados para oscilarem naturalmente na mesma frequência. Sem isto a energia no circuito primário não é transferida com eficiência para o circuito secundário.

Uma forma de ver a bobina de Tesla é considerar que o circuito primário forma um oscilador senoidal, após o disparo do faiscador, e que o sinal gerado excita o ressonador secundário. Um circuito ressonante sem perdas excitado em sua frequência de ressonância gera tensões e correntes que crescem numa rampa sem limite (com perdas, os sinais crescem até um limite dado pelo fator de qualidade do ressonador). Mas na bobina de Tesla, a quantidade de energia no circuito primário é limitada, e à medida em que essa energia é transferida para o ressonador secundário, a amplitude da oscilação no primário diminui. O resultado são formas de onda como as mostradas ao lado, para tensões sobre as bobinas primária (acima) e secundária (abaixo). A energia é primeiramente inteiramente transferida do circuito primário para o circuito secundário, e depois retorna e continua oscilado entre os dois circuitos periodicamente, supondo que o faiscador continue conduzindo. Pode-se notar também um decaimento exponencial causado pelas perdas no circuito.

A tensão (e a corrente) das oscilações no primário decaem com uma envoltória idealmente (caso sem perdas) cossenoidal, enquanto os sinais no secundário crescem de forma idealmente senoidal. Devido à grande diferença de nível de impedância entre os circuitos primário e secundário, a tensão alcançada no pico da envoltória no circuito secundário é muito maior que a tensão inicial que existia no capacitor primário. A relação entre a tensão máxima no secundário e a tensão inicial no primário é dada por conservação de energia:

$$\frac{1}{2} C_a V_a^2 = \frac{1}{2} C_b V_b^2 \therefore \frac{V_b}{V_a} = \sqrt{\frac{C_a}{C_b}}$$

Na relação,  $C_a$  é a capacitância primária,  $C_b$  a capacitância (distribuída) secundária,  $V_a$  é a tensão inicial em  $C_a$ , e  $V_b$  a tensão de pico no secundário. Como os dois circuitos ressonam na mesma frequência, o ganho de tensão pode ser também expresso em função das indutâncias  $L_a$  e  $L_b$ , primária e secundária:

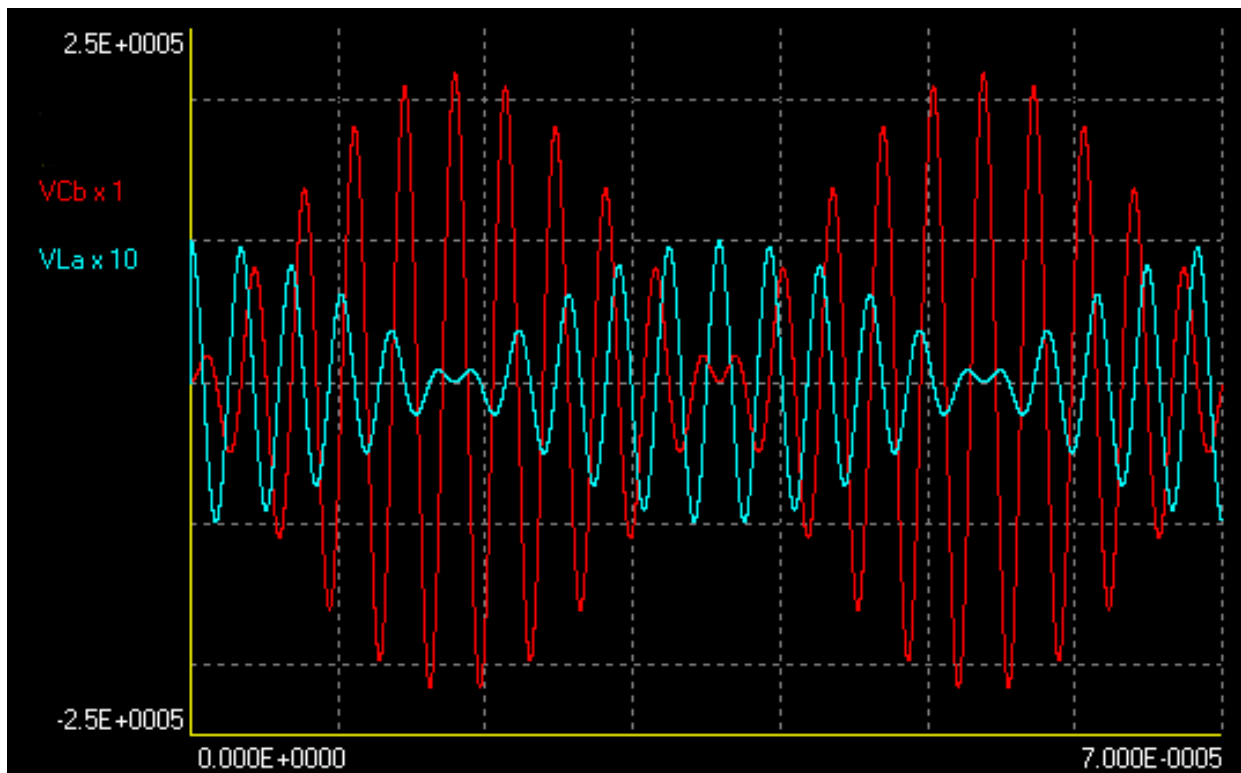
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_a C_a}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_b C_b}} \cdot \frac{V_b}{V_a} = \sqrt{\frac{C_a}{C_b}} = \sqrt{\frac{L_b}{L_a}}$$

Note que esta é também a relação que seria obtida com um transformador ideal. Embora o transformador de Tesla tenha baixo coeficiente de acoplamento, a dupla sintonia aproxima seu ganho de tensão do máximo possível. Estas relações assumem perdas desprezíveis. São limites máximos, que na prática não são atingidos. Mas não é difícil alcançar 90% do limite em uma construção prática.

As figuras a seguir são de simulações considerando inicialmente os valores:

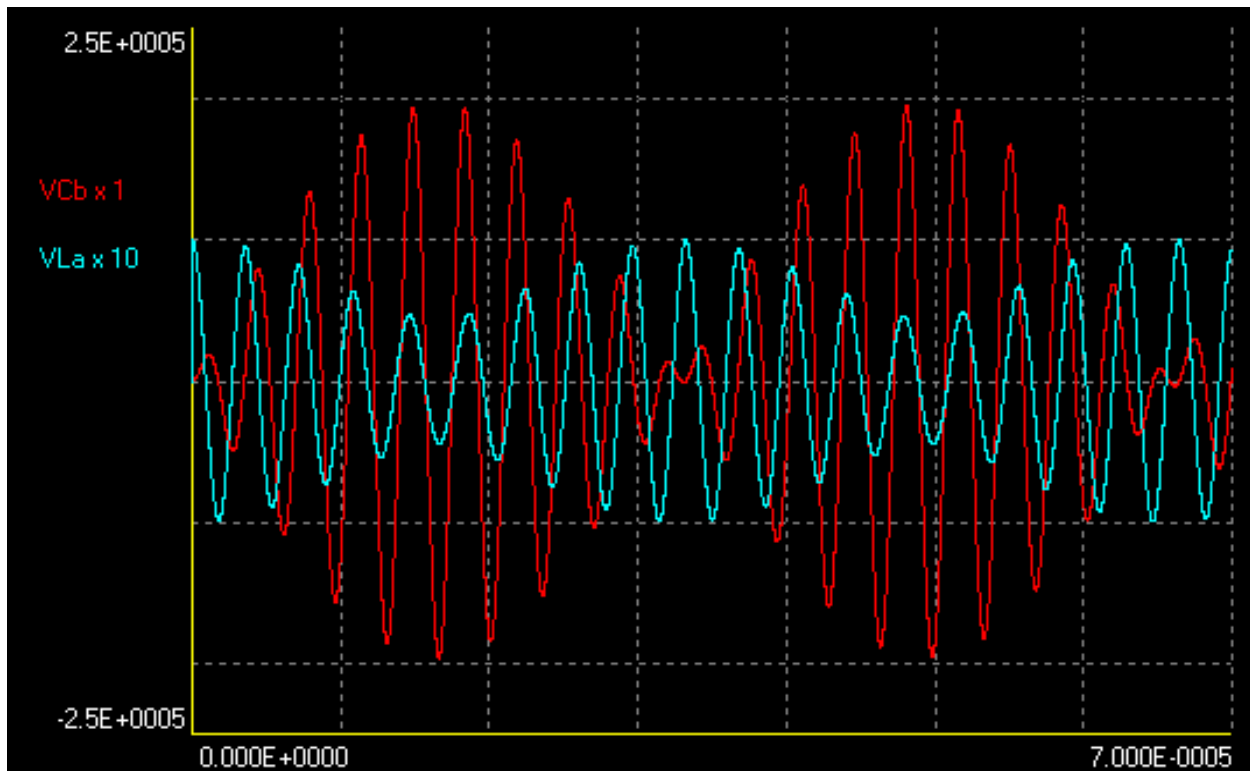
$$\begin{aligned} C_a &= 5.07 \text{ nF} \\ L_b &= 28.2 \text{ mH} \\ C_b &= 10.6 \text{ pF} \\ L_a &= 58.7 \text{ }\mu\text{H} \\ k &= 0.0950 \end{aligned}$$

São os valores de uma bobina que construí, com o coeficiente de acoplamento ajustado para transferência completa de energia em 5.5 ciclos. A tensão inicial no capacitor primário nas simulações é de 10 kV, resultando num máximo de tensão no secundário é de 219 kV.

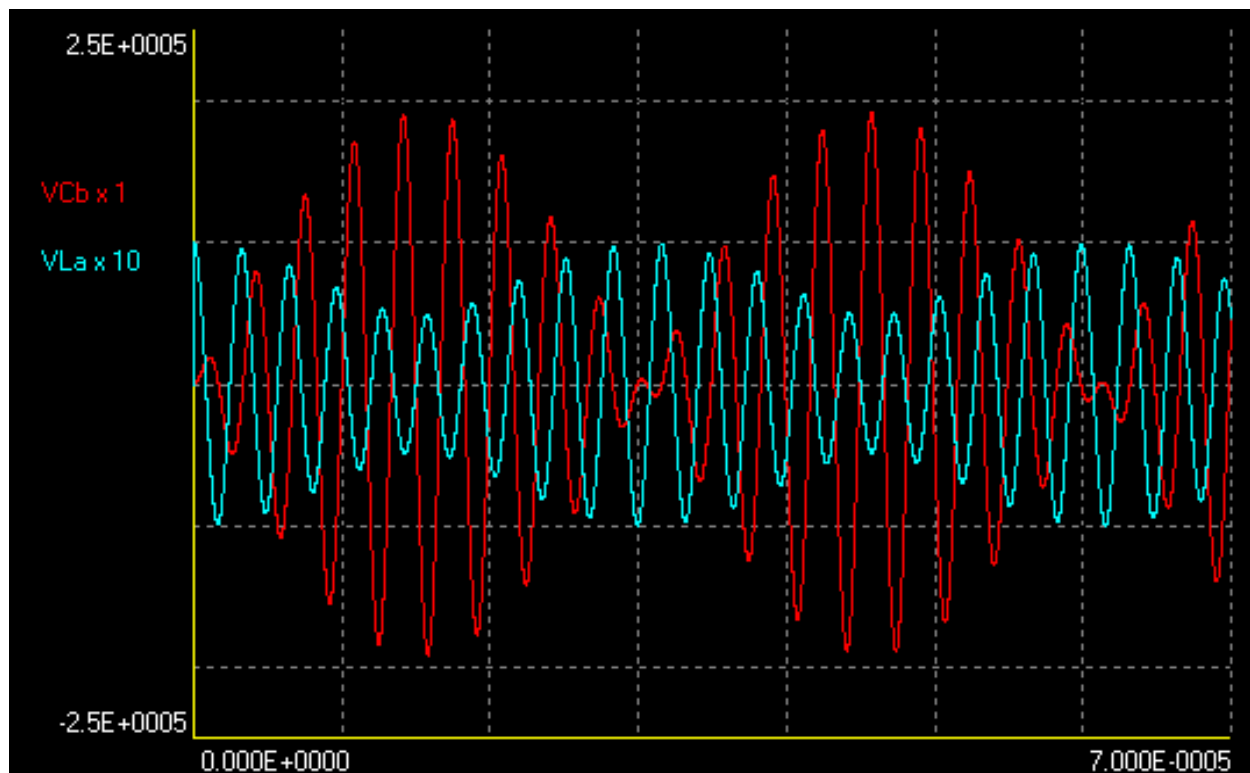


Acima, a situação ideal. Note-se os “notches”, ou mínimos nos batimentos completos na tensão vista sobre a bobina primária e o pico máximo de tensão secundária coincidindo com tensão zero no primário, com inclinação zero em ambas as curvas, indicando que não há corrente nas bobinas naquele instante. Toda a energia inicial é transferida para o capacitor distribuído secundário. A simulação considera que o faiscador está sempre ligado. Na prática ele se desligaria em um dos instantes em que a energia no circuito primário é mínima, usualmente um dos três primeiros, e daí em diante a energia ficaria apenas no circuito secundário (ver adiante).

Note-se que este modelamento do sistema como um transformador e dois capacitores discretos é aproximado. O ressonador secundário é distribuído, e apresenta outras ressonâncias acima da principal, que é a única considerada na análise. Este modelamento, entretanto, se mostra correto o bastante para uso prático, sendo mais correto quando o terminal da bobina secundária tem bem maior capacitância do que a capacitância distribuída da bobina secundária, o que abaixa a frequência da ressonância principal, mas afeta pouco as demais.



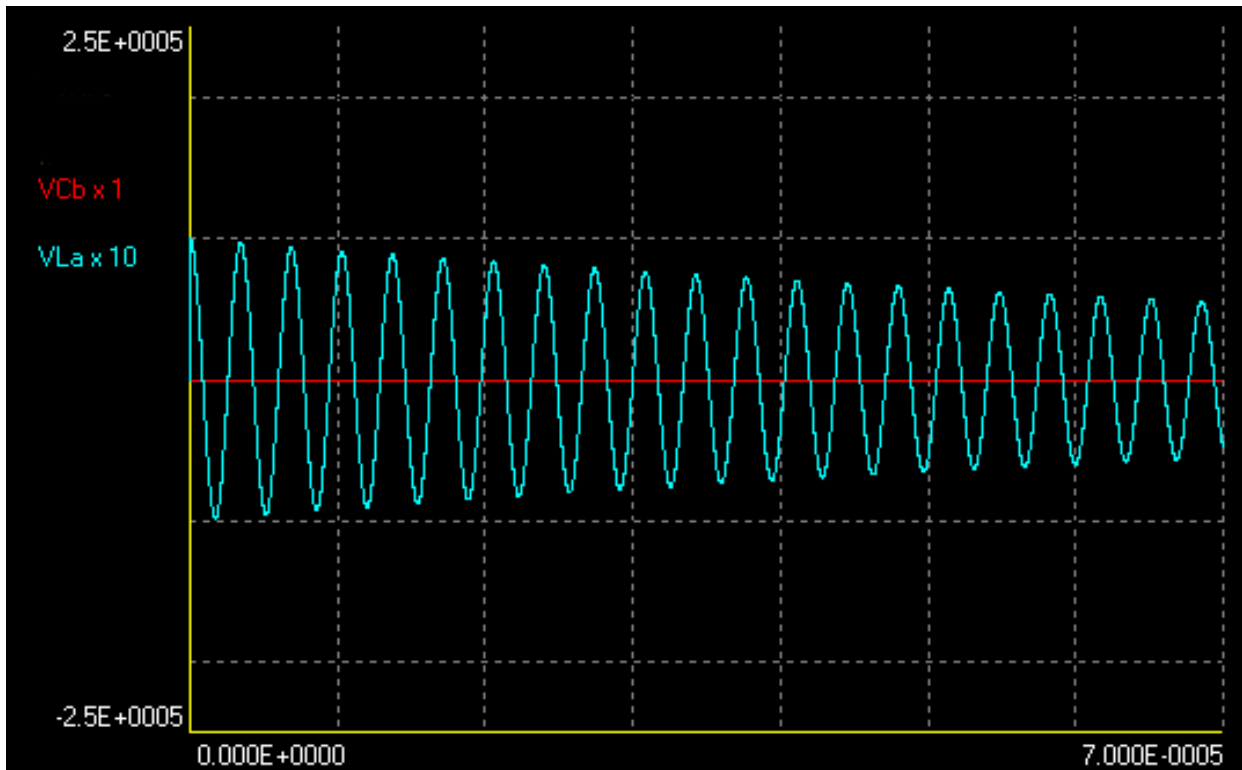
Se a indutância primária é um pouco maior que o ideal (110% do ideal), desfazendo a sintonia, os batimentos no primário são incompletos e menos energia é transferida. Batimentos completos continuam sempre a aparecer no secundário, mas a tensão máxima é menor.



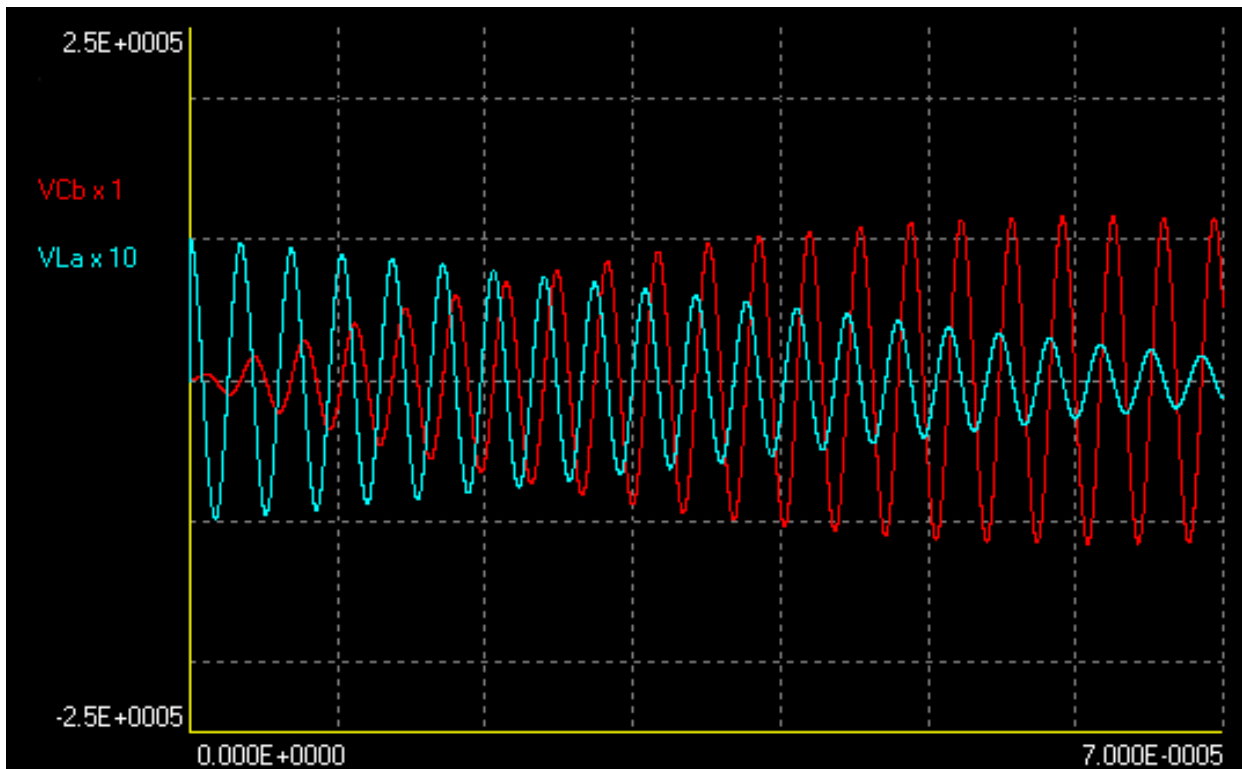
Algo similar acontece se a indutância primária é menor (90%) que a ideal. Estes sinais podem facilmente ser observados excitando-se o sistema com uma onda quadrada (de um gerador de sinais passado por um amplificador adequado) de baixa impedância e baixa frequência aplicada sobre o fuscador. Cada transição da onda quadrada gera um transiente com estas formas de onda.

## Acoplamento

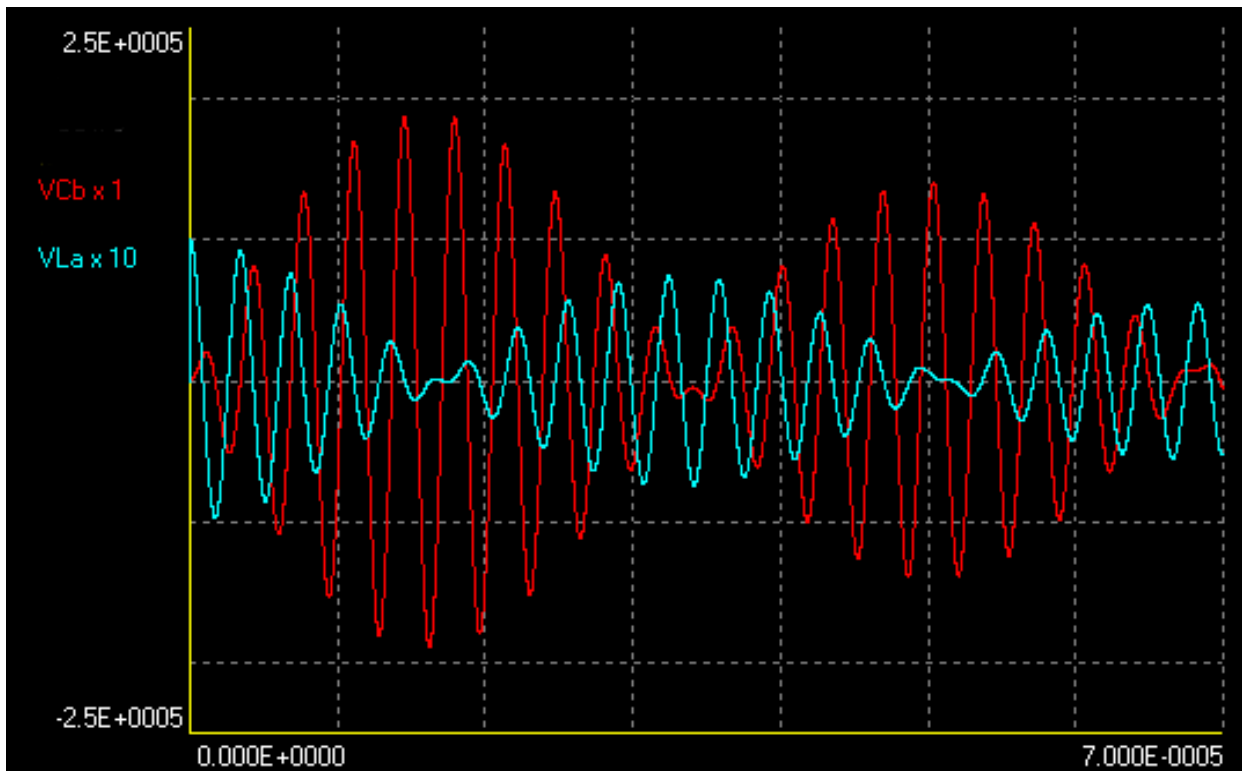
Nas próximas simulações, o efeito do coeficiente de acoplamento é examinado. Perdas são também consideradas.  $1 \Omega$  em série com o indutor primário e  $500 \Omega$  em série com o indutor secundário. As perdas representam a resistência do fuscador (que é na verdade não linear), resistências de fiação, incluindo efeito pelicular, e outras perdas, como perdas nos dielétricos do capacitor primário e da forma do secundário, e irradiação.



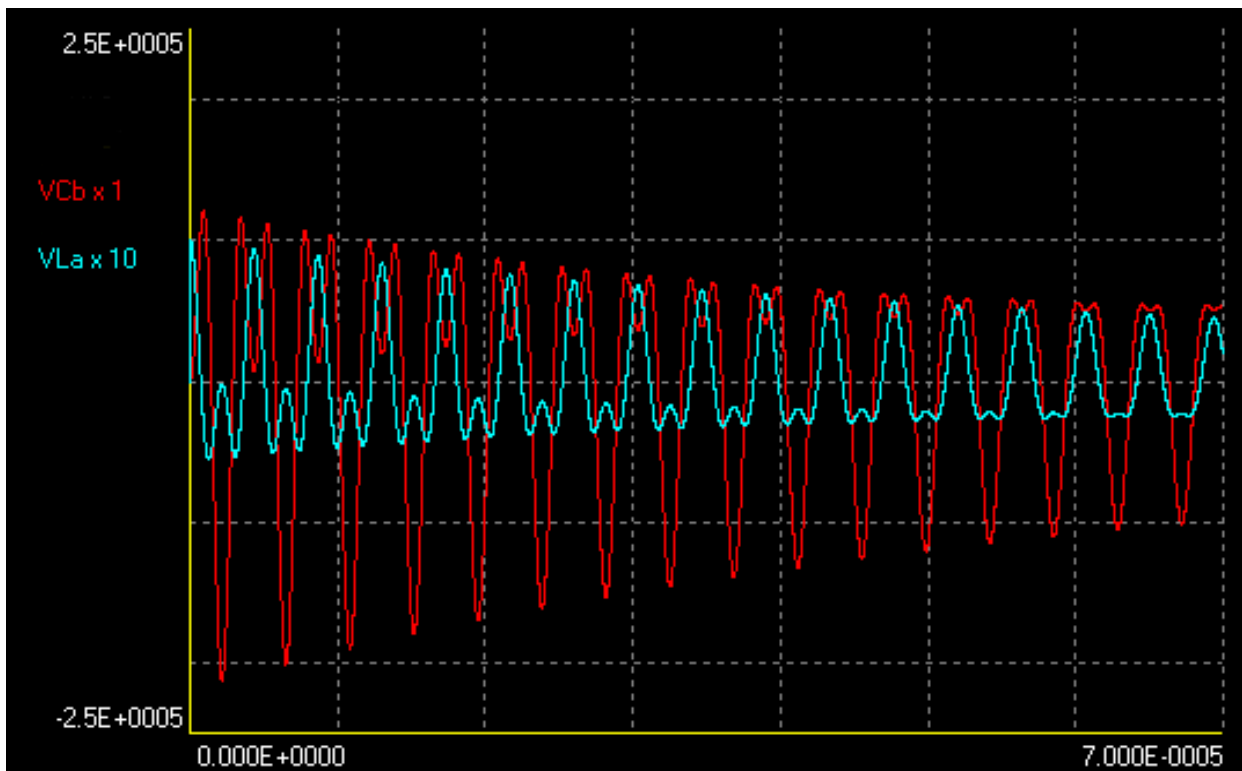
Se o circuito secundário é removido ( $k = 0$ ), as oscilações primárias não tem batimentos e decaem na taxa determinada pelo fator de qualidade do circuito primário.



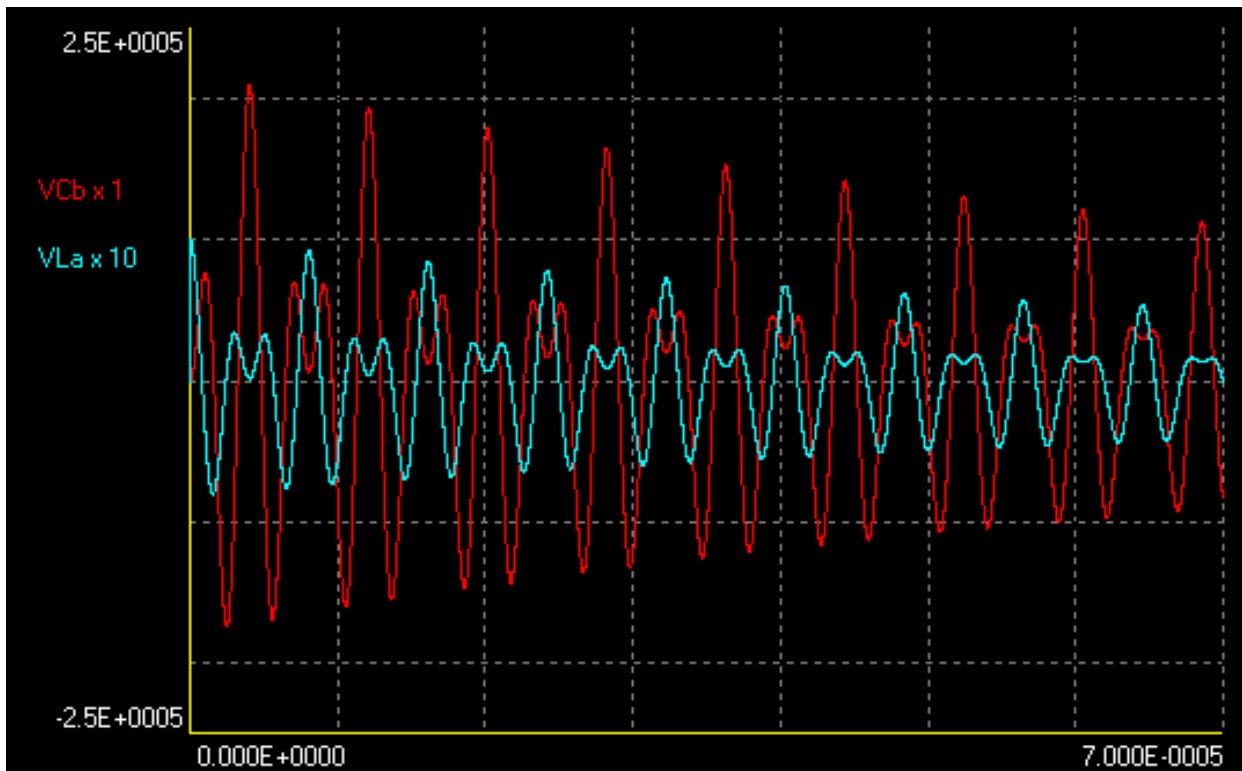
Se o circuito secundário é aproximado do primário ( $k = 0.02$ ), se observa gradual transferência de energia, com longos batimentos. Muita energia é perdida nos muitos ciclos de cada batimento.



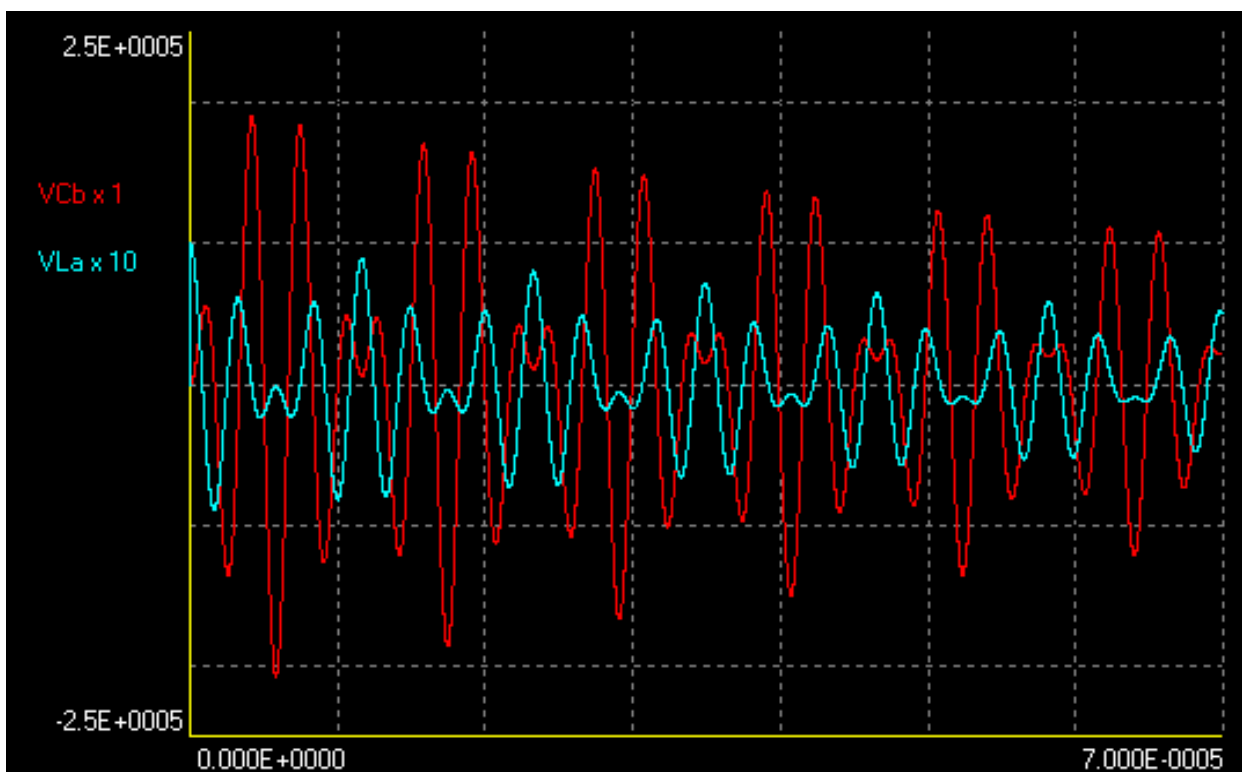
Com  $k = 0.1$  se tem formas de onda próximas do ideal. Mas note-se que a tensão máxima ideal não é atingida, devido às perdas nas resistências.



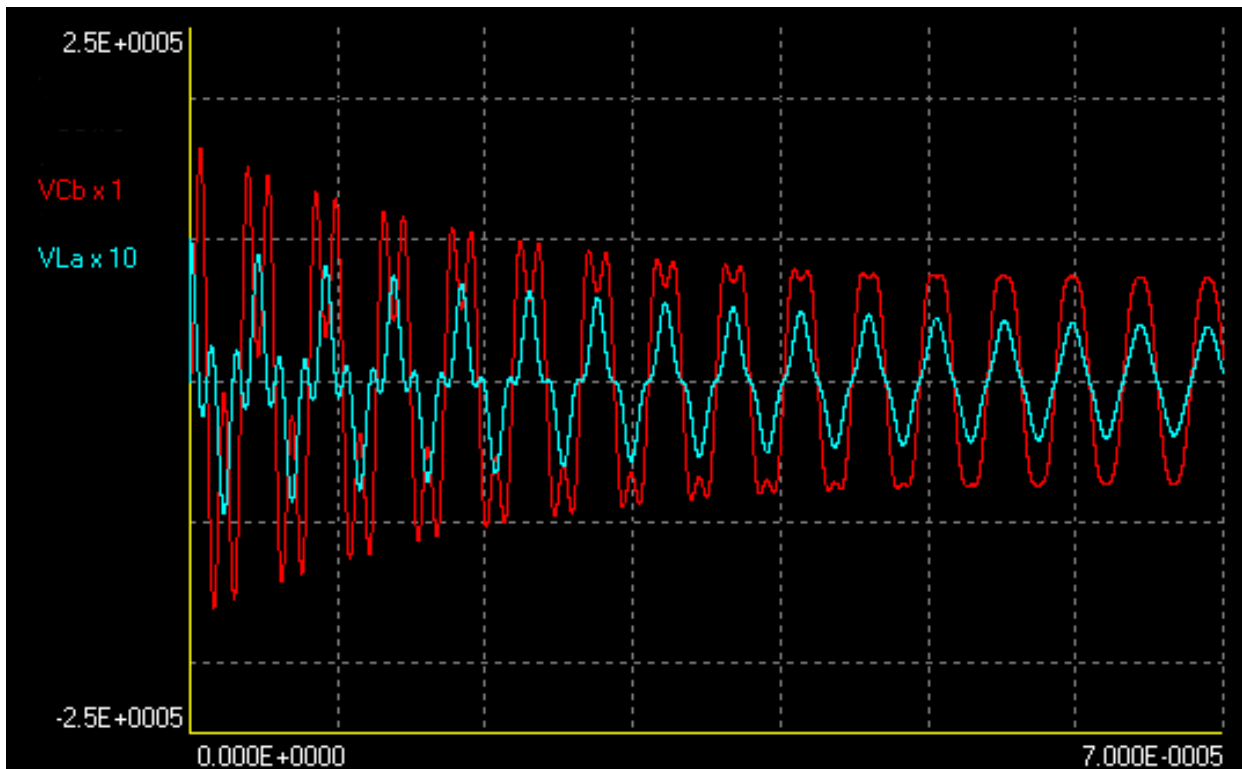
O coeficiente de acoplamento que resulta em mais rápida transferência de energia é  $k = 0.6$ , idealmente. A transferência ocorre em 1 ciclo apenas, e é pouco afetada pelas perdas. As formas de onda são a composição de duas senóides (com decaimento no exemplo) tendo razão de frequências de 1:2. Esse modo de operação, chamado modo 1:2, entretanto, é praticamente impossível de ser conseguido com bobinas normais operando no ar gerando altas tensões, devido a dificuldades de isolamento. É o ideal para aplicações da bobina de Tesla em conversão de energia.



O próximo modo com perfeita transferência de energia ocorre com  $k = 0.3846$ , modo 2:3, resultando em transferência em 1.5 ciclos. Esse modo é também de difícil implementação.



E o próximo modo, 3:4, com transferência em 2 ciclos, ocorre com  $k = 0.28$ , já se aproximando do que pode ser construído sem maiores cuidados com isolamento. Os bons valores do coeficiente de acoplamento ficam em torno de 0.1, modo 9:10, resultando num compromisso entre isolamento entre as bobinas e rápida transferência de energia para minimizar perdas.

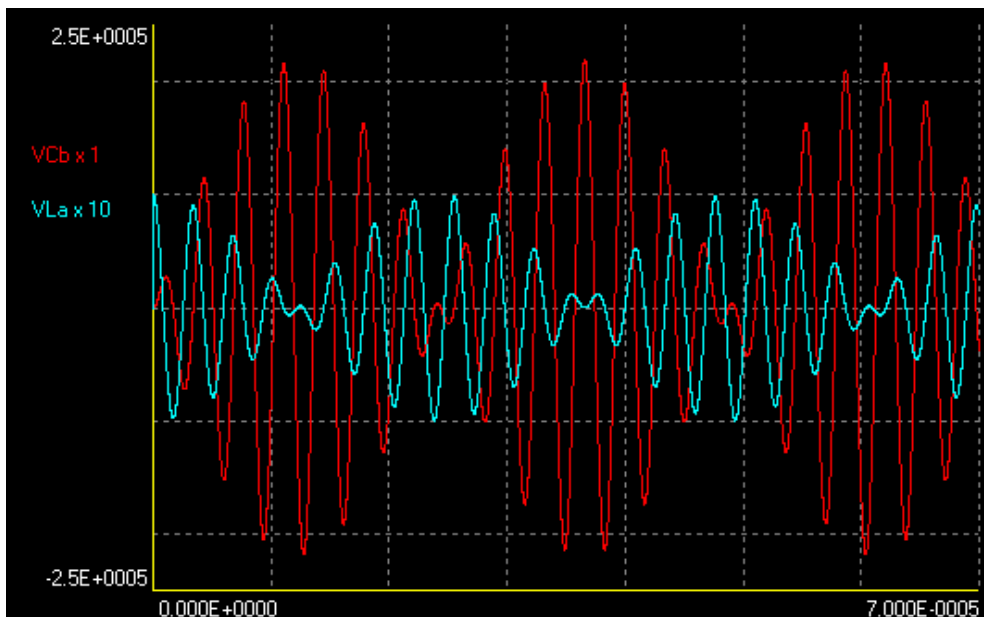


Não adianta aumentar o acoplamento. Existe um mínimo de eficiência em torno de  $k = 0.8$  (o mostrado). Daí em diante o comportamento se aproximaria do de um transformador ideal comum, se a construção fosse possível.

Os valores “ideais” para o coeficiente de acoplamento, no caso sem perdas, são os valores da forma:

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

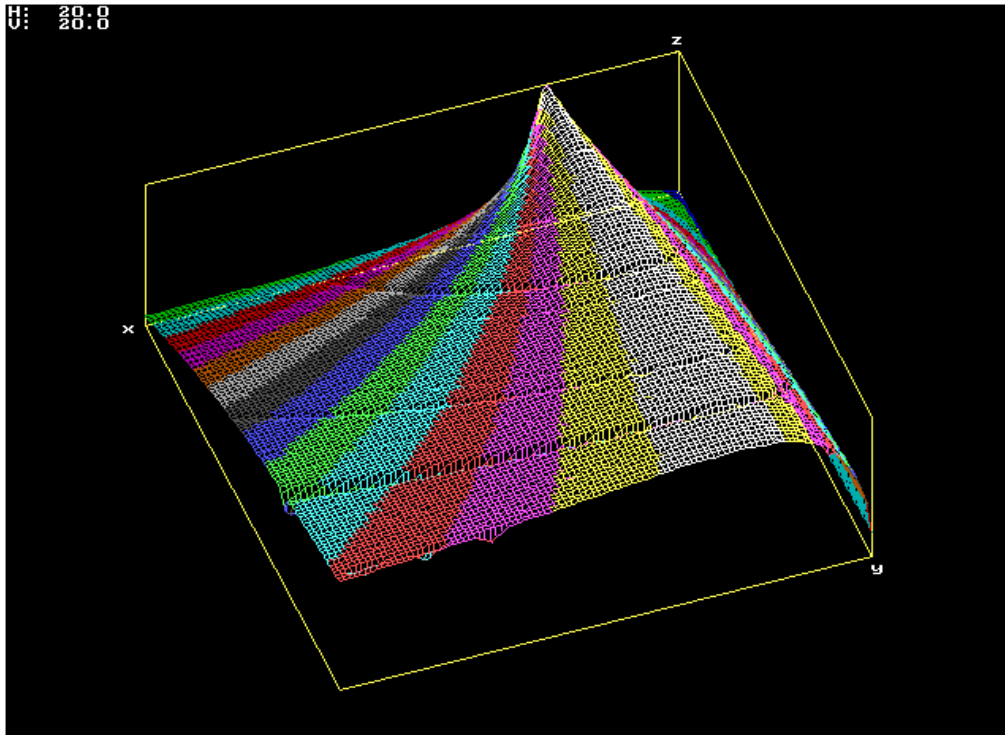
onde  $a$  e  $b$  são inteiros com diferença ímpar, usualmente inteiros sucessivos. O modo de operação é então o modo  $a:b$ . Nesses modos, a transferência completa de energia se dá em  $b$  semiciclos da tensão primária. São possíveis modos em que a diferença entre  $a$  e  $b$  é maior que 1, mas o que ocorre nesses casos é que aparecem mínimos imperfeitos na energia primária antes de ser atingido o zero perfeito. Esses modos, para  $a$  e  $b$  não muito pequenos, são praticamente equivalentes aos obtidos dividindo  $a$  e  $b$  por  $b-a$  e arredondando para ter  $b-a = 1$ .



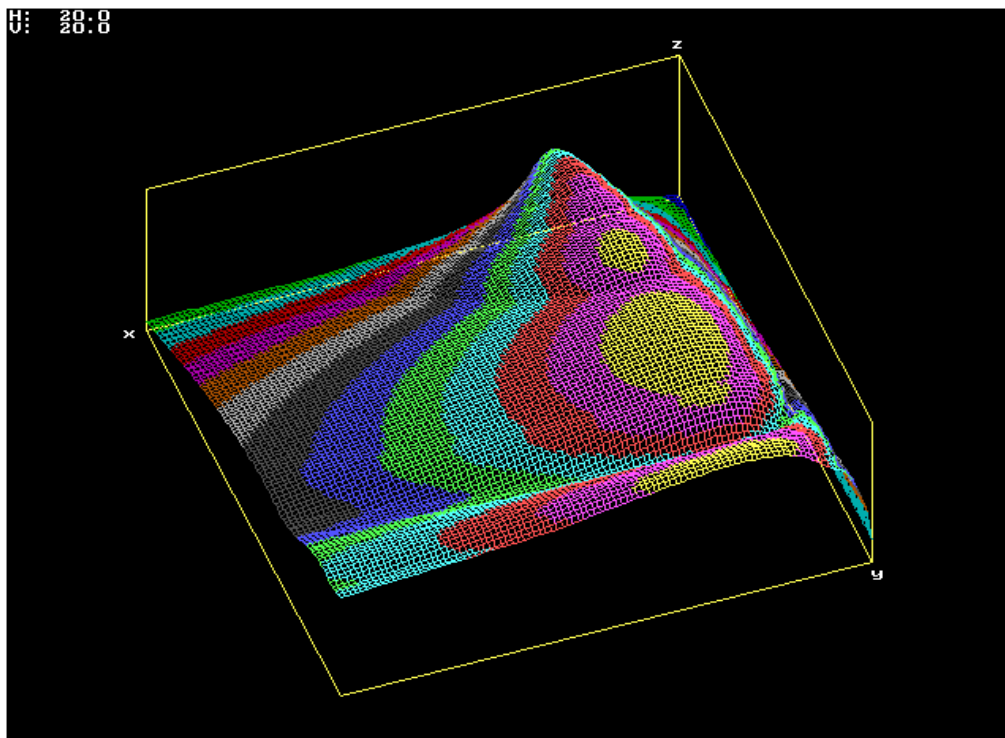
Operação no modo  $a:b = 20:23$ ,  $k = 0.139$ , sem perdas. O primeiro mínimo de energia é imperfeito, mas o segundo é perfeito. A transferência completa de energia sempre ocorre em  $b$  semiciclos (23 no caso). Este modo é praticamente idêntico ao modo  $7:8$ , que dá  $k = 0.133$  e transfere a energia completamente em 8 semiciclos.

## Sintonia e acoplamento

Para avaliar a importância da sintonia, as figuras abaixo mostram o efeito da variação da indutância da bobina primária ( $x$ ) no máximo de tensão secundária ( $z$ ), em função do coeficiente de acoplamento ( $y$ ). As escalas variam  $L_a$  entre 10% e 400% do valor ideal para  $k$  entre 0.05 e 0.9.

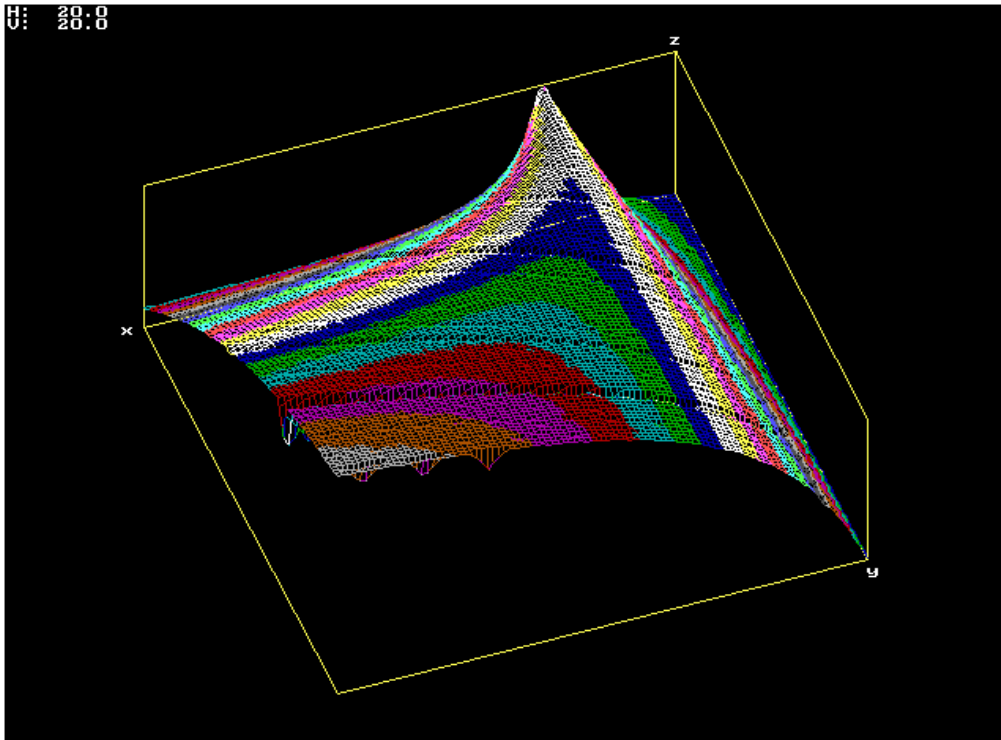


No caso ideal sem perdas, nota-se que quanto menor o coeficiente de acoplamento, mais crítica fica a sintonia. Há valores ótimos para  $k$ , mas eles são pouco críticos quando  $k$  é pequeno. O largo máximo em torno de  $k = 0.6$  é bem evidente. O mínimo com  $k = 0.8$  forma o vale visível na parte de baixo. É o pior, mas há outros.

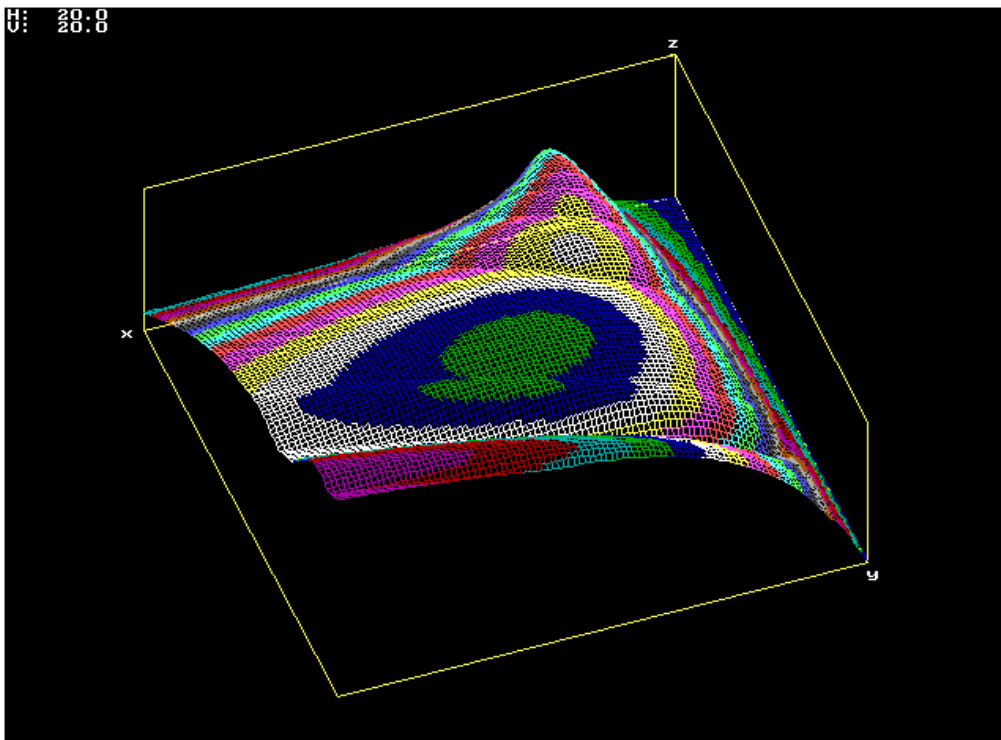


Considerando agora perdas, supondo um fator de qualidade de 20 no ressonador secundário. Fica claro que a operação em torno dos coeficientes de acoplamento ótimos é vantajosa. O máximo para  $k = 0.6$  é o maior, seguido do próximo para  $k = 0.38$ . Para valores baixos de  $k$ , as perdas são maiores e não há máximos claros.





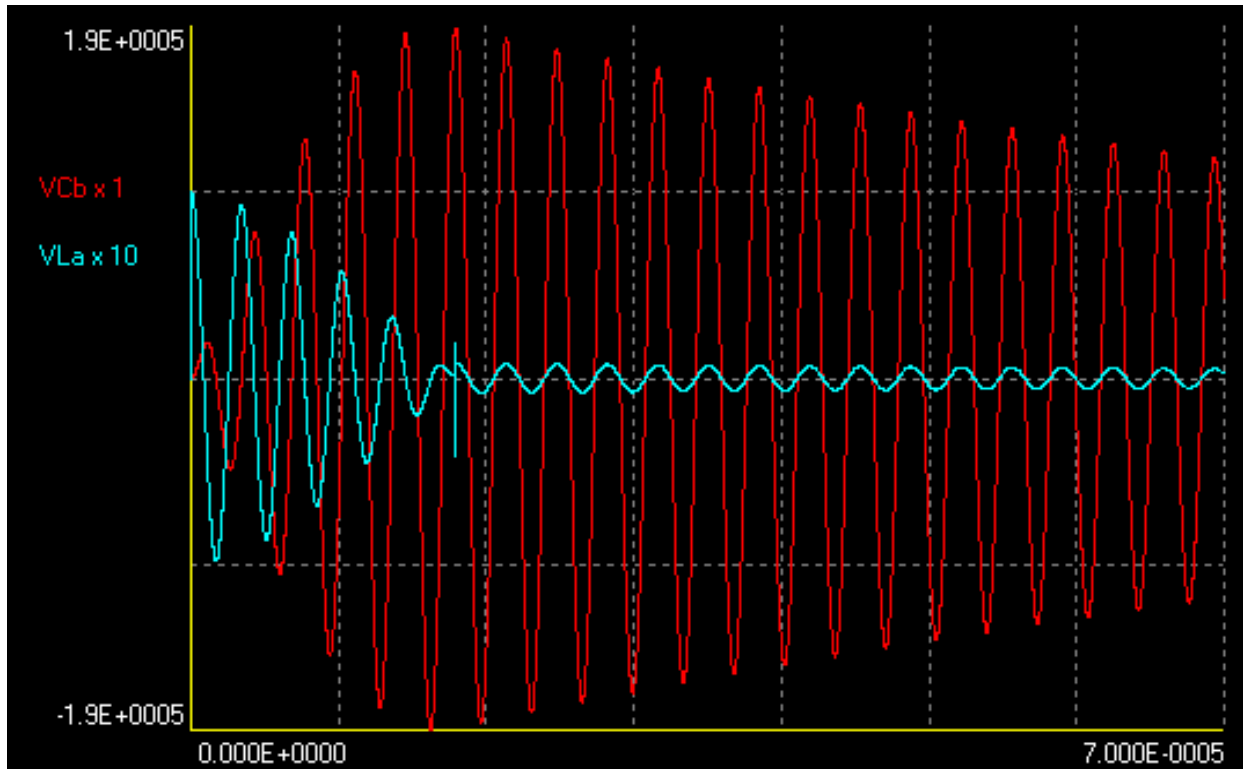
Considerando agora o efeito da variação da capacitância primária ( $x$ ), entre 10% e 400% do valor ideal, no caso sem perdas se observa que há sempre um pequeno aumento na tensão de saída quando o capacitor é aumentado, enquanto a falta de sintonia não é sentida pelo sistema, atingindo um limite de 2 vezes mais tensão para valores altos de  $k$ . Há sempre ganho se  $k > 0.5$ . Para bobinas de Tesla normais, com  $k$  baixo, entretanto, não há vantagem em aumentar  $C_a$ .



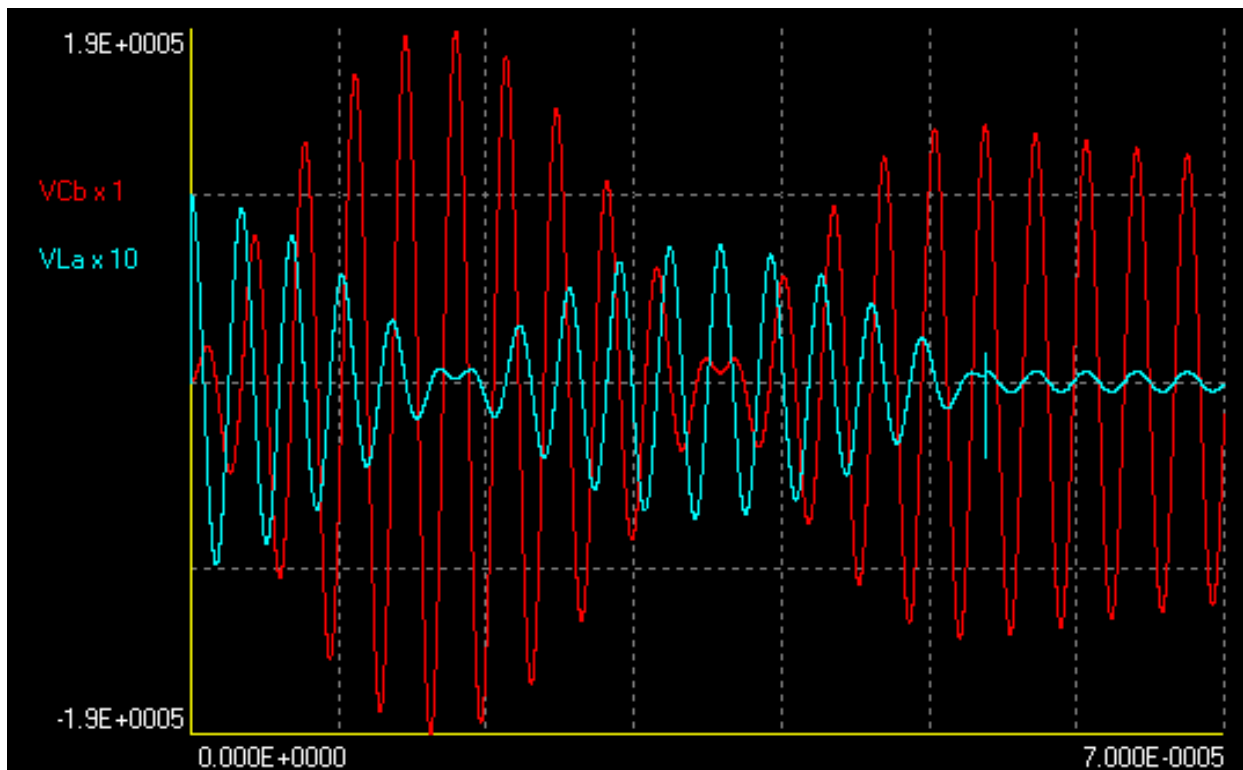
Considerando perdas, nota-se que há também alguma vantagem em aumentar  $C_a$  quando  $k$  é baixo. Aparecem máximos, que ficam deslocados na direção de maior  $C_a$ . Mas o efeito é também desprezível quando  $k$  é pequeno.

## Extinção (“quenching”)

O faiscador “dispara” inicialmente quando a tensão sobre o capacitor primário atinge sua tensão de ruptura. Nos ciclos seguintes, a presença de ar ionizado entre os eletrodos, e o calor gerado pelo arco, o mantém conduzindo. Quando a energia oscilando no circuito primário passa por um mínimo, entretanto, há uma tendência a que a condução cesse, o que é chamado de “quenching”, em inglês, ou “extinção”. Como nesse momento a maior parte da energia está no circuito secundário, ela fica presa lá até se dissipar.



Extinção do arco primário no primeiro mínimo (“notch”) da energia no primário. A pequena tensão que continua sendo observada sobre a bobina primária aparece por ação de transformador.



Extinção do arco no segundo mínimo. É comum que isto ocorra.



Extinção do arco no terceiro mínimo, nesse caso com maior coeficiente de acoplamento, modo 4:5. Note-se a maior tensão que resta depois da extinção, justamente devida ao maior coeficiente de acoplamento. Em modos baixos, alto  $k$ , a extinção do arco torna-se difícil, pois essa tensão pode ser o bastante para redispapar o arco durante muitos mínimos.

Criado em 28/7/2007