

UMA CARGA ARTIFICIAL RESSONANTE

Por Luiz Amaral
PYILL/AC2BR

Introdução

O nosso problema específico é o de se construir uma carga artificial para a faixa de 470 a 510kHz para a qual está sendo montado um transmissor da ordem de 250W de potência média de saída.

Uma carga artificial ideal apresenta uma impedância resistiva pura **R** e independente da frequência. Como esta é difícil de ser construída com resistores comuns de carvão¹, a solução sugerida é de se usar resistor indutivo (usado nas resistências de chuveiros elétricos da Figura 1) que, a princípio formaria um circuito R-L série naquela banda de frequências, com um capacitor **C** também série para compensar a reatância indutiva.

A impedância do elemento resistivo **R-L** seria na representação complexa $Z_{RL} = R + j.L.\omega$ (j = unidade imaginária, **L** a indutância e ω a frequência angular igual a $2.\pi.f$, com f sendo a frequência).

Em linguagem menos matemática, equivale a dizer que a componente resistiva de tal impedância é constante e igual a **R** e a reativa igual a **L.ω**, com ambas **R** e **L** independentes da frequência.

A capacidade **C** deve ser tal que haja ressonância, isto é, sua reatância $-1/(\omega.C)$ seja igual a **L.ω** em módulo, de forma a se obter uma reatância total nula e, portanto, uma impedância constante e resistiva igual a **R**.

A Solução Escolhida

Por simplicidade resolvi optar pela solução mais simples de se controlar: o uso de resistores de fio mesmo que se criando uma carga indutiva. O mais simples, barato e fácil de se encontrar em qualquer lugar é se usar resistências de chuveiro elétrico, no meu caso, os da marca Lorenzetti® modelo Max-Ducha que é dividida em dois pedaços para se ter as operações 'verão' e 'inverno', comuns aos chuveiros elétricos, conforme a Figura 1.



FIGURA 1

¹ A dificuldade referida se baseia no fato de serem raros no mercado os resistores não indutivos de carvão de potência mais alta. O preço das cargas artificiais para potências maiores é também muito alto.

Combinando-se resistências de 5.500W e de 4.400W para tensão de 220V é possível se obter uma resistência total de 50Ω dentro de 2% da seguinte maneira: duas partes mais longas da resistência de 5.500W e duas resistências inteiras de 4.400W.

Uma vez montado o circuito com a combinação de resistores do tipo da Figura 1, este ajustado para 50Ω com o auxílio da tensão alternada de 60Hz da rede local de energia. No entanto, surgiram dois problemas quando se passou a usar a carga artificial, assim montada, na banda de 500kHz com o capacitor de ressonância:

1 - o valor da componente resistiva se apresentou muito maior do que 50Ω.

2 - o capacitor calculado para se obter a ressonância medindo-se o valor da reatância indutiva também se apresentou muito diferente do necessário na prática, isto é, o valor da frequência de ressonância se mostrou muito fora do esperado.

Um estudo mais profundo mostrou que os problemas ocorriam por efeito 'skin' no condutor, aumentando a resistência com a frequência e também pela existência de importante capacitância distribuída γ na bobina resistiva.

O circuito equivalente pode ser simplificado como o da Figura 2.

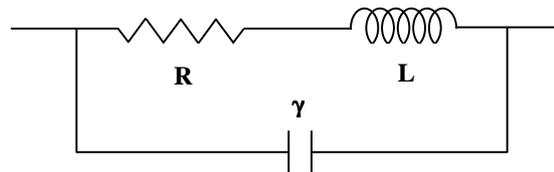


Figura 2

A existência dessa capacitância distribuída γ complica muito a forma da impedância Z do circuito que agora possui uma componente real r diferente de R e dependente de L , γ e de ω^2 (veja Apêndice).

$$Z = R(\omega) / [(1 - \omega^2 \cdot L \cdot \gamma)^2 + \omega^2 \cdot R^2(\omega) \cdot \gamma^2] \quad [I]$$

Note-se que, se fizermos $\gamma = 0$ em [I], obtemos $r = R(\omega)$, como se deveria esperar para o caso ideal sem capacitância distribuída.

Aqui foi feito um teste para se verificar se o nosso problema era mesmo de capacitância distribuída. Ao se esticar o fio da bobina (que tem comportamento de mola espiral), tanto a indutância L como a capacitância γ variam e, assim, também varia r (como o comprimento total do fio não varia, o valor de $R(\omega)$ permanece constante). Porém, se é introduzido na bobina um núcleo de ferrite, L varia, com $R(\omega)$ e γ permanecendo inalterados. Se r variar, foi devido ao primeiro termo do denominador, já que o segundo termo dele e o numerador não variaram.

A experiência foi efetuada, mostrando que r depende de L e é crescente com este, justificando uma expressão para a impedância do tipo de [I].

Isto mostra que, devido à capacitância distribuída γ , existe uma forte dependência entre r e L .

A solução é fazer γ e L os menores possíveis. Para diminuir L , o caminho tentado foi reenrolar o fio resistivo com as espiras ímpares num sentido e as pares no sentido oposto (enrolamento com espiras alternadas invertidas).

² Esta dependência em ω possui duas origens, a indireta pelo efeito 'skin', explicitado na forma $R(\omega)$, além da dependência direta pelo denominador da expressão [I].

Isto também afeta a capacitância distribuída γ . Existe claramente uma solução de compromisso entre as minimizações de L e de γ , nem sempre fácil de se quantificar.

Um dos problemas de tal enrolamento é que suas pontas ficam em extremos opostos da bobina, dificultando a sua ligação ao conector coaxial na entrada da carga artificial. Uma outra forma de se enrolar o fio é mostrado na Figura 3³, onde os extremos se apresentam próximos, facilitando a montagem física do conjunto com o capacitor C .

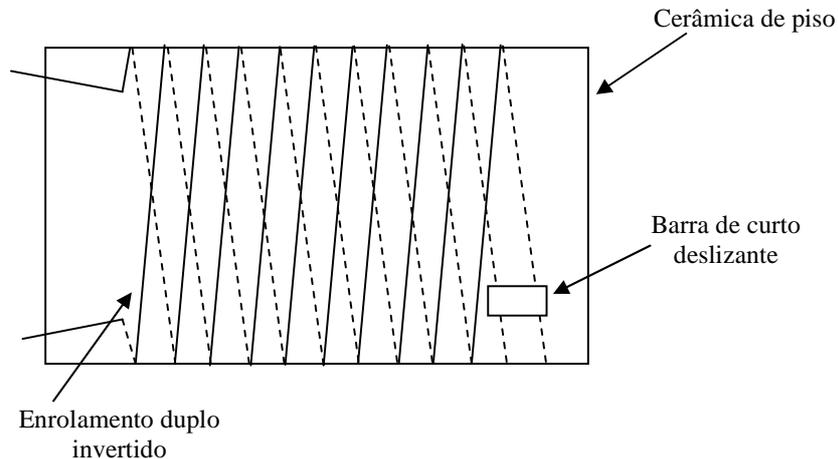


Figura 3

Para facilitar o ajuste, introduzi uma barra de curto que é usada para se ajustar o valor da componente resistiva r . Na frequência de trabalho, escorrega-se a barra de curto sobre a bobina de forma a se obter o valor desejado (50Ω , no caso) para a componente resistiva r . O capacitor C é montado sobre a mesma placa cerâmica isolante e, como um padder⁴, é ajustado para se obter a ressonância do conjunto, isto é, C deve apresentar uma reatância igual e de sinal oposto à componente reativa X da bobina dada pela expressão [II] (a parte imaginária desta). Pode ser que, ajustando C , seja necessário novo posicionamento da barra de curto para um ajuste fino do valor de r .

Dessa forma, com os dois elementos ajustáveis (barra de curto e C) pode-se obter uma impedância resistiva e com o valor desejado (50Ω) com bastante precisão.

Na prática foi verificado que o enrolamento da Figura 3 apresentou valores muito semelhantes aos obtidos com o enrolamento com espiras alternadas invertidas, porém com muito maior praticidade na montagem.

A Figura 4 mostra o resultado obtido após o ajuste da barra de curto e do capacitor na frequência de 504kHz (a da transmissão programada para os testes). Pode-se ver as curvas de r (formada por círculos) e de X (formada por quadrados) em função da frequência desde 470kHz até 510kHz. Verifica-se que variam muito pouco conforme a tabela abaixo:

Frequência (kHz)	r (Ω)	X (Ω)	
470	48,21	-6,14	(equivalente a um capacitor de 55,12nF)
504	50,05	0,13	(equivalente a um indutor de 41nH)
510	50,29	1,18	(equivalente a um indutor de 0,37 μ H)

Não há, portanto, necessidade de ressonância da carga artificial ao se percorrer a banda toda, apesar de se poder fazê-lo (para os mais puristas).

³ Esta forma foi sugerida pelo Gilson, PU5MPL.

⁴ O capacitor foi montado de forma caseira como os existentes no projeto do transmissor de 500kHz, conforme artigo do mesmo autor existente sobre o assunto.

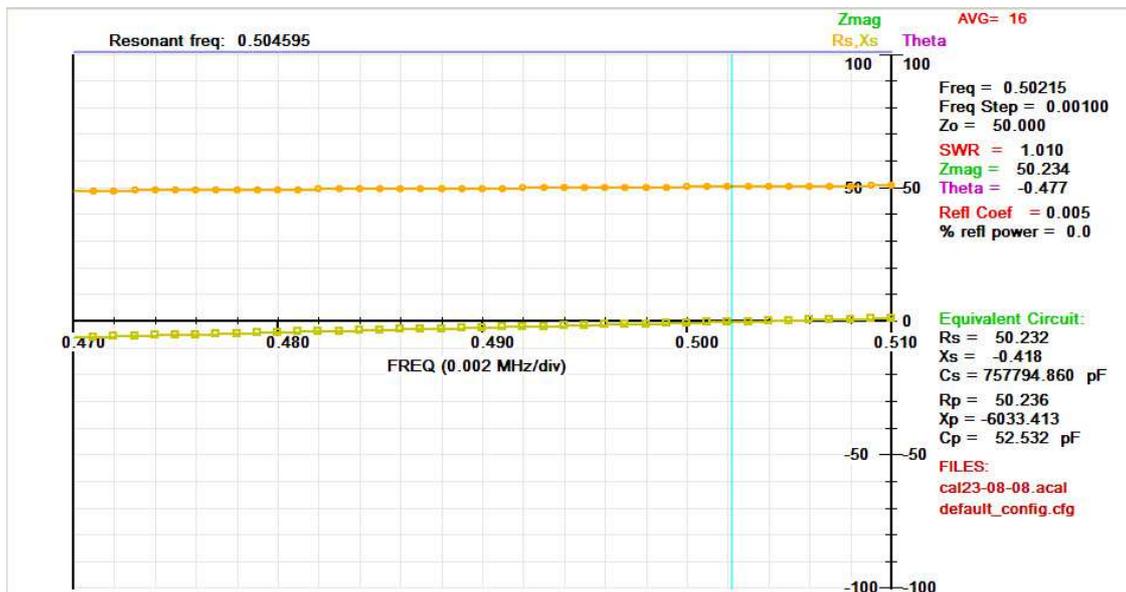


FIGURA 4

A Figura 4, no entanto, mostra na linha vertical a frequência de 502,15kHz (escolhida aleatoriamente na banda), onde as componentes resistiva e reativa são **Rs** e **Xs**, esta, no caso, capacitiva, equivalente a uma capacidade **Cs**.

A Figura 5 mostra o circuito equivalente com o capacitor **C** inserido que ressona com **X**.

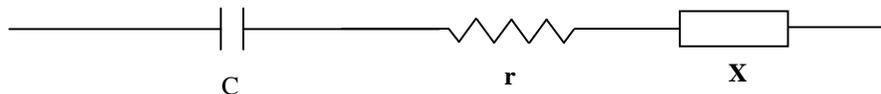


Figura 5

A Figura 6 mostra a foto da placa montada com o conector fêmea (do PL-259) sem o capacitor e a Figura 7, a sua parte inferior.

Para as medidas foram utilizados um analisador de antenas da Array Solutions® modelo AIM-4170, complementado por um gerador de funções Minipa® modelo MFG-4202 (com impedância de saída igual a 50Ω) e um osciloscópio Hitachi® modelo V-223.

A medida com o gerador de funções com o osciloscópio baseia-se no fato de que, quando a resistência da carga (não indutiva ou ressonante) é igual à do gerador, forma-se um divisor de tensão resistivo de fator 2, isto é, com a carga conectada, a tensão deve ser a metade daquela medida sobre o gerador em aberto (sem a carga). Foram confirmados, com este método, os resultados obtidos com o analisador de antenas.

Por Luiz Amaral
PYILL/AC2BR

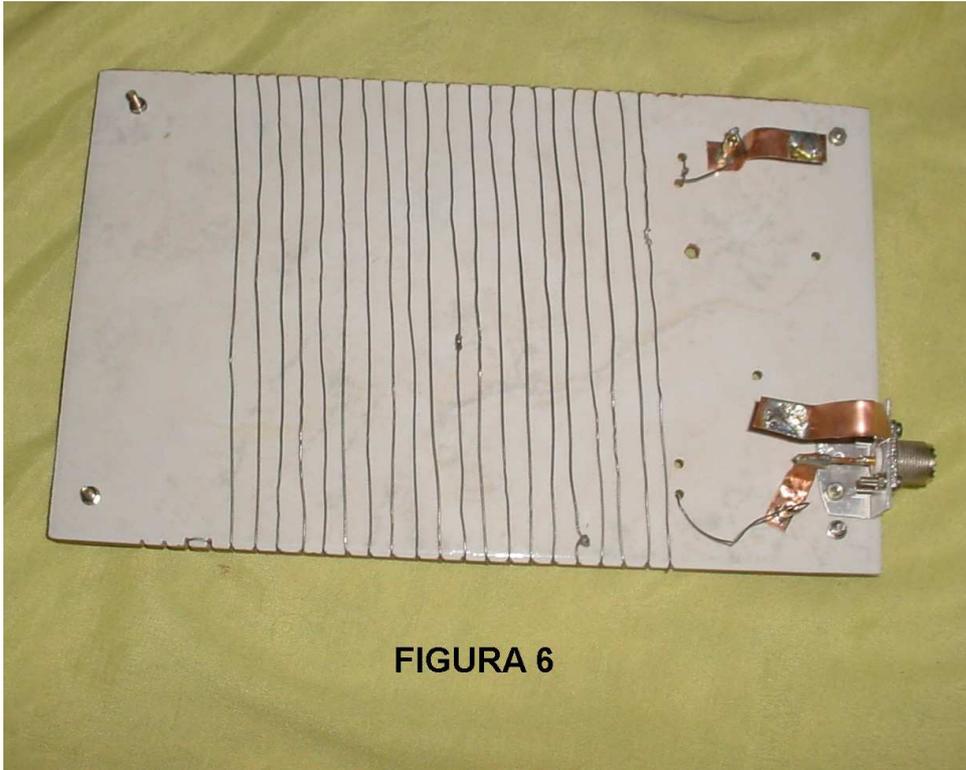


FIGURA 6

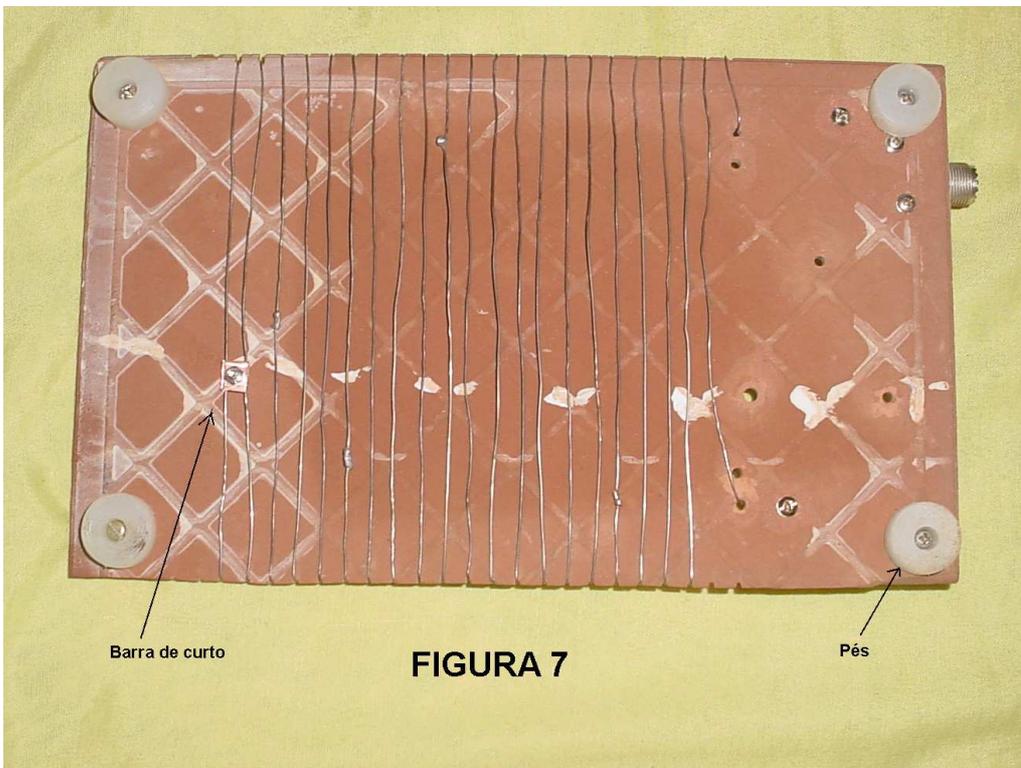


FIGURA 7

Por Luiz Amaral
PYILL/AC2BR

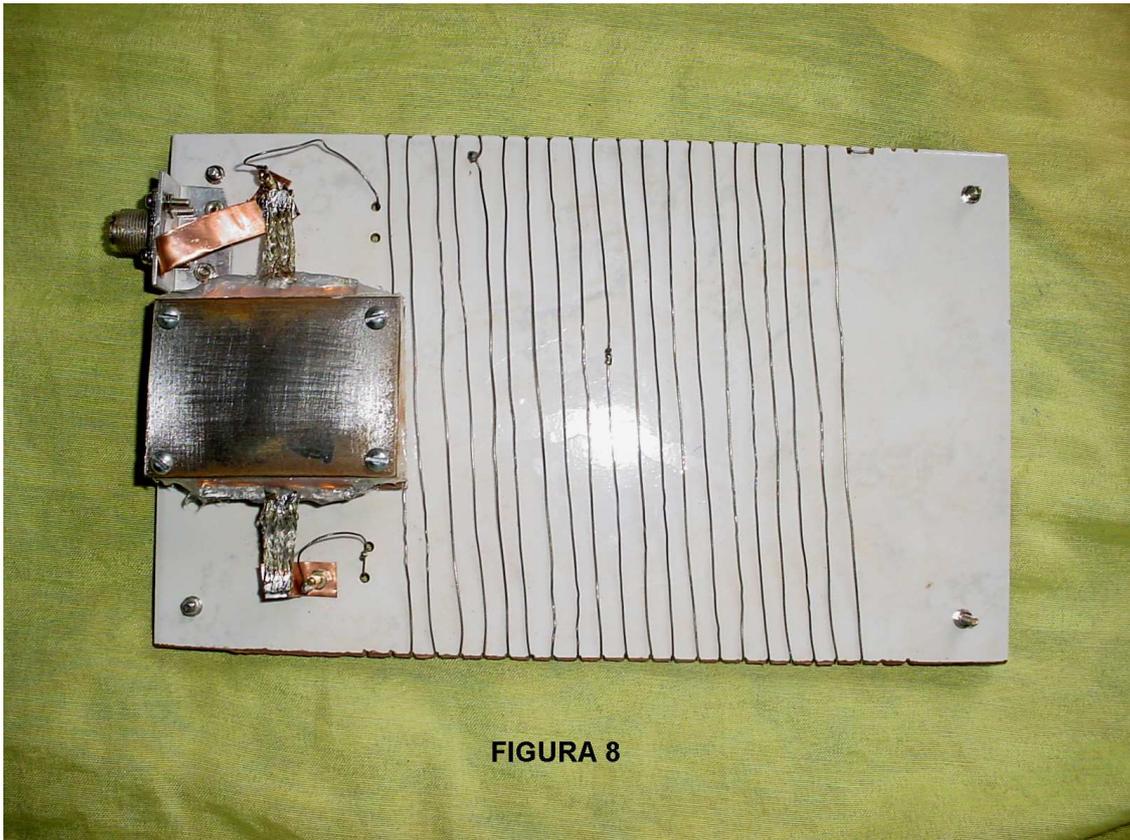


FIGURA 8

A Figura 8 mostra a carga artificial pronta contendo inclusive o capacitor de ressonância da mesma. O analisador AIM-4170 foi usado para se obter a ressonância ao se ajustar os quatro parafusos do capacitor (que aparecem na Figura 8) que variam sua capacidade e a posição do cursor que ajusta o valor da componente resistiva da carga, normalmente 50Ω na frequência de interesse.

Pode haver certa interação entre os ajustes do cursor e do capacitor, isto é, após ajustar um deles, pode ser necessário se ajustar o outro e vice-versa até se obter o resultado requerido.

É necessário lembrar que não se deve nem ajustar nem utilizar esta carga sobre superfícies metálicas, já que a capacidade entre esta e o fio resistivo pode modificar um pouco os valores dos parâmetros medidos. Deve-se portanto colocá-la sobre superfície isolante e distante daquelas superfícies.

**Por Luiz Amaral
PY1LL/AC2BR**

Conclusão

A solução apresentada foi a construção de uma carga ressonante (banda estreita) em substituição de uma carga resistiva (banda larga) de alto custo.

A banda de utilização da mesma, na prática, se mostra bem maior do que o necessário para cobrir a faixa de 470kHz a 510kHz de nosso interesse, especialmente com a utilização de capacitor 'padder' junto com a barra de curto.

Como a nossa carga foi montada com fio de resistência de chuva, por ser mais imediatamente obtível no mercado⁵, foram necessárias emendas no fio. Para maior estabilidade, todas as emendas e conexões efetuadas no fio de níquel-cromo foram soldadas com solda de estanho. Para isso, foi necessária a raspagem das pontas do fio a soldar com um estilete e, nas emendas, os dois fios foram torcidos de modo a se obter uma maior rigidez mecânica e menor temperatura na emenda para não afetar as soldas. Estas foram feitas utilizando-se um fluxo especial (desenvolvido para solda de estanho em alumínio, mas que funciona muito bem na liga resistiva), o da Brasweld® usado no seu SuperFlux R15.

Num chuva elétrico de 220V e de 5.500W, que usa o fio escolhido, a corrente é de 25A. Sob 110V, a corrente passa a 43A. Mesmo com 450W médios (potência bem maior que a gerada pelo transmissor do projeto), a corrente seria de 3A, portanto a temperatura esperada para o fio é bastante baixa e, em especial nas emendas, onde o volume é maior, o calor não compromete as soldas de estanho.

Apêndice

A impedância Z do circuito da Figura 2 é dada por:

$$Z = (R + j.\omega.L)/(1 - \omega^2.L.\gamma + j.\omega.R.\gamma)$$

Esta expressão pode ser trabalhada dando:

$$Z = \{R + j.\omega.[L.(1 - \omega^2.L.\gamma) - R^2.\gamma]\}/[(1 - \omega^2.L.\gamma)^2 + \omega^2.R^2.\gamma^2]$$

Tira-se daí a expressão da componente resistiva r e da reativa X :

$$r = R/[(1 - \omega^2.L.\gamma)^2 + \omega^2.R^2.\gamma^2]$$

$$X = j.\omega.[L.(1 - \omega^2.L.\gamma) - R^2.\gamma]/[(1 - \omega^2.L.\gamma)^2 + \omega^2.R^2.\gamma^2]$$

Quando γ é pequeno, pode-se escrever r como:

$$r = R/(1 - 2.\omega^2.L.\gamma)$$

Quando se expande a bobina aumentando seu comprimento, γ é uma função crescente com L , e portanto a expressão ' $1 - 2.\omega^2.L.\gamma$ ' diminui com L , o que aumenta r . Assim, se for variado apenas L (com um ferrite) e r variar menos que o processo de expansão da bobina, significa que $\gamma > 0$ e é importante no processo.

⁵ A montagem fica mais simples com o uso de fio de níquel-cromo de 0,75mm de diâmetro adquirido no mercado especializado por ter menos dobras e defeitos e não necessitar de emendas.