



Universidade Federal de Uberlândia

## Prática 1: circuitos ressonantes

*Prof. Alan Petrônio Pinheiro*

Faculdade de Engenharia Elétrica

Curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações

---

### Referências teóricas

Para entendimento teórico mais aprofundado sobre os temas aqui tratados recomenda-se a leitura da referência [1], especialmente o capítulo 2 inteiro.

### 1 - Objetivos da prática

O objetivo desta prática é entender o comportamento de circuitos ressonantes utilizados para sintonizar determinada faixa de frequência. Para isto usamos o ADS para exibir os diferentes comportamentos de diferentes circuitos com diferentes parâmetros de modo a entender como estes circuitos e estes parâmetros influenciam na sintonização.

### 2 - Procedimento para execução da prática

Esta prática tem em sua primeira parte a simulação de um circuito sintonizador e, na segunda parte, a montagem prática de um circuito sintonizador em bancada (que é opcional).

#### 2.1 – Simulando um circuito sintonizador básico

1. Monte o circuito da Figura 1a. Observe os valores empregados de componentes.
    - a. Os componentes passivos podem ser encontrados na paleta “Lumped-Components”
    - b. A fonte “V\_AC” (fonte de tensão AC) pode ser encontrada na paleta “Sources-Freq Domain”
    - c. Insira os labels “entrada” e “saida” conforme se vê na Figura 1a.
  2. Na paleta “Simulation-AC”, insira o componente “AC Small signal simulation”. Altere seu *star* e *stop frequency* conforme figura.
  3. Posteriormente, faremos algumas análises no tempo também. Para já ir adiantando, sugere-se que:
    - a. Na paleta “Simulation-Transient”, insira o componente “Trans”. Altere seus valores para os mesmos que se veem na Figura 1a.
    - b. Vá na paleta “Source-Time Domain” e insira a fonte “VtSine”. Em um primeiro momento, deixe ela desconectada e desabilitada como se mostra na Figura 1a. Observe que foi atribuído a ela a frequência de 50MHz.
-

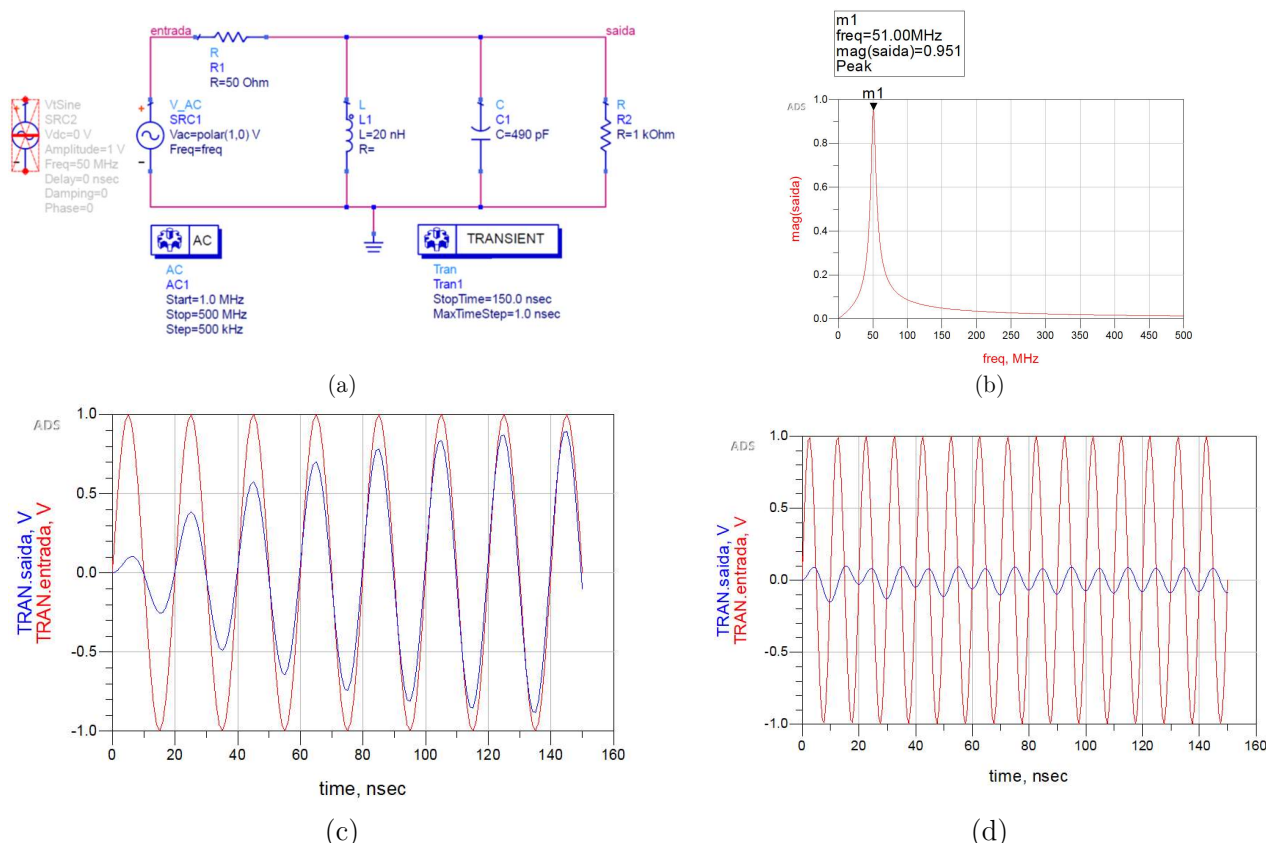


Figura 1 – (a) Circuito ressonante para ser simulado. (b) Resposta em frequência. (b) Simulação no tempo da entrada e da saída considerando uma fonte de 50MHz e (d) uma fonte de 100MHz.

A partir do circuito da Figura 1a, **faça alguns testes**:

- Identifique, pelo gráfico: (i) o valor de pico de ressonância, (ii) a banda de passagem e (iii) o valor de Q deste circuito.
- Habilitando a função de análise no tempo, compare a onda de entrada e de saída produzida para uma frequência de 50MHz. Agora, mude a fonte para outros valores conforme figura abaixo e veja o que acontece com a saída. O que se pode concluir?

Freq.	Amplitude	Atenuação (dB)
1MHz		
35MHz		
50MHz		
65MHz		
150MHz		

- Coloque uma resistência de 10 $\Omega$  em série com o indutor de 20nH e verifique os efeitos desta resistência na resposta em frequência do seu circuito
- Agora crie no mesmo arquivo um segundo circuito similar ao visto na Figura 1a. Porém altere os valores de  $L_1$  e  $C_1$  para 3pH e 3.3uF, respectivamente. Compare simultaneamente os gráficos dos

dois circuitos para ver as diferenças (se houverem), especialmente na frequência de pico e na largura da banda passante (que identifica Q).

## 2.2 – Transferência de impedância

Se pegarmos o circuito da Figura 1a, cujo gráfico de resposta em frequência é novamente ilustrado na Figura 2a, e trocarmos  $R_s$  para  $1k\Omega$ , teremos um gráfico de resposta em frequência similar ao da Figura 2b. Observe que a simples mudança de  $R_s$  de  $50$  para  $1000\Omega$  aumentou Q (ou seja: aumentou a seletividade do circuito).

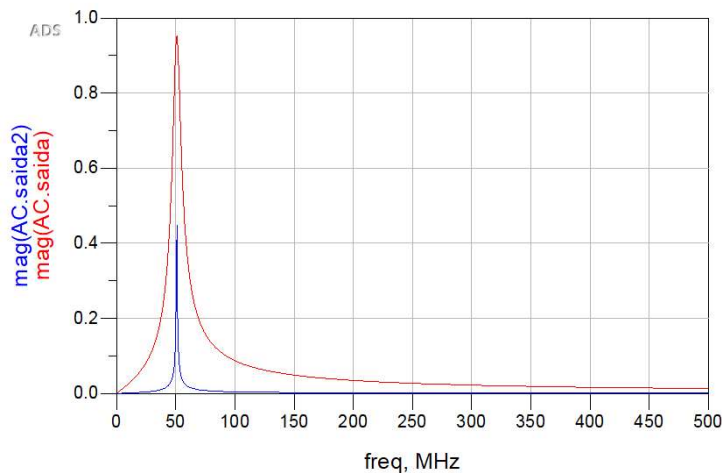


Figura 2 – (a) Resposta em frequência do circuito da Figura 1a considerando  $R_s=50\ \Omega$  (gráfico vermelho) e  $R_s=1000\Omega$  (gráfico azul).

Neste caso, foi possível melhorar Q apenas substituindo  $R_s$  por um valor maior (lembre-se da relação  $Q=R_p/X_p$  onde  $R_p=R_s//RL$ ). Porém, na maior parte dos casos nem sempre é possível alterar  $R_s$  uma vez que ele é um valor constante de um circuito que será acoplado ao circuito ressonante. Desta forma é preciso dispor de meios para aumentar “virtualmente” o valor visto de  $R_s$  sem que se ocorra sua substituição efetiva. Uma forma de se fazer isto é usando transferência de impedância. Para isto considere que o circuito da Figura 1a possa ser virtualmente substituído pelo circuito da Figura 3a. Observa-se que foi substituído apenas  $R_s$ . Utilizando-se o modelo de transformação de impedância da Figura 3b, temos as relações:

$$R'_s = R_s \left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right)^2 = 1000 = 50 \left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right)^2 = C_1 = 3,4721C_2$$

e

$$C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = 489pF = \frac{3,4721C_2 \cdot C_2}{3,4721C_2 + C_2} \therefore C_2 = 0,63nF \text{ e } C_1 = 2,18nF$$

Com base nestes valores, faça:

- 1) Monte o circuito da Figura 3a
- 2) Monte o circuito da Figura 3c
- 3) Analise o gráfico de resposta em frequência dos dois circuitos e os compare.

Desta forma, mudando o circuito da Figura 1a para a Figura 3c, usando o modelo de transformação de impedância da Figura 3b, teremos como gráfico de resposta em frequência a Figura 3d (curva azul). Observe pelos seus resultados que a resposta em frequência desta figura é similar (não igual) a mesma da resposta em frequência da Figura 3a, mas sem a necessidade de alterar o valor de  $R_s$  para  $1000\Omega$ . Isto indica que a mudança de configuração permitiu que  $R_s$  de  $50\Omega$  fosse virtualmente “transformado” em  $R_s$  de  $1000\Omega$ . Por isto o gráfico da Figura 3d é mais estreito (maior  $Q$ ) ainda que  $R_s$  seja baixo (lembre-se que  $R_s$  influencia em  $R_p$  que influencia em  $Q$  do circuito). Pode-se notar também a mudança para a nova configuração alterou a resposta de fase do circuito devido à presença de dois capacitores. Contudo, boa parte das aplicações não se preocupam com as fases de um sinal.

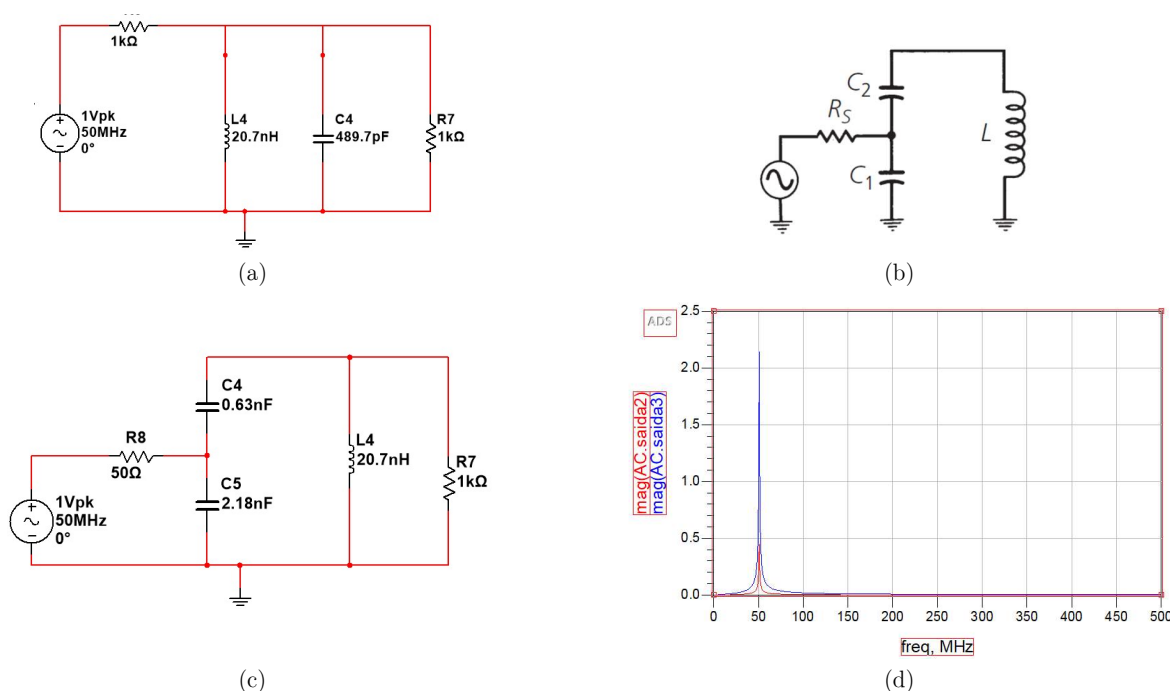


Figura 3 – (a) Circuito com  $R_s$  alterado para um valor mais próximo do ideal. (b) Modelo usado para transformação de impedância da fonte. (c) Circuito da Figura 1a que sofreu transformação de impedância para compensar  $R_s$  baixo e transformá-lo virtualmente em um  $R_s$  de  $1000\Omega$ . (d) Comparação da resposta em frequência entre o circuito (c) e (a) desta figura. A curva em vermelho indica a resposta de (a) e a azul a resposta de (c).

Outros tipos de transformação de impedância da fonte, usando indutor, também estão disponíveis na literatura técnica. Além disto há também técnicas de transformação de resistência de carga que podem contribuir com  $Q$ .

## 2.3 – Acoplamento de circuitos ressonantes

Em algumas aplicações é necessário ter uma atenuação mais acentuada nas bandas de rejeição. Para isto, o projetista pode acoplar dois (ou mais) circuitos ressonantes em série. A Figura 4 ilustra um modelo de acoplamento (capacitivo) de dois circuitos ressonantes iguais ao modelo da Figura 1a. Se compararmos a resposta em frequência de um ressonador simples (Figura 5a) com a resposta em frequência do circuito acoplado (Figura 5b) veremos que o acoplamento atenua mais acentuadamente e por isto a banda de

transição é menor. Uma outra consequência disto é o “estreitamento” da banda de passagem do circuito ressonante. Para entender melhor os efeitos de dois circuitos ressonantes acoplados, faça:

- 1) Monte o circuito da Figura 4. Observe que ele é constituído por dois ressonadores ligados e acoplados em série por um capacitor. Estes ressonadores são os mesmos da Figura 1a
- 2) Faça a análise da resposta em frequência do circuito. Compare, no mesmo gráfico, a resposta em frequência do circuito da Figura 1a e o da Figura 4.
- 3) Em seguida, altere ao seu gosto os valores do capacitor de acoplamento C7 da Figura 4 para ver os efeitos que ele terá no circuito. Neste projeto considerou-se para cálculo do capacitor de acoplamento a relação  $C7 = C/Q = 489.7\text{pF}/14 = 35\text{pF}$ ; onde Q é o fator de seletividade do circuito ressonante simples (Figura 1a).

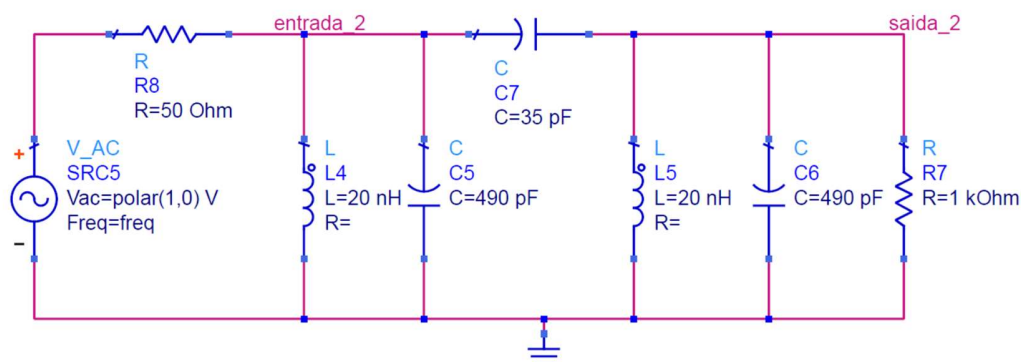


Figura 4 – Circuitos ressonantes acoplados capacitivamente

A análise dos gráficos da Figura 5 revela que o acoplamento conduz a uma maior atenuação e também a uma maior inclinação da banda de transição. Por consequência, a banda de passagem é também mais estreita (Q maior). Contudo, geralmente, os projetistas usam acoplamento não para o estreitamento da banda passante, mas sim para uma maior atenuação da banda de rejeição.

Vale também destacar que é possível fazer um circuito ressonador que seja ao mesmo tempo acoplado e com transferência de impedância (ver seção anterior) para “equilibrar” valores de Rs. Este arranjo (acoplamento e/ou transferência de impedância) dão ao projetista mais recursos para controlar largura de banda (leia-se Q) e atenuação.

(a)

(b)

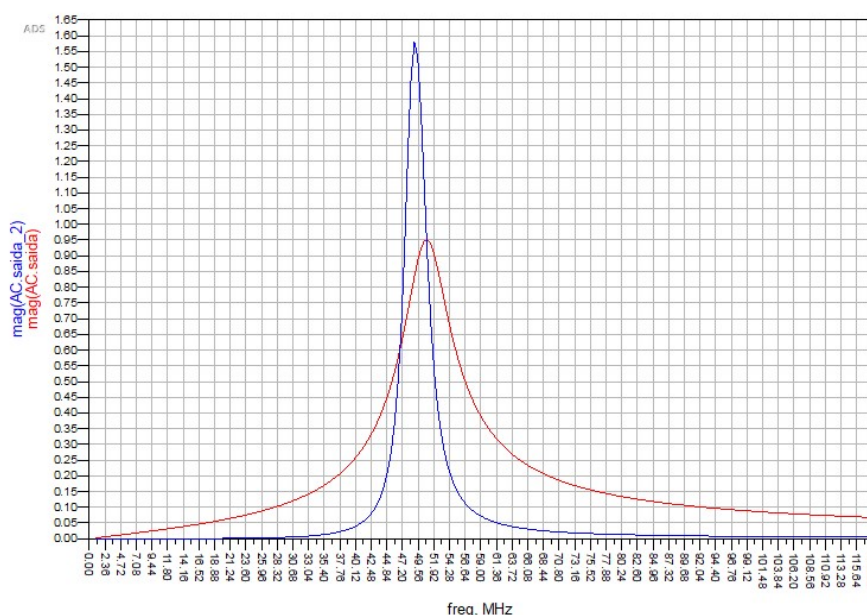


Figura 5 – Resposta em frequência do ressonador simples visto na Figura 1a (vermelho) do ressonador acoplado duplo visto no circuito da Figura 4 (azul).

### 3 - Reflexões a serem feitas sobre o experimento

- Qual é o ganho ou atenuação no pico da ressonância? Por que ela é diferente de 0 dB?
- No circuito da Figura 1a, a troca de  $R_s$  e  $R_L$  influenciam a frequência de ressonância? O que a mudança destes parâmetros influencia na curva deste circuito?
- Por que que ao injetar uma onda quadrada com frequência semelhante a frequência de ressonância do circuito, temos na saída uma onda que não é quadrada? E por que ao injetar esta mesma onda quadrada porém com frequência duas vezes maior a frequência de ressonância os resultados são consideravelmente diferentes?
- Na ressonância, o valor de  $X_L/X_C$  (impedância equivalente dos dois elementos em paralelo) é máxima, mínima ou intermediária?
- Observe a fase da resposta em frequência. Por que antes do ponto de ressonância ela tem um valor e após a ressonância ela tem outro valor completamente oposto? Que valores são estes e por que são estes valores?
- Como é feito para descobrir a frequência de ressonância deste tipo de circuito usando uma fórmula matemática? Em qual frequência o circuito solta a maior saída em tensão? E como você espera que seja o comportamento da corrente na carga? E o comportamento da transferência de potência da fonte para a carga?
- Qual a fator de seletividade  $Q$  do circuito da Figura 1a? Quais opções tenho para mudar seu  $Q$  sem mudar sua frequência central (pico da ressonância) e sem mudar  $R_s$  e  $R_L$ ? Ainda, por que a mudança de  $L_1$  e  $C_1$  para 3pH e 3.3uF não mudaram a frequência de ressonância do circuito mas mudaram a largura da banda passante? Dica: pense na fórmula  $Q = R_p/X_p$  discutida em sala de aula. Ainda, observe a atenuação do pico da ressonância.

- h) Para ter um circuito bem seletivo (alto  $Q$ ), as vezes é necessário aumentar  $R_s$  ou  $R_L$ . Por que? E como fazer isto sem trocar  $R_s$  ou  $R_L$ ? E para alargar a banda de passagem do sinal, o que se pode fazer?
-