

Capítulo 3:

Circuitos ressonantes

Prof. Alan Petrônio Pinheiro

Universidade Federal de Uberlândia

Faculdade de Engenharia Elétrica

alanpetronio@ufu.br



Parte 1: circuitos ressonantes

Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 2: Circuitos ressonantes e filtros

• Circuitos ressonantes

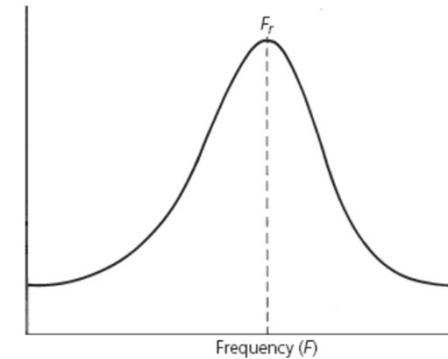
- Definições
- Sintonizador LC
- Q circuito sintonizador
 - Dependência Rs
 - Dependência RL
 - Dependência Q_{compo}
- Perdas inserção
- Acopla. Circ. Ressonantes
- Transf. de impedância
- Resumo fórmulas

• Filtros

- Passivos
- Projeto Butterworth
- Projeto Chebyshev
- Projeto Bessel
- Transformação passa-alta
- Transformação passa-banda
- Transformação rejeita-banda

• Referências para estudo

- O que é?
- Uso:
 - Transmissores e receptores
 - Selecionar faixa de frequências



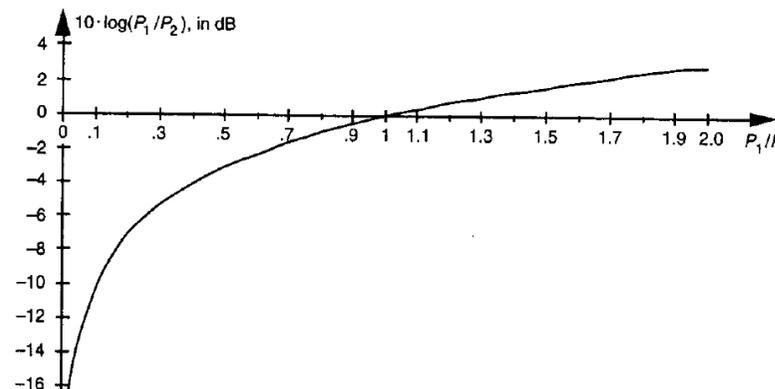
Por definição, na ressonância: $X_L = X_C$

- Conceitos:
 - Decibel: razão entre duas medidas de **potência** para descrever perdas e ganhos

- dBm = relação a 1mW

- Conversão escala linear em dB: $Valor_{db} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{Valor_{linear}}{Valor_{ref}} \right)$

- Conversão dB em escala linear: $Valor_{linear} = 10^{\left(\frac{valor_{db}}{20} \right)}$



Valor em dB	Valor linear
20 dB	10
10 dB	3,1
6 dB	2
0 dB	1
-6 dB	0,5
-10 dB	0,31
-20 dB	0,1
-40 dB	0,01
-60 dB	0.001



Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 2:
Circuitos ressonantes
e filtros

• Circuitos ressonantes

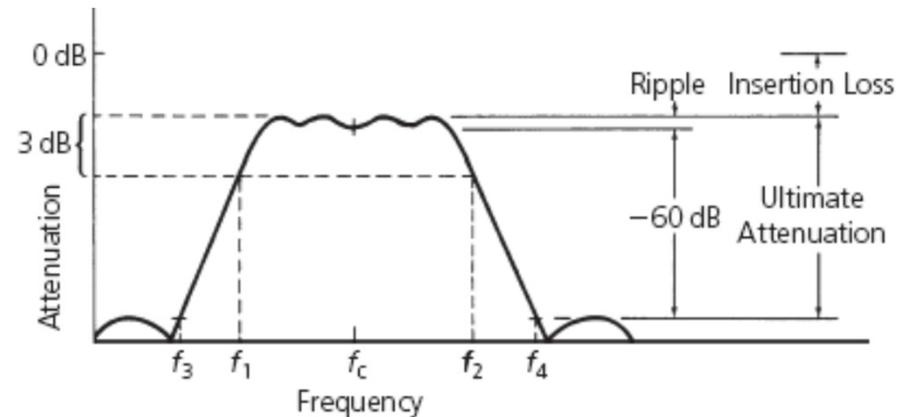
- Definições
- Sintonizador LC
- Q circuito sintonizador
 - Dependência R_s
 - Dependência R_L
 - Dependência Q_{compo}
- Perdas inserção
- Acopl. Circ. Ressonantes
- Transf. de impedância
- Resumo fórmulas

• Filtros

- Passivos
- Projeto Butterworth
- Projeto Chebyshev
- Projeto Bessel
- Transformação passa-alta
- Transformação passa-banda
- Transformação rejeita-banda

• Referências para estudo

• Resposta do filtro



• Q do circuito

– Não confundir com Q componente!

$$Q_{cap} = \frac{X_C}{ESR}$$

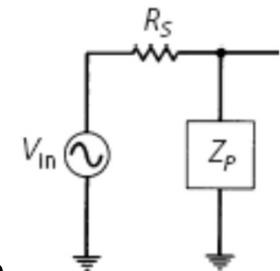
$$Q_{indu} = \frac{X_L}{R_S}$$

– Indica 'seletividade de um circuito ressonante'

$$Q = \frac{f_c}{f_2 - f_1}$$

– Perda inserção

• Componentes inseridos entre gerador e carga





Sintonizador LC

Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 2: Circuitos ressonantes e filtros

• Circuitos ressonantes

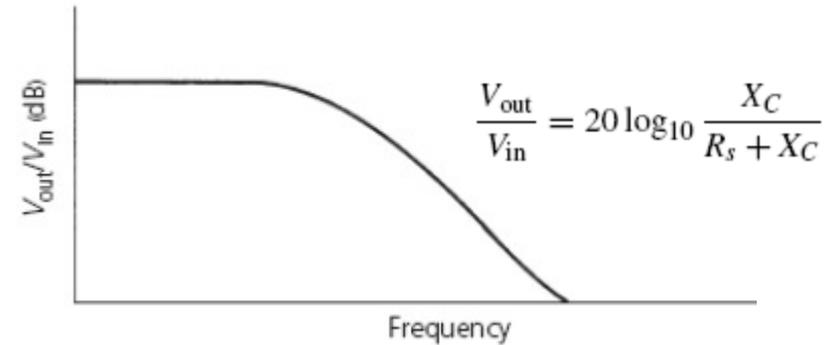
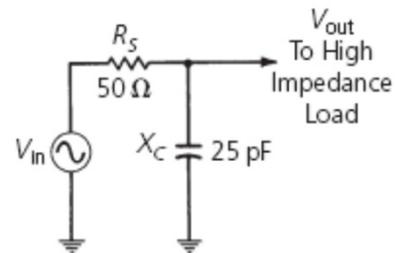
- Definições
- Sintonizador LC
- Q circuito sintonizador
 - Dependência R_s
 - Dependência R_L
 - Dependência Q_{compo}
- Perdas inserção
- Acopl. Circ. Ressonantes
- Transf. de impedância
- Resumo fórmulas

• Filtros

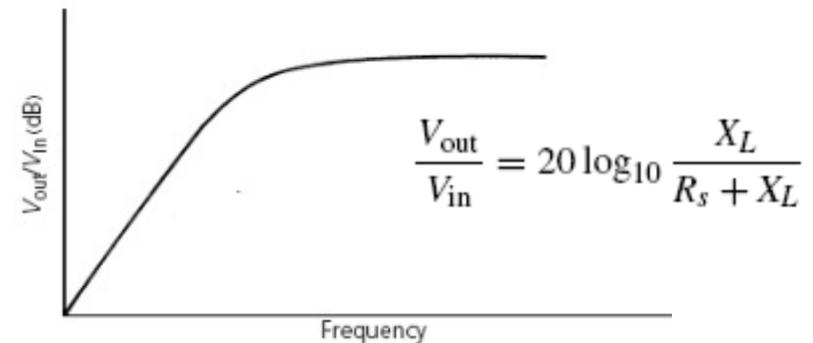
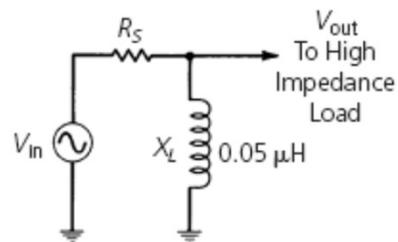
- Passivos
- Projeto Butterworth
- Projeto Chebyshev
- Projeto Bessel
- Transformação passa-alta
- Transformação passa-banda
- Transformação rejeita-banda

• Referências para estudo

• Filtro passa-baixas:



• Filtros passa-altas:





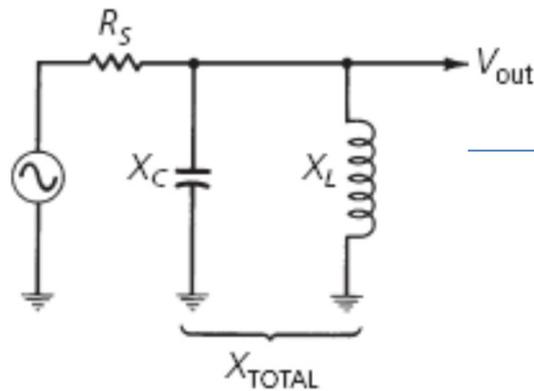
Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 2:
Circuitos ressonantes
e filtros

- Circuitos ressonantes
 - Definições
 - Sintonizador LC
 - Dependência R_s
 - Dependência R_L
 - Dependência Q_{compo}
 - Perdas inserção
 - Acopla. Circ. Ressonantes
 - Transf. de impedância
 - Resumo fórmulas
- Filtros
 - Passivos
 - Projeto Butterworth
 - Projeto Chebyshev
 - Projeto Bessel
 - Transformação passa-alta
 - Transformação passa-banda
 - Transformação rejeita-banda
- Referências para estudo

• Filtros “mistos”

– Circuito ressonante ou circuito sintonizador



$$\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = 20 \log_{10} \left| \frac{j\omega L}{(R_s - \omega^2 R_s L C) + j\omega L} \right|$$

• $R_s=50 \text{ ohm}$; $L=0.05\mu\text{H}$ e $C=25\text{pF}$

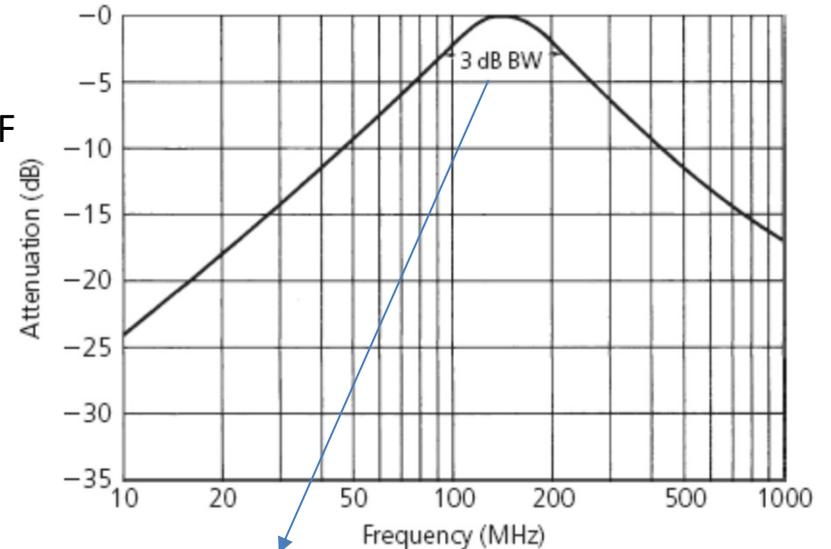
– Q circuito depende:

• R_s , R_L e Q dos componentes

Estudo caso (I)

Estudo caso (II)

– Na ressonância $X_C = X_L$



$Q = 1.1$



Q circuito sintonizador

Cir. Eletrônica Aplica.

- **Caso I:** efeitos de R_S e R_L no circuito sintonizador

Capítulo 2:

Circuitos ressonantes
e filtros

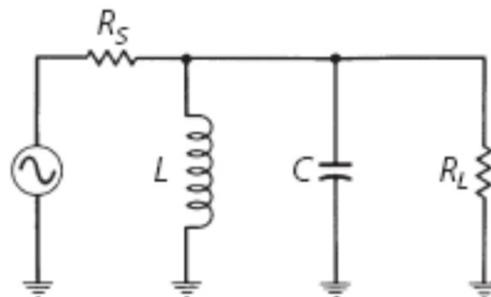
- **Circuitos ressonantes**

- Definições
- Sintonizador LC
- Q circuito sintonizador
 - Dependência R_S
 - Dependência R_L
 - Dependência Q_{comp}
- Perdas inserção
- Acopl. Circ. Ressonantes
- Transf. de impedância
- Resumo fórmulas

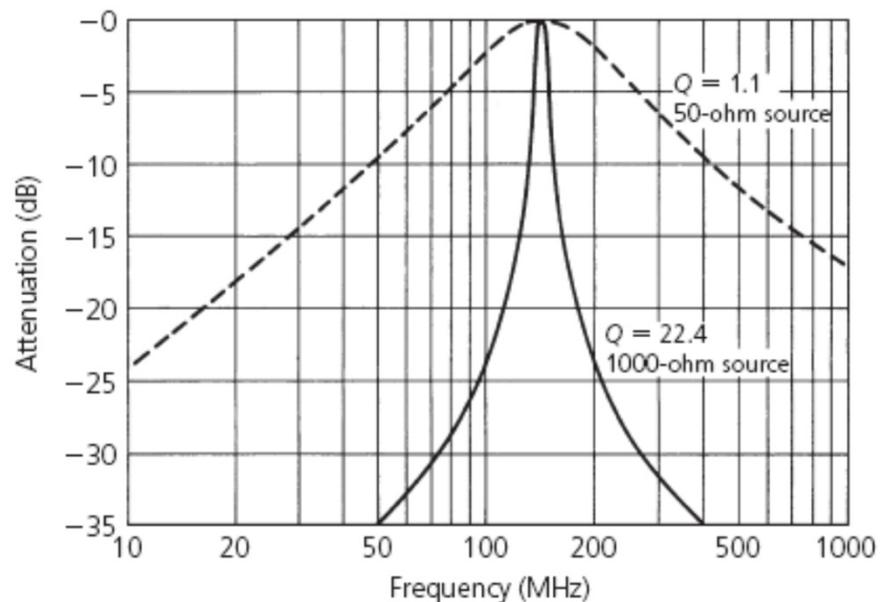
- **Filtros**

- Passivos
- Projeto Butterworth
- Projeto Chebyshev
- Projeto Bessel
- Transformação passa-alta
- Transformação passa-banda
- Transformação rejeita-banda

- **Referências para estudo**



- **Teste I.A:** substituir R_S por 1k ohm (sem inclusão R_L): observe o aumento de Q!





Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 2:
Circuitos ressonantes
e filtros

• Circuitos ressonantes

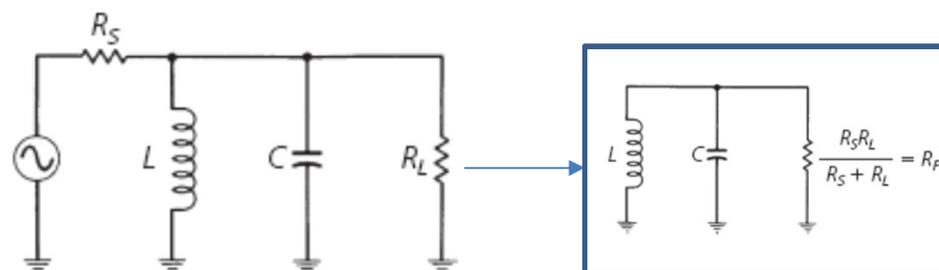
- Definições
- Sintonizador LC
- Q circuito sintonizador
 - Dependência R_s
 - Dependência R_L
 - Dependência Q_{compo}
- Perdas inserção
- Acopla. Circ. Ressonantes
- Transf. de impedância
- Resumo fórmulas

• Filtros

- Passivos
- Projeto Butterworth
- Projeto Chebyshev
- Projeto Bessel
- Transformação passa-alta
- Transformação passa-banda
- Transformação rejeita-banda

• Referências para estudo

– **Teste I.B:** incluir carga R_L : decrementa Q!



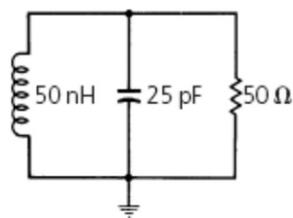
• Neste caso temos: $Q = \frac{R_P}{X_P}$

- R_p = resistência paralela equivalente entre R_s e R_L
- X_p = reatância indutiva ou capacitiva (são iguais na ressonância)

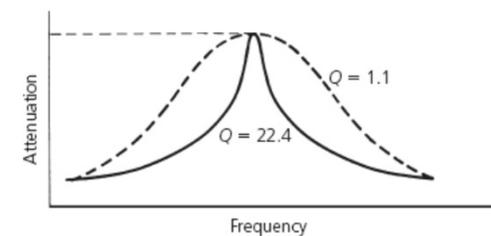
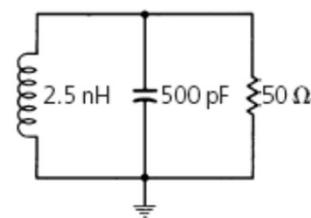
– Como melhorar Q?

- Selecionar bons valores de R_s e R_L
- Selecionar componentes de L e C

$Q = 1.1, f = 142.35 \text{ MHz}$



$Q = 22.4, f = 142.35 \text{ MHz}$





Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 2: Circuitos ressonantes e filtros

- **Circuitos ressonantes**
 - Definições
 - Sintonizador LC
 - Q circuito sintonizador
 - Dependência R_s
 - Dependência RL
 - Dependência Q_{comp}
 - Perdas inserção
 - Acopl. Circ. Ressonantes
 - Transf. de impedância
 - Resumo fórmulas
- **Filtros**
 - Passivos
 - Projeto Butterworth
 - Projeto Chebyshev
 - Projeto Bessel
 - Transformação passa-alta
 - Transformação passa-banda
 - Transformação rejeita-banda
- **Referências para estudo**

Exemplo 1: projete um circuito sintonizador para operar entre uma resistência de fonte de 150 ohms e uma carga de 1k ohms. Deseja-se sintonizar a frequência de 50MHz com uma largura de faixa de 2,5MHz.



Perdas inserção

Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 2: Circuitos ressonantes e filtros

• Circuitos ressonantes

- Definições
- Sintonizador LC
- Q circuito sintonizador
 - Dependência R_s
 - Dependência R_L
 - Dependência Q_{compo}

– Perdas inserção

- Acopl. Circ. Ressonantes
- Transf. de impedância
- Resumo fórmulas

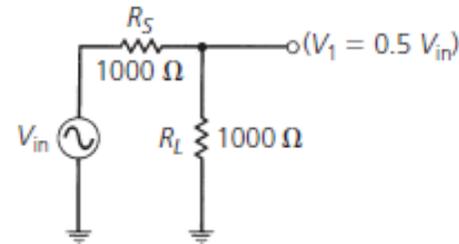
• Filtros

- Passivos
- Projeto Butterworth
- Projeto Chebyshev
- Projeto Bessel
- Transformação passa-alta
- Transformação passa-banda
- Transformação rejeita-banda

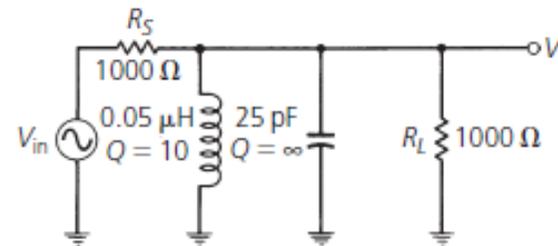
• Referências para estudo

- Circuito ressonante promove perda de ganho

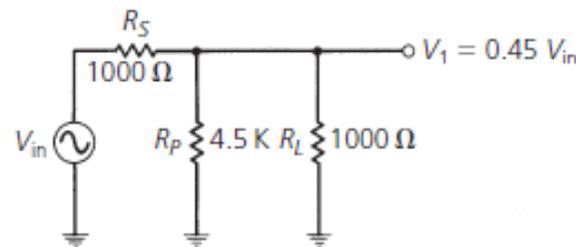
Circuito sem sintonizador: 50% de V_{in}



Inserção de circuito sintonizador entre gerador e carga efetiva



Circuito com sintonizador: 45% de V_{in}
(perda de 5% a mais de V_{in} em relação ao cenário sem circuito sintonizador)



$$Perda_{db} = 20 \log_{10} \left(\frac{0.45 V_{in}}{0.5 V_{in}} \right) = -0.9 \text{ dB}$$



Acoplamento de circuitos ressonantes

Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 2:
Circuitos ressonantes
e filtros

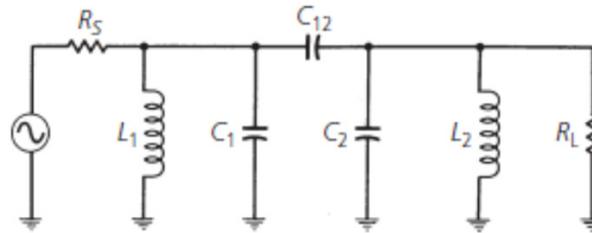
- Circuitos ressonantes
 - Definições
 - Sintonizador LC
 - Q circuito sintonizador
 - Dependência R_s
 - Dependência R_L
 - Dependência Q_{compo}
 - Perdas inserção
 - Acopl. Circ. Ressonantes
 - Transf. de impedância
 - Resumo fórmulas

- Filtros
 - Passivos
 - Projeto Butterworth
 - Projeto Chebyshev
 - Projeto Bessel
 - Transformação passa-alta
 - Transformação passa-banda
 - Transformação rejeita-banda

• Referências para estudo

• Nem sempre um simples estágio resolve

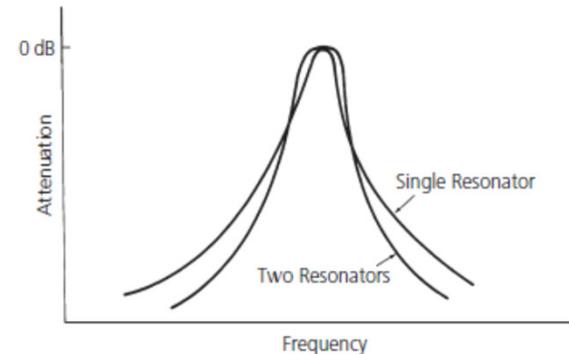
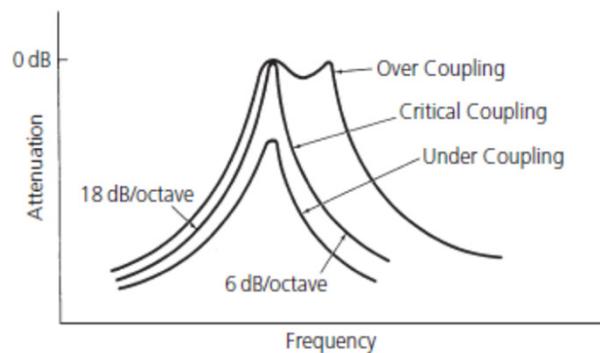
- Uso: decaimento mais rápido
- Q do circuito passa a ser 0,707 do Q de um circuito ressonante



• Acoplamento capacitivo

$$C_{12} = \frac{C}{Q}$$

- C = capacitância do circuito de ressonância
- Q = Q do circ. de um ressonador simples





Cir. Eletrônica Aplica.

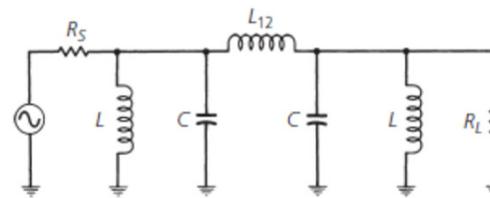
Capítulo 2:
Circuitos ressonantes
e filtros

- Circuitos ressonantes
 - Definições
 - Sintonizador LC
 - Q circuito sintonizador
 - Dependência R_s
 - Dependência R_L
 - Dependência Q_{compo}
 - Perdas inserção
- Acopla. Circ. Ressonantes
- Transf. de impedância
- Resumo fórmulas
- Filtros
 - Passivos
 - Projeto Butterworth
 - Projeto Chebyshev
 - Projeto Bessel
 - Transformação passa-alta
 - Transformação passa-banda
 - Transformação rejeita-banda
- Referências para estudo

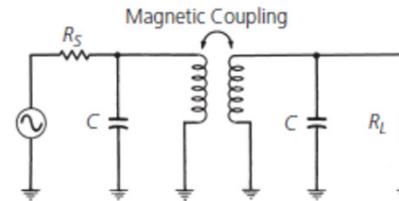
• Acoplamento indutivo

$$L_{12} = QL$$

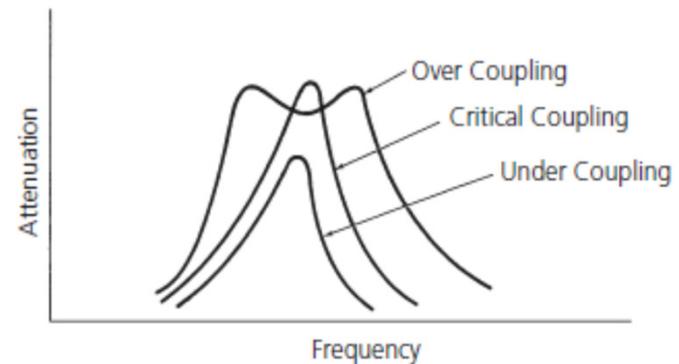
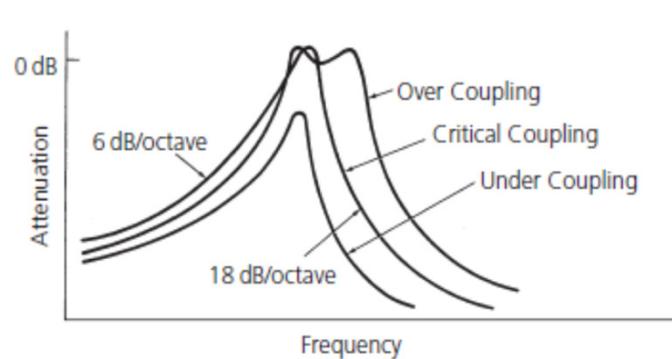
- L = indutância do circuito de ressonância
- Q = Q do circ. de um ressonador simples



(A) Series inductor



(B) Transformer





Transformações de impedâncias

Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 2:

Circuitos ressonantes e filtros

• Circuitos ressonantes

- Definições
- Sintonizador LC
- Q circuito sintonizador
 - Dependência R_s
 - Dependência R_L
 - Dependência Q_{compo}
- Perdas inserção
- Acopl. Circ. Ressonantes
- Transf. de impedância
- Resumo fórmulas

• Filtros

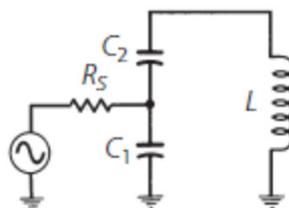
- Passivos
- Projeto Butterworth
- Projeto Chebyshev
- Projeto Bessel
- Transformação passa-alta
- Transformação passa-banda
- Transformação rejeita-banda

• Referências para estudo

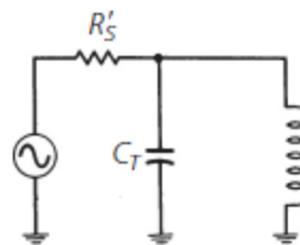
- Alguns casos é necessário dispor de artifícios para aumentar ou diminuir cargas (R_s ou R_L).
 - Solução: usar configurações de capacitores ou indutores específicas

• Caso 1: aumento de R_s

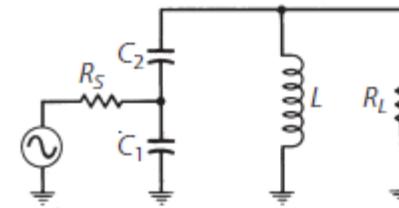
- Opção capacitiva:



Circuito original



Circuito equivalente

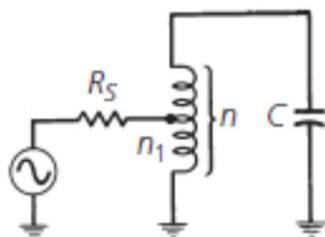


Circuito final com carga

$$R'_s = R_s \left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right)^2 \quad \text{sendo que} \quad C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

- Opção indutiva :

- auto-transformador ou indutor com derivação



$$R'_s = R_s \left(\frac{n}{n_1}\right)^2$$



Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 2: Circuitos ressonantes e filtros

• Circuitos ressonantes

- Definições
- Sintonizador LC
- Q circuito sintonizador
 - Dependência R_s
 - Dependência R_L
 - Dependência Q_{compo}
- Perdas inserção
- Acopl. Circ. Ressonantes
- Transf. de impedância
- Resumo fórmulas

• Filtros

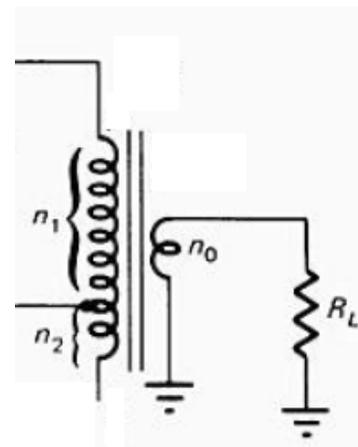
- Passivos
- Projeto Butterworth
- Projeto Chebyshev
- Projeto Bessel
- Transformação passa-alta
- Transformação passa-banda
- Transformação rejeita-banda

• Referências para estudo

Exemplo 5: projete um circuito ressonante com fator $Q=10$ e frequência central de 100MHz que deve operar com um sistema cujo $R_s=50$ ohm e $R_L= 2K$ ohm. Assuma que o Q do indutor é 100 (em 100Mhz).

- **Caso 2:** aumento/diminuição de R_L
 - Relação impedância:

$$R'_L = R_L \left(\frac{n_p}{n_s} \right)^2 = R_L \left(\frac{n_1+n_2}{n_s} \right)^2$$



Resumo fórmulas circuitos ressonantes

Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 2: Circuitos ressonantes e filtros

• Circuitos ressonantes

- Definições
- Sintonizador LC
- Q circuito sintonizador
 - Dependência R_s
 - Dependência RL
 - Dependência Q_{compo}
- Perdas inserção
- Acopla. Circ. Ressonantes
- Transf. de impedância
- Resumo fórmulas

• Filtros

- Passivos
- Projeto Butterworth
- Projeto Chebyshev
- Projeto Bessel
- Transformação passa-alta
- Transformação passa-banda
- Transformação rejeita-banda

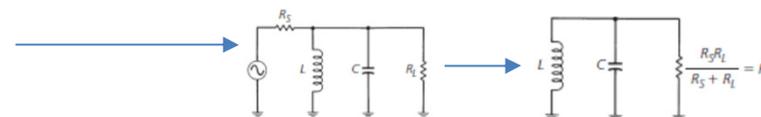
• Referências para estudo

• Q circuito geral: $Q_{\text{circuito}} = \frac{f_{\text{central}}}{f_2 - f_1}$

• $f_{\text{resson}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

• Q circuito com R_s e RL: $Q_{\text{circuito}} = \frac{R_p}{X_p}$

– Onde: X_p = reatância capacitiva ou indutiva na ressonância



• Acoplamento entre estágios

$$C_{12} = \frac{C}{Q}$$

$$L_{12} = QL$$

Onde: C ou L = capacitância ou indutância do circuito de ressonância; Q = Q do circ. De um ressonador simples