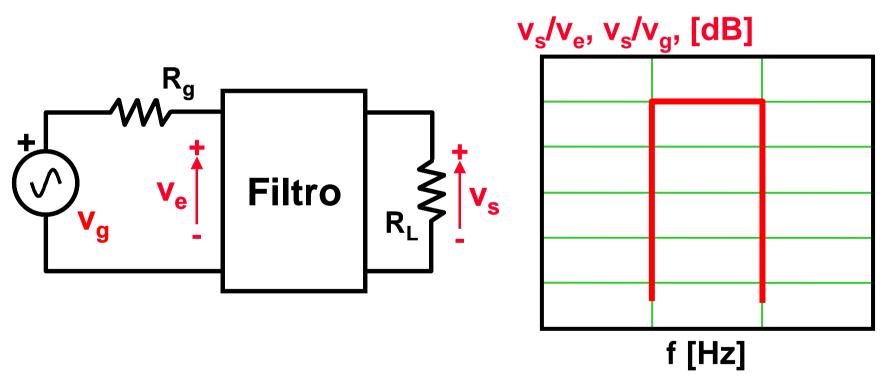
Cristais e Filtros Piezelétricos

Gil Pinheiro
UERJ/FEN/DETEL

Filtros passa-banda baseados em ressonadores piezelétricos

Objetivo:

Obter uma resposta em freqüência de filtro passa-banda ideal



Filtro passa-banda do tipo RLC série

Notação:

$$\omega_{\rm r} = 1/({\rm LC})^{1/2}$$

$$X_L(\omega) = j\omega \cdot L$$

$$X_{C}(\omega) = -j/(\omega \cdot C)$$

$$X_{Lr} = j\omega_r \cdot L$$

$$X_{Cr} = -j/(\omega_r - C) = -X_{Lr}$$

$$Q_F = L \cdot \omega_r / R_p$$

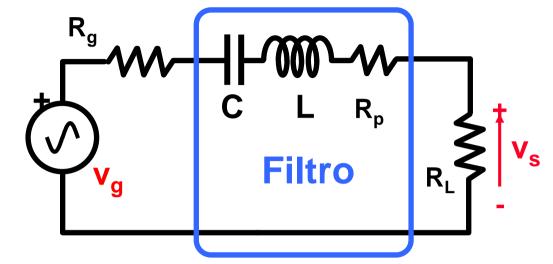
$$G_V = V_s/V_g$$

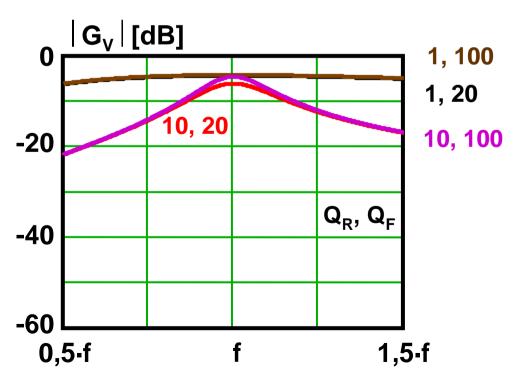
Suponhamos:

$$R_L = R_g = R$$

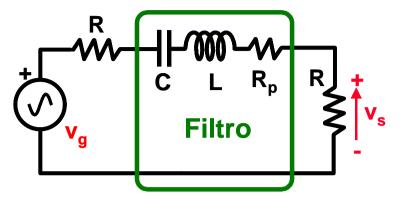
Definimos:

$$Q_R = L \cdot \omega_r / R$$





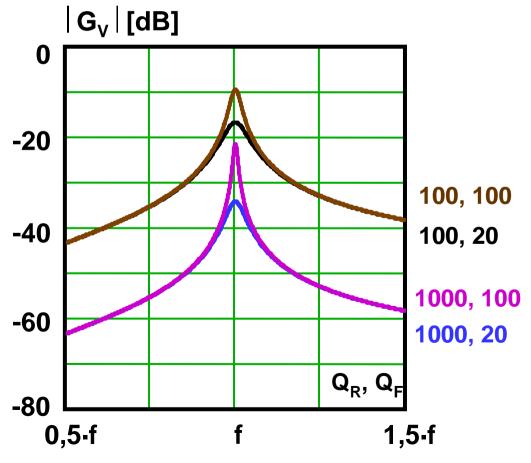
Filtro passa-banda do tipo RLC série



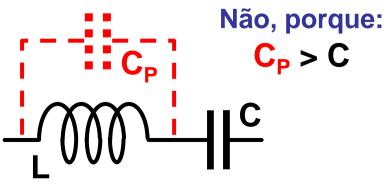
$$Q_F = L \cdot \omega_r / R_p$$
 $Q_R = L \cdot \omega_r / R$ $G_V = \frac{v_s}{v_g}$

É fisicamente possível ter valores de $Q_R = 1000$?

Exemplo: $R = 100 \Omega$, $f_r = 10 MHz$



Q_R	1	10	100	1000
L	1,59	15,9	159	1,5
	μH	μΗ	μΗ	mH
С	159	15,9	1,59	0,15
	pF	pF	pF	pF



Efeito Piezelétrico

- Alguns materiais cristalinos tais como o quartzo e a turmalina, além de alguns tipos de cerâmicas, apresentam o efeito piezelétrico (piezo = esforço mecânico)
- Numa substância cristalina em repouso a carga elétrica medida em suas extremidades é nula. A deformação da matriz atômica do material acarreta um desequilíbrio de cargas elétricas nessa estrutura, resultando na geração de cargas elétricas mensuráveis na superfície do material
- Com esse efeito, ocorre a geração de cargas elétricas no material quando é submetido a uma deformação, decorrente da aplicação de uma força externa (daí o nome do efeito) ou de um movimento oscilatório do cristal
- Eletrodos (placas) especiais são colocados nas faces do cristal, de modo a permitir a sua deformação e a concentrar as cargas elétricas do cristal quando o mesmo é deformado
- Sendo um efeito reversível, quando o material é submetido a um campo elétrico ocorre uma deformação. Como é um fenômeno eletro-mecânico, o grau da deformação do cristal depende da rigidez do material e da diferença de potencial aplicado

Construção de um cristal piezelétrico

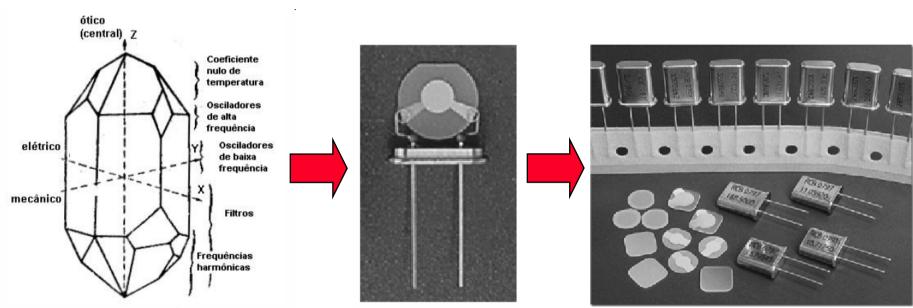
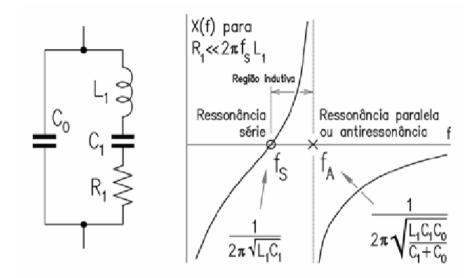
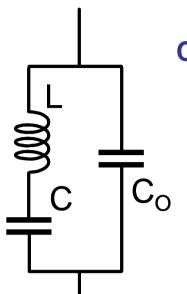


Figura 1 - Eixos de referência e zonas de corte de um cristal

Ressonância Série e Paralela



- Um cristal piezelétrico apresenta duas frequências de ressonância (série e paralela)
- É possível definir um modelo elétrico para o cristal, usando uma indutância, capacitâncias série e paralelo e resistência de perdas
- A capacitância C_o é devido à montagem do conjunto cristal e eletrodos.
 Sendo também chamada de capacitância parasita, pois não está associada às características mocionais do cristal
- Os elementos R_1 , C_1 e L_1 são as componentes mocionais do cristal
- O material se comporta como indutor numa faixa de frequências muito estreita (entre f_s e f_a). Essa característica é usada em algumas configuração de osciladores a cristal.



Calculando a impedância do modelo do cristal

$$Z(s) = \frac{\frac{1}{C_{O} \cdot s} (L \cdot s + \frac{1}{C \cdot s})}{\frac{1}{C_{O} \cdot s} + L \cdot s + \frac{1}{C \cdot s}} = \frac{1}{C_{P} \cdot s} \cdot \frac{(L \cdot C \cdot s^{2} + 1)}{(L \cdot C_{S} \cdot s^{2} + 1)}$$

$$sendo: \quad C_{S} = \frac{C \cdot C_{O}}{C + C_{O}} \quad C_{P} = C + C_{O}$$

$$C_{S} = \frac{C \cdot C_{O}}{C + C_{O}}$$

$$C_P = C + C_O$$

Análise CA: $s = j\omega$

$$s = j\omega$$

$$Z(j\omega) = \frac{-j}{C_P \cdot \omega} \cdot \frac{(1 - L \cdot C \cdot \omega^2)}{(1 - L \cdot C_S \cdot \omega^2)} = \frac{-j(\omega_1/\omega_2)^2}{C_O \cdot \omega} \cdot \frac{(1 - (\omega/\omega_1)^2)}{(1 - (\omega/\omega_2)^2)}$$

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

sendo:
$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$
 $\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_S}}$

Cristais piezelétricos

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_S}}$$

Como $C_S < C$, então: $\omega_2 > \omega_1$

• Se $\omega < \omega_1$:

 $Z(j\omega) = -j$ -(quantidade positiva) < 0, cristal possui comportamento capacitivo

• Se $\omega_1 < \omega < \omega_2$:

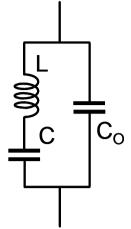
 $Z(j\omega) = -j$ -(quantidade negativa) > 0, cristal possui comportamento indutivo

• Se $\omega_2 < \omega$:

 $Z(j\omega) = -j$ -(quantidade positiva) < 0, cristal possui comportamento capacitivo

Cristal opera no modo indutivo apenas em: $\omega_1 < \omega < \omega_2$





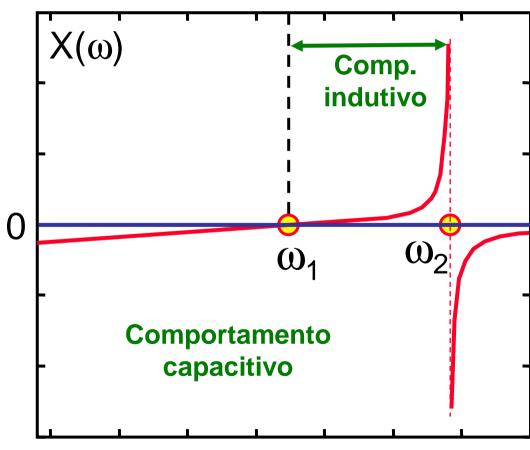
Resumo:
$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$
 $C_S = \frac{C \cdot C_O}{C + C_O}$ $\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_S}}$

$$C_{S} = \frac{C \cdot C_{O}}{C + C_{O}}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_S}}$$

$$Z(j\omega) = jX(\omega)$$

$$Z(j\omega) = jX(\omega) \qquad X(\omega) = \frac{-(\omega_1/\omega_2)^2}{C_0 \cdot \omega} \cdot \frac{(1 - (\omega/\omega_1)^2)}{(1 - (\omega/\omega_2)^2)}$$



Dados de Fabricante de Cristais Piezelétricos

HC-49/U HC-50/U Crystal



Specifications:

•	
Frequency Range	2.000 - 150.000 MHz
Frequency Tol. at 25°C.	30PPM - Standard 10PPM to 100PPM
Temperature Range (Operating)	-20 to + 70 CStandard
Frequency Stability	10PPM to 100PPM
Load Capacitance	10pF to 100pF or Series Resonant
Shunt Capacitance	7pF Max.
Resistance	See Below
Aging	+-5PPM/year Max.
Drive Level	1.0mW Max.

HC-49/U HC-50/U

BOMAR .530/13.5

HC-49/U2 .452/11.5

Equivalent Series Resistance (ESR)

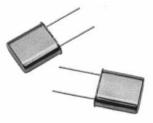
Frequency	Mode	HC-49/U1 HC-50/U1	HC-49/U2 HC-50/U2
2.000 - 2.999	Fundamental	500 ohms	110 00/02
3.000 - 3.199	Fundamental	300	
3.200 - 3.999	Fundamental	200	
4.000 - 4.499	Fundamental	100	
4.500 - 4.999	Fundamental	75	
5.000 - 6.999	Fundamental	70	
7.000 - 9.999	Fundamental	50	
10.000 - 25.000	Fundamental	30	40 ohms
20.000 - 29.999	Third Overtone	50	60
30.000 - 75.000	Third Overtone	40	60
60.000 - 125.000	Fifth Overtone	70	80
110.000 - 150.000	Seventh Overtone	120	120

Holder	Н
HC-50/U1	.530/13.5
HC-50/U2	.452/11.5

BOMAR

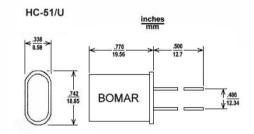
To Order ~ Phone: 1-800-526-3935 ~ Fax: 1-800-777-2197 www.bomarcrystal.com ~ e-mail: sales@bomarcrystal.com

HC-51/U Crystal



Specifications:

Frequency Range	1.000 - 10.000 MHz	
Freq. Tolerance	30PPM - Standard	
@ 25 C.	10PPM to 100PPM	
Temperature Range (Operating)	-20 to +70 C Standard	
Frequency Stability	10PPM to 100PPM	
Load Capacitance	10pF to 100pF or Series Resonant	
Shunt Capacitance	7pF Max.	
Resistance	See Below	
Aging	+-5PPM/year Max.	
Drive Level	1.0mW Max.	



1.000 - 1.499	Frequency	Mode	HC-51/U
2.000 - 2.999 Fundamental 300 3.000 - 3.999 Fundamental 150 4.000 - 5.999 Fundamental 75	1.000 - 1.499		500 ohms
3.000 - 3.999 Fundamental 150 4.000 - 5.999 Fundamental 75			
4.000 - 5.999 Fundamental 75	2.000 - 2.999		
6.000 - 10.000 Fundamental 60			
	6.000 - 10.000	Fundamental	60
	~ Fax: 1	-800-77	7-2197

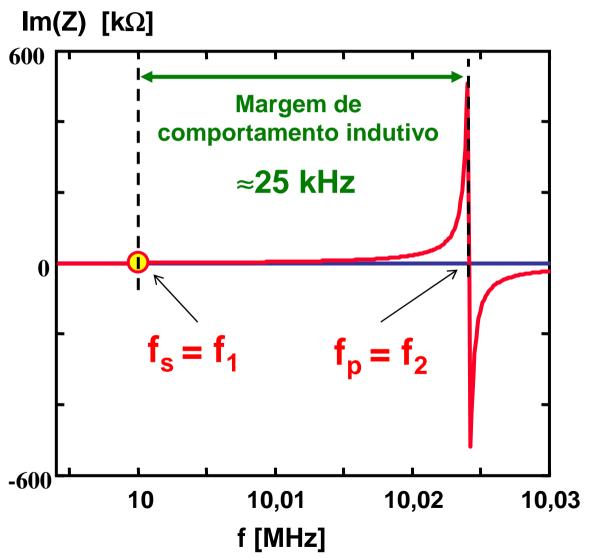
To Order ~ Phone: 1-800-526-3935 ~ Fax: 1-800-777-2197 www.bomarcrystal.com ~ e-mail: sales@bomarcrystal.com

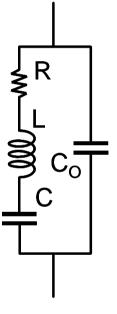
Em outra escala

Exemplo: cristal de μP de 10 MHz

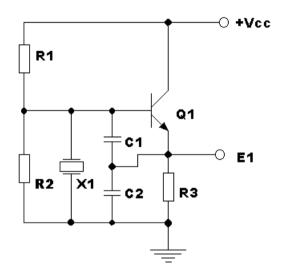
$$R = 20 \Omega$$
 L = 15 mH C = 0,017 pF

$$C_0 = 3.5 pF$$





Oscilador a Cristal



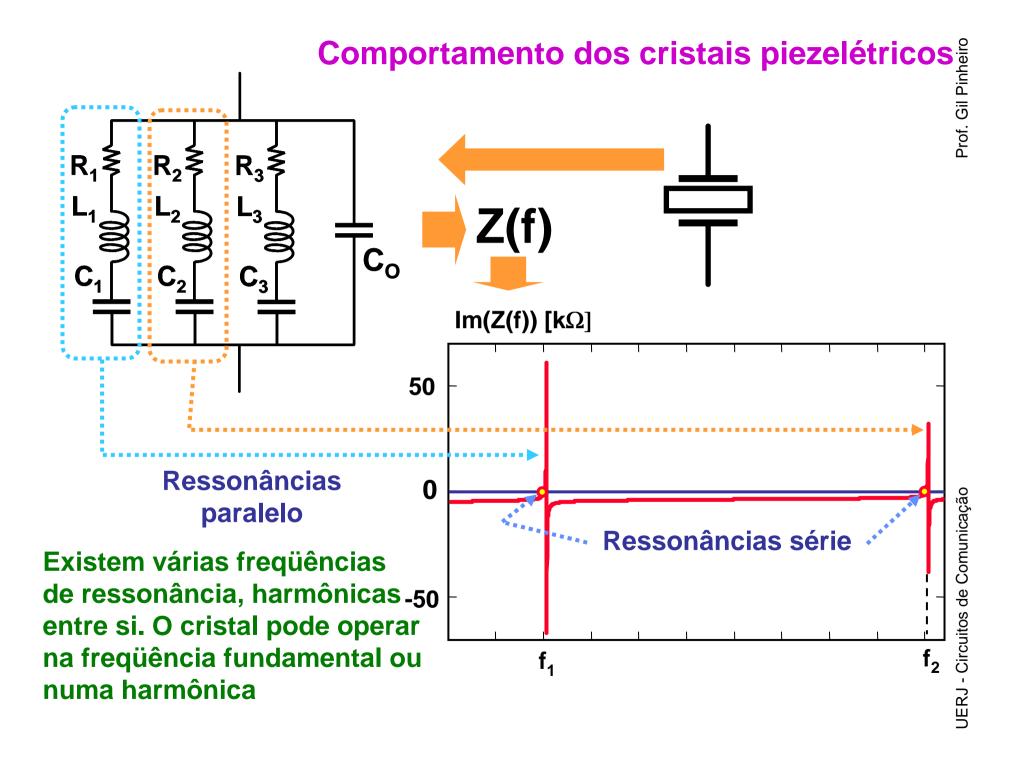
Oscilador Colpitts - Aproveita o comportamento indutivo do cristal, numa estreita faixa de freqüência (entre f_s e f_p), resultando num oscilador de freqüência bastante estável

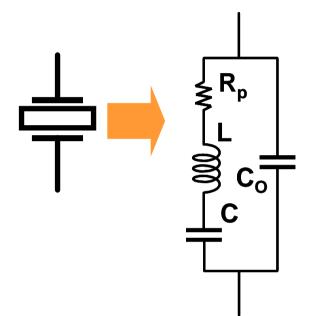
Ressonância Série e Paralela

- Num cristal piezelétrico, a capacitância Co é centenas de vezes maior que C1
- Então, pode-se demonstrar que: $\frac{f_p}{f} = \sqrt{\frac{C_1 + C_o}{C}}$

• Sendo:
$$\frac{f_s + \Delta f}{f_s} = \sqrt{\frac{C_1 + C_o}{C_o}}$$

• Logo:
$$\Delta f = f_s \frac{C_1}{2C_o}$$



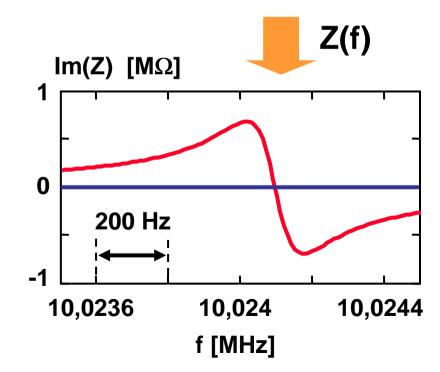


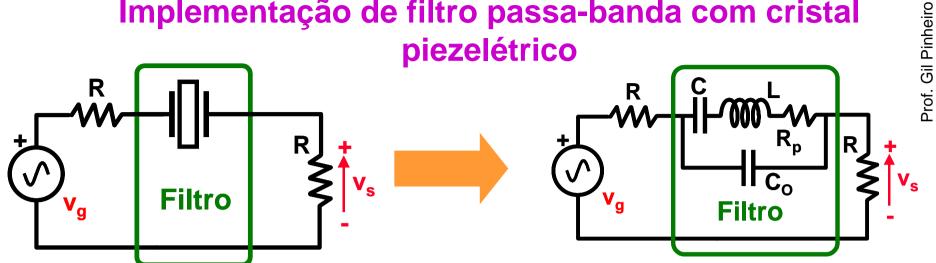
Exemplo: cristal de µP de 10 MHz

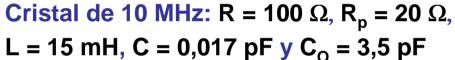
$$R_p$$
 = 20 Ω , L = 15 mH, C = 0,017 pF e C_O = 3,5 pF

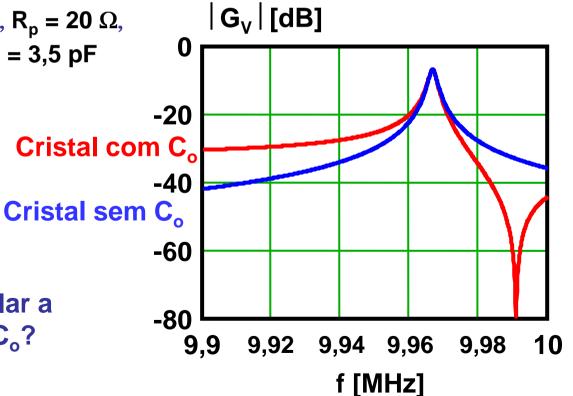
Portanto:

 $Q_F = L \cdot \omega_r / R_p = 47.237 \implies \acute{E}$ um valor altíssimo, não alcançável com componentes discretos



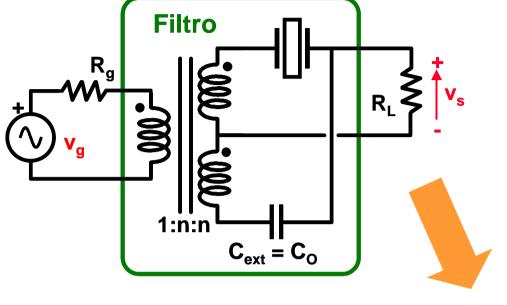




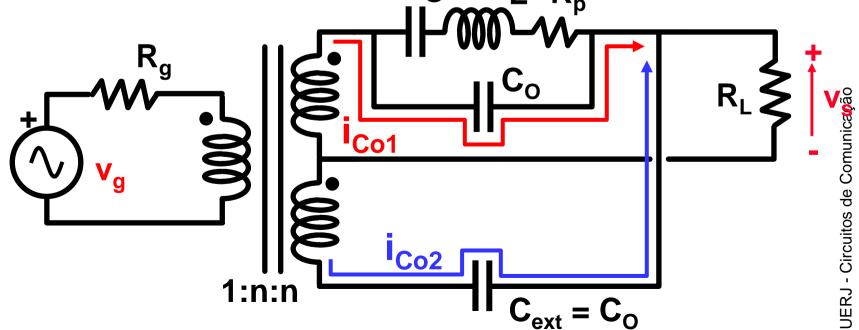


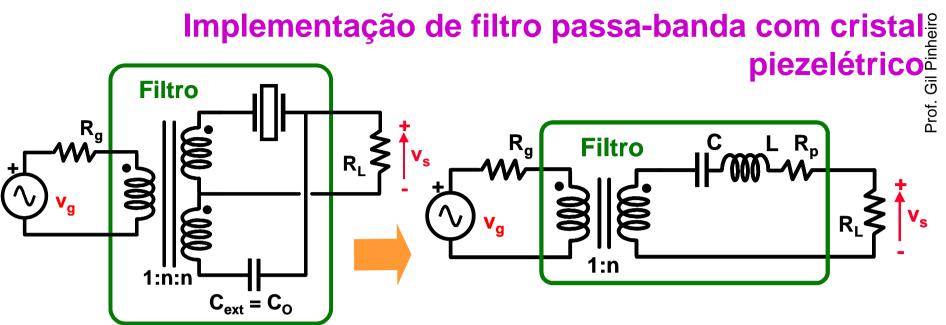
Como podemos cancelar a capacitância parasita C_o?

Implementação de filtro passa-banda com cristal piezelétrico piezelétrico como C_o e C_{ext} = C_o estão

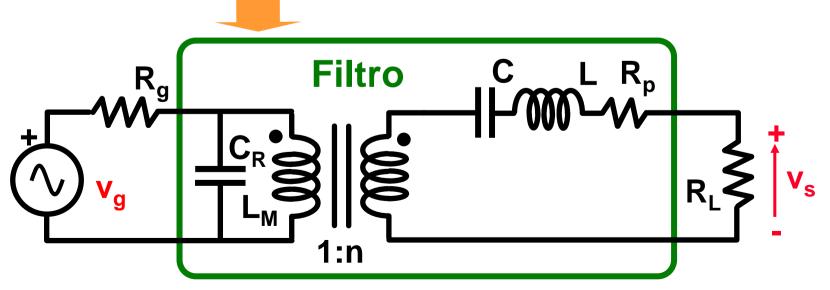


Como C_o e $C_{ext} = C_o$ estão submetidas a tensões de igual magnitude e de sinal contrário:





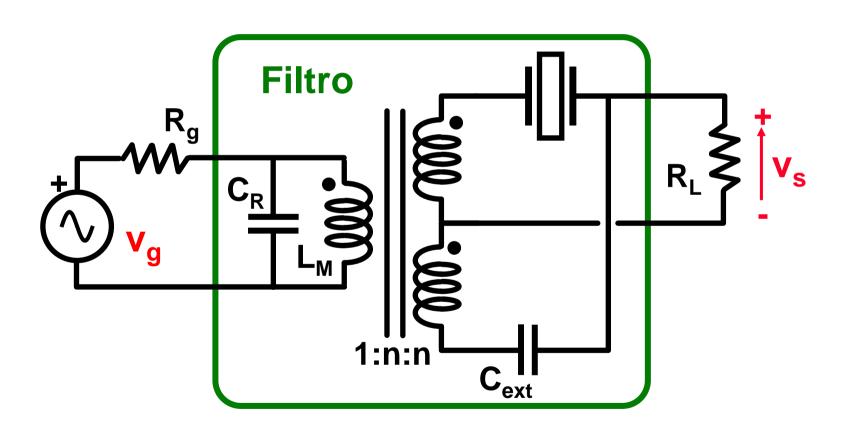
Pode-se cancelar a influência da indutância magnetizante do transformador por ressonância



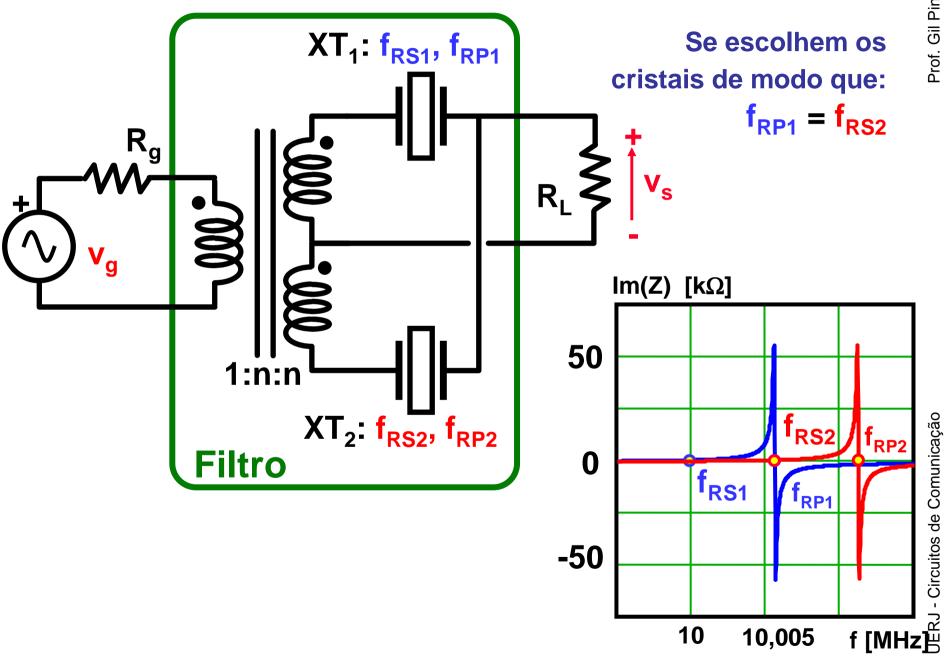
UERJ - Circuitos de Comunicação

Implementação de filtro passa-banda com cristal piezelétrico

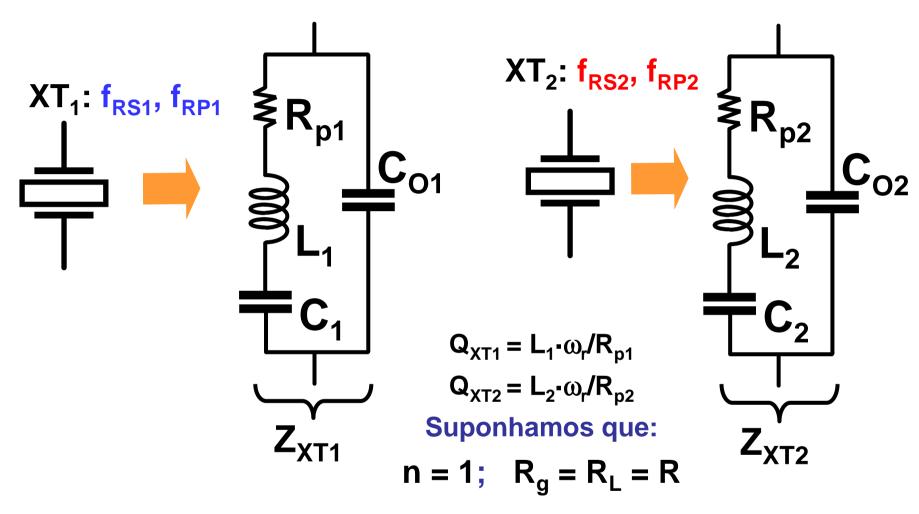
Circuito final



Filtro tipo cela com dois cristais



Filtro tipo cela com dois cristais



$$G_{V} = \frac{V_{s}}{V_{g}} = \frac{R(Z_{XT2} - Z_{XT1})}{4 \cdot R^{2} + Z_{XT2} \cdot Z_{XT1} + 2 \cdot R \cdot (Z_{XT2} + Z_{XT1})}$$

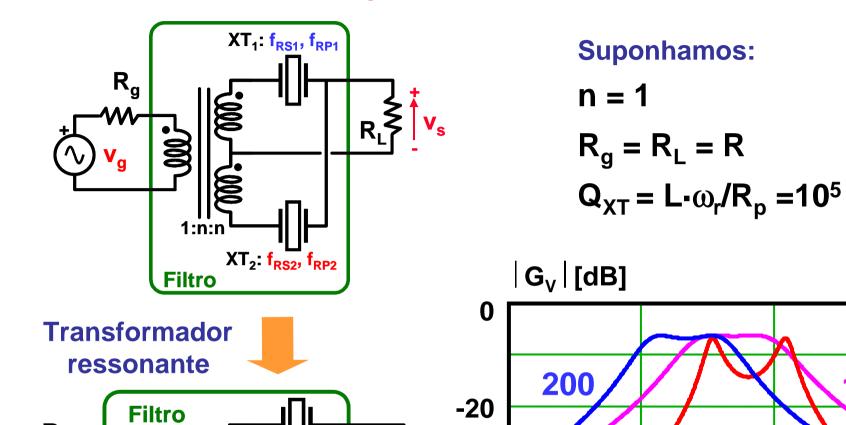
Filtro tipo cela com dois cristais

-40

-60

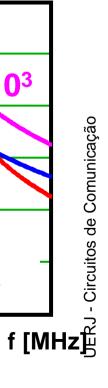
5-10³

10



XT₁

 XT_2

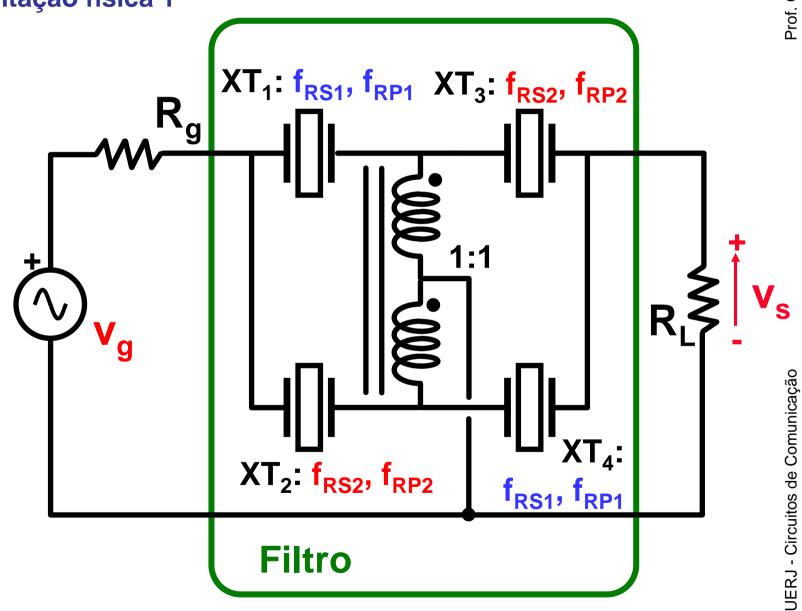


 $Q_{filtro} = L \cdot \omega_r / R$

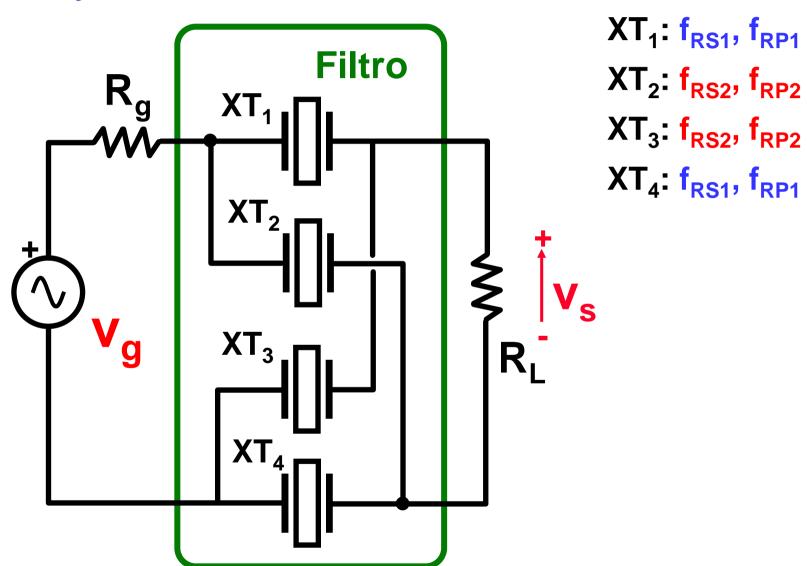
10,010

Filtro tipo cela com quatro cristais

Implementação física 1



Implementação física 2



$$XT_1 = XT_4$$
; $XT_2 = XT_3$; $R_g = R_L = R$

Definimos:

$$Y_{1} = \frac{4 \cdot R \cdot Z_{XT2} + 2 \cdot Z_{XT2} \cdot Z_{XT1} + (2 \cdot R + Z_{XT2}) \cdot (Z_{XT2} + Z_{XT1})}{R \cdot (Z_{XT2} - Z_{XT1})^{2}}$$

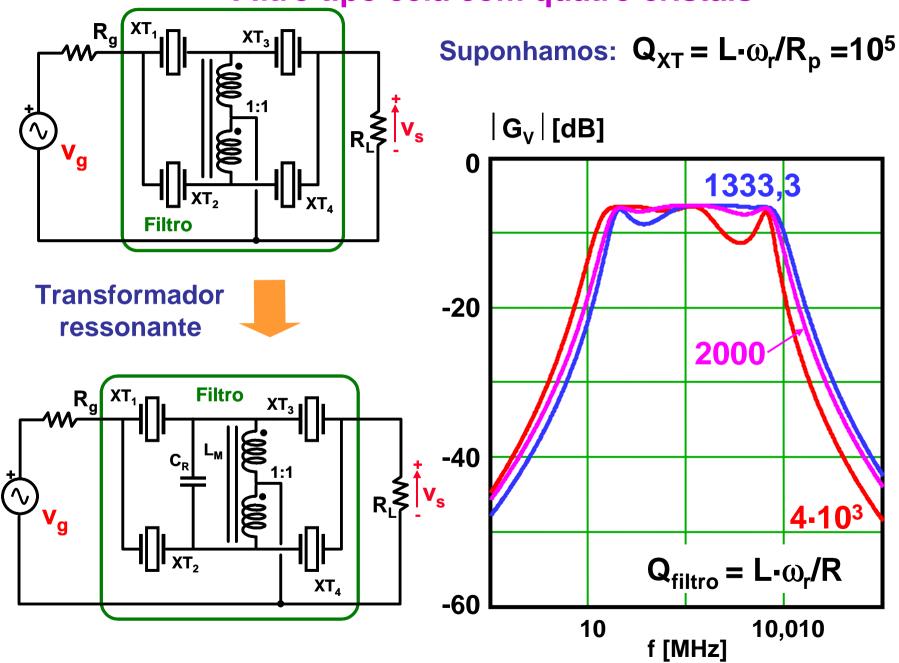
$$4 \cdot R \cdot Z_{XT2} + 2 \cdot Z_{XT2} + (2 \cdot R + Z_{XT1})^{2}$$

$$Y_2 = \frac{4 \cdot R \cdot Z_{XT1} + 2 \cdot Z_{XT2} \cdot Z_{XT1} + (2 \cdot R + Z_{XT1}) \cdot (Z_{XT2} + Z_{XT1})}{R \cdot (Z_{XT2} - Z_{XT1})^2}$$

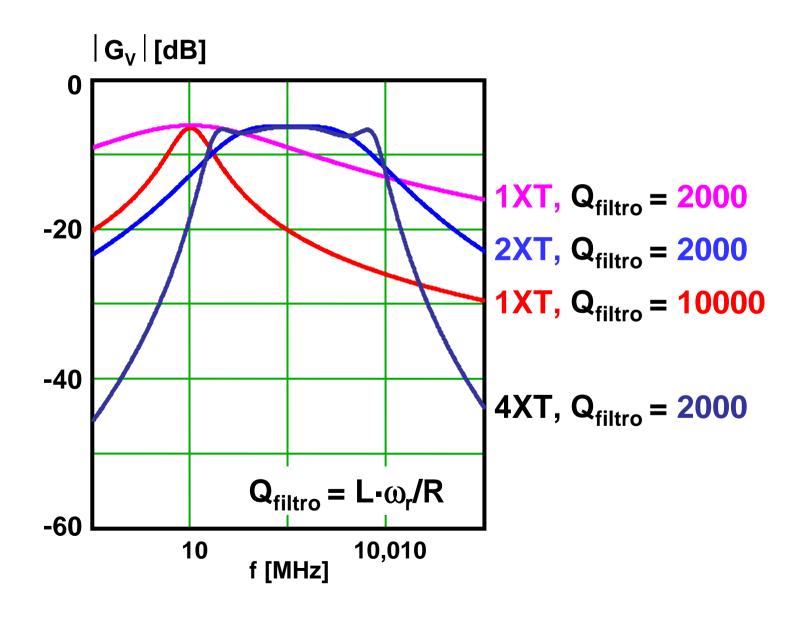
$$Y_3 = \frac{2 \cdot R + Z_{XT1}}{R \cdot (Z_{XT2} - Z_{XT1})}$$
 Então:

$$G_{V} = V_{s}/V_{g} = \frac{1}{R \cdot (Y_{1} + Y_{2}) + Z_{XT1} \cdot Y_{1} + Z_{XT3} \cdot Y_{3} + 1}$$

Filtro tipo cela com quatro cristais



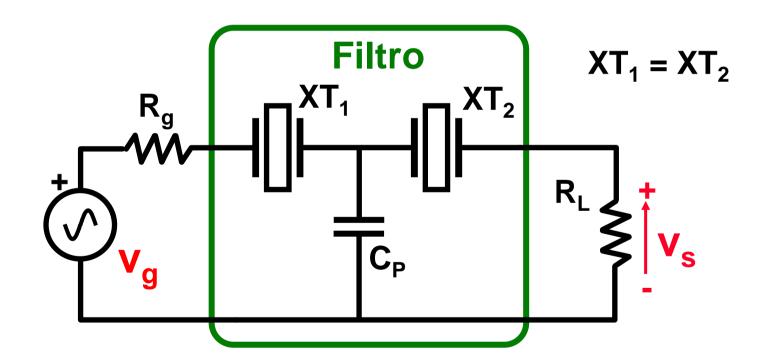
Comparação de filtros com um, dois e quatro cristais



Filtro tipo escada com dois cristais

Inconveniente dos filtros tipo cela: os cristais tem que ser de freqüências diferentes

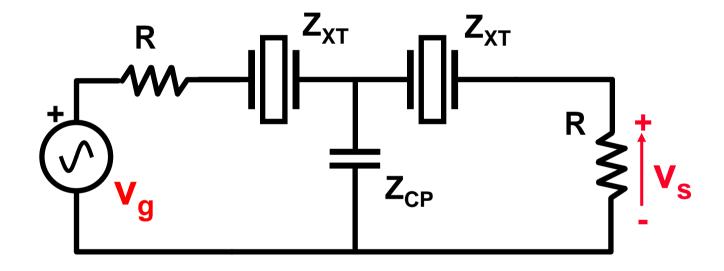
Solução: filtros em escada



Filtro tipo escada com dois cristais

Função de transferência $G_V = V_s/V_g$ (não demostrada)

Suponhamos que: $R_g = R_L = R$



$$G_V = V_s/V_g = \frac{R \cdot Z_{CP}}{(R + Z_{XT}) \cdot (R + Z_{XT} + 2 \cdot Z_{CP})}$$

Filtro tipo escada com dois cristais

Definimos:

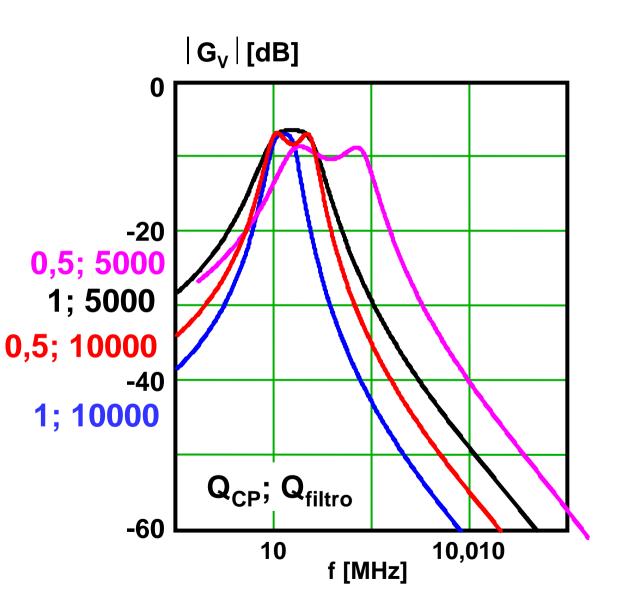
$$Q_{XT} = L \cdot \omega_r / R_p;$$

$$Q_{\text{filtro}} = L \cdot \omega_{\text{r}}/R;$$

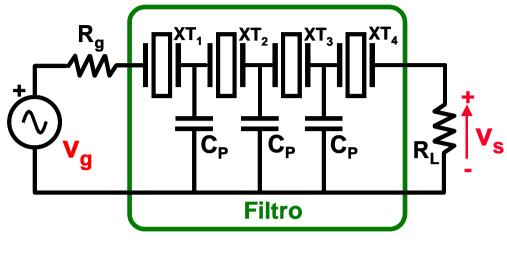
$$Q_{CP} = R \cdot C_P \cdot \omega_r$$

Suponhamos:

$$Q_{XT} = 10^5$$



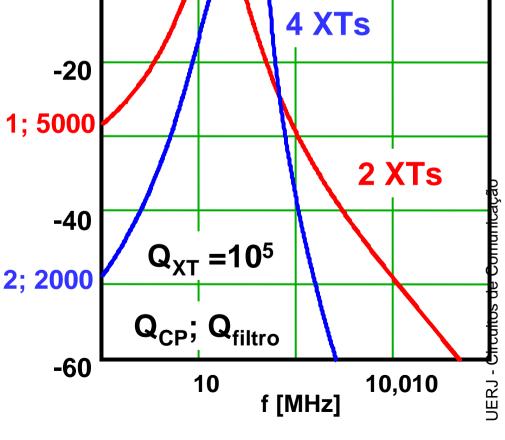
G_v [dB]



• Os filtros tipo escada são mais assimétricos.

• A assimetria diminui ao aumentar a quantidade de cristais

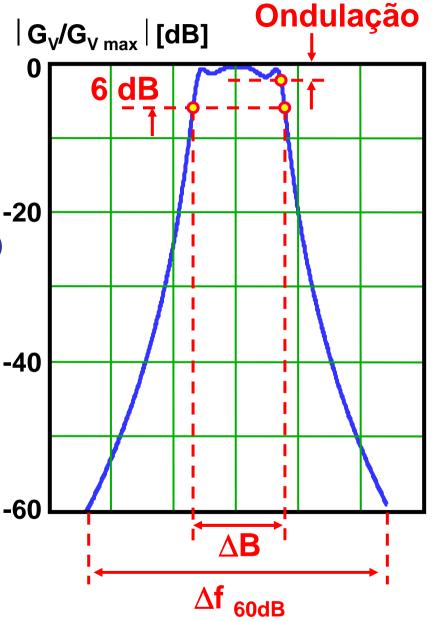
 Como nos filtros RLC em cascata, a seletividade aumenta com a quantidade de cristais



Parâmetros de filtros a cristal

- Ondulação
- Largura de banda (∆B)
- Freqüência central
- Perdas de inserção
- Impedância de terminação (R e C)
- Atenuação final
- Fator de forma a 60 ou a 80 dB.

Fator de forma a 60 dB = $= \Delta B/\Delta F_{60dB}$



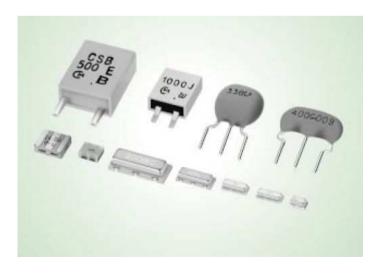
- Os filtros a cristal de quartzo são muito eficazes, mas são caros
- Podem ser usados outros materiais piezelétricos artificiais a custos bem menores
- Materiais alternativos se comportam de maneira similar, porém com características inferiores

Outros tipos de filtros piezelétricos:

- Filtros cerâmicos \Rightarrow f \approx 0,45-10,8 MHz; $Q_{dispositivo} \approx$ 800-2000; $P_{inserç\~ao} \approx$ 3-4dB
- Filtros de ondas acústicas superficiais (Surface Acustic Waves, SAW) \Rightarrow f \approx 20-1000 MHz; f/ Δ B \approx 2-100; Δ B/ Δ F_{60dB} \approx 1:1,5; P_{inserção} \approx 10-30dB

Ressonadores e Filtros Cerâmicos

- Algumas cerâmicas, que são materiais sintéticos obtidos pela mistura e prensagem de algumas substâncias, também apresentam efeito piezelétrico
- Os ressonadores cerâmicos, como os cristais de quartzo, podem ser empregados na construção de osciladores e filtros de alta freqüência. Na foto são mostrados diversos ressonadores (2 terminais) e filtros cerâmicos (3 terminais)



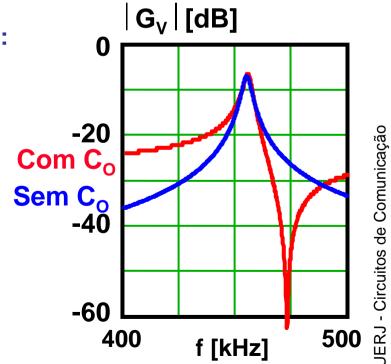
Filtros Cerâmicos

- Os materiais piezelétricos cerâmicos normalmente utilizados são do tipo titanato-zirconato de chumbo ou niobato de sódiopotássio.
- A forma característica é um disco de material cerâmico com eletrodos depositados (metalizados)

 $R_{\alpha} = R_{L} = R = 100 \Omega$

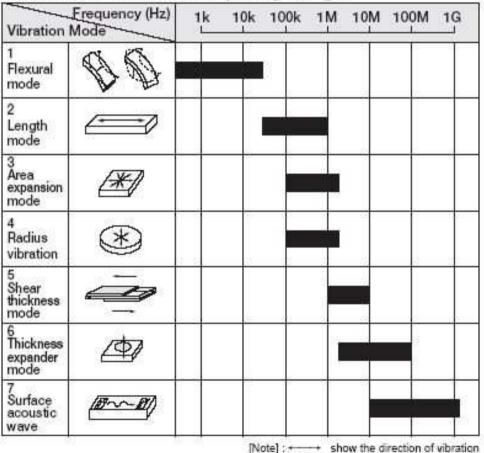
• Exemplo: ressonador cerâmico para amplificador de Frequência Intermediária (FI) de 455 kHz:





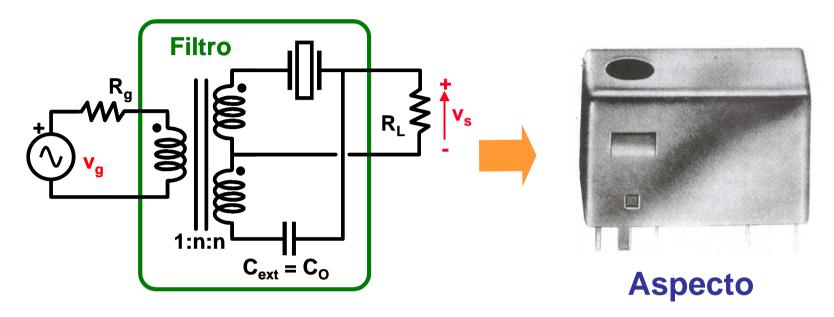
Modos de Vibração de Ressonadores Cerâmicos

■Vibration Mode and Frequency Range

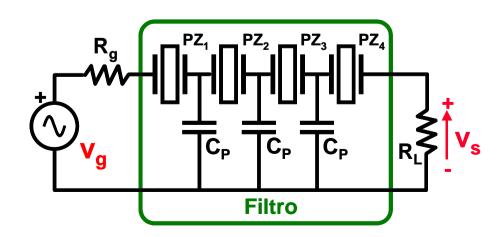


Filtros cerâmicos

Filtro com ressonador cerâmico e circuito ressonante (híbrido):

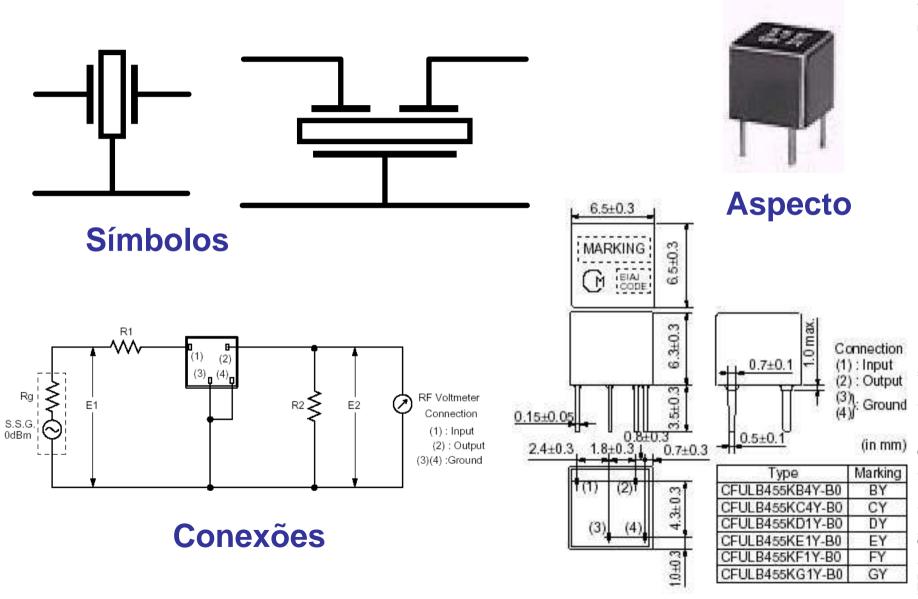


Filtro de vários ressonadores cerâmicos:



Filtros Cerâmicos

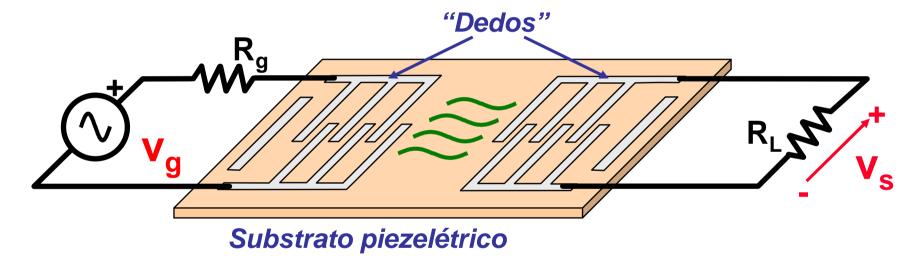
Filtro cerâmico monolítico:



UERJ - Circuitos de Comunicação

Filtros de ondas acústicas superficiais - SAW

- Utilizam lâminas finas de materiais piezelétricos tipo niobato de lítio (LiNbO₃) que atuam como substrato.
- Nas extremidades se depositam os eletrodos de alumínio em forma de "dedos"



- A onda acústica superficial gerada se propaga no substrato, alcançando os "dedos" de saída e gera uma tensão na carga
- A frequência de filtragem depende das dimensões