

# Circuitos Osciladores

**Circuitos de Rádio-Frequência** - 10 de Junho de 2025

Arthur Cadore M. Barcella

# Sumário

Cristais Piezoelétricos .....	3
Modelo Elétrico do Cristal .....	6
Fator Q .....	14
Modos de Operação: Fundamental e Harmônicos .....	17
Circuito Oscilador .....	21

# **Cristais Piezoelétricos**

## Estrutura do Cristal Oscilador

Os cristais osciladores são dispositivos que convertem energia elétrica em energia mecânica e vice-versa.

Esses componentes são projetados a partir de materiais piezoelétricos, como quartzo, que possuem uma estrutura cristalina que permite o efeito piezoelétrico.

O cristal oscilador de quartzo é construído a partir de um cristal de quartzo natural ou sintético, que é cortado em uma forma específica e polarizado através de dois eletrodos, conforme apresentado na ilustração a direita.

Cristal de Quartzo



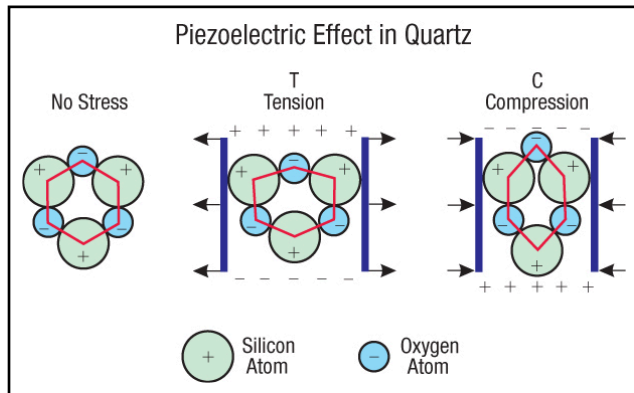
## Efeito Piezoelétrico

O efeito piezoelétrico é a propriedade de certos materiais de gerar uma tensão elétrica quando submetidos a uma pressão mecânica.

Quando um cristal piezoelétrico é submetido a uma tensão elétrica, ele se deforma, podendo se contrair ou expandir, dependendo da polaridade da tensão aplicada. Quando a tensão é removida, o cristal retorna a sua forma original, gerando uma tensão elétrica oposta.

Assim, o tempo de contração e expansão do cristal determina a frequência de oscilação do cristal.

### Efeito Piezoelétrico



# **Modelo Elétrico do Cristal**

## Modelo Elétrico

Um oscilador de cristal pode ser modelado como um circuito RLC série em paralelo com um capacitor, conforme apresentado a direita.

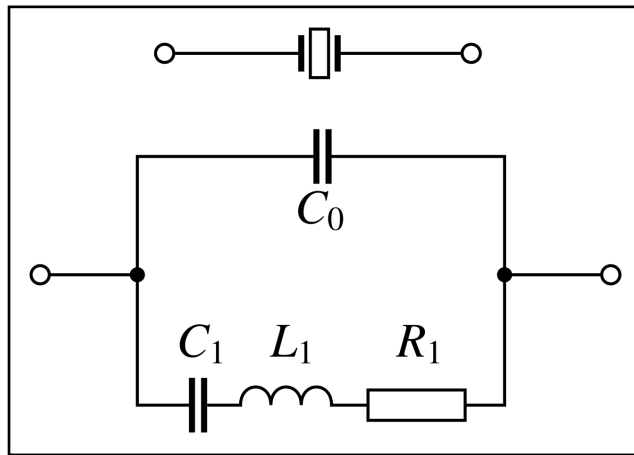
A equação de impedância do cristal é dada por:

$$Z(s) = \frac{1}{C_1} + L_1 + R_1 \parallel \left( \frac{1}{C_0} \right)$$

Onde:

- $C_1$ : Capacitância “Motional”, elasticidade equivalente do cristal.
- $L_1$ : Indutância “Motional”, massa equivalente do movimento do cristal.
- $R_1$ : Representa as perdas do cristal.
- $C_0$ : Representa a capacitância parasita do cristal, que é a capacitância entre os terminais

Modelo Elétrico Correspondente do Cristal



## Oscilação em Modo Série

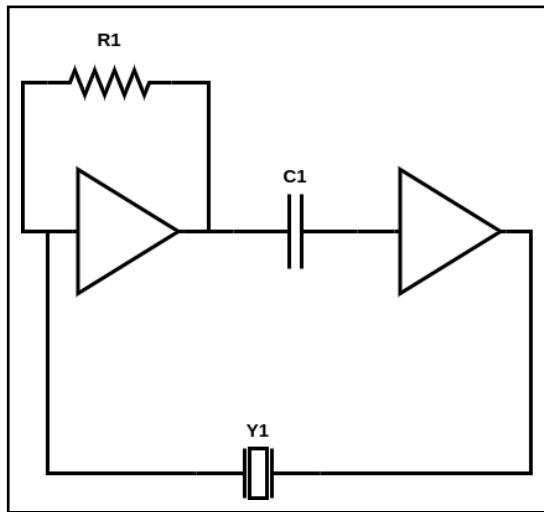
Um cristal pode ser conectado de duas maneiras ao circuito oscilador: em modo série ou em modo paralelo.

No modo série, o cristal é conectado em série com um resistor e um capacitor, formando um circuito RLC série.

A frequência de oscilação do circuito é determinada pela capacitância e indutância do circuito:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$$

Oscilador de Cristal em Modo Série





## Oscilação em Modo Paralelo

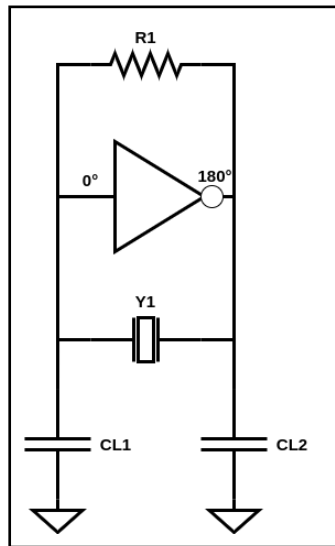
No modo paralelo, o cristal é conectado em paralelo com um resistor e um capacitor, formando um circuito RLC paralelo.

A frequência de oscilação do circuito é determinada pela capacitância e indutância do circuito:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \cdot \left(1 + \frac{C_1}{2(C_0 + C_L)}\right)$$

Nesse segundo caso, a frequência de oscilação do circuito é maior que a frequência de ressonância do cristal, devido à capacitância de carga  $C_L$  que é vista pelo cristal.

Oscilador de Cristal em Modo Paralelo



## Capacitância de Carga

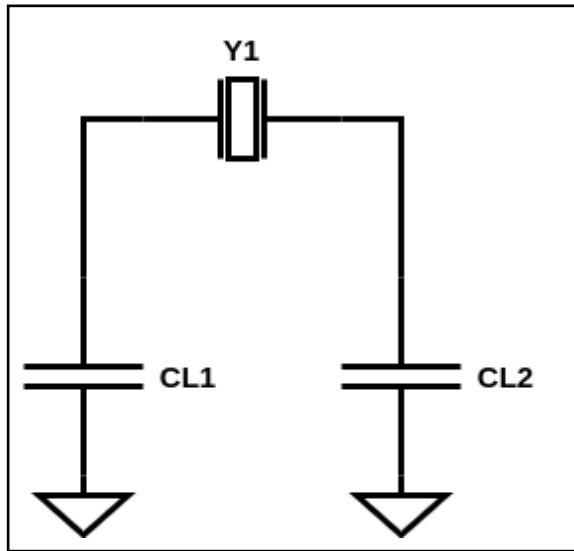
A capacitância de carga é a capacitância que é vista pelo cristal quando ele está em operação em um circuito oscilador.

Na ilustração a direita, a capacitância de carga vista pelo cristal é dada por:

$$C_L = \frac{C_{L1} \cdot C_{L2}}{C_{L1} + C_{L2}} + C_{\text{parasita}}$$

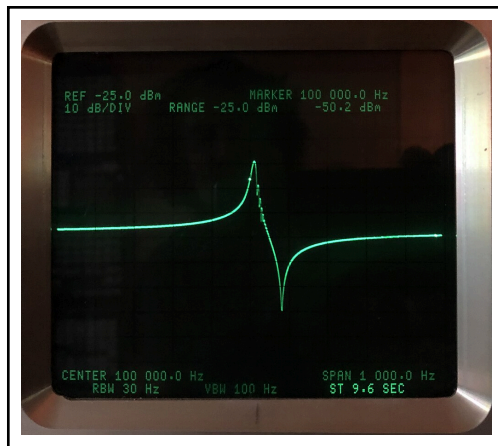
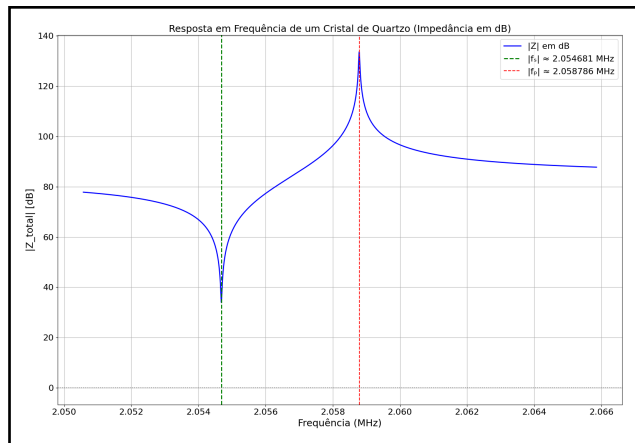
Quando o cristal é projetado, o fabricante especifica a capacitância de carga  $C_L$  que deve ser utilizada para que o cristal opere na frequência desejada.

Capacitância de Carga



# Resposta em Frequência do Cristal

Com base nos dois modos de operação do cristal, podemos observar a ressonância do cristal em modo série e paralelo, conforme apresentado a seguir:



## Efeitos de temperatura

A temperatura afeta a frequência de oscilação do cristal, devido à variação da elasticidade e densidade do material piezoelétrico.

Dessa forma, o cristal possui um parâmetro denominado “aging” (ou envelhecimento), que indica a variação da frequência do cristal ao longo do tempo de acordo com a temperatura:

### Especificações Técnicas

Especificação	Valor
Frequency Tolerance	$\pm 10$ ppm
Temperature Range	$\sim 40 \sim +85^{\circ}\text{C}$
Aging (at $25^{\circ}\text{C}$ )	$\pm 5$ ppm / year

Os parâmetros apresentados anteriormente são exemplos de um cristal oscilador comum, o HC-49S 9AC (JGHC) ilustrado a seguir:

Cristal Oscilador HC-49S 9AC (JGHC)



# Especificações completas de um Cristal

Especificações de exemplo: Cristal HC-49S 9AC (JGHC)

## Crystals specifications

ITEMS/TYPE	9AC
Frequency Range	3.2~64 MHz
Frequency Tolerance (at 25 °C)	± 10 ppm, ± 20 ppm, or specify
Operating Temperature Range	~40~+85°C, or specify
Shunt Capacitance (C0)	7pF Max.
Drive Level	1~ 500µW (50 µW typical)
Load Capacitance	20pF, or specify
Aging (at 25°C )	± 5 ppm / year Max.
Storage Temperature Range	-40~+125°C

**Fator Q**

## Fator Q

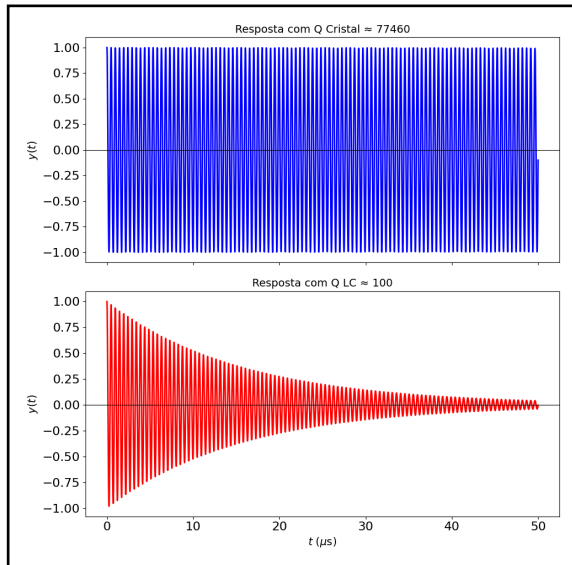
O principal motivo para o uso de cristais osciladores é a sua alta estabilidade de frequência, que é medida pelo fator Q do cristal.

O fator Q é definido como a razão entre a frequência de ressonância do cristal e a largura de banda da curva de ressonância:

$$Q = \frac{f_s}{\Delta f}$$

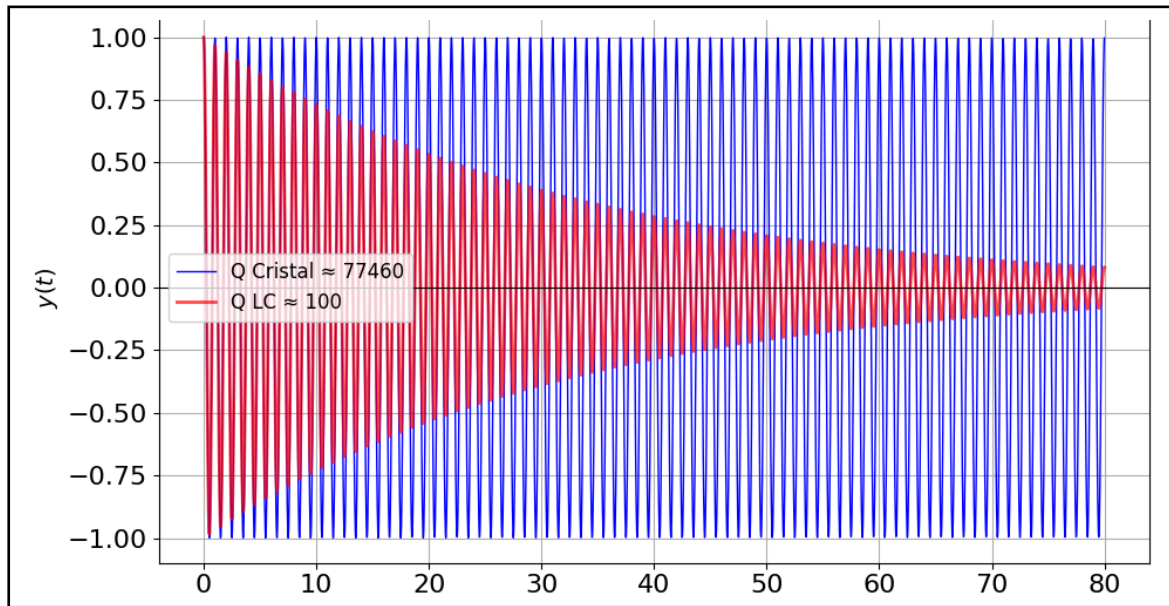
Onde  $f_s$  é a frequência de ressonância do cristal e  $\Delta f$  é a largura de banda da curva de ressonância.

## Comparação Fator Q



# Fator Q

Comparação Fator Q





# **Modos de Operação: Fundamental e Harmônicos**

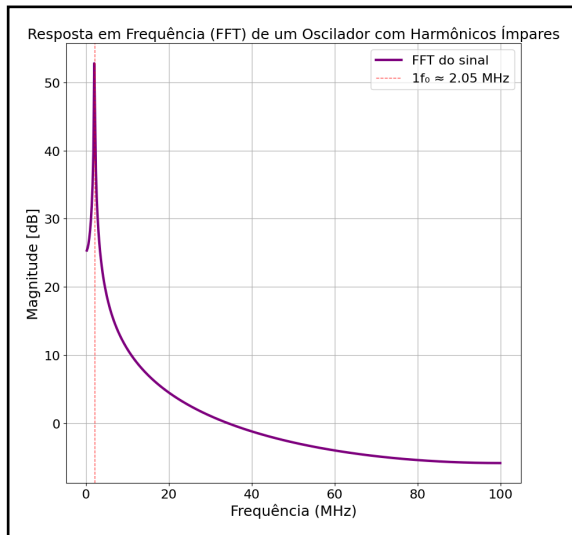
# Modo de operação Fundamental

Tipicamente, os cristais osciladores operam no modo fundamental, quando a frequência desejada está dentro da faixa de operação do cristal.

O modo fundamental significa que o oscilador irá operar na frequência de oscilação  $f_s$  quando ele é conectado em modo série ou  $f_p$  quando em paralelo, e é determinada pela capacitância e indutância do circuito, conforme visto anteriormente.

A direita é apresentada uma resposta em frequência do cristal oscilador considerando apenas o modo fundamental.

## Comparação Fator Q



## Modo de operação Harmônico

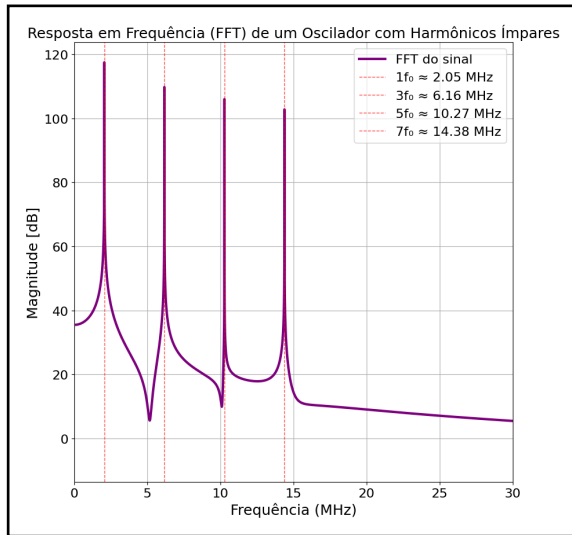
Em alguns casos, o cristal oscilador pode operar em harmônicos, quando a frequência desejada está fora da faixa de operação do cristal.

O modo harmônico significa que o oscilador irá operar em múltiplos inteiros da fundamental, como  $3f_0$ ,  $5f_0$ , etc., onde  $f_0$  é a frequência fundamental do cristal.

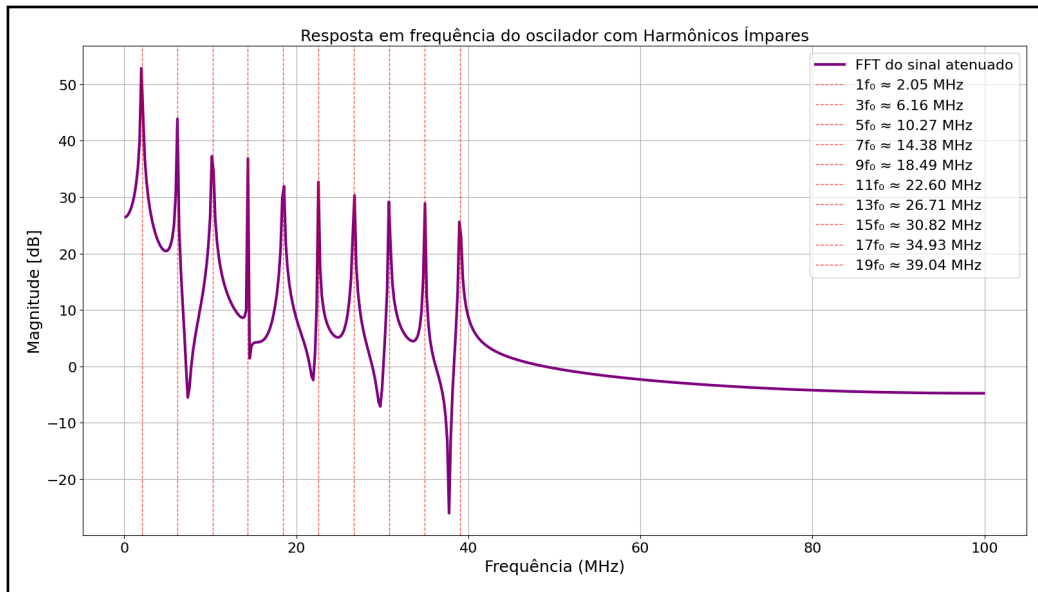
Isso permite que o oscilador opere em frequências mais altas, tipicamente acima de 66MHz, mas com uma menor estabilidade de frequência.

A direita é apresentada uma resposta em frequência do cristal oscilador considerando o modo harmônico.

### Comparação Fator Q



# Resposta em Frequência



# **Circuito Oscilador**