

Modelo de um cristal de quartzo

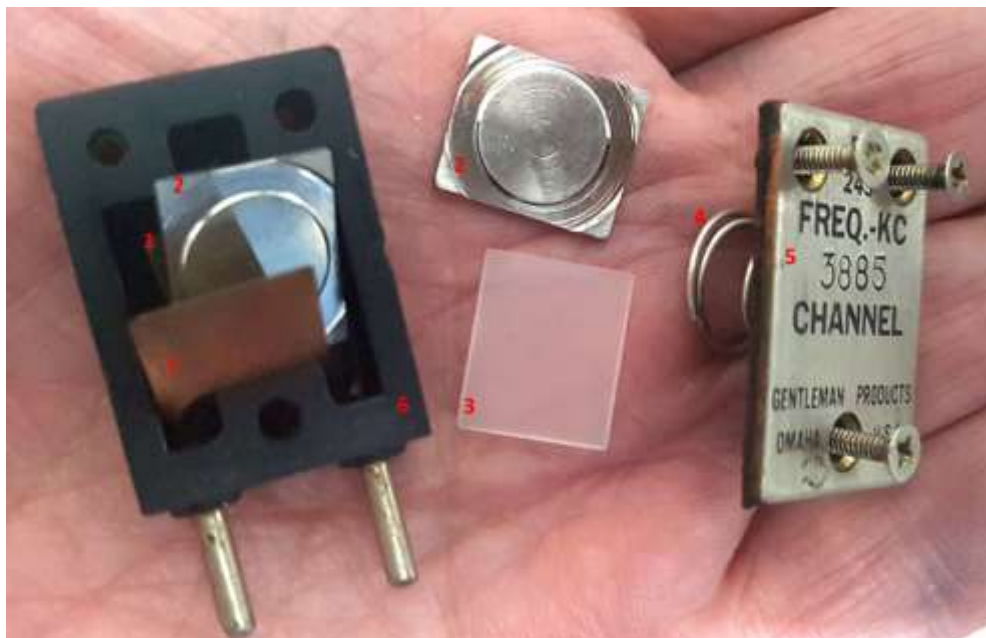
O cristal que vamos modelar foi produzido pela *Gentleman Products, Omaha*, EUA, e foi ajustado para ressonar na frequência de 3885 kHz. Este cristal de quartzo foi usado no primeiro transceptor militar portátil dos



EUA, BC-661 (*Basic Component 661*) ou SCR (*Set Complet Radio*) 631. Este transceptor, designado por “*Handie Talkie*” foi produzido entre 1943 e 1948 por uma empresa associada da Motorola. Foi extensivamente usado pelos aliados na 2ª guerra mundial. A faixa de frequências em que podia funcionar era de 3,5 MHz a 6 MHz e a frequência era definida pelo cristal de emissão.

O cristal foi fabricado em 16 de janeiro de 1945. O cristal é extremamente robusto e é amovível para se poder escolher outros cristais com outras frequências de emissão para o transceptor.

A lâmina de cristal (corte AT¹) está dentro de uma caixa robusta (FT243) e a espessura da lâmina foi ajustada para a frequência de 3885 kHz através da espessura de 0,46 mm. Uma mola comprime a lâmina de quartzo podendo corrigir de alguns Hz a frequência de oscilação (maior frequência para maior pressão).



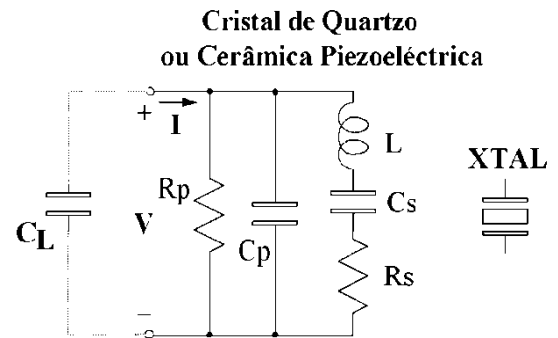
Cristal de controlo da frequência de emissão do transceptor BC-611 (vista interior).

1- Contacto de cobre; 2-Placa de pressão de latão niquelado; 3 lâmina de quartzo; 4 – mola de pressão;
5- Tampa da caixa; 6 - Caixa de baquelite

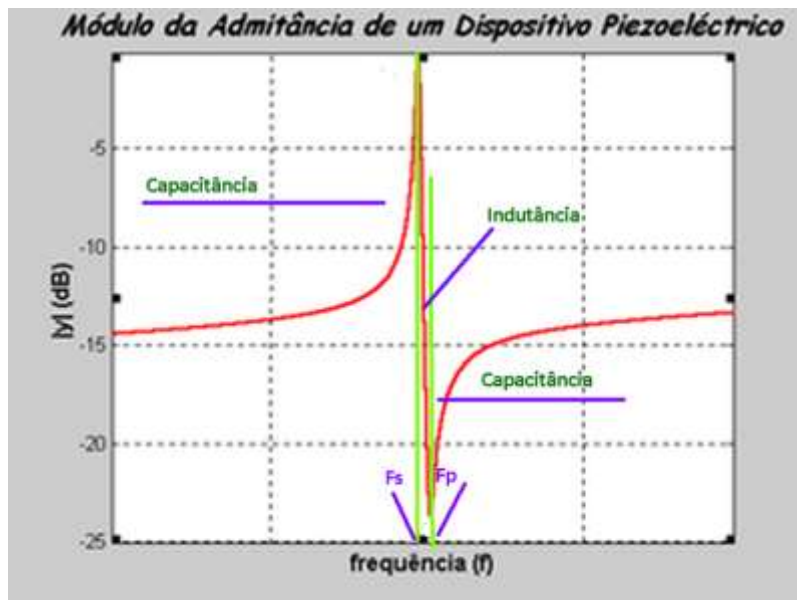
¹ O corte AT é um corte especial, muito usado, segundo ângulos bem determinados com o eixo maior do cristal, que permite à lâmina de cristal exibir propriedades de grande estabilidade com a temperatura.

Modelo de ressonadores piezoelétricos

Na figura pode ver um modelo elétrico do ressonador piezoelétrico. Em baixa frequência o ressonador comporta-se essencialmente como um condensador com a capacidade C_p e algumas perdas no dielétrico representadas por R_p e que, no caso do dielétrico ser o quartzo, são normalmente desprezáveis. C_L é uma carga capacitiva ou capacidades parasitas associadas ao involucro do cristal.



Para frequências altas começam a intervir os fenómenos mecânicos e elétricos, que interatuam, devido à reversibilidade do efeito piezoelétrico e que se traduzem na existência de uma frequência de ressonância série ω_s devida a L_s (*motional inductance*) e C_s (*motional capacitance*). Esta ressonância tem um fator de qualidade muito elevado porque é dependente da fraca resistência de perdas mecânicas, R_s .

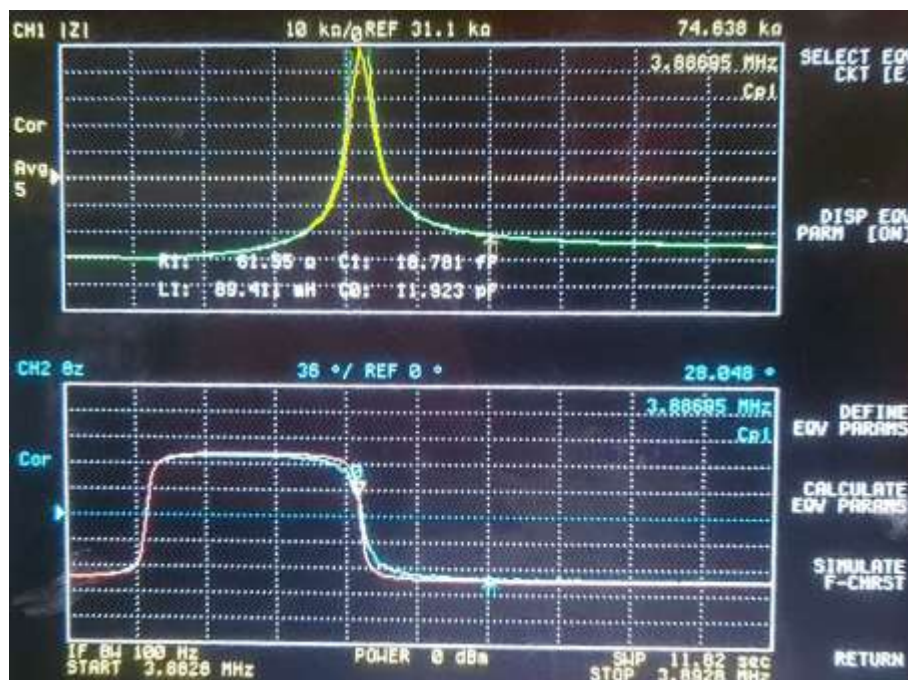


$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}}$$

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_s \left(\frac{C_s C_p}{C_s + C_p} \right)}}$$

Abaixo da frequência de ressonância série, f_s , e acima da frequência de ressonância paralelo, f_p , o cristal tem um comportamento capacitivo. Entre estas duas frequências o cristal tem um comportamento essencialmente indutivo; é neste intervalo que normalmente os osciladores eletrónicos funcionam.

No instrumento Agilent 4395A, dotado do acessório de medida de impedâncias Agilent 9018, pudemos fazer uma medição de impedância do cristal entre as frequências de 3882,8 MHz e 3892,8 MHz, onde ocorre o primeiro modo de ressonância do cristal. Obtivemos a representação gráfica do módulo e da fase da impedância, apresentada na figura seguinte.



Módulo e fase da impedância do cristal na vizinhança do modo fundamental de ressonância.

A curva a amarelo é a do módulo e a azul é a da fase. As curvas a verde e a vermelha são as da simulação do modelo.

Este modo fundamental de ressonância é muito pronunciado e obtivemos o valor de $62,6 \Omega$ na frequência de ressonância série de $3,88695 \text{ MHz}$ e $70 \text{ k}\Omega$ na frequência de ressonância paralelo ($3,887038 \text{ MHz}$) que apenas está separada de 88 Hz da frequência de ressonância série.

A grande estabilidade dos osciladores a cristal resulta do facto destas frequências serem definidas com muita precisão e estabilidade (propriedades mecânicas) e do oscilador eletrónico ter necessariamente de funcionar entre estas duas frequências em que o cristal tem carácter indutivo.

Extraindo os parâmetros do modelo para este modo de ressonância obtém-se:

$R_s = 61,55 \Omega$; $C_s = 18,8 \text{ pF}$; $L_s = 89,41 \text{ mH}$; $C_p = 11,92 \text{ pF}$; $C_L = 0 \text{ pF}$ e $R_p = \infty \Omega$.

Numa lâmina de faces paralelas a ressonância acústica série deve-se a que a onda refletida vem com a fase oposta à da onda incidente atual e quase que se cancelam. Este fenómeno também ocorre para os modos de ressonância múltiplos ímpares embora possam ser menos relevantes devido ao facto da atenuação acústica no cristal subir com a frequência.

Procurámos medir o 3º modo de ressonância do cristal numa frequência próxima² de $3 \times 3885 \text{ kHz}$, numa faixa de frequências entre $11,6225 \text{ MHz}$ e $11,6725 \text{ MHz}$, obtendo-se o resultado representado na figura seguinte.

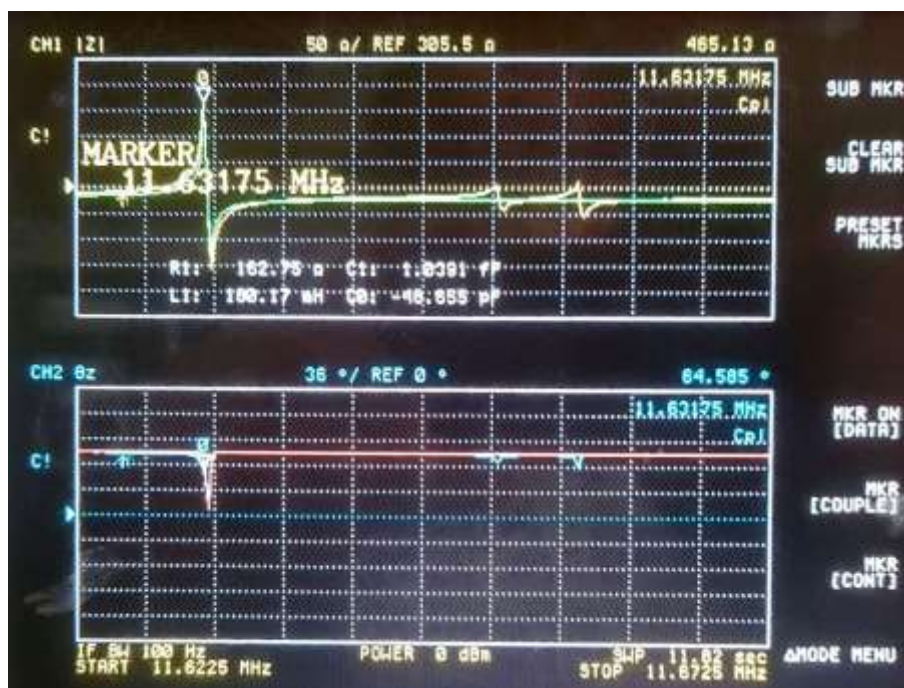
Os módulos múltiplos apresentam uma configuração mais complicada começando por exibir uma frequência de ressonância série pouco pronunciada, uma ressonância paralelo mais pronunciada, seguindo-se uma nova ressonância série mais pronunciada que a primeira. O modelo elétrico que explica este comportamento já não é o que acima foi referido. Todavia, considerando o modelo acima

² Normalmente o 3º modo ocorre numa frequência mais baixa dado que a velocidade de propagação no cristal é mais reduzida quando a frequência aumenta.

representado como uma boa aproximação, obteríamos os seguintes parâmetros para este 3º modo de ressonância: $R_s = 162,75 \Omega$; $C_s = 1,04 \text{ fF}$; $L_s = 140,17 \text{ mH}$; $C_p = -48,65 \text{ pF}$; $C_L = 0 \text{ pF}$ e $R_p = \infty \Omega$.

O modelo só se ajustaria com uma capacidade C_p negativa. Um modelo mais correto seria, possivelmente, conseguido adicionando ao anterior mais um circuito de ressonância série em paralelo com o atual, para modelarmos as duas frequências de ressonância série.

Medimos $300,5 \Omega$ na ressonância série de $11,6275 \text{ MHz}$ e $465,13 \Omega$ na frequência de ressonância paralelo de $11,631775 \text{ MHz}$ e medimos $148,07 \Omega$ na 2ª frequência de ressonância série de $11,632275 \text{ MHz}$. Estas duas últimas frequências estão separadas de $5,25 \text{ kHz}$, bastante mais do que acontecia com o modo fundamental e, por isso, os osciladores a funcionarem em modos múltiplos são menos estáveis e precisos do que os que funcionam em modo fundamental.



Módulo e fase da impedância do cristal na vizinhança do 3º modo de ressonância.

A curva a amarelo é a do módulo e a azul é a da fase. As curvas a verde e a vermelha são as da simulação do modelo.

Em 1924, o Prof. Georges Pierce, da Universidade de Harvard, patenteia o primeiro circuito oscilador de cristal realmente utilizável na prática. A estrutura é semelhante à que hoje em dia se usa, ver figura. Nesta figura o inversor digital através de uma resistência de realimentação, R_1 , fica a funcionar como amplificador linear. O cristal vai funcionar como uma indutância, entre as frequências de ressonância série e paralelo. A capacidade C_1 permite alterar ligeiramente a frequência de oscilação e R_2 tem dos papéis: i) limita a potência aplicada ao cristal que tem limites para que possa funcionar numa região linear e, assim, dar mais estabilidade à frequência gerada e ii) conjuntamente com C_2 introduz uma desfasagem que facilita o arranque das oscilações.

