

## 3ELE002 - Circuitos de Comunicação

**Experiência 4 - Oscilador a Cristal Piezoelétrico**Taufik ABRÃO<sup>†</sup>, Lab. Telecom - Depto Eng. Elétrica da Univ. Estadual de Londrina

**RESUMO** projeto e análise de osciladores de RF à cristal com transistor bipolar, configuração Base comum.

**palavras-chave:** osciladores à cristal; transistor bipolar.

**1. OBJETIVOS**

- comprovar na prática a validade e limitações de um projeto um oscilador a cristal piezoelétrico empregando modelo de pequenos sinais;
- determinar a frequência de oscilação no modo série de um oscilador a cristal com transistor bipolar configurado em base comum;
- analisar a estabilidade de frequência em função da variação da tensão de alimentação e temperatura.
- avaliar o conteúdo harmônico e a potência à saída do oscilador a partir do analisador de espectro.

**2. INTRODUÇÃO**

Veja Notas de aula, Unidade 2 - Osciladores de RF

**2.1 Características do Circuito Oscilador à Cristal**

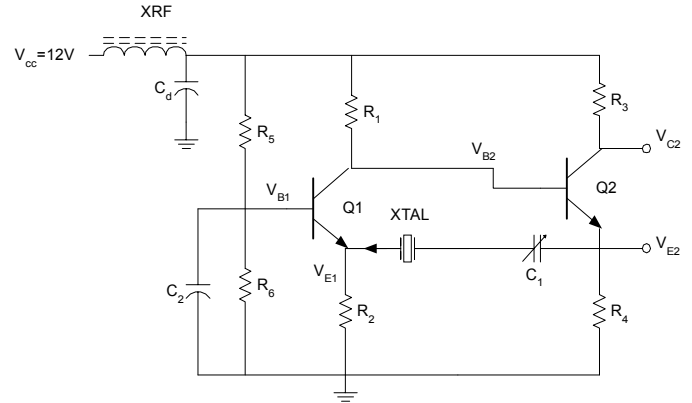
A configuração do circuito da figura 1 é conhecida como oscilador Butler. O cristal está colocado na malha de realimentação positiva, entre os emissores de Q1 e Q2, operando portanto no modo de ressonância série. No entanto, com a introdução de  $C_1$  em série o cristal passa a operar na região de ressonância paralela, sendo que a reatância indutiva do cristal é cancelada pela reatância capacitiva de  $C_1$ , com o conjunto ainda operando no modo de ressonância série. Esta configuração permite portanto trabalhar com cristais especificados para oscilarem no modo série e paralelo, bastando inserir ou retirar  $C_1$ .

Outras vantagens desta configuração são:

- saída pode ser retirada do coletor de Q2, estando isolada do elo de realimentação do cristal
- relacionando adequadamente  $R_3/R_4$  é possível especificar o nível máximo de tensão ou corrente que será aplicado ao cristal

**2.2 Projeto do Oscilador à cristal com transistor bipolar configuração base comum**

Na condição de oscilação, admitindo-se que o *amplificador não introduz desvio de fase*, o cristal (junto com  $C_1$ ) comporta-se como um resistor (ressonância série), como indicado nas figuras 2 e 3.



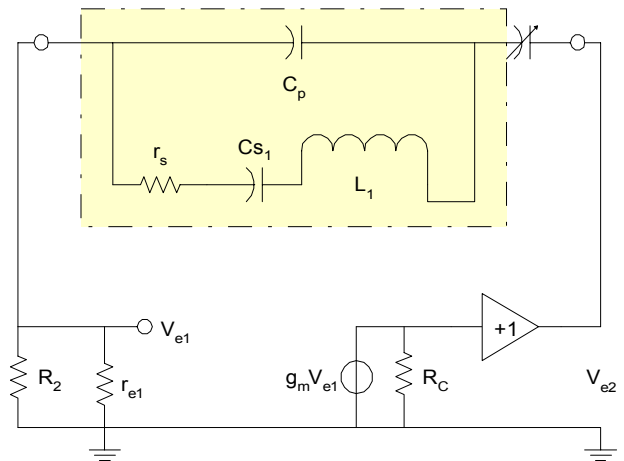
**Fig. 1** Oscilador Butler a cristal piezoelétrico com transistor bipolar em configuração base-comum (Q1) e estágio buffer (Q2)

Condição de oscilação:

$$A = \frac{r_i}{r_i + r_s} G > 1 \quad (1)$$

$$= \frac{r_i}{r_i + r_s} g_m R_C > 1$$

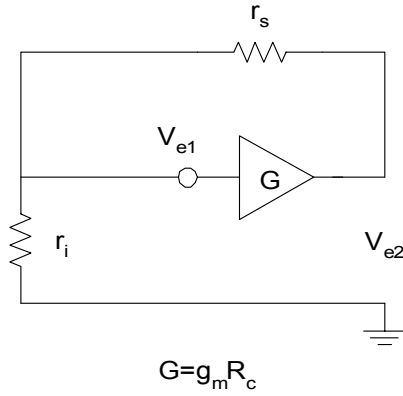
onde  $r_i = r_{e1}/R_2 =$  resistência equivalente de entrada do amplificador, com e  $r_{e1} =$  resistência de entrada do primeiro estágio amplificador (base comum) e  $r_s =$  resistência de perdas do cristal, figura 2



**Fig. 2** Modelo para o oscilador à cristal incluindo o circuito equivalente para o cristal piezoelétrico

Com a hipótese de  $I_C$  de Q1 ser tal que a sua resistência de entrada seja dada por

$$r_{e1} = \frac{1}{g_m} = \frac{1}{36I_{C1}} \ll R_2$$



**Fig. 3** Modelo equivalente para o oscilador à cristal na condição de ressonância série do cristal.

e muito menor que  $R_2$ ; desta forma, pode-se simplificar a equação (1) admitindo-se  $r_i \cong r_{e1}$

$$A = \frac{r_{e1}}{r_{e1} + r_s} G = \frac{r_{e1}}{r_{e1} + r_s} g_m R_C = \frac{R_C}{\frac{1}{g_m} + r_s} > 1$$

Portanto,  $R_C > r_s + \frac{1}{g_m}$  (2)

Assumindo que:

1. a freq de oscilação será 1 a 3 MHz e o cristal especificado para operar no modo paralelo com capacitância de carga de  $32pF$ . A resistência série deste cristal (consultando a tabela 1 das notas de aula) está em torno de  $r_s = 400$  a  $50\Omega$ , aproximada e respectivamente.
2. ganho de malha seja  $A = 3$ , resulta que  $R_C > 3(r_s + \frac{1}{g_m})$ . Como pode ser desprezado na eq (2)  $\Rightarrow R_C \cong 3r_s = 1200$  ou  $150\Omega$ , dependendo do cristal utilizado.
3. No circuito da figura 1 tem-se que

$$R_C = R_1 // h_{fe} R_4 = \frac{R_1 h_{fe} R_4}{R_1 + h_{fe} R_4}$$

Procurando minimizar o valor de  $R_4$ , vamos adotar  $h_{fe} R_4 = 1800$  ou  $240\Omega$  respectivamente. Adotando  $Q1 = Q2 = BF495$  devido aos baixos valores de capacitâncias de junção. Para estes transistores pode-se considerar  $h_{fe} \geq 30 \Rightarrow R_4 = \frac{1800}{30} = 60\Omega$  ou  $\frac{240}{30} = 8\Omega$ . Adotaremos  $R_4$  na faixa de 68 a  $10\Omega$ , conforme a freq de oscilação do cristal,  $f_{osc} = 1$  a  $3$  MHz.

4. Dimensionamento de  $R_3$  deve satisfazer as seguintes condições:
  - a. deve ter o menor valor possível, para que o circuito tenha menor impedância de saída.
  - b. excursão do sinal à saída (coletor de Q2) maior que  $V_{cc}/2$  para que este sinal possa ser diretamente compatível com diversas aplicações.
  - c. potência de excitação do cristal limitada em torno de  $1mW$  (fabricante). Isto implica em:

$$\frac{V_s^2}{r_s} \leq 1mW \Rightarrow$$

para  $f_{osc} = 1MHz$  :

$$V_s^2 \leq \sqrt{400 \times 10^{-3}} = 630 mV_{rms} = 1,78V_{pp}$$

ou para  $f_{osc} = 3MHz$  :

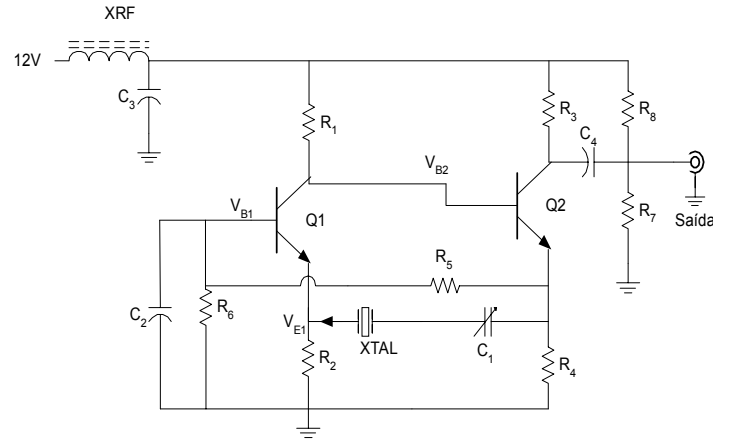
$$V_s^2 \leq \sqrt{50 \times 10^{-3}} = 223 mV_{rms} = 631mV_{pp}$$

### 3. Parte experimental

Observação importante: antes de ir ao laboratório, prepare tabelas, gráficos e equações que serão utilizadas na execução do experimento. Desenhe diagramas de instrumentos (setup de medidas) necessários às medidas.

#### 3.1 Etapas

1. Montar o circuito oscilador à cristal da figura 4 com os valores dados na tabela 1.



**Fig. 4** Circuito final para o oscilador a cristal com transistor bipolar, configuração base comum.

$R_1 = 12K\Omega$	$R_6 = 6,8K\Omega$
$R_2 = 470\Omega$	$R_7 = 33K\Omega$
$R_3 = 680\Omega$	$R_8 = 33K\Omega$
$R_4 = 220\Omega$	$R_5 = 4,7K\Omega$
$C_1 = 2 - 70pF$	$XRF = 1$ a $10 mH$
$C_2 = 10nF$	$Q1 = BF495$
$C_3 = 10nF$	$Q2 = BF495$
$C_4 = 10nF$	$XTAL: 1$ a $20 MHz$

**Tabela 1** Valores para os componentes do Oscilador Butler a cristal + Buffer

2. Com o osciloscópio, avalie a forma de onda à saída do estágio oscilador e de saída:
  - a. frequência e amplitude.
  - b. distorção na forma de onda senoidal
  - c. diferença de fase entre a entrada e saída do elemento ativo (base comum). Obtenha as diferenças de fase nos pontos pertencentes à malha de realimentação,  $\beta$ . Veja Apêndice 5 para determinação de defasagem entre dois sinais utilizando osciloscópio no modo X-Y.

- d. Qual a influência da ponta de prova do osciloscópio sobre o valor de  $f_{osc}$  quando colocada na saída de cada estágio? Meça com um frequencímetro a freq de oscilação nas diferentes situações.
3. Determinação da estabilidade com  $V_{CC}$ . Varie a tensão de alimentação em  $\pm 20\%$  em relação à nominal medindo a correspondente variação de freq. Calcule a estabilidade relativa,  $\frac{\Delta f}{f} / V$  em  $[\frac{Hz}{MHz} / V]$  e  $[ppm / V]$ , parte por milhão por volts.
4. Obtenção da quantidade de realimentação necessária à manutenção das oscilações. Note que neste oscilador à cristal, a realimentação é controlada pela resistência série do cristal na ressonância.
  - a. Reduza a tensão de alimentação até o limiar onde as oscilações cessem (observadas à saída de  $Q2$ ), mantendo as oscilações neste limite. Lembre-se que o  $g_m$  (transcondutância do transistor) depende de  $V_{CC}$ . Nesta condição, meça a amplitude das oscilações no coletor de  $Q2$  e a tensão C.C. no emissor de  $Q1$ .
  - b. **Estime a resistência série do cristal**, admitindo que nesta condição o ganho de malha é igual a 1. Considere o efeito de  $R_2$  em paralelo com  $r_{e1}$  no cálculo da atenuação.
  - c. Obtenha (calcule) o fator de mérito do circuito carregado,  $Q_{Load}$ .
  - d. **Medida do ganho real do amplificador.**
    - i. Remova o cristal.
    - ii. Injete um sinal senoidal (gerador de RF) no emissor de  $Q1$ ; ajuste o sinal para a  $f_{osc}$  e regule o nível do sinal de modo que o sinal amplificado no emissor de  $Q2$  não apresente distorção aparente.
    - iii. calcule o ganho como sendo a relação entre as amplitudes do sinal nos emissores de  $Q2$  e  $Q1$  (utilize pontas de prova X1, observando os dois pontos simultaneamente para evitar desbalanceamento no carregamento).
5. Refaça o cálculo do índice de mérito do circuito oscilador a cristal com o ganho de malha obtido experimentalmente.
2. Qual o tipo de realimentação é utilizada para obter as oscilações?
3. O cristal opera no modo de ressonância série ou paralelo ?
4. Quais as características de uma ponta de prova utilizadas com o osciloscópio, se conhecidas, para avaliar o efeito sobre a freq de oscilação de um circuito. Caso não se disponha das especificações da ponta de prova utilizada, utilize valores típicos. Proponha um método de medida levando-se em consideração o efeito da ponta de prova.
  - a. esta topologia de oscilador é mais ou menos sensível ao efeito da ponta de prova em relação ao oscilador LC analisado na experiência anterior ?
5. Analise os resultados obtidos experimentalmente e por simulação (Spice), observando e comparando a defasagem nos vários pontos da malha de realimentação do circuito oscilador, verificando a condição de fase, isto é:  $\angle A.\beta = 0^\circ$ .

## 5. APÊNDICES

### 5.1 Equações úteis

$r_i = \frac{r_\pi}{\beta}$ , com  $\beta$  = ganho de corrente base-coletor

$$r_\pi = \frac{kT}{q} \frac{\beta}{I_C} = \frac{0,026\beta}{I_C}$$

onde  $I_C$  = polarização DC de coletor;  $q$  = carga do elétron;  $k$  = constante de Boltzmann e  $T$  = temperatura; para temperatura ambiente,  $T = 290K \Rightarrow kT/q = 0,026V$ .

Transcondutância:  $g_m.r_\pi = \beta = \frac{qI_C}{kT} \approx 40I_C$  ou  $\approx 36I_C$

portanto,  $g_m$  é diretamente proporcional a  $I_C$ .

## 4. ANÁLISE

1. Refazer o projeto a partir dos valores dos componentes (freq. do cristal etc) disponíveis na montagem e comparar com os resultados experimentais. Considere  $V_{CC} = 12V$  (nominal).
  - a. Simular o circuito obtido utilizando simulador elétrico Spice ou similar.
  - b. Obter o  $Q^{Loaded}$  do oscilador a partir da análise espectral do oscilador à XTAL no Spice.
  - c. obter o  $Q^{Loaded}$  do oscilador através do cálculo teórico. Comparar com o resultado obtido anteriormente (Spice). Justifique possíveis discrepâncias