

Osciladores para Rádio Frequência de Elevada Estabilidade

João Manuel Tavares, João Nuno Matos

Resumo- Este artigo descreve técnicas de projecto de osciladores de elevada estabilidade recorrendo às propriedades piezoeléctricas do cristal de quartzo. São também apresentados um conjunto de osciladores para rádio frequência cujos princípios de construção obedecem a essas mesmas técnicas.

Abstract- This article describes methods for high stability oscillators design using quartz crystal piezoelectric properties. It also presents a set of radio frequency oscillators whose construction principles obey to these methods.

I. INTRODUÇÃO

Sendo os osciladores a cristal dispositivos de uso tradicional, o seu projecto e análise nem sempre são claros. Este facto motivou a realização de vários osciladores a cristal que conduziu ao presente artigo.

Os osciladores encontram aplicações em sistemas de telecomunicações e equipamento laboratorial entre outras.

Recorre-se a uma implementação discreta do oscilador sempre que seja necessário gerar um sinal periódico de frequência muito elevada ou sempre que os requisitos da aplicação exijam uma elevada estabilidade em frequência. Sempre que a estabilidade seja um factor a maximizar recorre-se ao uso do cristal de quartzo no circuito. Contudo a frequência máxima de operação fica limitada a cerca de 200 MHz; para estender esse limite torna-se necessário recorrer a multiplicadores de frequência.

O cristal de quartzo é um dispositivo de pequenas dimensões com uma excelente estabilidade em temperatura e em frequência e por isso adequado para *standards* de frequência.

II. OSCILADORES A CRISTAL

A. Características do cristal

O cristal é um dispositivo electromecânico que utiliza as propriedades piezoeléctricas do quartzo. A aplicação de uma força no cristal segundo uma certa direcção, origina o aparecimento de cargas eléctricas. Inversamente, se um campo eléctrico for aplicado, causará a deflecção mecânica do cristal.

Um cristal de quartzo é formado por um pedaço fino de quartzo colocado entre dois eléctrodos. Uma tensão

alternada aplicada a esses eléctrodos causa a vibração do cristal. Se a frequência dessa tensão for muito próxima da ressonância mecânica do cristal, a amplitude das vibrações torna-se muito elevada. A força dessas vibrações faz com que o cristal produza um campo eléctrico sinusoidal que controla a impedância efectiva entre os dois eléctrodos. Essa impedância depende fortemente da frequência de excitação e possui um factor de qualidade (Q) muito elevado.

Cada cristal tem várias ressonâncias ao longo do espectro e cada uma pode ser representada pelo circuito eléctrico equivalente da figura 1.

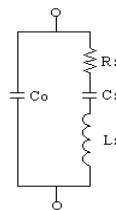


Fig. 1 - Modelo eléctrico de um modo de ressonância do cristal.

A figura 2 apresenta o modelo completo. C_0 pode ser considerado constante com a frequência; R_{s_n} aumenta com n ; $C_{s_n} \approx C_{s_1}/n^2$ e L_{s_n} é aproximadamente igual para todos os modos. Toma-se $n = 1, 3, 5, 7, \dots$.

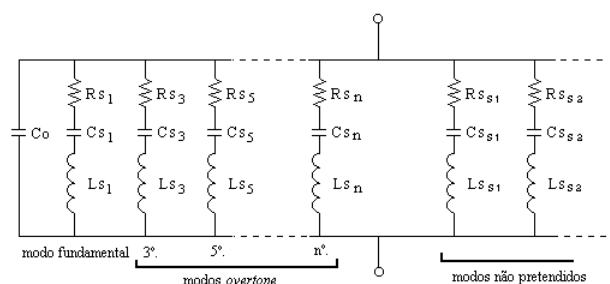


Fig. 2 - Modelo eléctrico generalizado do cristal.

Além do modo fundamental ($n=1$) o cristal apresenta modos de ressonância em todos os harmónicos ímpares ($n=3,5,\dots$) chamados de *overtone*. As frequências de *overtone* não são múltiplos perfeitos da frequência fundamental. Os modos não pretendidos não estão relacionados com o fundamental ou *overtone*s, não são controláveis no processo de fabrico e como tal são únicos para cada cristal.

O modelo da figura 2 é bastante complexo. Como o cristal só é especificado para funcionar num desses modos o modelo pode ser simplificado para o modelo da figura 1 que representará então o modo de ressonância para o qual o cristal foi otimizado. Se esse modo for o fundamental o cristal especifica-se com um modo de vibração fundamental; caso seja um modo *overtone*, especifica-se com um modo de vibração no n -ésimo *overtone*.

O gráfico da reactância em função da frequência para o modelo da figura 1 é apresentado na figura seguinte.

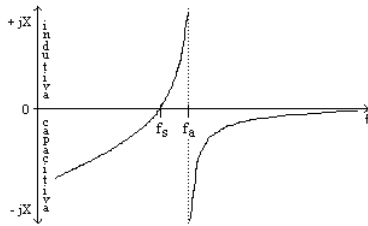


Fig. 3 - Reactância do cristal versus frequência.

Como se pode ver o cristal apresenta uma brusca variação da reactância numa zona estreita de frequência o que justifica o seu uso como elemento estabilizador de frequência em osciladores.

O cristal caracteriza-se por duas frequências distintas:

- a frequência de ressonância série, f_s , para a qual a reactância do cristal é nula;
- a frequência de ressonância paralela, f_a , para a qual a reactância do cristal é praticamente infinita.

A razão $(f_a - f_s)/f_s$ define o *pull range* do cristal e representa o máximo desvio em frequência relativamente a f_s que é possível obter para um dado cristal.

A frequência de operação especificada pelo fabricante representa a frequência de ressonância série se a configuração do circuito especificada for a série, ou representa uma frequência entre f_s e f_a se for especificada uma configuração paralela. Neste último caso a frequência de operação é medida quando se submete o cristal a uma carga capacitiva que é normalmente de 32 pF.

Outros parâmetros importantes são a estabilidade em frequência à temperatura de referência e a tolerância de frequência na gama de temperaturas de utilização. A forma como a frequência varia com a temperatura varia de corte para corte (processo de fabrico do cristal) e em geral o corte AT é o que apresenta melhores coeficientes de temperatura.

Igualmente deve-se ter em conta o *aging rate* do cristal que se traduz numa variação da frequência de operação com o envelhecimento do cristal.

Para aplicações de elevada estabilidade deve-se ter ainda em conta o nível de excitação (*drive level*) do cristal. Este está relacionado com a potência máxima que pode ser dissipada pelo dispositivo. Ultrapassar o valor máximo especificado pelo fabricante pode levar a:

- envelhecimento acelerado do cristal;

- pioria da estabilidade em frequência devido ao aquecimento do cristal;
- em situações extremas à fractura do cristal.

B. Características dos restantes elementos

De modo a não prejudicar a estabilidade em frequência do oscilador os restantes elementos do circuito devem ter a menor contribuição possível para a frequência de oscilação do circuito.

Embora a função do dispositivo activo seja a de garantir ganho suficiente à frequência de interesse [1], devido aos seus elementos parasitas reactivos acaba por ter também influência na estabilidade da frequência de oscilação. De modo a minimizar esse efeito, a frequência de transição para o dispositivo activo deve ser especificada como sendo entre dez a vinte vezes a frequência de operação. Se tal solução contrariar o aspecto económico é também possível utilizar uma frequência de transição inferior, à custa de perda de estabilidade.

Qualquer circuito sintonizado que seja porventura usado deverá possuir um factor de qualidade baixo de modo a minimizar os seus efeitos na frequência de oscilação.

A adição de um elemento reactivo em série com o cristal (geralmente um *trimmer*) para ajustar a frequência de oscilação [1] é de prática corrente, pois permite compensar pequenos desvios de frequência da pretendida. Contudo a inclusão desse elemento prejudica a estabilidade do oscilador com a temperatura uma vez que não se pode garantir um coeficiente de temperatura nulo para esse elemento. Aliás é esse um dos métodos que se usa para corrigir a variação de frequência com a temperatura para um oscilador a cristal. Contudo esse assunto ultrapassa o âmbito deste artigo.

C. Características do oscilador a cristal

Duas figuras de mérito dos osciladores a cristal são a estabilidade em frequência a uma temperatura fixa e a estabilidade em frequência dentro de uma gama de temperaturas.

Outras características, são a frequência de oscilação, a tensão de alimentação, a potência consumida pelo circuito, a estabilidade em amplitude do sinal, a distorção harmónica na carga, o valor da carga aceite e a potência de sinal na carga.

D. Configurações usuais

Apenas se apresenta configurações baseadas num único dispositivo activo que conduzem a uma maior simplicidade e mais baixo custo do circuito.

Os três primeiros circuitos (figura 4) utilizam cristais na configuração paralela e destinam-se às frequências mais baixas. O cristal é operado indutivamente e tem de ser ressonante com a malha capacitiva para criar uma alta impedância à frequência de oscilação.

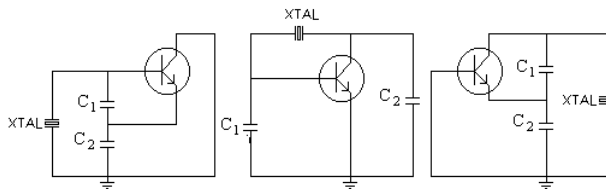


Fig. 4 - Osciladores do modo paralelo: *Colpits*, *Pierce* e *Clapp*.

Para as frequências mais elevadas as condições de ganho impõem valores para as capacidades tais que a carga imposta ao cristal é inferior à especificada pelo fabricante (usualmente 32 pF) e por isso é necessário utilizar outra configuração de circuito oscilador.

As configurações que ultrapassam este problema são as da figura 5. O cristal funciona perto da ressonância série. A baixa impedância do cristal a essa frequência permite que o sinal dessa frequência passe com pouca atenuação enquanto que as outras frequências são bloqueadas pelo cristal.

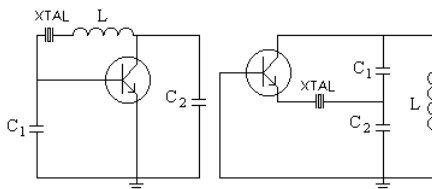


Fig. 5 - Osciladores do modo série: *Impedance Inverting Pierce* e *Grounded Base*.

Mas estas configurações também podem usar um cristal em ressonância paralela se se adicionar em série com o cristal uma indutância de valor adequado que tem a função de baixar a frequência de ressonância série do cristal [2]. Contudo esta técnica (usada no *Impedance Inverting Pierce*) pode conduzir a oscilações não controladas pelo cristal.

III. TÉCNICAS DE PROJECTO E ANÁLISE DE OSCILADORES

A. Considerações iniciais.

Em primeiro lugar é necessário definir as especificações para o circuito oscilador a montar. Essas especificações podem incluir a frequência de oscilação, a estabilidade em frequência, a distorção harmónica, a carga aceite, a potência na carga, a tensão de alimentação e eventualmente o consumo máximo.

Uma vez que o cristal de quartzo é um componente relativamente dispendioso há que atender aos requisitos de estabilidade em frequência para justificar o uso, ou não, de um oscilador a cristal.

A escolha do cristal de quartzo obedece aos critérios de estabilidade pretendidos. Aliás o preço do cristal depende das suas características de estabilidade em frequência. Caso se pretenda usar um trimmer em série com o cristal para corrigir eventuais desvios de frequência não se deve sobre especificar as suas características de estabilidade por razões já apontadas.

O outro aspecto importante é obter o seu modelo equivalente da figura 1. Para tal é necessário usar os valores fornecidos pelo fabricante, ou na ausência de alguns destes, usar um procedimento experimental para os medir.

Tomada a opção pelo oscilador a cristal e caso a frequência de operação seja elevada existem duas opções a escolher: opta-se por utilizar um cristal que funcione a essa frequência ou opta-se por utilizar um multiplicador de frequência e usar um cristal de frequência mais baixa. Esta última opção tem somente como vantagem o factor económico já que um cristal de mais baixa frequência é mais barato e o multiplicador de frequência pode ser realizado com pouco aumento de complexidade do circuito original. Para isso, e por exemplo para a configuração *Colpits*, é suficiente colocar no colector do transistor um circuito sintonizado para o harmónico de interesse. Porém é necessário lembrar que esta opção leva a uma piora da estabilidade do oscilador por um factor de n (em que n é o factor de multiplicação da frequência).

O transistor a utilizar deverá ser capaz de fornecer ganho suficiente e a potência necessária na carga à frequência de operação. Para melhor estabilidade a sua frequência de transição deverá situar-se entre dez a vinte vezes a frequência de operação.

Com base na frequência de operação, tipo de cristal e requisitos de estabilidade deverá escolher-se a configuração adequada para o circuito. As mais usuais estão esquematizadas nas figuras 4 e 5.

B. Dimensionamento

Caso a carga a atacar seja de baixa impedância existe necessidade de utilizar uma malha de adaptação. Em rádio frequência é usual ter cargas que variam entre os 50 e os 100 ohm. As malhas de adaptação mais simples são o divisor capacitivo, a malha L e o transformador [3]. Uma vez conhecida a carga a adaptação com estas malhas é um processo mais ou menos trivial. Note-se que uma carga mais elevada também implica uma maior tensão de alimentação do circuito para permitir a excursão de sinal necessária no ponto do circuito oscilador onde é colocada a malha. Caso a tensão de alimentação esteja definida à partida há que tomar atenção ao valor máximo da carga que se especifica. Ainda, para o caso do oscilador do modo paralelo, há que ter em conta a dissipação no cristal. Os valores recomendados para a carga de colector situam-se entre os 300 e 2000 ohm. Valores mais elevados levam a um menor consumo dc. Para as configurações onde o sinal para a malha provém de um ponto de baixa impedância do circuito pode-se usar valores mais baixos para essa carga.

Seguidamente define-se a amplitude do sinal de tensão na junção BE do transistor pretendida. Os osciladores são circuitos não lineares e a maioria baseiam-se na não linearidade do dispositivo activo para controlar a amplitude de oscilação, como sucede com as configurações apresentadas.

Considerando $x = V_{BE} / V_T$ pode definir-se, para o transistor bipolar, uma transcondutância para grande sinal, $Gm(x) = gm \frac{2I_1(x)}{xI_0(x)}$, onde gm é a transcondutância para pequeno sinal e $I_1(x)$ e $I_0(x)$ são funções de Bessel modificadas [4,5]. Deste modo, a análise para sinal do oscilador toma-se com base no modelo simplificado do transistor, apresentado na figura seguinte.

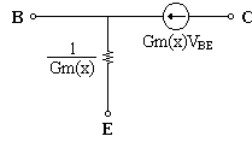


Fig. 6 - Modelo para grande sinal do transistor bipolar.

O modo como a transcondutância varia com o aumento da amplitude do sinal traduz a diminuição do ganho do dispositivo. Essa variação é representada no gráfico da figura 7.

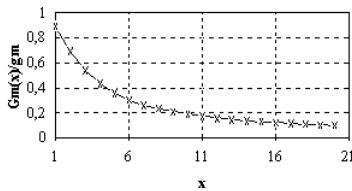


Fig. 7 - $Gm(x)/gm$ em função de x .

Este tipo de análise além de garantir que as condições iniciais de oscilação são cumpridas, permite também projectar a amplitude de oscilação.

A escolha para o grau de não linearidade, x , resulta de um compromisso. Por um lado um valor mais elevado implica melhor estabilidade em amplitude e por outro implica maior distorção do sinal [4], embora seja preciso atender que a distorção harmónica também dependerá do tipo de malha de adaptação usada e do factor de qualidade da carga colocada no colector.

Definida a amplitude do sinal no ponto do circuito onde se retira a amostra e a amplitude do sinal na junção V_{be} pode-se dimensionar a malha de realimentação; geralmente são os pontos do circuito antes e depois da malha de realimentação. Para um oscilador do modo paralelo trata-se de dimensionar os valores de dois condensadores. O valor dessas capacidades deverá ser o maior possível de modo a minimizar os efeitos das capacidades parasitas do transistor que aliás podem ser incluídas no dimensionamento; também deverão atender ao valor máximo para o *drive level* do cristal. Para osciladores do modo série com a base à massa trata-se de dimensionar o valor de dois condensadores e de uma indutância. Note-se que neste caso o cristal também contribui para a atenuação do sinal e esse facto terá de ser levado em conta. O factor de qualidade do circuito deve manter-se baixo e jogar com valores para as capacidades e indutância de modo a minimizar os efeitos de parasitas.

As equações que definem estes circuitos podem ser encontradas em [2].

Pode-se em seguida calcular a transcondutância para grande sinal necessária e daí, em função de x , retirar o valor de transcondutância para pequeno sinal (gm).

Conhecido gm procede-se à polarização do transistor. Nos casos em que o colector do transistor não está, para sinal, à massa, revela-se útil no projecto utilizar uma indutância para fazer a alimentação do colector. O uso desta permite uma maior excursão de sinal e permite manter fixa a tensão de polarização do colector (igual à tensão de alimentação) independentemente da corrente de polarização do transistor. Temos assim o projecto praticamente concluído. O projecto deverá ser feito com cuidado de modo a ter praticamente a certeza que o circuito funcionará como o previsto.

Para confirmar a validade do projecto dever-se-á recorrer em seguida a um programa de análise não linear, tal como o PSpice [6]. O aspecto crítico na simulação do circuito oscilador reside no próprio cristal. Uma vez que o factor de qualidade do cristal é muito elevado a dinâmica do sistema torna-se muito lenta o que exige tempos de simulação muito longos. Por outro lado os parâmetros da modelização do cristal nem sempre são muito exactos o que agrava a situação. Daí que o projecto deva ser feito atenciosamente e se necessário usar componentes de valores ajustáveis de modo a corrigir eventuais desvios.

IV. OSCILADORES REALIZADOS

Com propósito demonstrativo apresentam-se três osciladores, a operarem a 1MHz, 10MHz e 100MHz para os quais será dada uma curta explicação de alguns aspectos relacionados com o projecto e apresentada uma tabela com as suas principais características.

O oscilador de 1 MHz (figura 8) utiliza uma configuração Pierce modificada. A configuração Pierce é das mais simples em termos de análise e é das que apresenta melhor estabilidade em frequência [2].

Uma vez que com a configuração normal não era possível manter o *drive level* do cristal abaixo do valor máximo, optou-se por colocar o cristal no ponto da malha de realimentação onde a amplitude do sinal é menor e por isso a dissipação no cristal é pequena. Incluiu-se um *trimmer* em série com o cristal para ajustar ligeiramente a frequência. O sinal que ataca a carga é retirado do colector do transistor através de um divisor capacitivo.

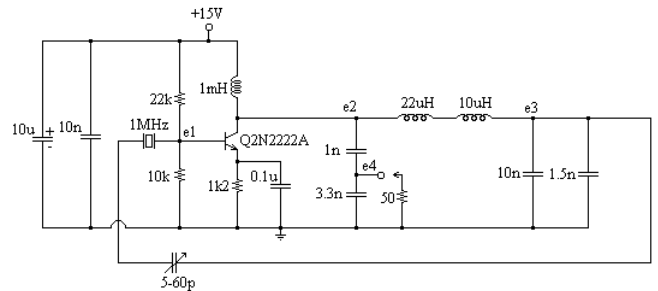


Fig. 8 - Oscilador de 1 MHz.

Características:

- frequência de oscilação: 1.000007 MHz ;
- estabilidade: ≤ 1 ppm;
- carga: 50 Ω ;
- potência: +8.6 dBm;
- t.h.d.: 21 %;
- Vcc: 15 V;
- Consumo quiescente: 57 mW.

O oscilador de 10 MHz (figura 9) também usa a configuração Pierce. Escolheu-se o tipo de malha de adaptação L (com entrada C) para aproveitar as características de filtro passa-baixo desta malha reduzindo a distorção harmónica na carga. É necessário usar um condensador à saída da malha para bloquear a corrente contínua para a carga. A capacidade total usada entre o colector e a massa resulta da combinação da capacidade da malha de adaptação e da capacidade da malha de realimentação.

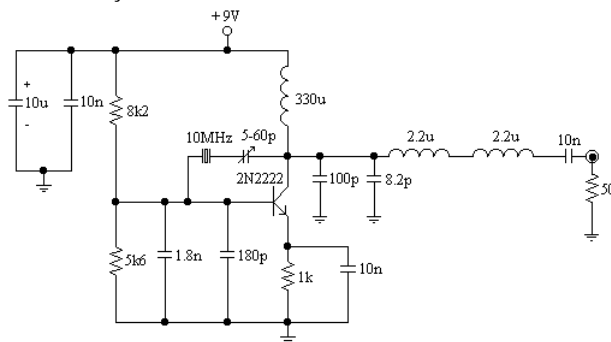


Fig. 9 - Oscilador de 10 MHz.

Características:

- frequência de oscilação: 9.99990 MHz ;
- estabilidade: ≤ 1 ppm;
- carga: 50 Ω ;
- potência: +9.4 dBm;
- t.h.d.: 2.4 %;
- Vcc: 9 V;
- Consumo quiescente: 32 mW.

O oscilador de 100 MHz (figura 10) utiliza a configuração *grounded base*. A realimentação é efectuada pelo divisor capacitivo e pelo cristal. O divisor capacitivo é ressonante, à frequência de oscilação, com uma indutância de modo a que a carga imposta ao colector seja resistiva. A adaptação da carga é feita por uma malha L (com entrada L). As indutâncias da malha de realimentação e da malha de adaptação estão combinadas numa única indutância.

Também a alimentação do colector do transistor é feita pela bobina que é comum às duas malhas.

O ajuste da indutância permite maximizar a amplitude do sinal no colector e o ajuste do *trimmer* permite variar ligeiramente a frequência.

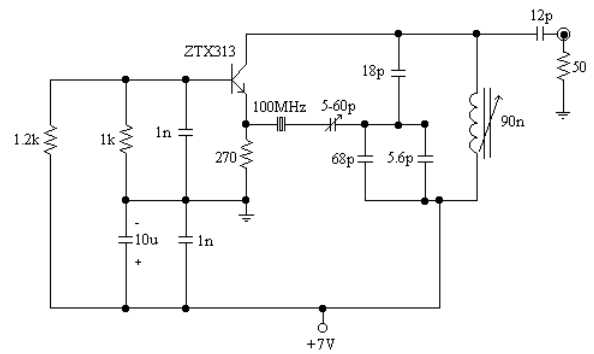


Fig. 10 - Oscilador de 100 MHz.

Características:

- frequência de oscilação: 99.9999 MHz ;
- estabilidade: ≤ 1 ppm;
- carga: 50 Ω ;
- potência: +7.5 dBm;
- t.h.d.: 0.64 %;
- Vcc: 7 V;
- Consumo quiescente: 88 mW.

V. CONCLUSÕES

Este artigo mostrou parte do trabalho realizado num projecto de fim de licenciatura do curso de Eng. Electrónica e Telecomunicações.

Começou-se por descrever as características dos cristais, dos elementos activos usados em osciladores e as configurações mais usuais. Seguidamente descreveram-se algumas técnicas de projecto e análise de osciladores a cristal. Finalmente apresentaram-se alguns osciladores realizados.

Conclui-se que é possível projectar e construir osciladores de elevada estabilidade, baseados em cristais, seguindo as técnicas descritas neste artigo.

REFERÊNCIAS

- [1] Jack Smith, "Modern Communication Circuits".
- [2] Marvin E. Frerking, "Crystal Oscillator Design and Temperature Compensation".
- [3] Sol Lapatine, "Electronics in Communication".
- [4] Clarke and Hess, "Communication Circuits: Analysis and Design".
- [5] João N. P. Matos, "Contribuição ao Estudo e Projecto de Sincronizadores de Sinais em RF e MW".
- [6] MicroSims, "NT Evaluation PSpice - version 6.3".