

3 Osciladores em Realimentação

3.1. Introdução

Ao longo deste capítulo será introduzida e descrita a configuração básica de um oscilador realimentado, seu critério de oscilação e sua operação em função do fator de qualidade associado à malha de realimentação. O conceito e aplicação do fator de qualidade realimentado serão introduzidos e destacados.

3.2. Critério de Oscilação

A estrutura básica de um oscilador senoidal em realimentação consiste em um amplificador e uma malha seletiva em frequência conectada a um elo de realimentação positiva, de acordo com o diagrama de blocos na Figura 3.1 abaixo.

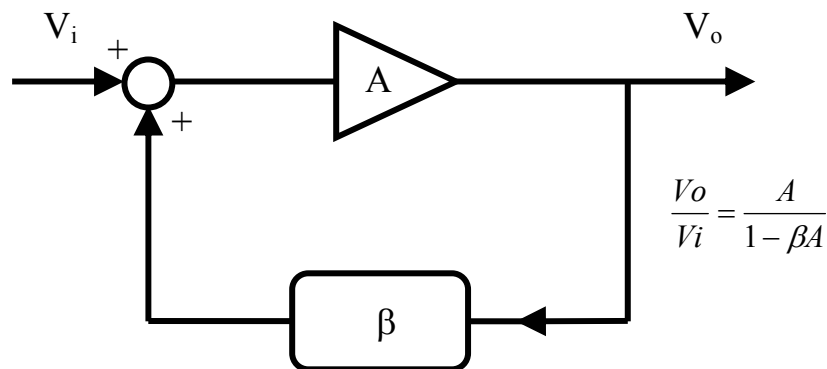


Figura 3.1. Diagrama de blocos de um oscilador.

Embora em um circuito oscilador real o sinal de entrada não esteja presente, foi incluído um sinal de entrada para auxiliar na explicação do princípio de funcionamento. É importante observar que o sinal de realimentação é somado a um sinal positivo. Portanto o ganho com realimentação é dado por [9]:

$$A_f = \frac{A(s)}{1 - A(s)\beta(s)} \quad (3.1)$$

O ganho da malha de realimentação é definido como:

$$H(s) = A(s)\beta(s) \quad (3.2)$$

A equação característica fica sendo então:

$$1 - H(s) = 0 \quad (3.3)$$

Se, na frequência central de oscilação f_0 , o ganho da malha $A\beta$ for igual a unidade, isso significa, pela Equação (3.1) que A_f será infinito. Isto é, nessa frequência, o circuito terá uma saída finita com uma entrada de sinal zero. Tal circuito é, por definição, um oscilador [9]. Portanto, a condição para a malha de realimentação da Figura 3.1 produzir uma oscilação senoidal de frequência ω_0 é que:

$$\begin{aligned} |H(j\omega_0)| &\equiv |A(j\omega_0)\beta(j\omega_0)| = 1 \\ \phi(\omega) &= 2\pi \end{aligned} \quad (3.4)$$

Ou seja, em ω_0 a fase do ganho de malha deve ser $2n\pi$, $n = 1, 2, 3, \dots$ e a amplitude do ganho de malha deve ser unitária. Isto é conhecido como **critério de Barkhausen**. Observe que para o circuito oscilar em uma certa frequência, o critério deve ser satisfeito apenas nessa frequência (ω_0), caso contrário, a forma de onda resultante não será uma senóide pura.

Intuitivamente, o **critério de Barkhausen** pode ser analisado considerando-se novamente a malha de realimentação da Figura 3.1. Para essa malha produzir e sustentar uma saída χ_0 sem que seja aplicada uma entrada ($\chi_s = 0$), o sinal de realimentação χ_f ,

$$\chi_f = \beta\chi_0$$

deve ser suficientemente alto, de modo que, quando multiplicado por A, produza χ_0 ,

$$A\chi_f = \chi_0$$

isto é,

$$A\beta\chi_0 = \chi_0$$

que resulta em

$$A\beta = 1$$

Deve ser observado que a frequência de oscilação (ω_0) é determinada exclusivamente pelas características de fase da malha de realimentação; a malha oscila na frequência cuja a fase é $2n\pi$, $n = 1, 2, 3, \dots$, ou seja, na frequência de ressonância. Isso significa que a estabilidade da frequência de oscilação será determinada pelo modo pelo qual a fase $\phi(\omega)$ da malha de realimentação varia com a frequência. Uma função com inclinação íngreme $\phi(\omega)$ resultará em uma frequência mais estável. Isso fica claro se imaginarmos uma variação de fase $\Delta\phi$ devida a uma variação nos componentes do circuito. Se $d\phi/d\omega$ for alta, a variação resultante em ω_0 será pequena, conforme ilustra a figura abaixo [9].

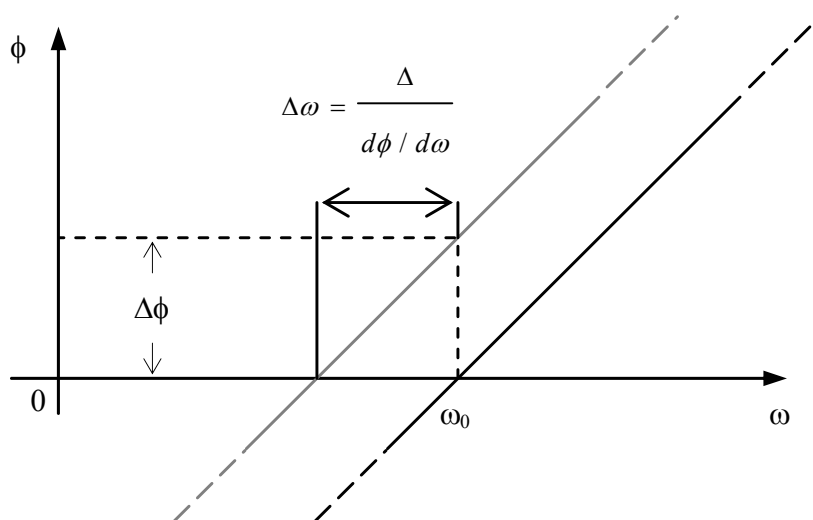


Figura 3.2. Dependência da estabilidade da frequência do oscilador com a inclinação da resposta em fase.

Um método alternativo para estudar os circuitos osciladores consiste no exame dos pólos do circuito, que são as raízes da equação característica. Para o circuito produzir e manter oscilações em ω_0 , a equação característica deve ter raízes em $s = \pm j\omega_0$. Portanto, $1 - A(s)\beta(s)$ deve ser da forma $s^2 + \omega_0^2$ [9].

3.3. Fator de Qualidade - Q

O fator de qualidade carregado é importante para definir o desempenho de um circuito elétrico. Ele é uma medida do grau de seletividade, ou mais genericamente, do desempenho do circuito ressonante. Uma definição bastante

geral deste parâmetro, aplicável a qualquer sistema ressonante e ao circuito RLC da Figura 2.1, é dada por [2, 7]:

$$Q = \frac{\omega_0 \times (\text{Energia Média Total Armazenada no Circuito})}{\text{Potência Dissipada no Circuito}} \quad (3.5)$$

Na ressonância, tendo em vista que $W_m = W_e$, a energia média total armazenada é:

$$W = W_m + W_e = 2W_m = 2W_e$$

No caso particular do circuito RLC em paralelo, pode-se escrever

$$W = \frac{1}{2} C V V^*$$

Então, como a potência dissipada neste circuito é igual à $\frac{1}{2} R I I^*$, o fator de qualidade não carregado é

$$Q = \frac{\omega_0 C}{G} = \omega_0 R C = \frac{R}{\omega_0 L} \quad (3.6)$$

sendo:

$$\omega_0^2 L C = 1$$

$$G = R^{-1}$$

Considerando que o circuito RLC paralelo apresenta um Q elevado, a impedância de entrada pode ser escrita como [7]:

$$|Z_{in}| = \frac{R}{\sqrt{1 + 4Q^2 \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2}} \quad (3.7)$$

A Figura 3.2 ilustra um gráfico desta última equação em função de $\Delta\omega/\omega_0$. Este gráfico apresenta a curva normalizada de seletividade ou ressonância, que é uma característica comum de circuitos ressonantes. Nesta mesma figura é apresentado a curva de fase de Z_{in} .

Através do gráfico, ou até mesmo da Equação (3.7), pode-se concluir que quando

$$\Delta\omega = \frac{\omega_0}{2Q} \quad (3.8)$$

a impedância $|Z_{in}| / R$ cai a 0,707 de seu valor máximo quando $\omega = \omega_0$, a reatância é igual à resistência e a potência dissipada no circuito cai à metade de seu valor de ressonância, ou seja, queda de 3 dB [7, 12].

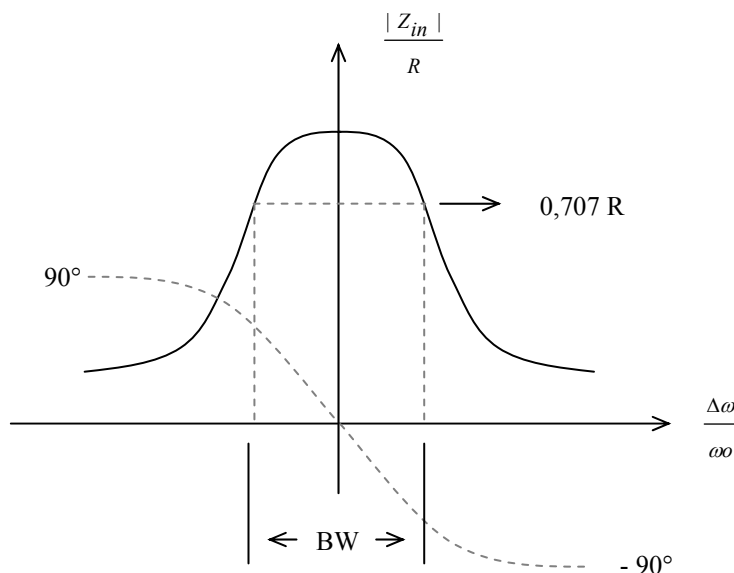


Figura 3.3. Curva de seletividade ou ressonância.

A faixa passante normalizada, definida como faixa normalizada compreendida entre os pontos de 3 dB, tem valor

$$BW = 2 \frac{1}{2Q} = \frac{1}{Q} \quad (3.9)$$

Esta relação permite que o fator de qualidade seja definido de uma outra forma, isto é, o Q do circuito ressonante é igual ao inverso da faixa passante normalizada.

Se a resistência R representar somente as perdas no circuito ressonante, o Q dado pela Equação (3.6) é denominado Q não carregado e pode ser representado por Q_0 . Se, por outro lado, o circuito ressonante é acoplado a uma carga externa e esta consome parte da potência fornecida, representando este carregamento por um resistor R_L , a resistência total será dada por $R // R_L$.

Portanto, o novo Q denominado Q carregado é representado por Q_L e será inferior ao Q não carregado, isto é:

$$Q_L = \frac{RR_L}{\omega L (R + R_L)} < Q_0$$

Define-se, finalmente, o Q externo, designado por Q_e , como sendo o Q que resultaria se o circuito ressonante fosse não dissipativo ($R = \infty$) e existisse somente o carregamento externo. Assim,

$$Q_e = \frac{R_L}{\omega L} \quad (3.10)$$

De acordo com as definições anteriores, pode-se concluir imediatamente a relação [7, 12]:

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_e} + \frac{1}{Q_0} \quad (3.11)$$

3.4. Q de “Feedback” – Q’

O fator de qualidade efetivo, conhecido como Q de “feedback”, se caracteriza na realimentação positiva do oscilador, se comportando como um filtro passa banda com o fator de qualidade muito superior ao Q_L da malha.

O Q de “feedback” é representado por [1]:

$$Q' = Q_L \frac{2}{\pi} \frac{P}{FkTB} \quad (3.12)$$

O que acarreta em uma banda passante de 3 dB:

$$BW' = BW \frac{2}{\pi} \frac{P}{FkTB} \quad (3.13)$$

É importante destacar que o ruído de fase de um oscilador, o qual foi apresentado no capítulo anterior, pode ser reduzido inserindo um filtro passa-banda de faixa passante bem estreita permitindo passar apenas a portadora gerada pelo oscilador, sendo esta a principal característica do Q de feedback Q' [1].

Afim de exemplificar o impacto do Q' na malha de oscilação, suponhamos a existência de um oscilador de baixo ruído com as seguintes características:

$$f_o = 100 \text{ MHz}$$

$$Q_L = 100$$

$$P_{out} = 0 \text{ dBm}$$

$$F(\text{dB}) = 30 \text{ dB}$$

Note que o valor de Q_L é bem pequeno, apenas 100.

Para este oscilador, a banda passante de 3 dB (BW_{3dB}) é

$$BW_{3dB} = \frac{f_0}{2Q} = \frac{10^8}{2 \times 10^2} = 500 \text{ kHz}$$

Poderia então supor que a banda passante de 3 dB se estenderia pelos 500 kHz e seria necessário trabalhar com uma frequência de “offset” (f_m) maior do que 500 kHz. Na verdade a banda passante real é obtida depois da filtragem feita pelo Q de feedback (Q'), que é dado pela Equação (3.12).

Mesmo com uma potência total de saída baixa de $P_{out} = 0 \text{ dBm}$ e uma figura de ruído pobre de $F = 30 \text{ dB}$, o valor apresentado por Q' é muito elevado, isto é:

$$B = \frac{f_0}{Q} = 1 \text{ MHz} = 60 \text{ dB}$$

$$kT = -174 \text{ dBm}$$

$$\frac{P}{FkTB} = (0 - 30 + 174 - 60) \text{ dB} = 84 \text{ dB} = 10^{8,4}$$

$$Q' = 100 \times \frac{2}{\pi} \times 10^{8,4}$$

$$Q' = 1,6 \times 10^{10}$$

Calculando agora a nova largura de banda de 3 dB:

$$BW'_{3dB} = \frac{f_0}{2Q'} = \frac{10^8}{2 \times 1,6 \times 10^{10}} = 0,003 \text{ Hz}$$

3.5. Comentários e Conclusões Finais

Ao longo do presente capítulo foram introduzidos os elementos básicos de um oscilador configurado em uma malha de realimentação. As definições de fator de qualidade não carregado, carregado e externo foram também introduzidas. Foi destacado o conceito de fator de qualidade em realimentação associada a um exemplo prático de um oscilador e sua banda passante de realimentação. Os elementos apresentados foram destacados em um capítulo por corresponderem às soluções que serão utilizadas para o desenvolvimento e caracterização de osciladores ao longo da presente dissertação.