UFMG

ELT085 – Circuitos Eletrônicos Analógicos

Prof. Dr. Thiago de Oliveira
Departamento de Eng. Eletrônica

gep
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

UFMG

Parte VI:

Osciladores e Geradores de Sinais

gep
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Osciladores e Geradores de Sinais

- São circuitos capazes de produzir sinais padronizados (senoide, quadrada, triangular, etc), com frequência e amplitude definidas pelo projetista;
- A utilidade destes sistemas está muito ligada à:
  - Sinais de teste;
  - Geração de sinal de sincronismo (clock, temporizador, etc);
  - Sinal de portadora para comunicação analógica e digital;
- Pode- categorizar os tipos de osciladores em dois tipos:
  - Osciladores lineares (onda senoidal);
  - Osciladores não-lineares (onda triangular e quadrada);
- Outra categoria de circuitos são os conformadores de sinal

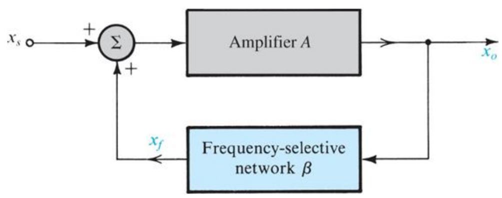
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Osciladores Lineares – Geradores de onda senoidal

- Os chamados osciladores lineares são normalmente compostos por dois tipos de elementos:
  - Um elemento linear (amplificador) realimentado positivamente, tendo uma malha de seleção de frequência na realimentação, que atua de modo que os pólos de malha fechada sejam alocados no eixo imaginário (marginalmente estável);
  - Um elemento não-linear capaz de estabilizar a tensão de saída do oscilador (garante a convergência dos pólos para o eixo imaginário, mesmo diante de incertezas de implementação);
- A análise e o projeto de osciladores lineares trata cada elemento separadamente, de modo que pode-se utilizar técnicas no domínio da frequência para o elemento linear e técnicas no domínio do tempo para o elemento não-linear;

Osciladores Lineares – Análise do elemento linear

- O elemento linear de um oscilador pode ser compreendido por meio do diagrama de blocos



$$A_{f(s)} = \frac{x_o(s)}{x_s(s)} = \frac{A(s)}{1 - A(s)\beta(s)}$$

$$L(s) = A(s)\beta(s)$$

5

Osciladores Lineares – Análise do elemento linear

- Critério de oscilação (Barkhausen):
  - Um oscilador é um sistema capaz de produzir uma saída finita e limitada com entrada nula;
  - Para o sistema realimentado, esta condição apenas é satisfeita se em alguma frequência $\omega_0 \rightarrow L(j\omega_0) = 1$, de modo que $A_f \rightarrow \infty$;
  - Para se produzir um sinal senoidal, é importante que $L(j\omega) = 1$, se e somente se $\omega = \omega_0$, caso contrário outra frequências podem ser excitadas pelo circuito, deformando a forma de onda;

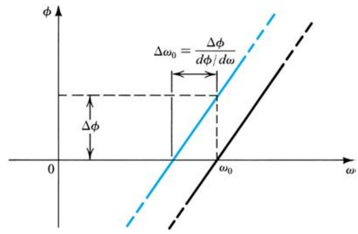
- A frequência na qual o sistema oscila é definida pela característica de fase da malha de realimentação:
  - A estabilidade da frequência de oscilação depende da sensibilidade da curva de phase de L(s) com a variação de frequência;

6

GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Osciladores Lineares – Análise do elemento linear

- Estabilidade da frequência oscilante



- Se no ponto $\phi = 0^o$, $\frac{d\phi}{d\omega} \gg 1$, uma variação de fase (provocada por um dos elementos do circuito) não gerará uma variação de frequência significativa;
- Tanto a unicidade da frequência ω_0 quanto a sua estabilidade são atingidas se os zeros de $1 - L(s)$ estiverem no eixo imaginário, ou seja:

$$1 - L(s) \approx s^2 + \omega_0^2$$

7

GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Osciladores Lineares – Análise do elemento linear

- Metodologia de análise de um circuito oscilador linear:
  1. Abra a malha e determine o ganho de malha;
  2. Avalie para qual frequência (ω_0) $\angle L(j\omega) = 0$;
  3. Verifique qual a condição que faz $|L(j\omega_0)| = 1$;

- Um ponto importante sobre o critério de barkhausen é que ele não garante, porém, que o circuito oscilador irá realmente oscilar

$$\frac{x_o}{x_s} = \frac{A(j\omega_0)}{1 - L(j\omega_0)}$$

$$x_o\big(1 - L(j\omega_0)\big) = x_s A(j\omega_0) = 0$$

Note que esta equação tem duas soluções:

$$1 - L(j\omega_0) = 0$$

$$x_0 = 0$$

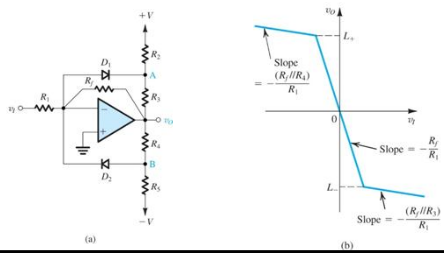
Barkhausen é uma condição necessária para um oscilador, mas não suficiente!

8

GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Osciladores Lineares – Análise do elemento linear

- Como fazer com que um oscilador linear oscile?
  - Após encontrar as condições que satisfazem o critério de barkhausen;
  - Faça $|L(j\omega_0|$ levemente maior do que a unidade.
  - Isso irá alocar os pólos de L(s) no semi-plano direito, produzindo uma saída instável;
  - Quando a amplitude da saída atingir um valor desejado, acione um sistema não linear para levar $|L(j\omega_0| = 1$;
- Exemplo de sistema não-linear para limitação de ganho



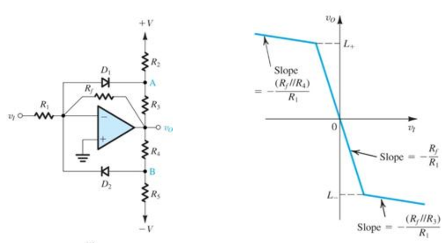
- Quando os diodos conduzem, o ganho do amplificador muda;
- Projetar para que a condução dos diodos ocorra quando Vo atingir uma amplitude desejada

9

GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Osciladores Lineares – Análise do elemento linear

- Como fazer com que um oscilador linear oscile?
  - Após encontrar as condições que satisfazem o critério de barkhausen;
  - Faça $|L(j\omega_0|$ levemente maior do que a unidade.
  - Isso irá alocar os pólos de L(s) no semi-plano direito, produzindo uma saída instável;
  - Quando a amplitude da saída atingir um valor desejado, acione um sistema não linear para levar $|L(j\omega_0| = 1$;
- Exemplo de sistema não-linear para limitação de ganho



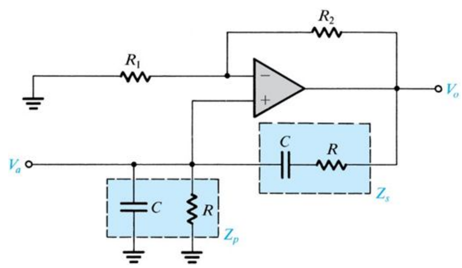
- Quando os diodos conduzem, o ganho do amplificador muda;
- Projetar para que a condução dos diodos ocorra quando Vo atingir uma amplitude desejada

10

GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Osciladores Lineares – Topologias clássicas

- Ponte de Wien ou Ponte de Viena:



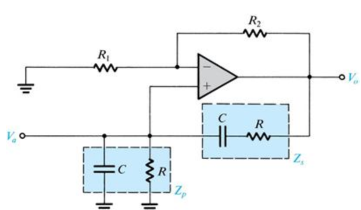
$$L(s) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{R \parallel \frac{1}{sC}}{\left(R + \frac{1}{sC}\right)\left(R \parallel \frac{1}{sC}\right)} = \frac{(1 + R_2/R_1)}{3 + sCR + 1/sCR}$$

11

GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Osciladores Lineares – Topologias clássicas

- Ponte de Wien ou Ponte de Viena:



$$L(j\omega) = \frac{(1 + R_2/R_1)}{3 + j\omega CR + 1/j\omega CR}$$

$$\angle\big(L(j\omega)\big) = 0 \rightarrow (\omega CR = 1/\omega CR)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{CR}$$

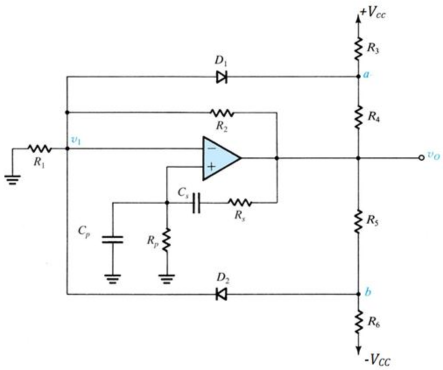
$$|L(j\omega)| = 1 \rightarrow \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 3$$

$$\frac{R_2}{R_1} = 2$$

12

Osciladores Lineares – Topologias clássicas

- Ponte de Wien ou Ponte de Viena – Circuito não-linear



$$v_1 = \frac{v_0}{3} \qquad v_{D1} = v_1 - v_A$$

$$v_A = \frac{V_{CC}R_4}{R_3 + R_4} + \frac{v_O R_3}{R_3 + R_4}$$

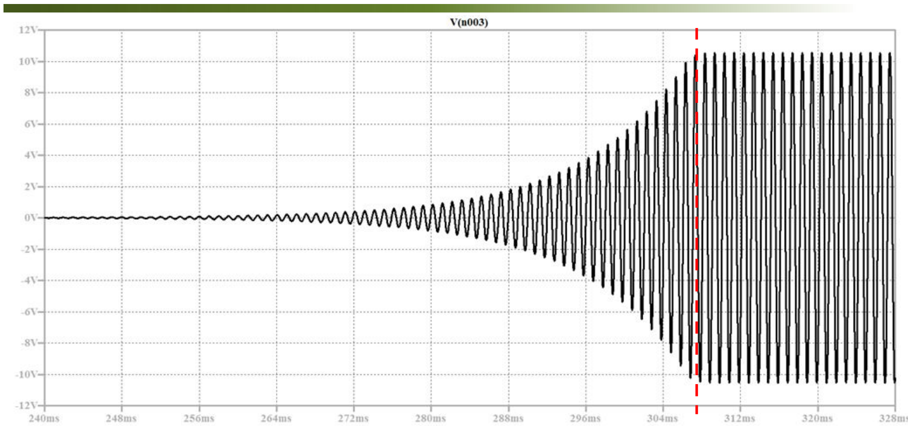
OBS: D1 conduz quando Vo<0

$$v_O = -\widehat{V_O} \qquad v_{D1} = 0{,}7V$$

$$\boxed{\widehat{V_O} = \frac{3V_{CC}R_4 + 2{,}1(R_3 + R_4)}{2R_3 - R_4}}$$

13

Osciladores Lineares – Ponte de Wien

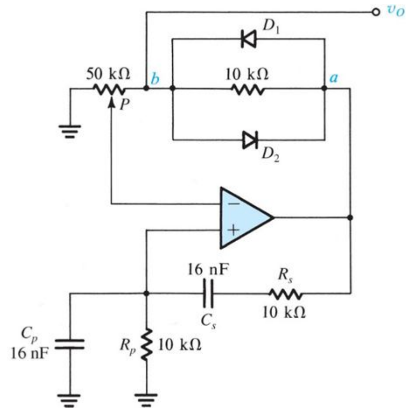


Limitador entra em ação

14

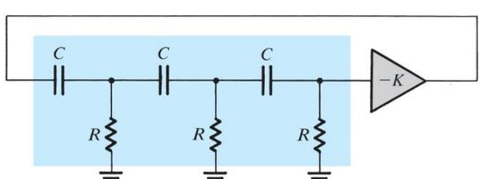
Osciladores Lineares – Ponte de Wien

- Limitador não-linear alterantivo



Osciladores Lineares – Deslocamento de Fase

- O circuito oscilará quando o deslocamento de fase da malha RC de realimentação for 180º

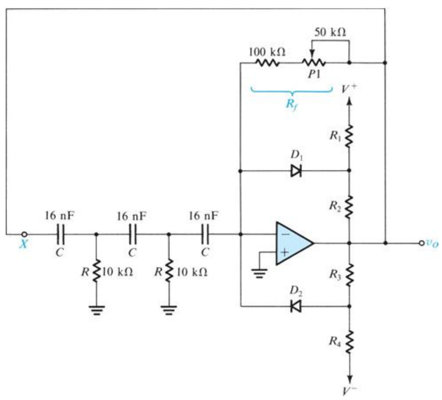


$$A\beta = -K \cdot \frac{s^3C^3R^3}{s^3C^3R^3 + 6 \cdot s^2C^2R^2 + 5 \cdot sCR + 1}$$

GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Osciladores Lineares – Deslocamento de Fase

- Implementação Prática



$$K = \frac{R_f}{Z_{th}}$$

$$A\beta = -\frac{\mathrm{R_f}}{\mathrm{R}} \cdot \frac{s^3C^3R^3}{3s^2C^2R^2 + 4sCR + 1}$$

$$A(j\omega)\beta(j\omega) = \frac{R_f R\omega^2C^2}{4 + j(3\omega CR - \frac{1}{\omega CR})}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{RC\sqrt{3}}$$

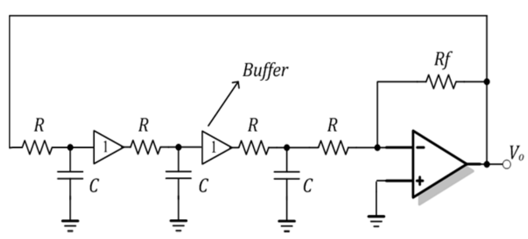
$$R_f \geq 12R$$

$$|V_{opico}| \approx \frac{V_{CC}R_2}{R_1} + 0.7 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Osciladores Lineares – Deslocamento de Fase

- Variação de implementação

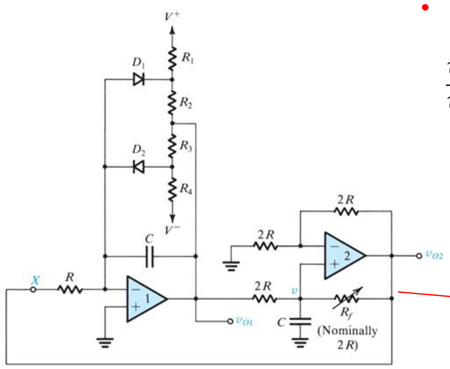


- Deduzir as equações do critério de Barkhausen

GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Osciladores Lineares – Quadratura

- Circuito implementado como a cascata de dois integradores (um inversor e outro não-inversor)



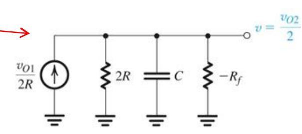
(a)

- Se $R_f = 2R$, o circuito se iguala a um integrador

$$\frac{v_{o2}}{v_{o1}} = \frac{1}{sCR} \rightarrow A\beta = -\frac{1}{(sCR)^2}$$

$$\boxed{\omega_0 = \frac{1}{CR}}$$

- Se $R_f < 2R$, o circuito se instabiliza

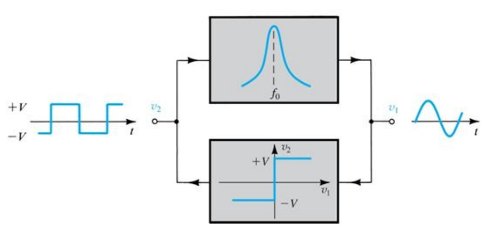


(b)

GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Osciladores Lineares – Filtro sintonizado

- Outra possibilidade de implementação de osciladores lineares com operacionais é se associar um filtro passa-faixas altamente seletivo com um limitador;



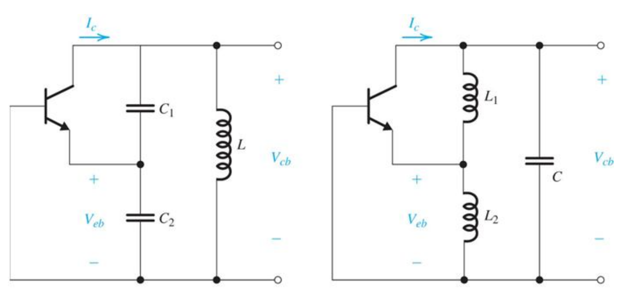
Osciladores Lineares – Transistorizados

- Para gerar sinais senoidais de frequências elevadas, osciladores com amplificadores operacionais não são utilizados, pois características como Slew rate e banda passante dos dispositivos limita o desempenho destes sistemas;
- Nestes casos, circuitos transistorizados com filtros seletivos LC ou que empreguem cristais são mais comuns
- Aplicações:
  - Geradores de portadoras para moduladores de telecomunicações;
  - Geradores de clock

21

Osciladores Lineares – Colpitts e Hartley

- O circuito tanque define um filtro passa-faixas seletivo que estabelece a frequência de oscilação;
- O divisor capacitivo (colpitts) ou indutivo (hartley) estabelece a realimentação do circuito e pode ser utilizado para iniciar a oscilação do circuito;
- A limitação de amplitude é naturalmente produzida pela característica não linear do transistor;



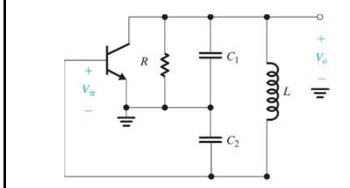
(a) (b)

22

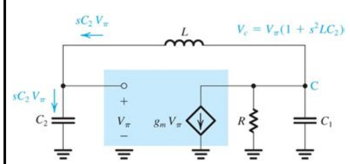
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Osciladores Lineares – Colpitts e Hartley

- Colpitts



(a)

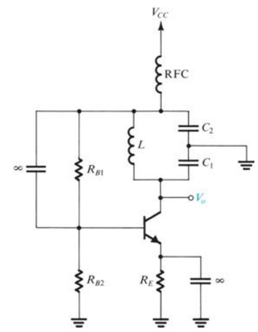


(b)

$$A\beta = -g_m\left(R \parallel \frac{1}{sC_1} \parallel \left(sL + \frac{1}{sC_2}\right)\right)\left(\frac{\frac{1}{sC_2}}{\frac{1}{sC_2} + s_L}\right)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\frac{LC_1C_2}{C_1 + C_2}}}$$

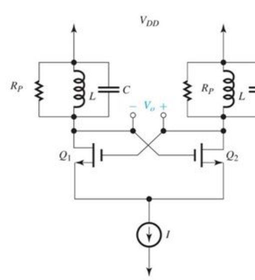
$$g_m R = \frac{C_1}{C_2}$$



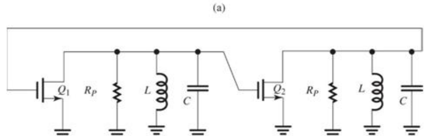
23

GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Osciladores Lineares – Oscilador LC de acoplamento cruzado



(a)



(b)

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Nesta frequência:

$$A_1 = A_2 = -g_m(R_p \parallel r_o)$$

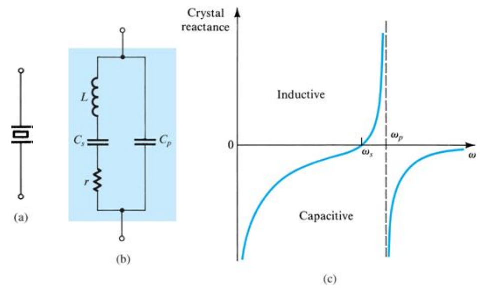
Logo, para oscilar:

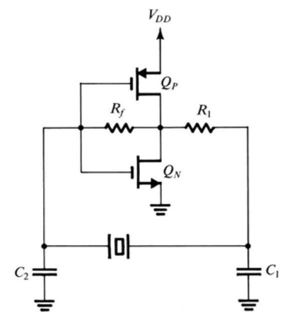
$$g_m(R_p \parallel r_o) = 1$$

24

Osciladores Lineares – Oscilador a cristal

- Cristais piezo-elétricos possuem uma ressonância eletromecânica muito estável e por isso tais circuitos são muito utilizados na geração de sinais de sincronismo;





25