Osciladores

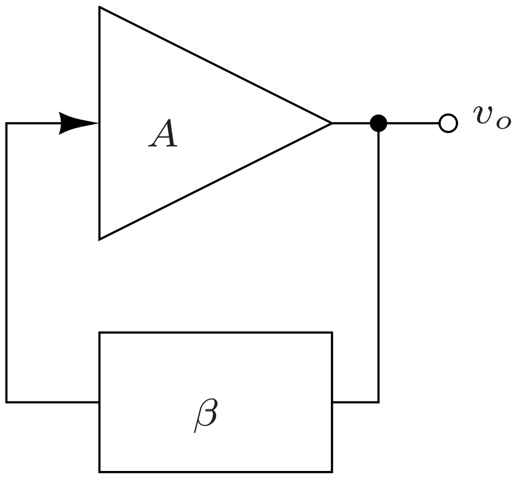
- Um oscilador é um dispositivo que produz um sinal alternado periódico sem a necessidade de qualquer sinal de entrada.
- O termo está mais associado à produção de ondas sinusoidais, enquanto que os geradores de ondas rectangulares são normalmente chamados de multivibradores.
- Um gerador de funções é um dispositivo laboratorial que permite produzir ondas sinusoidais, quadradas ou triangulares com frequências e amplitudes ajustadas pelo utilizador.
- Algumas características de um oscilador sinusoidal incluem a produção de ondas sinusoidais com muito baixa distorção e em muitas aplicações, a funcionalidade se ser facilmente ajustado para que o utilizador possa variar a sua frequência numa gama considerável.

- Uma oscilação é uma forma de instabilidade causada pela realimentação negativa que reforça um sinal que acabaria por desaparecer devido a perdas de energia.
- Para que a realimentação seja regenerativa (repõe a perda de energia do sinal) deve satisfazer certas relaçẽs de amplitude e fase que serão discutidas resumidamente.
- As oscilações também podem ser obtidas de uma forma indesejada em amplificadores de alto ganho com malhas de realimentação indesejadas que produzem a regeneração do sinal a uma ou mais frequências.
- Ao contrário, um oscilador é projectado com uma malha de realimentação de características conhecidas, para que ocorra a oscilação a uma frequência predeterminada.

O critério de Barkhausen

- Um oscilador é um circuito que não tem sinal de entrada, o que pode levar á questão do que é que significa a realimentação: realimentação de quê? Na realidade não faz qualquer diferença.
- Apenas existe uma malha fechada em que não é adicionado nenhum sinal de entrada.
- Pode começar-se a análise num ponto qualquer da malha fechada e considerar que aí fica tanto a entrada como a saída do circuito.
- Pode pensar-se na malha de realimentação como sendo todo o caminho que o sinal percorre ao percorrer a malha.
- É conveniente considerar a saída do amplificador como ponto de referência e ver a malha de realimentação como sendo o circuito que fica entre a saída do amplificador e a sua entrada.

- Este ponto de vista está ilustrado na figura, onde o amplificador tem um ganho A e uma malha de realimentação com um ganho β.



- β é a razão de realimentação, ou seja, é a percentagem da saída que é trazida de novo para a entrada do amplificador.
- Qualquer oscilador deve ter um amplificador, ou um dispositivo equivalente, que retire energia de uma fonte de tensão contínua para compensar as perdas que o sinal sofre ao longo da malha.

- Para ocorrer oscilação, o ganho em malha fechada deve satisfazer o critério de Barkhausen, ou seja:

$$A\beta = 1.$$

- Imagine-se uma pequena variação no nível do sinal de entrada do amplificador, devido a algum ruído existente no circuito, por exemplo.
- Basicamente, o critério de Barkhausen diz que esta variação será reforçada e a regeneração do sinal ocorrerá apenas se o ganho em malha fechada do circuito, no ponto onde a variação ocorreu, for unitário.
- É importante salientar que o ganho unitário não se refere apenas à amplitude mas também à fase.

- Normalmente a realimentação negativa faz com que o ganho dos amplificadores diminua, uma vez que o sinal realimentado está em oposição de fase com o de entrada.
- Contrastando com isto, o critério do ganho unitário para ocorrerem oscilações também é chamado de realimentação positiva, pois o sinal realimentado está em fase com o sinal de entrada (considerando o ruído existente como sinal de entrada).

- Para que o critério de Barkhausen seja compreendido e aplicado, deve tomar-se em consideração tanto o ganho como o deslocamento de fase de $A\beta$ em função da frequência.
- Elementos indutivos ou capacitivos existentes no amplificador ou na malha de realimentação fazem com que o ganho e o deslocamento de fase variem com a frequência.
- Existe apenas uma frequência à qual o ganho é unitário e o deslocamento de fase é nulo (múltiplo de $2\pi\ rad$).
- O sistema oscila então a essa frequência.
- Projectar um oscilador consiste então em seleccionar os componentes indutivos ou capacitivos e colocá-los num circuito para que as condições anteriores sejam verificadas à frequência pretendida.

- Para mostrar a dependência entre o ganho em malha fechada $A\beta$ e a frequência, este irá ser denotado de $A\beta(j\omega)$, um fasor complexo que pode ser expresso tanto na forma rectangular como polar:

  $$A\beta(j\omega) = |A\beta|\angle\theta = |A\beta|\cos\theta + j|A\beta|\sin\theta,$$

  onde $|A\beta|$ é o ganho em função da frequência e θ é o deslocamento de fase.

- O critério de Barkhausen diz o seguinte:

  $$|A\beta| = 1$$
  $$\theta = \pm 2k\pi,$$

  onde k é um número inteiro.

- Nas formas rectangular e polar, o critério de Barkhausen é expresso por:

  $$A\beta(j\omega) = 1\angle \pm 2k\pi = 1 + 0j.$$

Exemplo: O ganho de um amplificador em função da frequência é $A(j\omega) = -16 \times 10^6 / j\omega$. A malha de realimentação tem um $\beta(j\omega) = 10^3/(2 \times 10^3 + j\omega)^2$. Será que o sistema oscila? Em caso afirmativo, a que frequência?

R: O ganho em malha fechada é dado por:

$$A\beta = \left(\frac{-16\times10^6}{j\omega}\right)\left[\frac{10^3}{(2\times10^3+j\omega)^2}\right] =$$

$$\frac{-16\times10^9}{j\omega(2\times10+j\omega)^2}.$$

Para determinar se o sistema oscila, primeiro calcula-se a frequência (se existir) para a qual a fase é nula. para o cálculo da fase vem:

$$\begin{aligned}
\theta &= \angle\frac{-16\times10^9}{j\omega(2\times10+j\omega)^2} = \\
&= \angle(-16\times10^9) + \angle\frac{1}{j\omega} + \angle\frac{1}{2\times10^3+j\omega} + \\
&\qquad \angle\frac{1}{2\times10^3+j\omega} = \\
&= -\pi - \frac{\pi}{2} - 2\arctan\frac{\omega}{2\times10^3}.
\end{aligned}$$

Para que $\theta = -2\pi$, basta que $2\arctan(\omega/2\times 10^3) = \pi/2$, ou seja:

$$\begin{aligned}
\arctan\frac{\omega}{2\times 10^3} &= \frac{\pi}{4}\\
\frac{\omega}{2\times 10^3} &= 1\\
\omega &= 2\times 10^3\ rad/s.
\end{aligned}$$

Portanto, o desvio de fase ao longo da malha fechada é de $-2\pi\ rad$ quando $\omega = 2000\ rad/s$. Agora deve verificar-se se a esta frequência, o ganho é unitário. O ganho é dado por:

$$|A\beta| = \left|\frac{-16\times 10^9}{j\omega(2\times 10^3 + j\omega)^2}\right|.$$

Substituindo ω por 2000, vem:

$$\begin{aligned}
|A\beta| &= \left|\frac{-16\times 10^9}{2000j(2000+2000j)^2}\right| =\\
&= \frac{-16\times 10^9}{2000j(2000^2+2\times 2000^2 j - 2000^2)} =\\
&= 1.
\end{aligned}$$

O critério de Barkhausen é satisfeito para $\omega = 2000\ rad/s$. A frequência de oscilação é de $\omega/2\pi = 318.3\ Hz$.

Neste caso, foi usada a forma polar do critério de Barkhausen, uma vez que foi calculado o ângulo para o qual o desvio de fase era de $\pm k\pi\ rad$. Também se pode resolver o problema (obtendo-se o mesmo resultado) usando a forma rectangular do critério de Barkhausen: $A\beta = 1 + 0j$

$$A\beta = 1 = \frac{-16 \times 10^9}{j\omega(2 \times 10^3 + j\omega)^2} =$$

$$\frac{-16 \times 10^9}{j\omega(4 \times 10^6 + 4 \times 10^3 j\omega - \omega^2)}$$

Daqui tira-se que:

$$\frac{-16 \times 10^9}{4 \times 10^6 j\omega - 4 \times 10^3 \omega^2 - j\omega^3} = 1$$

$$-16 \times 10^9 = 4 \times 10^6 j\omega - 4 \times 10^3 \omega^2 - j\omega^3.$$

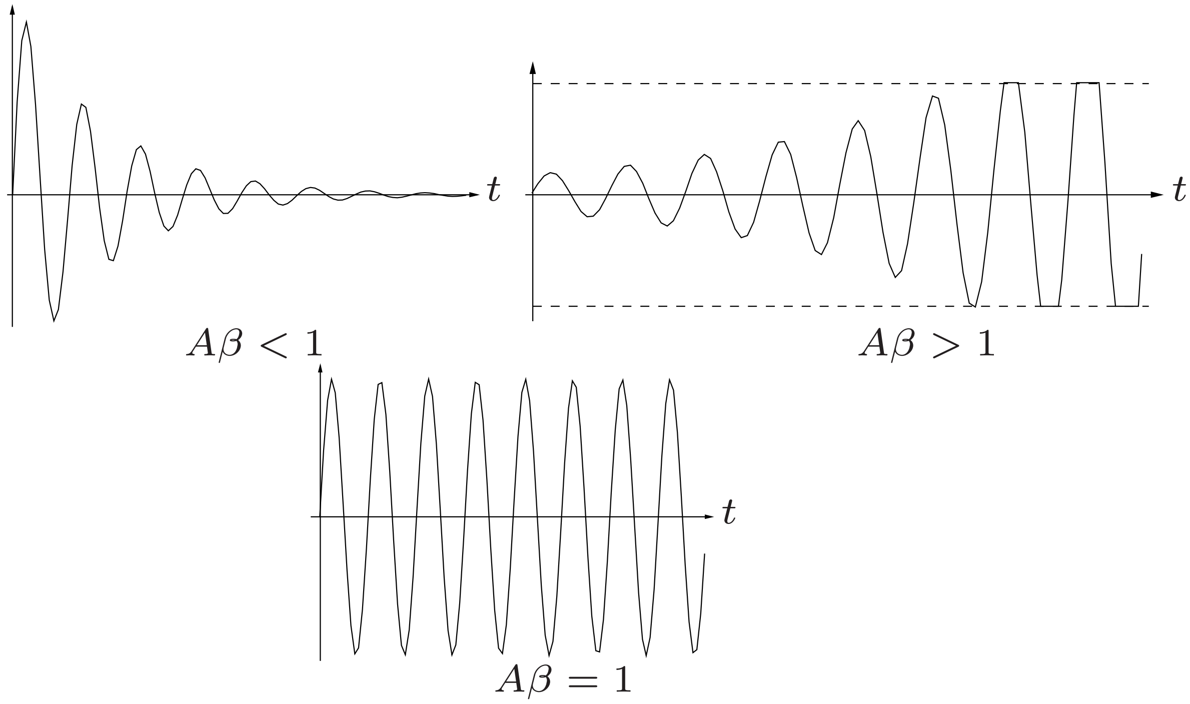
Para que as duas expressões sejam iguais, as suas partes reais e imaginárias devem ser iguais simultaneamente:

$$\begin{cases} -16 \times 10^9 = -4 \times 10^3 \omega^2 \\ 0 = 4 \times 10^6 \omega - \omega^3. \end{cases}$$

As duas condições anteriores são verdadeiras para $\omega = 2000\ rad/s$, ou seja, o sistema oscila à frequência de $318.3\ Hz$.

Arranque das oscilações

- Qualquer circuito tem associado algum ruído que normalmente tem componentes em todas as frequências do espectro.
- Quando se liga um circuito oscilador, o único sinal existente é o ruído.
- Esse ruído é amplificado e realimentado à entrada, mas apenas uma frequência satisfaz o critério de Barkhausen, logo o oscilador vai produzir um sinal dessa frequência.
- E a amplitude do sinal? No início das oscilações, o produto $A\beta$ deve ser maior do que um para que a amplitude das oscilações aumente.
- Quando for atingida a amplitude desejada, o produto $A\beta$ deve ser igual a um, para que as oscilações continuem indefinidamente.



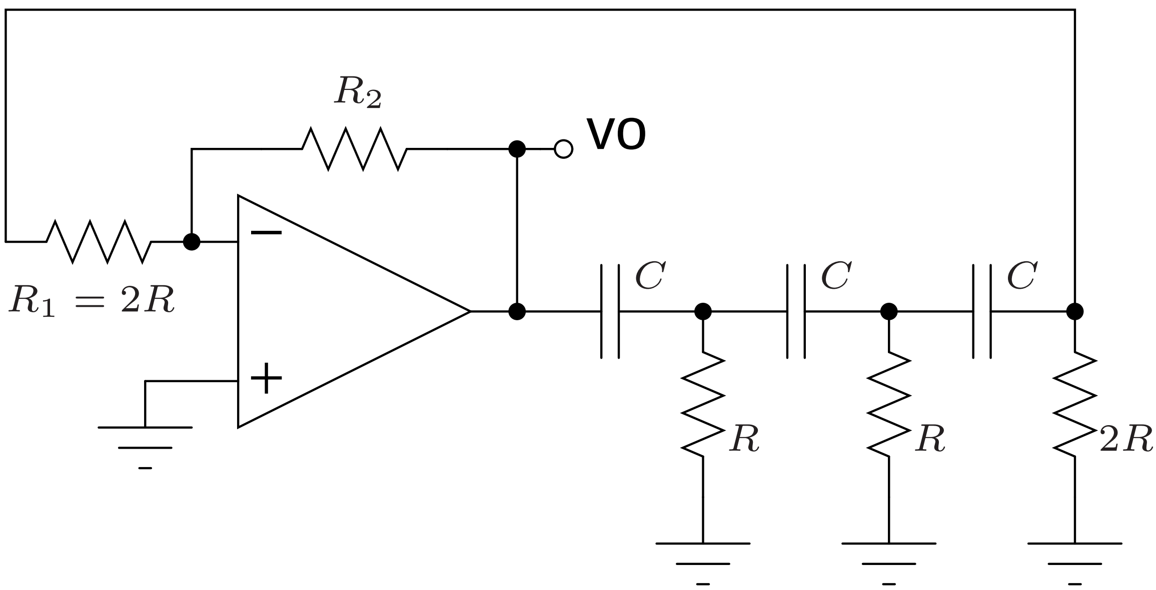
$A\beta < 1$ $A\beta > 1$

$A\beta = 1$

- Para que um oscilador arranque, é necessário que inicialmente o produto $A\beta$ seja maior do que um para que a amplitude das oscilações aumente a partir da pequena amplitude do ruído existente no circuito.
- Quando a amplitude atingir um nível razoável, o produto $A\beta$ deve diminuir para a unidade, com o objectivo de manter as oscilações com uma amplitude constante.

O oscilador RC por deslocamento de fase

- Um dos circuitos osciladores mais simples, que usa um amplificador operacional está representado na figura.



- O amplificador operacional está ligado na configuração inversora e alimenta três secções RC em cascata.

- O amplificador inversor provoca um desvio de π *rad* no sinal que o atravessa.
- O objectivo das três secções RC é introduzir outro desvio de fase de π *rad*.
- É de notar que o sinal que passa por uma secção RC, tem um deslocamento de fase que depende da frequência.
- Quando o sinal atravessa as três secções, vai haver uma frequência para a qual o desvio de fase é de π *rad*. Quando o sinal com essa frequência for realimentado na entrada do amplificador inversor, o desvio total de fase será de 2π *rad* e ocorrerão oscilações a essa frequência.
- As três secções da malha RC introduzem algumas perdas na amplitude do sinal.
- Essas perdas são recuperadas no amplificador, bastando para isso ajustar o seu ganho que é dado por $-R_2/2R$.

- Com alguma habilidade matemática, pode demonstrar-se que a razão de realimentação determinada pela cascata RC é

$$\beta = \frac{R^3}{(R^3 - 5RX_c^2) + j(X_c^3 - 6R^2X_c)},$$

onde $X_c = 1/j\omega C$ é a impedância dos condensadores.

- Para que ocorram oscilações, a cascata RC deve desviar a fase do sinal de $\pi\ rad$, o que significa que o ângulo de β deve ser de $\pi\ rad$.

- Para que o ângulo de β seja de $\pi\ rad$, a parte imaginária da expressão deve ser nula.

- Portanto, pode calcular-se a frequência de oscilação igualando a parte imaginária de β a zero, o que dá:

$$\begin{aligned}
X_c^3 - 6R^2X_c &= 0 \\
X_c^3 &= 6R^2X_c \\
X_c^2 &= 6R^2 \\
\frac{1}{(\omega C)^2} &= 6R^2 \\
\omega &= \frac{1}{\sqrt{6}RC}\ rad/s,
\end{aligned}$$

ou

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC}\ Hz.$$

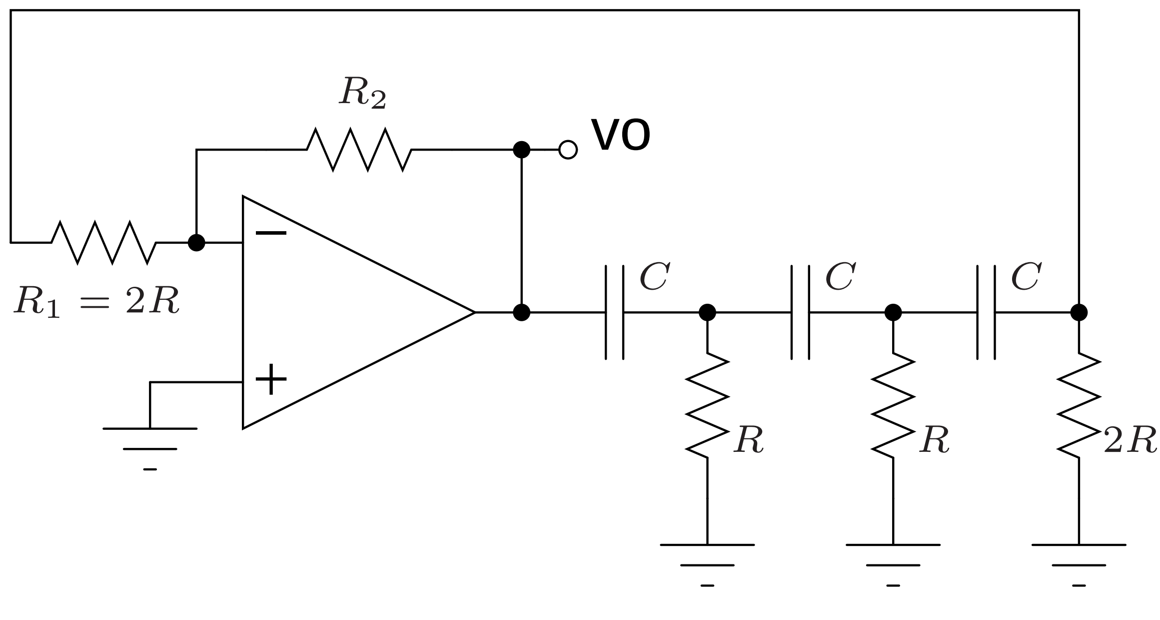
- É de salientar que R_1 está virtualmente em paralelo com a resistência de $2R$ da cascata RC. O valor desse paralelo é R, fazendo com que as três secções RC sejam iguais.
- Para determinar o ganho do amplificador inversor, deve calcular-se em primeiro lugar a perda introduzida pela cascata RC.
- Isto obtém-se calculando a amplitude de β à frequência de oscilação: $\omega = 1/(\sqrt{6}RC)$.
- Como foi visto, a essa frequência a parte imaginária de β é nula, ou seja:

$$\begin{aligned}
\beta &= \frac{R^3}{R^3 - 5RX_c^2} \\
&= \frac{R^3}{R^3 - 5R(\sqrt{6}RC/C)^2} \\
&= \frac{R^3}{R^3 - 30R^3} \\
&= -\frac{1}{29}.
\end{aligned}$$

- O sinal de menos confirma que a cascata RC desvia a fase de π rad à frequência de oscilação.
- Também se concluí que para que o produto $A\beta$ seja unitário, o ganho do amplificador deve ser igual a -29, ou seja:

$$\frac{R_2}{R_1} = 29.$$

Exemplo: Projecte um oscilador RC por deslocamento de fase para funcionar a 100 Hz, usando o circuito da figura.



R:

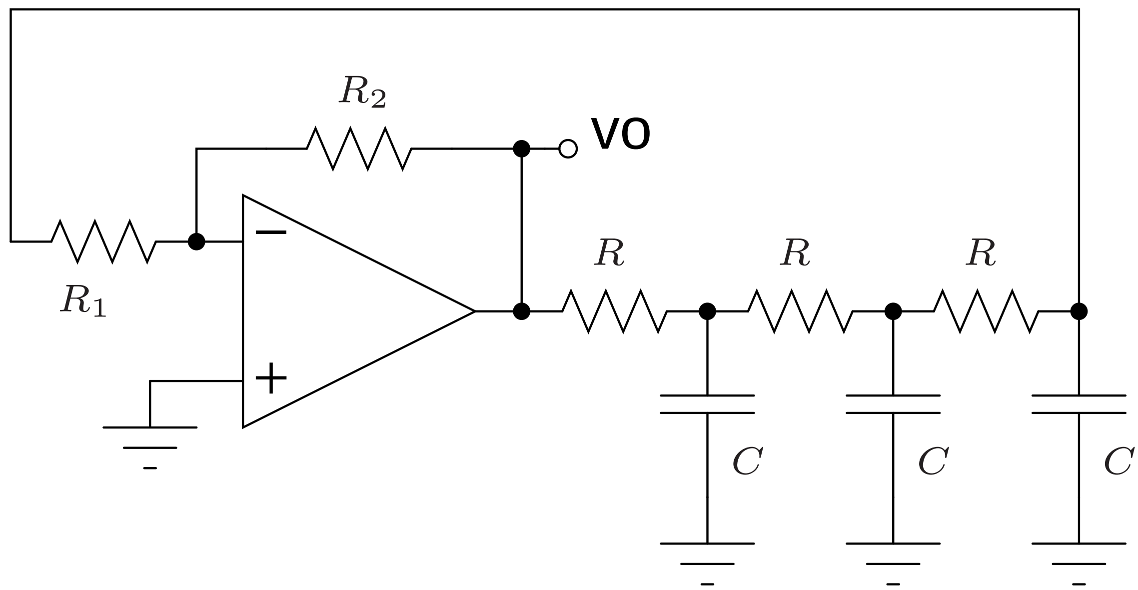
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC} = 100\ Hz.$$

Fazendo $R = 10\ k\Omega$, $2R = 20\ k\Omega$ e

$$C = \frac{1}{100 \times 2\pi\sqrt{6} \times 10k} = 65\ nF$$

$$R_2 = 29 \times 20k = 580\ k\Omega.$$

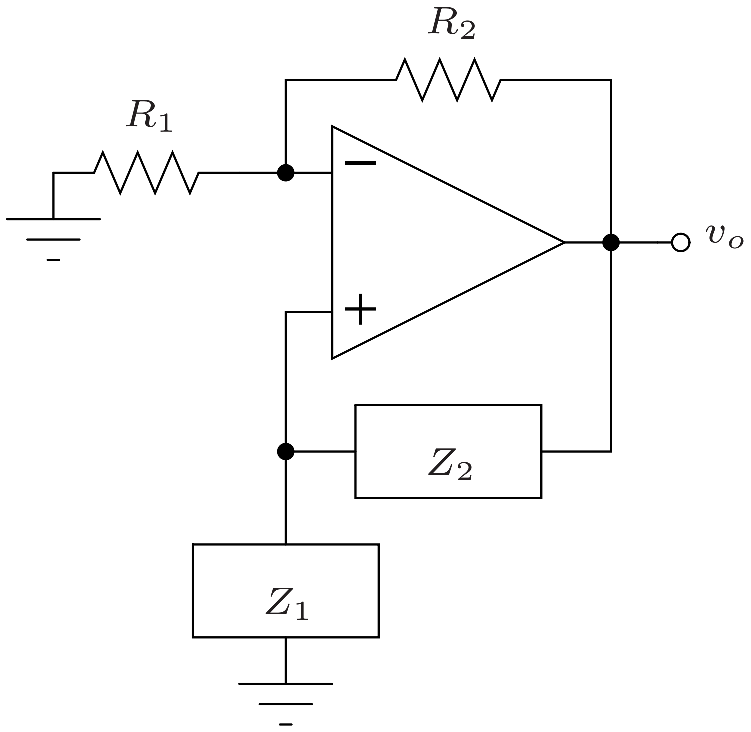
- Um outro modo de construir o oscilador RC por deslocamento de fase consiste em trocar as resistências com os condensadores, resultando no circuito da figura.



- O funcionamento deste circuito é em tudo idêntico ao anterior.
- Deve ter-se no entanto em atenção o facto de o último condensador da cascata estar virtualmente em paralelo com R_1, o que altera um pouco a frequência de oscilação.

O oscilador em ponte de Wien

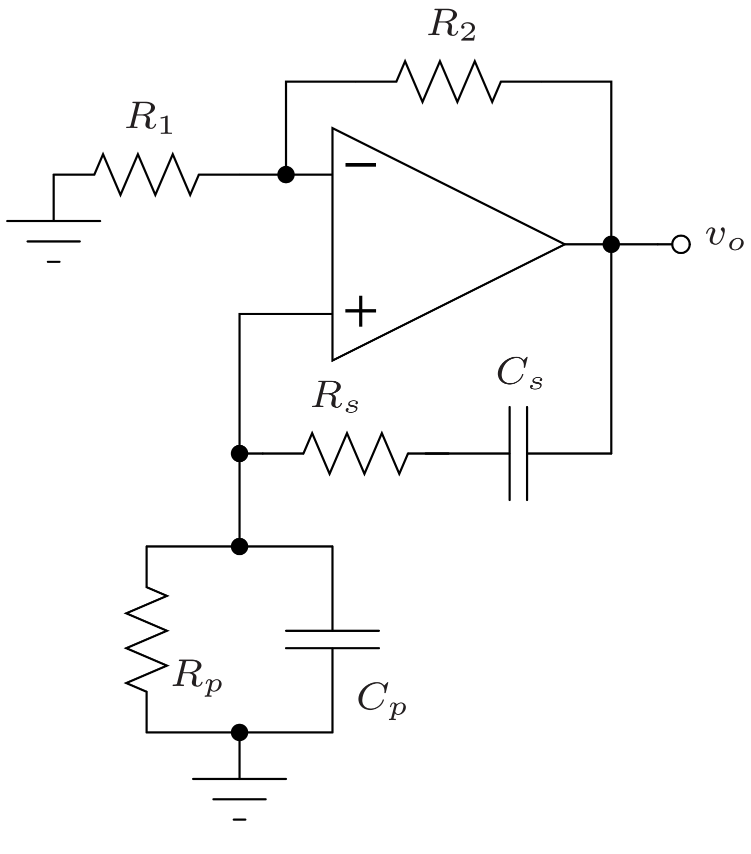
- A figura mostra um oscilador muito popular, chamado de ponte de Wien.



- O amplificador operacional é usado numa configuração não inversora e as impedâncias Z_1 e Z_2 formam um divisor de tensão que determina a razão de realimentação.

- É de notar que o divisor de tensão formado pelas impedâncias faz com que uma parte da tensão de saída seja realimentada na entrada não inversora do amplificador operacional.
- As resistências R_1 e R_2 determinam o ganho e são seleccionadas de modo a que o ganho em malha fechada seja igual a 1.
- Se as impedâncias Z_1 e Z_2 forem adequadas, há uma frequência para a qual o desvio de fase do sinal realimentado é nulo.
- Como o amplificador está ligado na configuração não inversora, o seu desvio de fase também é nulo, o que faz com que o desvio de fase total ao longo da malha fechada é zero à frequência de oscilação, verificando o critério de Barkhausen.

- No caso do oscilador em ponte de Wien, Z_1 é um circuito RC série e Z_2 é um circuito RC em paralelo, tal como mostra a figura.



- Neste caso,

$$Z_1 = R_p || - jX_{c_p} = \frac{-JR_pX_{c_p}}{R_p - jX_{c_p}}$$

$$Z_2 = R_s - jX_{c_s}.$$

- A razão de realimentação é dada por:

$$\beta = \frac{v_p}{v_o} = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} =$$

$$\frac{-jR_pX_{c_p}/(R_p - jX_{c_p})}{R_s - jX_{c_s} - jR_pX_{c_p}/(R_p - jX_{c_p})},$$

que depois de simplificado, dá:

$$\beta = \frac{R_pX_{c_p}}{(R_sX_{c_p} + R_pX_{c_s} + R_pX_{c_p}) + j(R_sR_p - X_{c_s}X_{c_p})}.$$

- Para que v_p esteja em fase com v_o, a parte imaginária da equação anterior deve ser nula, ou seja:

$$\begin{aligned} R_sR_p - X_{c_s}X_{c_p} &= 0 \\ R_sR_p &= \frac{1}{\omega C_s}\frac{1}{\omega C_p} \\ \omega^2 &= \frac{1}{R_sR_pC_sC_p} \\ \omega &= \frac{1}{\sqrt{R_sR_pC_sC_p}}\ rad/s \end{aligned}$$

- Normalmente faz-se $R = R_s = R_p$ e $C = C_s = C_p$.

- Neste caso, a frequência de oscilação é dada apenas por:

$$\omega = \frac{1}{RC}\ rad/s,$$

ou

$$f = \frac{1}{2\pi RC}\ Hz.$$

- A partir da equação da frequência, vem:

$$R = \frac{1}{\omega C} = X_c.$$

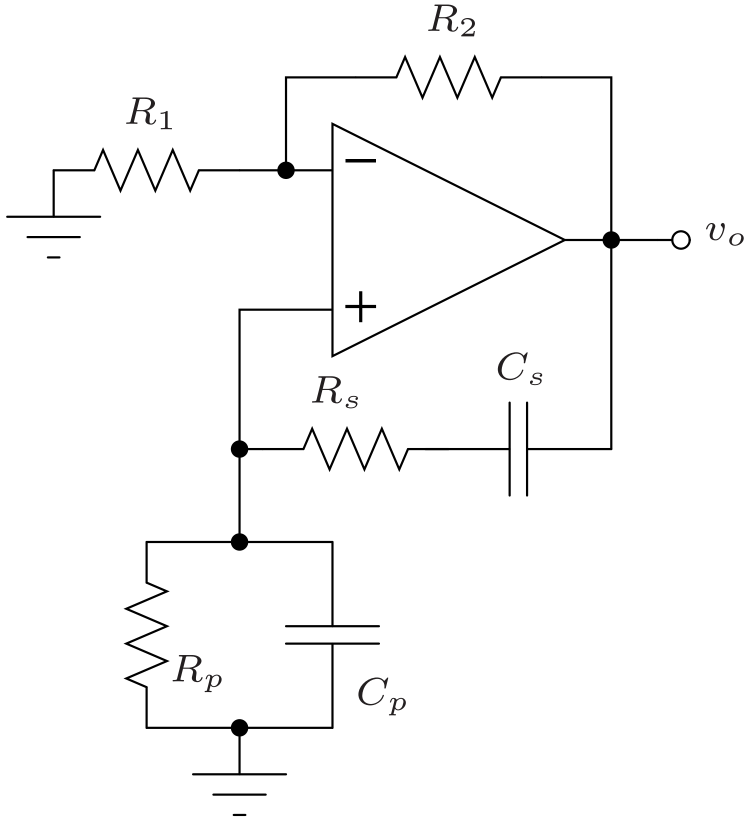
- Substituindo na equação do β, dá:

$$\beta = \frac{R^2}{3R^2 + j0} = \frac{1}{3}.$$

Isto significa que o amplificador deve ter um ganho de $A = 3$ para que o ganho total em malha fechada ($A\beta$) seja unitário. Como o ganho do amplificador é dado por $A = 1 + (R_2/R_1)$, vem:

$$1 + \frac{R_2}{R_1} = 3 \Leftrightarrow R_2 = 2R_1.$$

Exemplo: Projecte um oscilador em ponte de Wien de 25 kHz, baseado no circuito da figura.



R:

Considerando $R_s = R_p = 10\ k\Omega$.

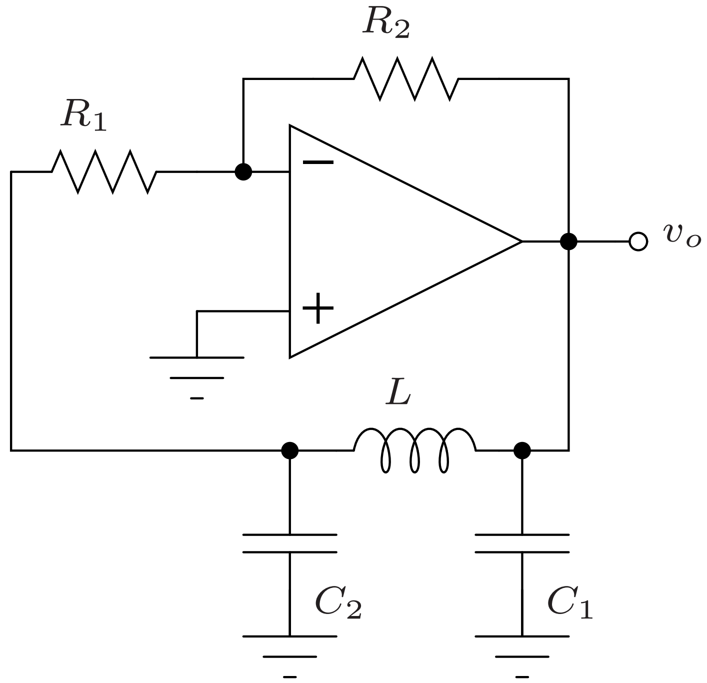
$$f = 25k = \frac{1}{2\pi \times 10k \times C} \Leftrightarrow C_s = C_p = 636.6\ pF.$$

Considerando $R_1 = 10\ k\Omega$,

$$R_2 = 2R_1 = 20\ k\Omega.$$

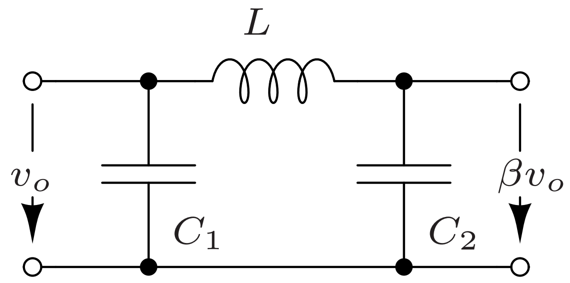
O oscilador Colpitts

- A malha de realimentação é constituída por um circuito LC ressonante.



- A frequência de oscilação é dada pela frequência de ressonância da rede LC, que é a frequência para a qual o desvio de fase é de $\pi\ rad$.
- A essa frequência, a impedância da rede LC é representada por um número real, ou seja, tem uma parte imaginária nula.

- A figura mostra a malha de realimentação do oscilador Colpitts.



- A impedância desta malha, sob o ponto de vista da saída do amplificador operacional é dada pelo paralelo de $-jX_{C1}$ com $jX_L - jX_{C2}$:

$$Z = \frac{(-jX_{C1})(jX_L - jX_{C2})}{(-jX_{C1}) + (jX_L - jX_{C2})} =$$

$$\frac{X_L X_{C1} - X_{C1} X_{C2}}{j(X_L - X_{C1} - X_{C2})}.$$

- Para que Z seja um número real, a parte imaginária deve ser nula, ou seja,

$$X_L - X_{C1} - X_{C2} = 0 \Leftrightarrow X_L = X_{C1} + X_{C2}$$

ou

$$\omega L = \frac{1}{\omega C_1} + \frac{1}{\omega C_2}.$$

- Resolvendo em ordem a ω, dá a frequência de oscilação:

  $$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC_T}}\ rad/s \quad \text{ou} \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_T}}\ Hz,$$

  onde

  $$C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

- É de notar que no cálculo anterior é desprezado o efeito de R_1 que está virtualmente em paralelo com C_2. Isto faz com que a equação da frequência seja apenas uma aproximação que é válida se $R_1 \gg X_{C_2}$.

- Como v_o aparece atenuado depois do divisor de tensão formado por L e C_2, desprezando novamente o efeito de R_1, o factor de realimentação β é dado por:

$$\beta = \frac{-jX_{C2}}{jX_l - j_X C_2}.$$

- Mas como $X_L = X_{C1} + X_{C2}$ à frequência de ressonância,

$$\beta = \frac{-jX_{C2}}{j(X_{C1} + X_{C2}) - jX_{C2}} = \frac{-X_{C2}}{X_{C1}} = -\frac{C_1}{C_2}.$$

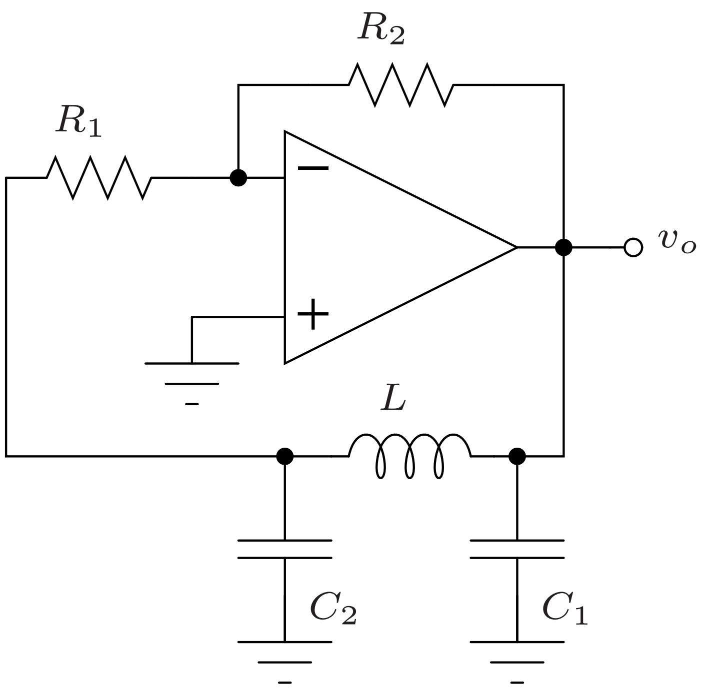
- É de notar que β é um número real com uma fase de $\pi\ rad$, tal como se pretendia.

- Para que o ganho total em malha fechada seja igual a 1, é necessário que:

$$A\beta = 1 \Leftrightarrow A = \frac{1}{\beta} = -\frac{C_2}{C_1}.$$

- Isto significa que o ganho em malha fechada do amplificador inversor que é dado por $-R_2/R_1$ deve ser igual a $-C_2/C_1$.
- Um modo prático de dimensionar este oscilador consiste em fazer $C_1 = C_2$ e $R_1 = R_2$.

Exemplo: Projecte um oscilador de Colpitts que funcione a 100 kHz.



R: Atribuindo o valor de 10 nF a C_1 e C_2, vem:

$$C_T = \frac{C_1C_2}{C_1 + C_2} = 5\,nF.$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_T}} = 100\;kHz \Leftrightarrow L \approx 0.5\;mH.$$

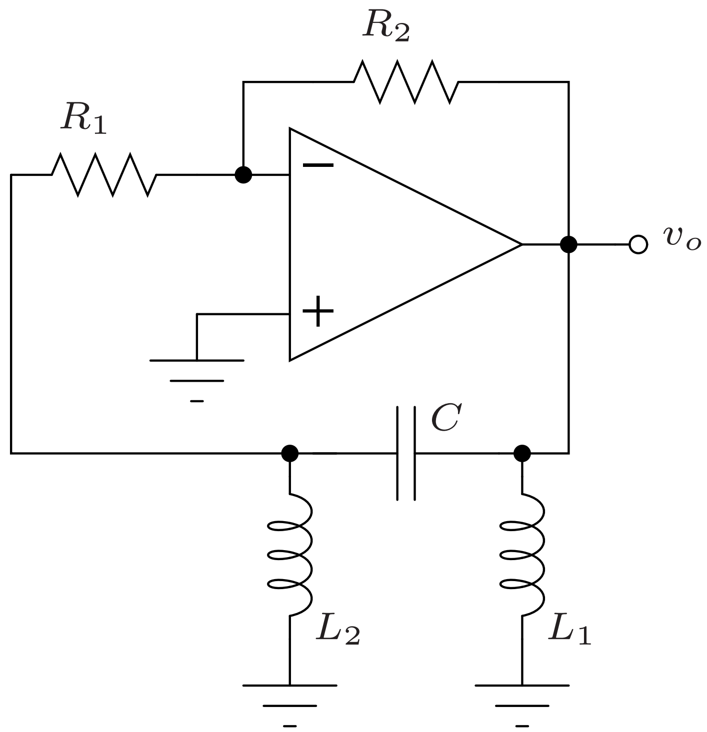
Para que R_1 seja muito maior do que X_{C2} à frequência de ressonância:

$$X_{C2} = \frac{1}{\omega C_2} = \frac{1}{2\pi \times 100k \times 10n} = 159.15\;\Omega.$$

$$R_1 = R_2 = 100X_{C1} = 15.915\;k\Omega.$$

O oscilador Hartley

- As impedâncias da malha de realimentação do oscilador de Hartley consistem numa rede LC ressonante formada por duas bobines e um condensador.



- Tal como no oscilador Colpitts, as oscilações ocorrem à frequência de ressonância da rede, ou seja, a frequência à qual a impedância total é real.

- Seguindo o mesmo procedimento para calcular a frequência de oscilação que no oscilador Colpitts, obtêm-se:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_T C}}\ Hz,$$

onde $L_T = L_1 + L_2$.

- O factor de realimentação, à frequência de ressonância é dado por:

$$\beta = -\frac{L_2}{L_1}.$$

- Se as bobines L_1 e L_2 partilharem o mesmo núcleo, existe uma indutância mútua M e o valor de L_T é dado por:

$$L_T = L_1 + L_2 + 2M.$$

- Para que o critério de Barkhausen seja satisfeito, $A\beta = 1$, ou seja,

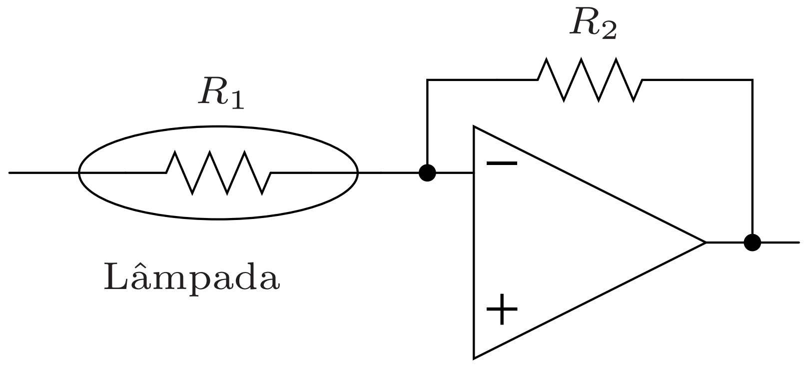
$$A = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{L_1}{L_2}.$$

Circuitos de arranque das oscilações

- Tal como foi visto anteriormente, os circuitos osciladores não necessitam de qualquer sinal na sua entrada.
- O ruído existente no circuito é amplificado e realimentado na entrada, produzindo as oscilações.
- No entanto, para que a amplitude do sinal de saída aumente, é necessário que o ganho em malha fechada, no início das oscilações seja superior a um.
- Quando a amplitude atingir um valor razoável, é então necessário que o ganho do circuito em malha fechada caia para a unidade de modo a que a amplitude do sinal de saída seja mantida.
- Isto é conseguido com circuitos de controlo automático de ganho.

Circuito de arranque com lâmpada de tungsténio

- O circuito de arranque das oscilações de um oscilador que usa uma lâmpada de tungsténio pode ser visto na figura.

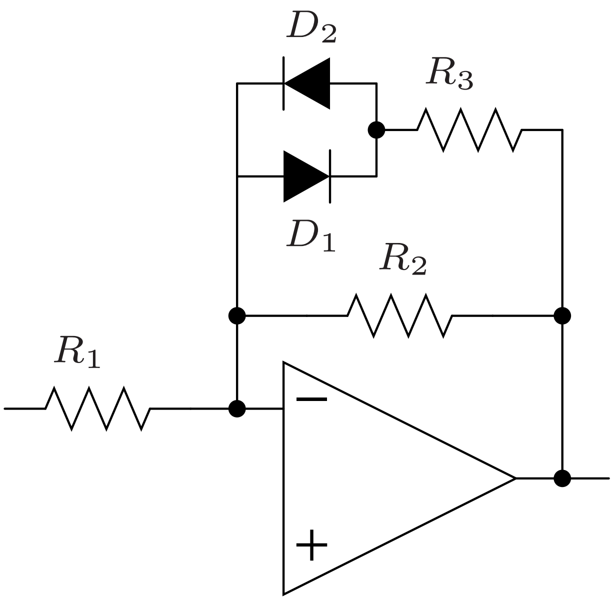


- Como se trata de um circuito muito simples, o seu princípio de funcionamento é relativamente fácil de entender.
- Inicialmente, a resistência da lâmpada tem o valor R_1.
- À medida que a corrente aumenta, a temperatura do filamento da lâmpada aumenta, fazendo com que o valor da sua resistência também aumente.
- Como o ganho do amplificador depende da razão R_2/R_1, se R_1 aumenta, este diminui.

- Neste circuito, em vez de uma lâmpada pode ser usada uma resistência dependente da temperatura (RTD).
- Se a RTD tiver um coeficiente positivo, isto é, a sua resistência aumenta com a temperatura (PTC *"positive temperature coefficient"*), coloca-se em vez de R_1.
- Se a RTD tiver um coeficiente negativo, ou seja, a sua resistência diminui com a temperatura (NTC *"negative temperature coeficient"*), coloca-se em vez de R_2.
- Uma das principais desvantagens deste método consiste no facto de que as variações da temperatura ambiente provocam alterações no ganho do amplificador.

Circuito de arranque com dois díodos

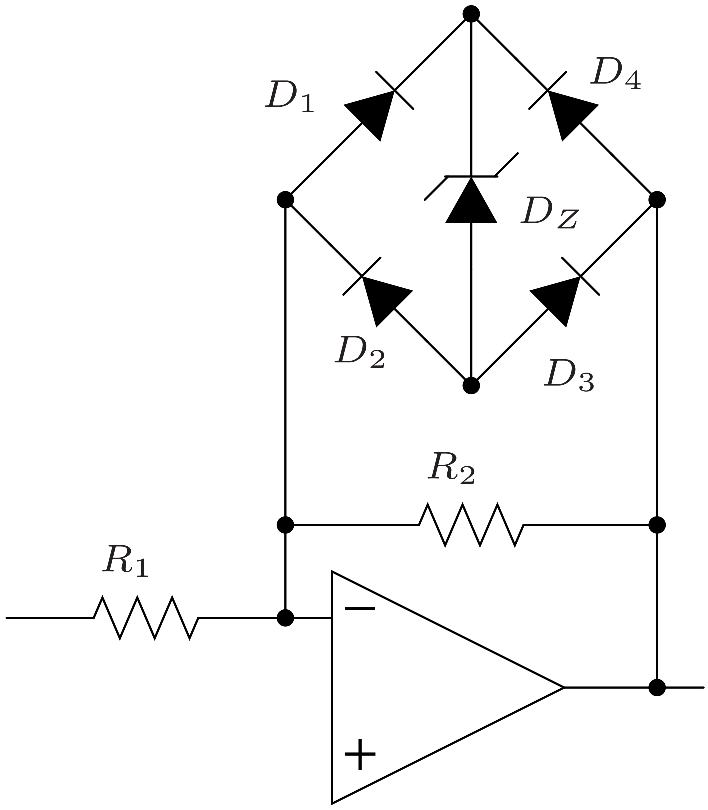
- O segundo método de provocar o arranque de um oscilador e controlar o ganho do seu amplificador consiste na utilização de dois díodos.



- Quando se liga o circuito, os díodos estão ambos ao corte e o ganho do amplificador depende apenas da razão R_2/R_1, que deve ser escolhida para que o ganho $A\beta$ do oscilador em malha fechada seja superior a 1.
- As oscilações vão aumentar de amplitude até ao ponto em que os díodos entram em condução.
- A partir daí, a resistência R_3 vai ficar em paralelo com R_2, limitando o ganho do amplificador.

Circuito de arranque com díodo de *zenner*

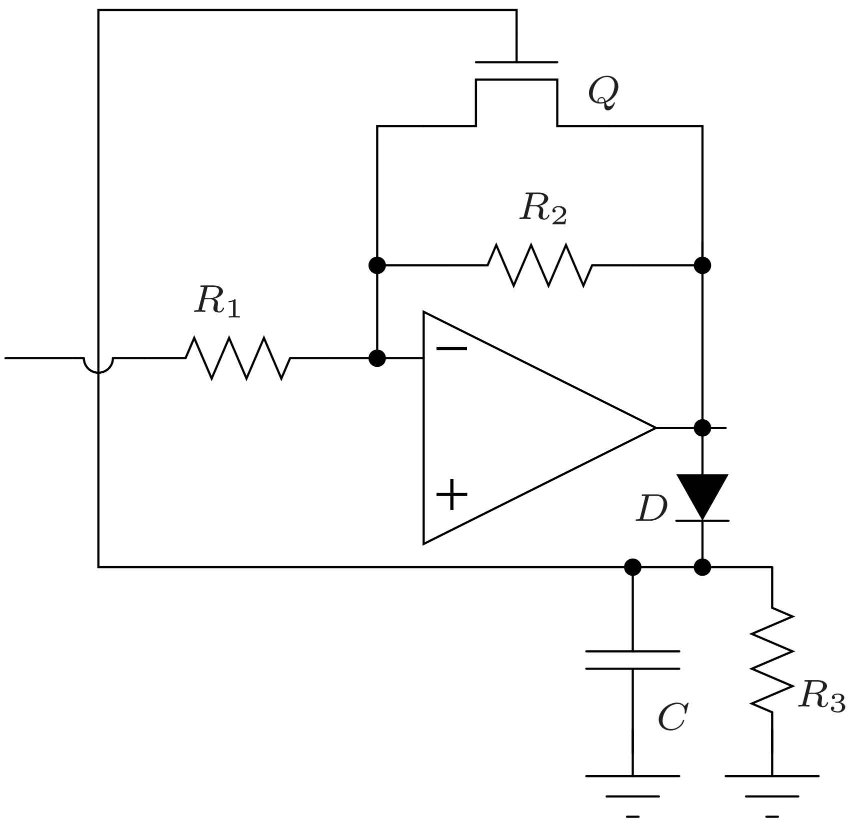
- O circuito de arranque com díodo de *zenner* é semelhante ao anterior, só que em vez de uma resistência é usado um díodo de *zenner*.



- Quando se liga o circuito, a amplitude do sinal é baixa e o díodo de *zenner* não conduz.
- Quando a amplitude do sinal de saída tiver um valor razoável, o díodo de *zenner* entra em condução, limitando-a.
- Os quatro díodos ligados em ponte garantem que o díodo de *zenner* esteja sempre inversamente polarizado.

Circuito de arranque com MOSFET

- O circuito de arranque da figura consiste num controlador automático de ganho que usa um MOSFET.



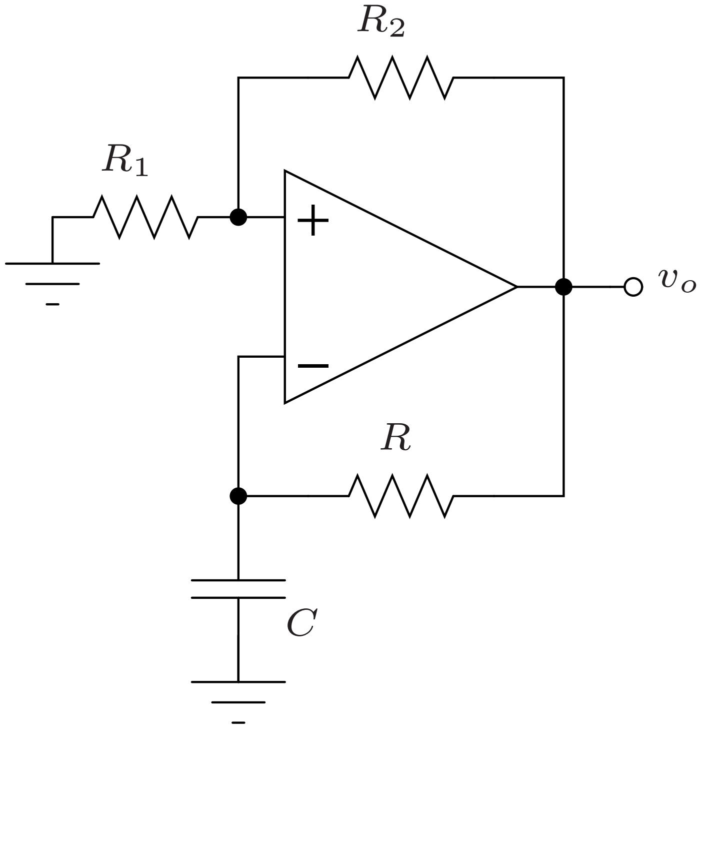
- A malha formada pelo díodo e pelo condensador funciona como detector de pico da tensão de saída.
- Enquanto este pico for inferior à tensão de *threshold* do MOSFET, este não conduz e o ganho do circuito em malha fechada deve ser maior do que 1.
- À medida que a tensão de pico de saída aumenta, a resistência do MOSFET diminui.
- Como esta resistência está em paralelo com R_1, o ganho do circuito em malha fechada vai diminuir até atingir a unidade.
- A partir daí, o circuito irá oscilar com uma amplitude constante.

Multivibradores ou osciladores de relaxação e geradores de funções

- Os circuitos multivibradores também produzem sinais alternados sem que lhes seja aplicado qualquer sinal na sua entrada.
- No entanto as tensões de saída destes circuitos têm a forma de impulsos rectangulares.
- Pelo facto muitos autores não os consideram circuitos osciladores.
- O gerador de funções produz as três formas de onda básicas: quadrada, triangular e sinusoidal.

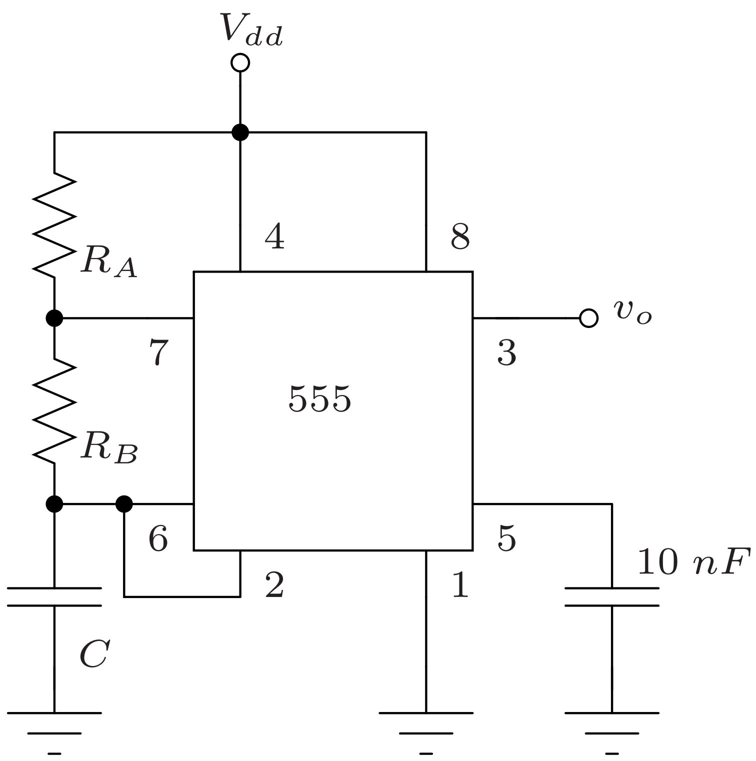
Oscilador de relaxação

- O circuito da figura não tem qualquer sinal de entrada.
- No entanto, o circuito produz uma tensão cuja forma de onda é rectangular.



- Basicamente o circuito consiste num comparador com histerese com uma malha de realimentação formada por uma rede RC.
- Supondo que inicialmente a tensão de saída é igual a V_{sat}, o condensador vai carregar através da resistência R.
- Quando a tensão no condensador, que é igual à tensão na entrada inversora do amplificador operacional, atingir o UTP do comparador com histerese, o valor da tensão de saída passa a ser de $-V_{sat}$.
- Neste caso o condensador vai descarregar até que a tensão na entrada inversora do amplificador operacional atingir o LTP.
- Nesse caso a saída volta a ter o valor de V_{sat} e o ciclo repete-se.

555 na configuração astável



Gerador de funções

Circuito gerador de funções com *dutty-cycle* de 50% e frequência fixa.