

Aula 11

Limitações do Amplificador Operacional Circuitos com díodos

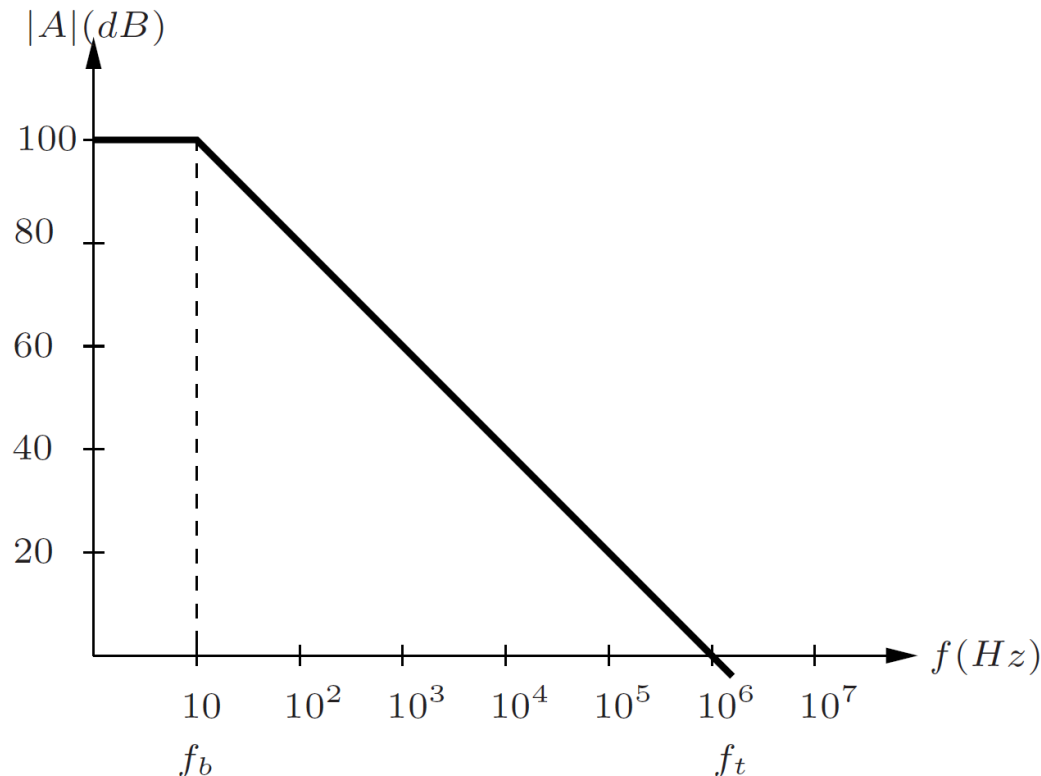
Gerardo Rocha

Limitações do amplificador operacional

- Nos circuitos anteriores, o amplificador operacional foi mostrado como um componente ideal.
- Em muitas aplicações, deve ter-se em consideração as características não ideais do amplificador operacional, de modo a poder prever e até melhorar o desempenho dos circuitos.

Ganho diminui com a frequência

- Esta é a maior limitação do amplificador operacional: o seu ganho não é infinito.
- Em vez disso, é finito e diminui com a frequência.



Ganho diminui com a frequência

- Apesar do ganho ser relativamente alto para baixas frequências (até 10 Hz), começa a descer a uma taxa constante a partir daí.
- A frequência para a qual o ganho começa a descer é chamada de fb e a frequência para a qual o ganho é unitário (0 dB) é chamada de ft.
- O produto do ganho pela frequência é constante.
- Em fb, o ganho é de 10^5 (100 dB), enquanto que em ft o ganho é unitário (0 dB).
- Em qualquer dos casos, $|A| \times f = 10^6$.
- Esta constante tem o nome de “produto ganho-largura de banda”.

Saturação da saída

- Os amplificadores operacionais funcionam linearmente dentro de uma gama limitada de tensões de saída.
- O amplificador operacional satura para tensões que em valor absoluto estão de 1 a 3 Volts abaixo da tensão de alimentação.
- Por exemplo, um amplificador operacional alimentado a $\pm 15\text{V}$, satura positivamente a cerca de 13 V e negativamente a cerca de -13 V .
- Para que não haja cortes nos picos e a correspondente distorção, a entrada do circuito deve ser mantida a níveis relativamente baixos (dependendo do ganho da montagem).

slew-rate

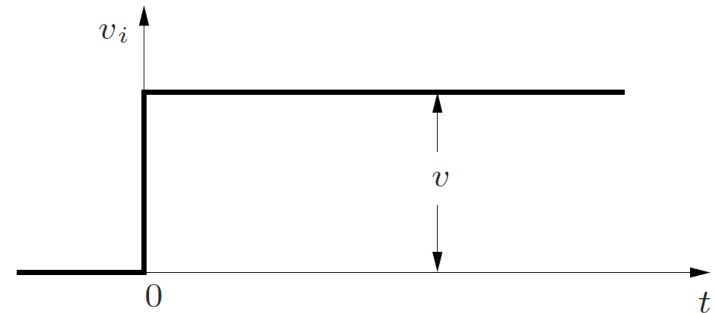
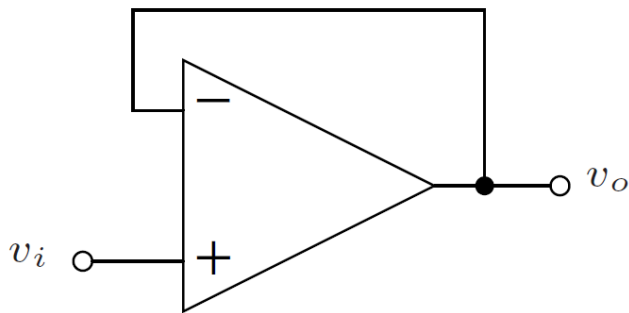
- Outro fenómeno que causa distorção não linear na presença de sinais grandes é o slew-rate.
- A tensão de saída de um amplificador operacional não varia instantaneamente.
- Existe uma taxa máxima de variação que é chamada de slew-rate:

$$SR = \left. \frac{dv_o}{dt} \right|_{max}$$

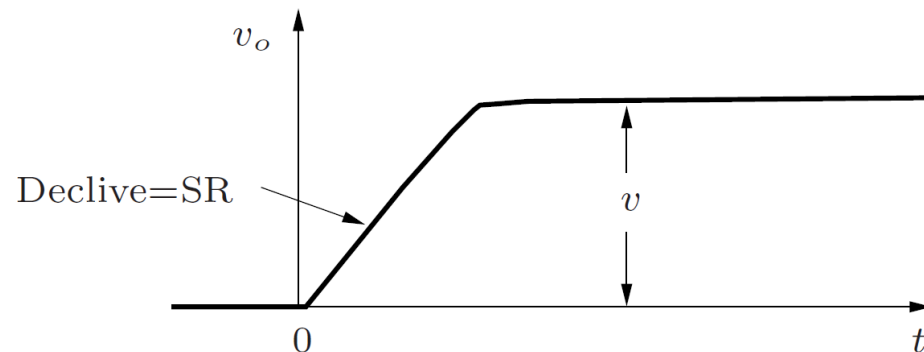
- É especificado nas folhas de características do fabricante em V/ μ s.
- Se o sinal aplicado a um circuito com um amplificador operacional for tal que necessite de uma resposta mais rápida do que o valor do slew-rate especificado, a saída não vai acompanhar a entrada.
- Em vez disso, a saída varia à taxa máxima possível, que é igual ao slew-rate.

slew-rate

- Um amplificador operacional ligado na configuração de seguidor de tensão, cuja entrada é um degrau:



- A saída não segue a entrada instantaneamente.
- Em vez disso, é uma rampa linear com declive igual ao SR.



Largura de banda à potência máxima

- O facto de o ganho diminuir com a frequência é um fenómeno linear e não altera a forma de uma senoide aplicada à entrada, ou seja, não introduz distorção não linear.
- Por outro lado, o slew-rate causa distorção não linear a um sinal sinusoidal quando a sua frequência e amplitude forem tais que a saída correspondente necessite de variar a uma taxa superior a SR.
- Isto origina outra especificação do amplificador operacional, a largura de banda à potência máxima.

Largura de banda à potência máxima

- O slew-rate pode causar distorção não linear nas formas de onda sinusoidais.
- Considere-se o amplificador com ganho unitário e uma senoide aplicada à sua entrada.

$$v_i(t) = A \sin \omega t$$

- A taxa de variação da saída é dada pela derivada da entrada:

$$\frac{dv_i(t)}{dt} = \omega A \cos \omega t.$$

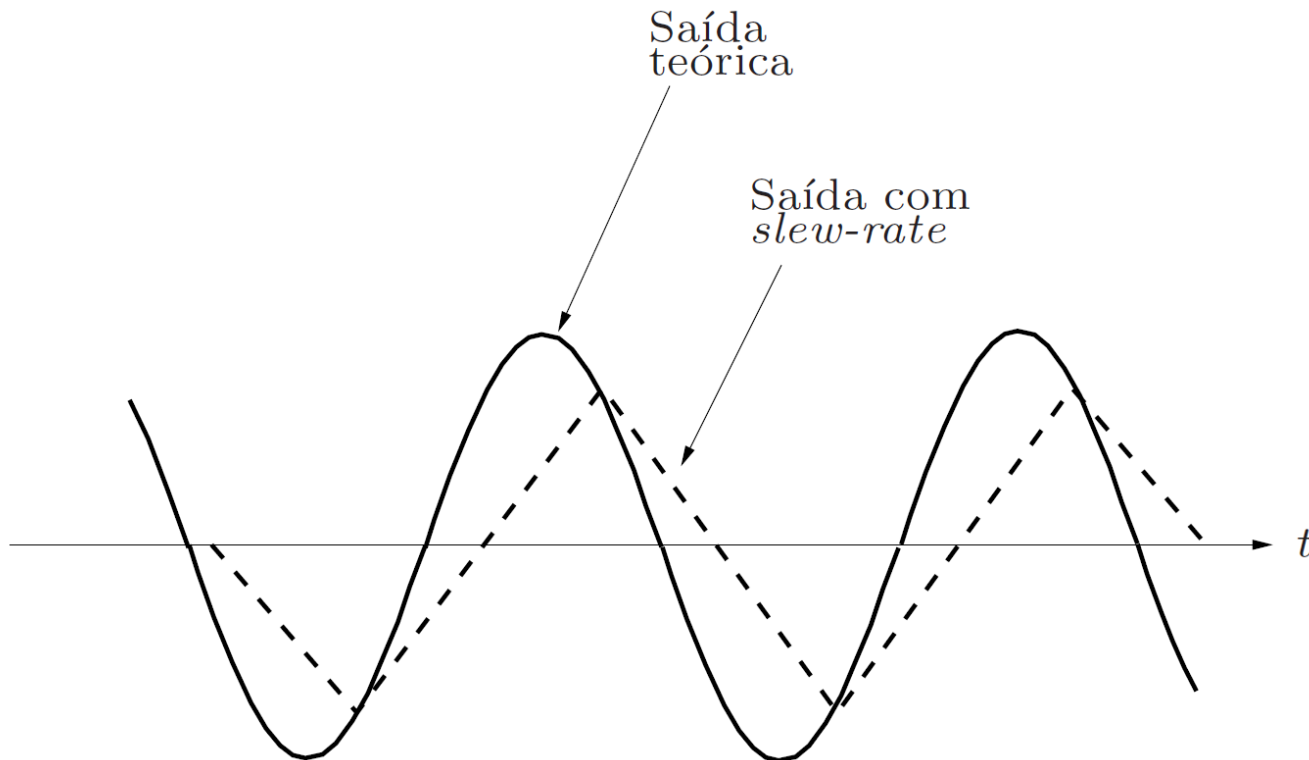
- A variação apresenta o seu valor absoluto máximo quando

$$\cos \omega t = \pm 1$$

- Esse valor máximo é ωA e se exceder o slew-rate do amplificador operacional, a saída será distorcida.

Largura de banda à potência máxima

- O amplificador operacional não consegue acompanhar a taxa de variação da senoide quando esta passa por zero e a forma de onda de saída tem um declive mais baixo.



Largura de banda à potência máxima

- As folhas de características de um amplificador operacional normalmente especificam um parâmetro chamado de “largura de banda à potência máxima” (FPB): frequência para a qual uma senoide com a amplitude máxima começa a apresentar distorção devida ao slew-rate:

$$SR = \omega V_{omax} \qquad FPB = \frac{SR}{2\pi V_{omax}}$$

- As sinusoides com amplitudes menores do que o valor máximo, só apresentam distorção a frequências maiores do que o FPB.
- Neste caso, o produto da amplitude máxima de saída pela frequência máxima é constante.

Tensão de offset

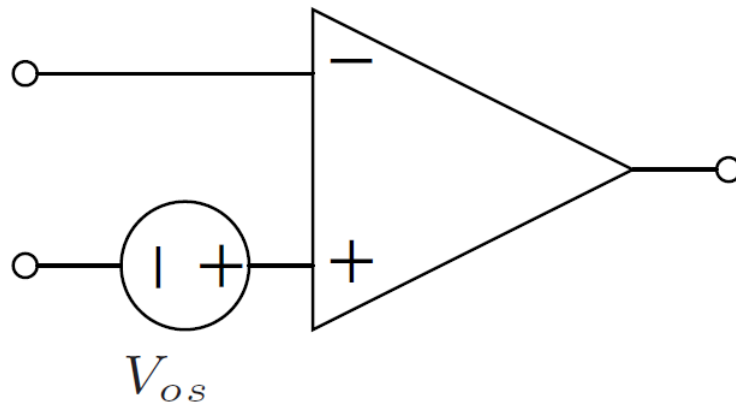
- Os amplificadores operacionais são dispositivos de acoplamento direto, com ganho muito elevado, o que faz com que estejam sujeitos a problemas para tensões contínuas.
- O primeiro desses problemas é a tensão de offset de entrada.
- Para entender este problema, considere-se um amplificador com as duas entradas ligadas à terra.
- Na saída irá aparecer uma tensão contínua que pode atingir os níveis de saturação positiva ou negativa, se o amplificador operacional tiver um ganho muito elevado.

Tensão de offset

- A tensão de saída pode ser levada novamente para o seu valor ideal (0 V), colocando uma fonte de tensão externa, de valor e polaridade apropriados, entre as entradas do amplificador operacional.
- A “tensão de offset de entrada” (V_{os}) deve ser igual em amplitude e de polaridade oposta à fonte de tensão externa aplicada.
- A tensão de offset de entrada deve-se a diferenças entre os componentes que formam o andar diferencial de entrada do amplificador operacional.
- Mas o mais importante é conhecer o efeito da tensão de offset de entrada no funcionamento dos circuitos em malha fechada.
- Os amplificadores operacionais comuns apresentam tensões de offset de entrada entre 1 mV e 5 mV , que variam com a temperatura e com a idade.

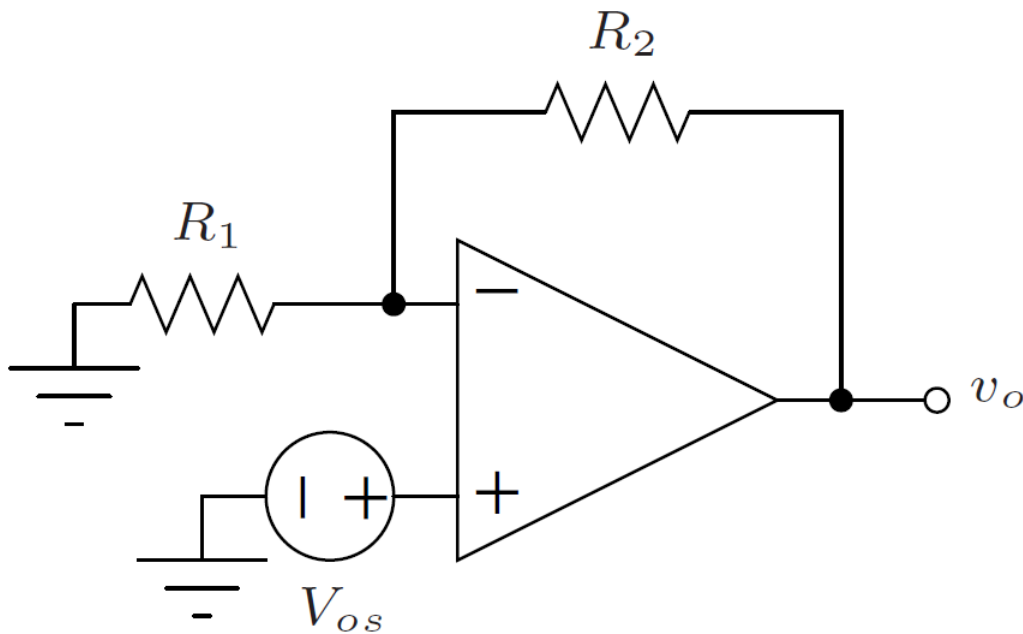
Tensão de offset

- Para analisar o efeito da tensão de offset de entrada no funcionamento de circuitos com amplificadores operacionais, em primeiro lugar é necessário um modelo que contemple a tensão de offset.



Tensão de offset

- A análise do circuito para determinar o efeito de V_{os} é relativamente simples: faz-se a fonte de tensão de entrada igual a zero e substitui-se o amplificador operacional pelo seu modelo com offset.



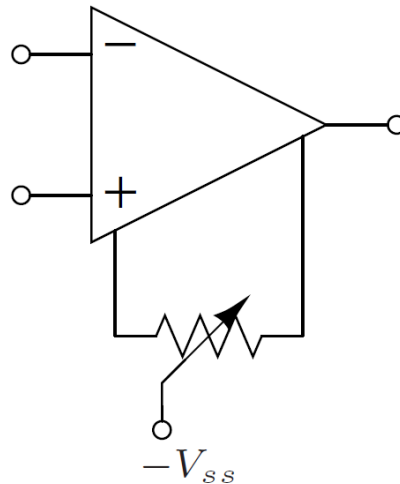
$$v_o = V_{os} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

Tensão de offset

- Esta tensão contínua de saída pode ter um valor elevado.
- Por exemplo, num amplificador com um ganho em malha fechada de 1000, se o amplificador operacional tiver uma tensão de offset de entrada de 5 mV , a tensão de
- saída poderá ultrapassar os 5 V , quando a entrada estiver ligada à terra.
- Quando for ligado um sinal à entrada, o seu efeito vai ser somado ao da tensão de offset, o que torna a análise relativamente simples: basta usar o teorema da sobreposição.
- Além de deslocar o nível da tensão contínua de saída, o offset provoca mais dois problemas:
- A excursão máxima do sinal diminui.
- Se o sinal de entrada tiver uma componente contínua, não é possível distinguir a saída produzida por este da tensão de offset.

Tensão de offset

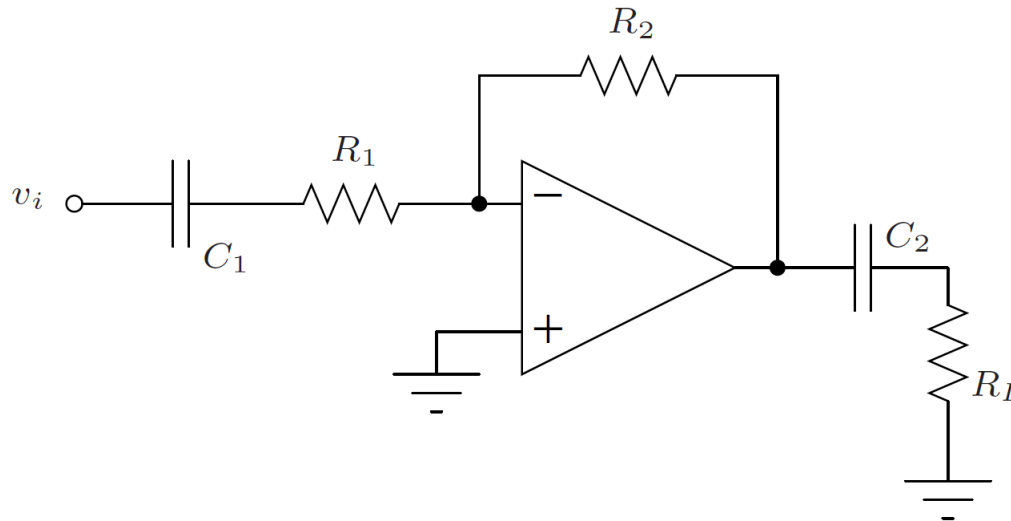
- Alguns amplificadores operacionais são construídos com dois terminais adicionais entre os quais se pode ligar um potenciômetro para ajustar a tensão de offset.



- Apesar de com esta técnica o offset poder ser ajustado para zero, o problema persiste quando V_{os} variar com a temperatura ou com a idade do amplificador operacional.

Tensão de offset

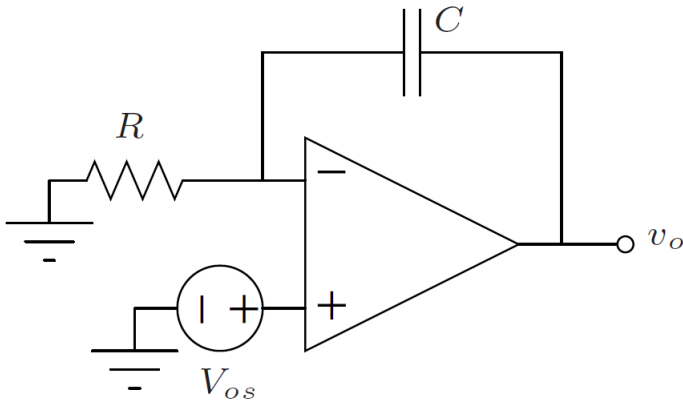
- Um modo de eliminar o problema do offset, quando a tensão de entrada for alternada, consiste em usar acoplamento capacitivo na entrada e na saída do amplificador em malha fechada.



- Este método tem a desvantagem de não servir para sinais contínuos ou de muito baixa frequência.

Tensão de offset

- Um outro circuito que é muito afetado pela tensão de offset de entrada do amplificador operacional é o integrador de Miller.



$$i(t) = \frac{V_{os}}{R}$$

$$v_c = v_o - V_{os} = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt$$

$$v_o = V_{os} \left(1 + \frac{t}{RC} \right)$$

A tensão de saída aumenta linearmente com o tempo até que o amplificador operacional sature.

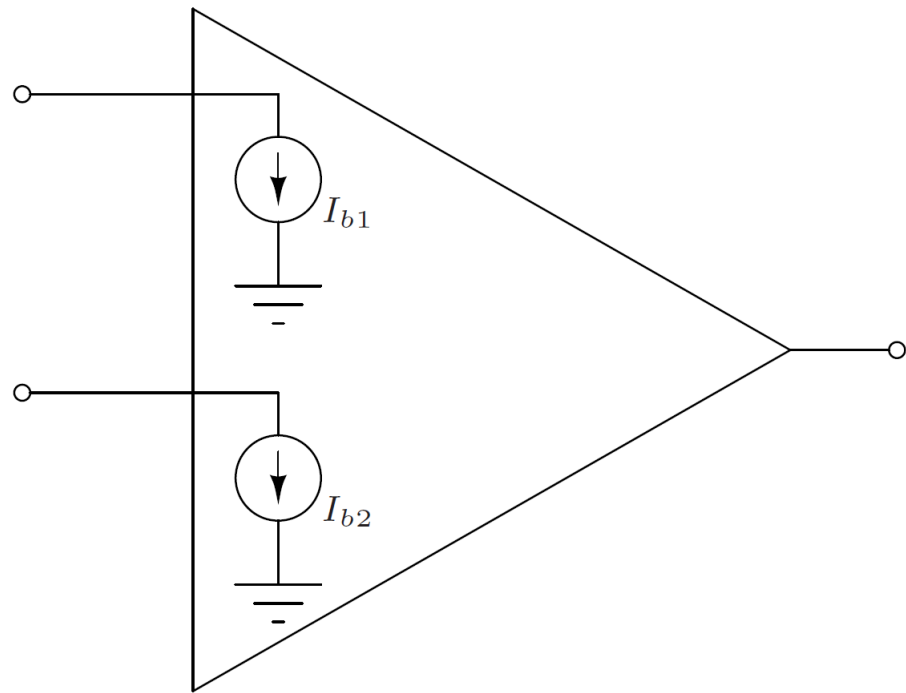
O problema pode ser minimizado colocando uma resistência de valor elevado em paralelo com o condensador.

Esta resistência vai descarregar o condensador, evitando que a saída sature.

Infelizmente torna o integrador não ideal.

Correntes de polarização de entrada

- Para que o amplificador operacional funcione, é necessário que existam correntes de polarização nas suas entradas.



Correntes de polarização de entrada

- As correntes de polarização podem ser representadas por duas fontes de corrente I_{b1} e I_{b2} , ligadas aos terminais inversor e não inversor respectivamente.
- No caso de os transístores que formam o par diferencial de entrada do amplificador operacional serem bipolares, essas correntes apresentam um valor que embora seja baixo, está longe de ser nulo.
- No caso de o par diferencial ser formado por JFETs ou MOSFETs o valor da corrente de polarização pode ser desprezado em quase todas as aplicações.

Correntes de polarização de entrada

- Os fabricantes de amplificadores operacionais, normalmente especificam dois valores:

- A corrente de polarização:

$$I_b = \frac{I_{b1} + I_{b2}}{2}$$

- A corrente de offset de entrada:

$$I_{os} = |I_{b1} - I_{b2}|$$

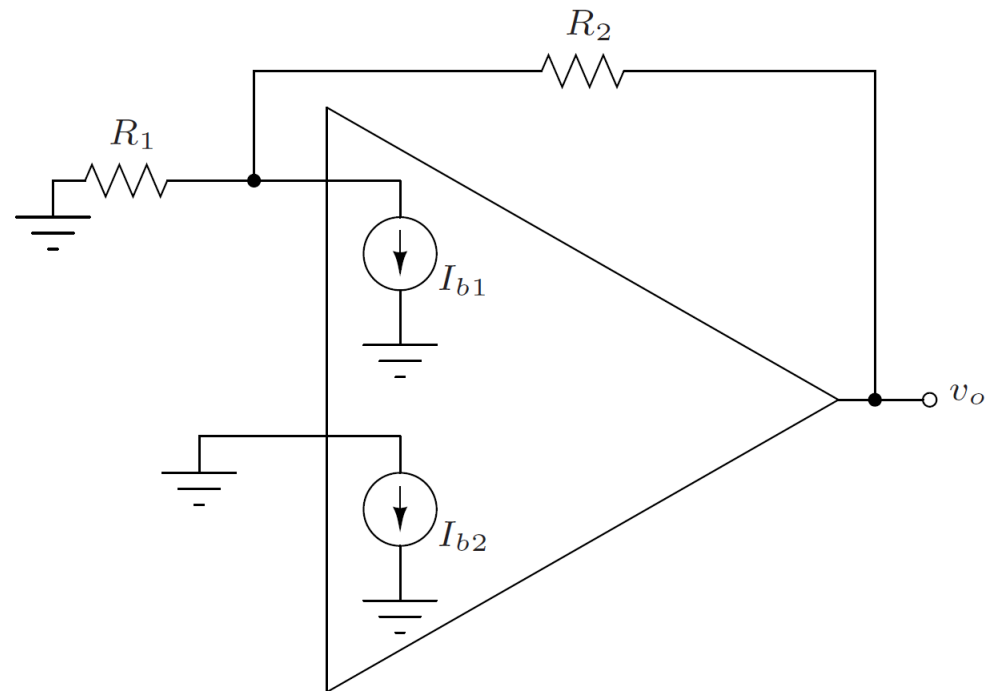
- Os valores típicos das correntes de polarização e de offset de entrada dos amplificadores operacionais que usam transístores bipolares são de cerca de:

$$I_b = 100 \text{ nA}$$

$$I_{os} = 10 \text{ nA.}$$

Correntes de polarização de entrada

- Para calcular o efeito da corrente de polarização, pode usar-se o circuito da figura, com o sinal de entrada nulo.
- Como a tensão na entrada inversora é nula, devido ao curto-circuito virtual, a corrente em R_1 também é nula.

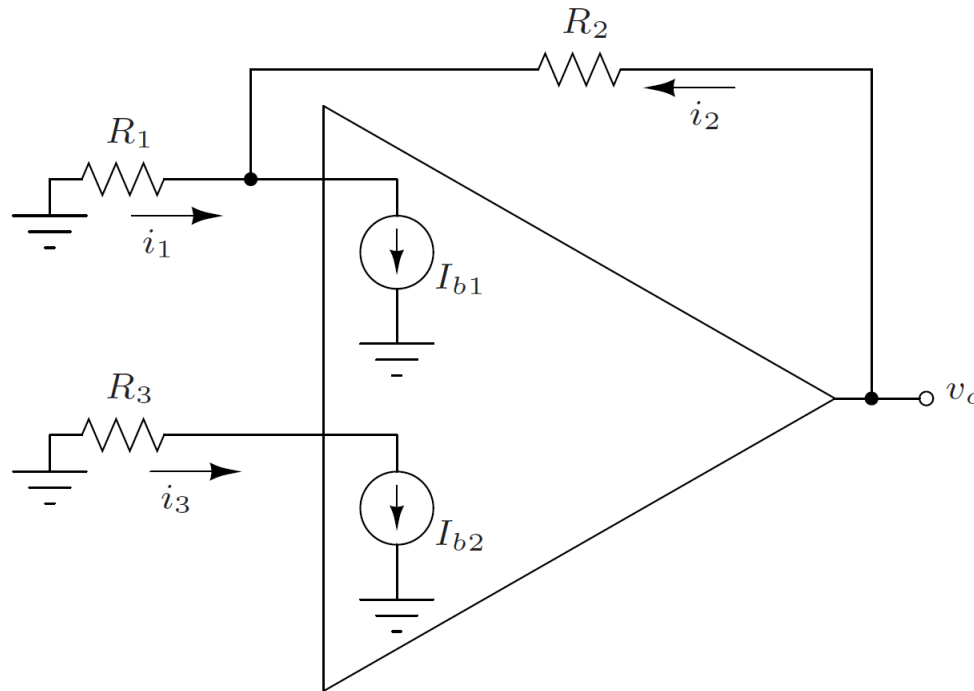


Neste caso, $v_o = R_2 I_{b1} \simeq R_2 I_b$

Isto faz com que o valor de R_2 não possa ser muito elevado.

Correntes de polarização de entrada

- Existe uma técnica para reduzir o efeito das correntes de polarização na tensão de saída. Consiste na introdução duma resistência R_3 ligada à entrada não inversora.
- Sob o ponto de vista do sinal, R_3 não produz qualquer efeito.



Correntes de polarização de entrada

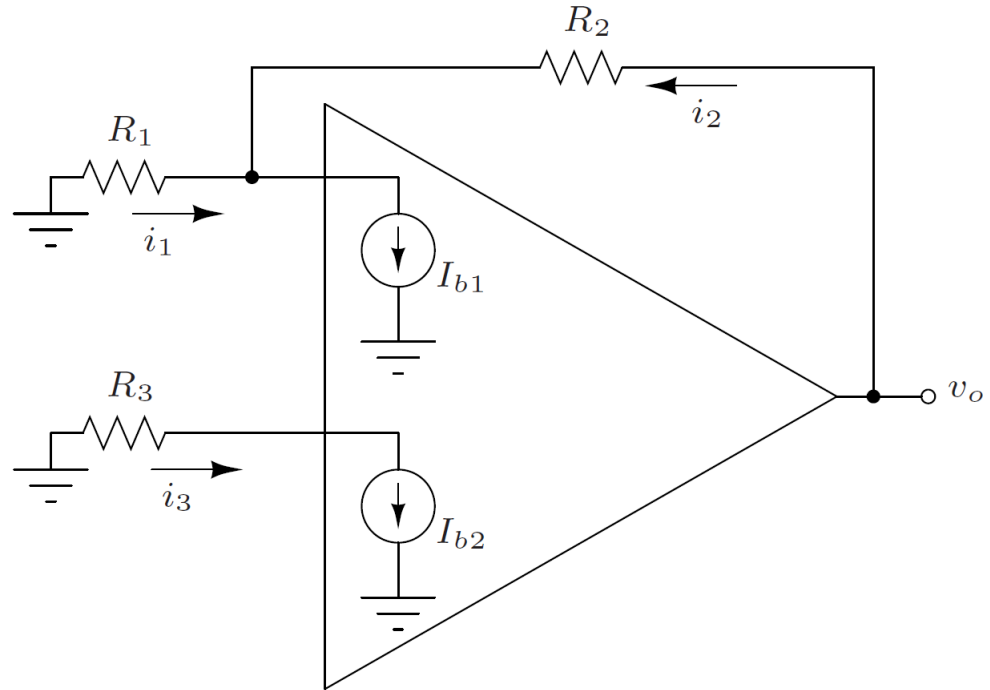
$$v_p = -R_3 I_{b2}$$

$$i_1 = \frac{v_n}{R_1} = \frac{-R_3 I_{b2}}{R_1}$$

$$i_2 = \frac{v_o - v_n}{R_2} = I_{b1} - i_1$$

$$\frac{v_o + R_3 I_{b2}}{R_2} = I_{b1} - \frac{R_3 I_{b2}}{R_1}$$

$$v_o = -R_3 I_{b2} + R_2 I_{b1} - \frac{R_2 R_3}{R_1} I_{b2}$$



Considerando o caso em que $I_{b1} = I_{b2} = I_b$

$$v_o = \frac{R_2 R_3 - R_1 R_3 + R_1 R_2}{R_1} I_b.$$

Correntes de polarização de entrada

Para que vo seja nula:

$$-R_2R_3 - R_1R_3 + R_1R_2 = 0 \Leftrightarrow R_3 = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_3 = R_1 || R_2$$

Pode agora verificar-se o facto de I_{b1} ser diferente de I_{b2} .

Considere-se:

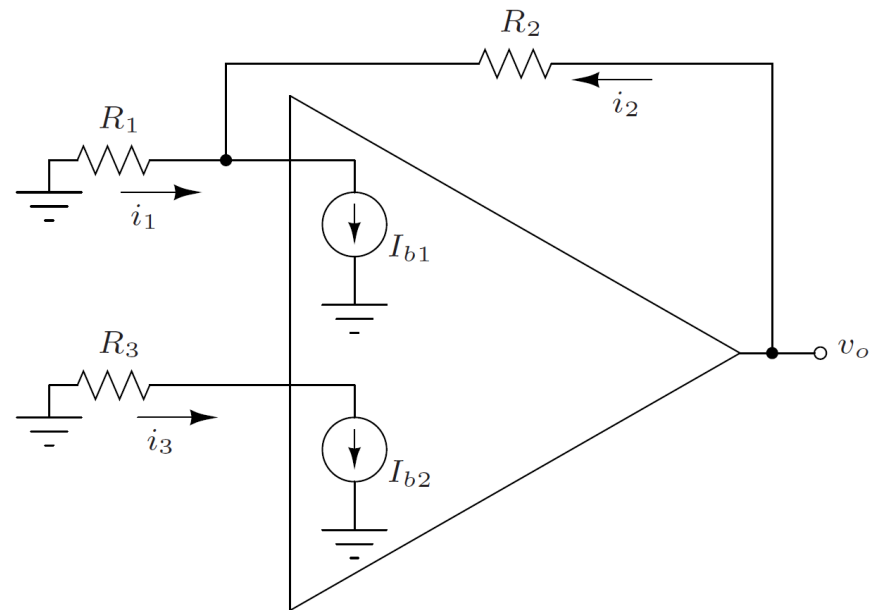
$$I_{b1} = I_b + I_{os}/2$$

$$I_{b2} = I_b - I_{os}/2$$

Obtém-se:

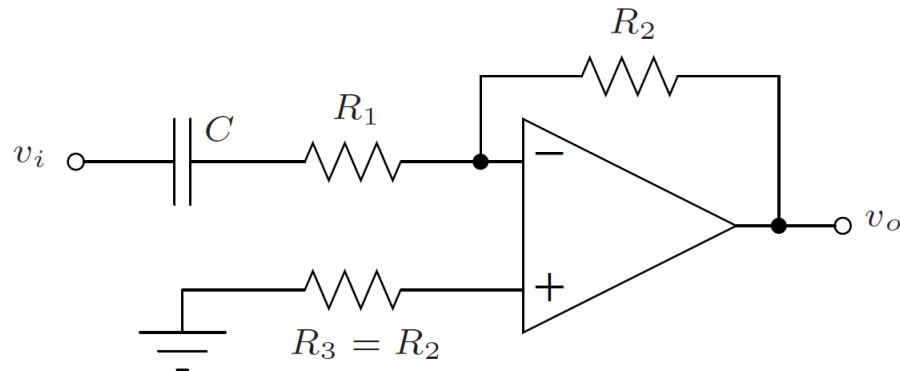
$$v_o = R_2 I_{os}$$

Que é um valor muito menor do que $R_2 I_b$ obtido sem R_3 . Para minimizar o efeito das correntes de polarização, coloca-se uma resistência na entrada não inversora, cujo valor é igual ao paralelo das outras duas.



Correntes de polarização de entrada

- No caso de o amplificador ser acoplado capacitivamente, a resistência de compensação do efeito da corrente de polarização é apenas igual a R_2 , uma vez que a corrente contínua em R_1 é nula.

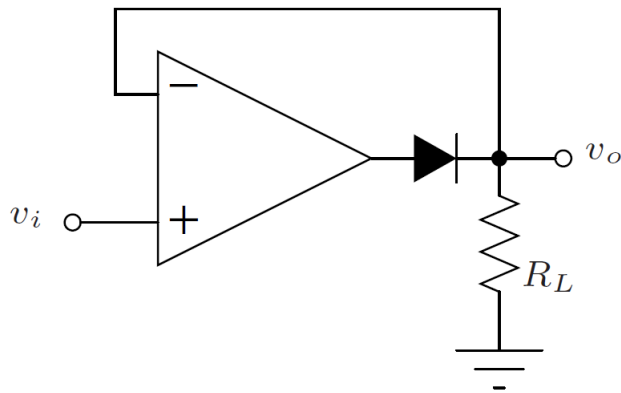


Circuitos com díodos

- Os amplificadores operacionais melhoram o desempenho de circuitos que usam díodos.
- Um amplificador operacional com realimentação negativa reduz o efeito da queda de tensão no díodo, permitindo construir circuitos com comportamentos muito próximos do ideal, mesmo com sinais de entrada de nível baixo.

Retificador de meia onda

- Quando o sinal de entrada é positivo, a tensão de saída do amplificador operacional fica positiva e o diodo conduz.
- O circuito comporta-se como um seguidor de tensão para todo o semi-ciclo positivo.
- Quando o sinal de entrada é negativo, a tensão de saída do amplificador operacional é negativa e o diodo não conduz.



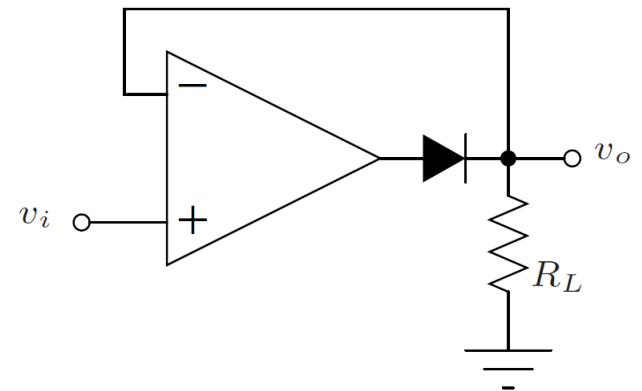
- Com o diodo a comportar-se como um circuito aberto, não há corrente a circular em R_L e a tensão de saída é nula.
- Globalmente, o circuito comporta-se como um retificador de meia onda.
- O ganho do amplificador operacional (A), que muito elevado, elimina o efeito da queda de tensão no diodo.

Retificador de meia onda

Por exemplo, se a queda de tensão no díodo for de 0.7 V e o ganho do amplificador operacional for de 100 000, a tensão de entrada necessária para que o díodo entre em condução é de:

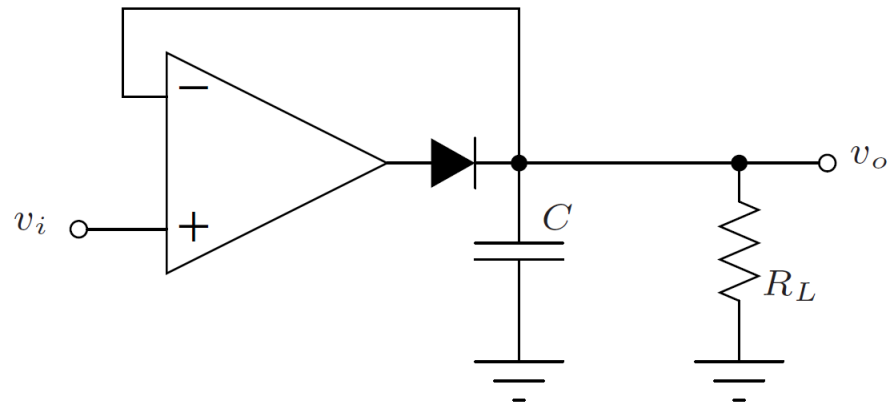
$$v_i = \frac{0.7}{100000} = 7 \mu V,$$

ou seja, se a tensão de entrada do circuito for superior a 7 μV , o díodo entra em condução e o circuito comporta-se como um seguidor de tensão.



Detetor de pico

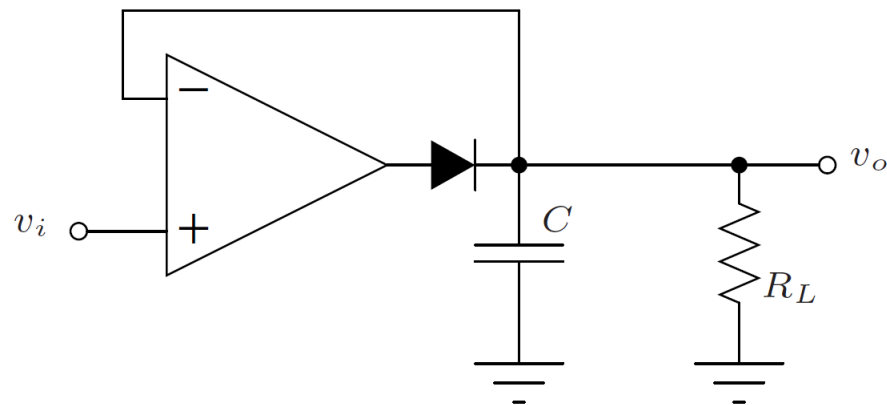
- Quando se pretende medir a amplitude de sinais pequenos, uma forma de o fazer consiste em detetar o valor do seu pico.



- Tal como no retificador de meia onda, neste circuito a tensão de entrada necessária para que o díodo entre em condução está na gama dos microvolts, o que significa que o circuito funciona para sinais com amplitude bastante baixa.

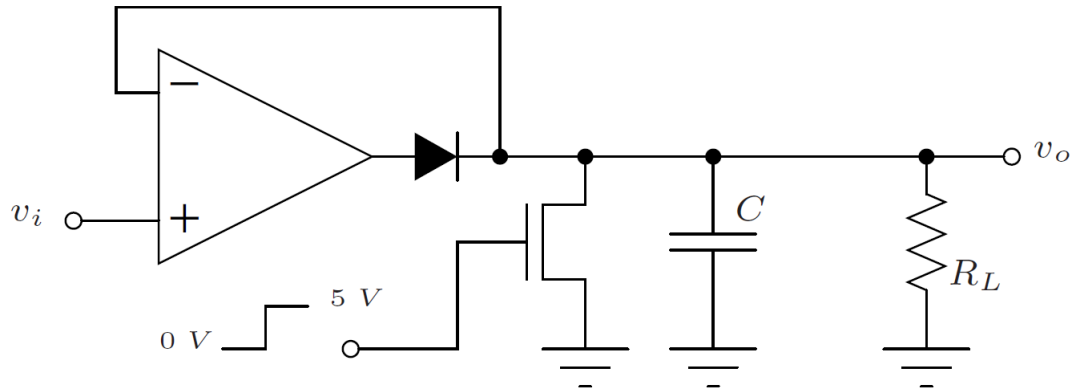
Detetor de pico

- Quando o diodo conduz, a impedância de saída do circuito é muito baixa, o condensador vai carregar-se com a tensão de pico positiva do sinal de entrada.
- Quando o diodo não conduz, o condensador descarrega-se através de R_L , com uma constante de tempo que é dada por $R_L C$.
- Para evitar erros na leitura do valor de pico, devido à descarga do condensador, esta constante de tempo deve ser muito maior do que o período do sinal de entrada.



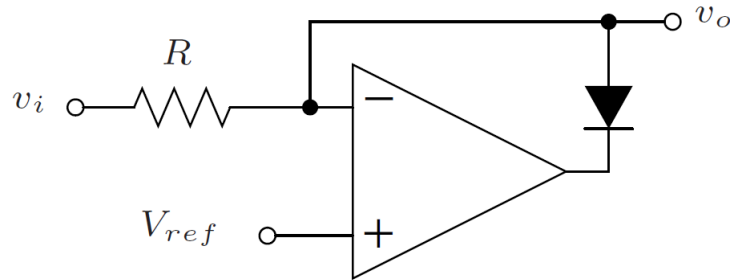
Detetor de pico

- Normalmente os circuitos detetores de pico incluem um sistema de descarga rápida do condensador, para permitir o reset.
- Quando a tensão aplicada à gate do MOSFET for baixa, este está ao corte e o circuito funciona como foi descrito anteriormente.
- Quando for aplicada uma tensão de nível lógico alto à gate do MOSFET, este conduz, descarregando rapidamente o condensador.



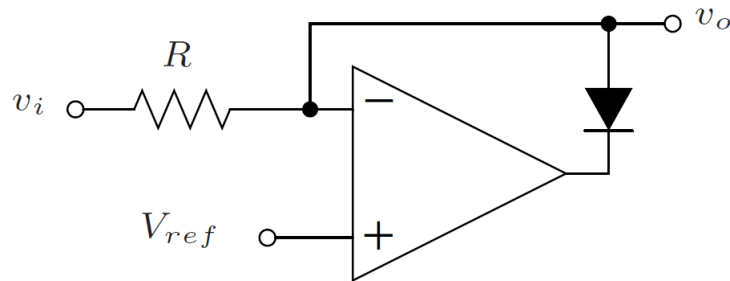
O circuito de reset é necessário devido ao facto de a constante de tempo do circuito ser muito elevada, o que faz com que a tensão de saída permaneça praticamente constante, mesmo depois do sinal de entrada ser retirado ou alterado.

Limitadores de pico



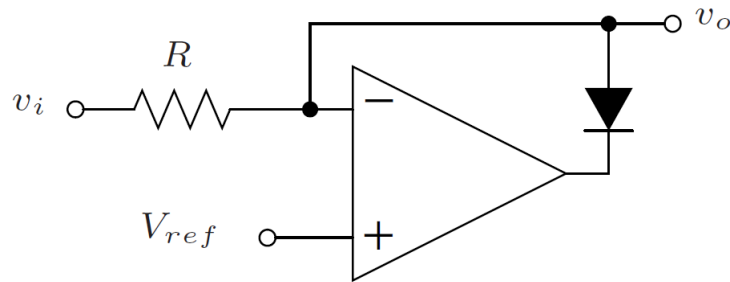
- Quando a tensão de referência é nula, a entrada não inversora do amplificador operacional está ligada à terra.
- Se a tensão de entrada do circuito (v_i) for positiva, vai existir uma pequena tensão de erro entre as entradas não inversora e inversora do amplificador operacional.

Limitadores de pico



- Como a entrada inversora está a um potencial maior do que a entrada não inversora, a saída do amplificador operacional vai ser negativa, o diodo entra em condução e estabelece a realimentação negativa.
- Nesse caso, a tensão de saída vai ser igual à tensão na entrada não inversora.
- Por outro lado, quando v_i for negativo, a tensão de saída do amplificador operacional será positiva e o diodo não conduz.
- A tensão de saída será igual à de entrada.

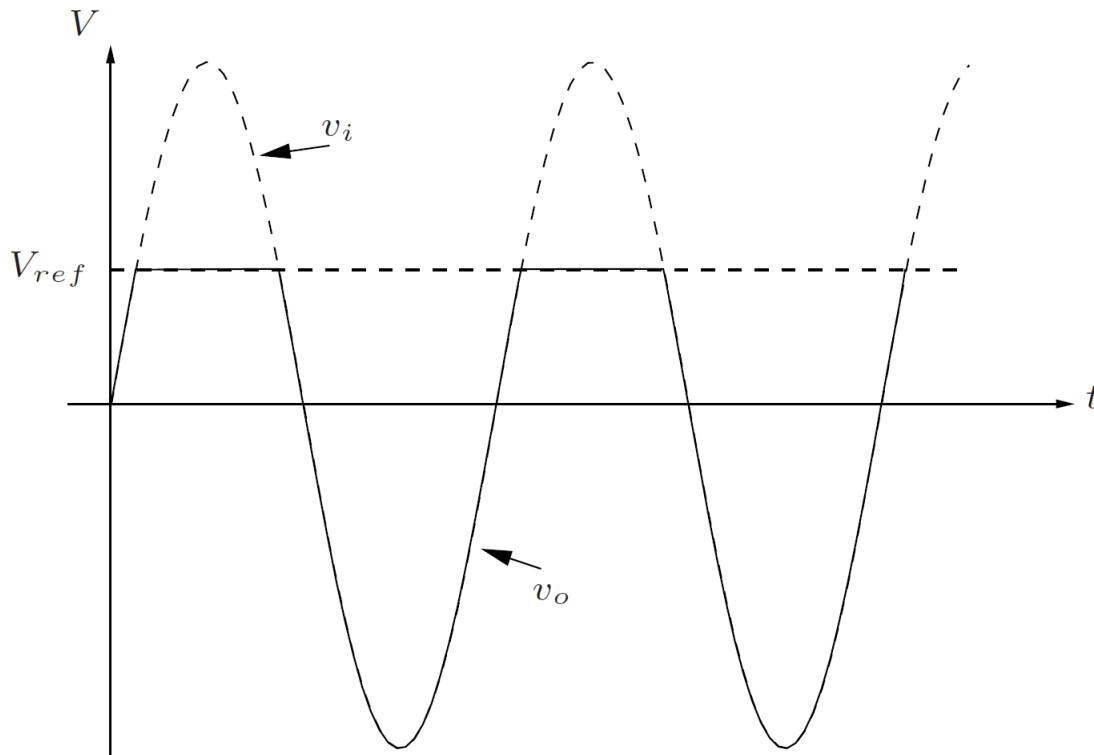
Limitadores de pico



- Para valores de V_{ref} diferentes de zero, o circuito funciona de um modo semelhante ao descrito anteriormente.
- Se v_i for maior do que V_{ref} , a saída do amplificador operacional é negativa e o diodo conduz, fazendo com que $v_o = V_{ref}$.
- Se v_i for menor do que V_{ref} , a saída do amplificador operacional será positiva e o diodo não conduz.
- A tensão de saída é igual à de entrada.

Limitadores de pico

- Formas de onda de entrada e de saída do circuito, para um V_{ref} positivo.
- O circuito funciona do mesmo modo no caso de V_{ref} ser negativo.



Para se obter um circuito limitador de pico negativo, basta inverter a polaridade do díodo.

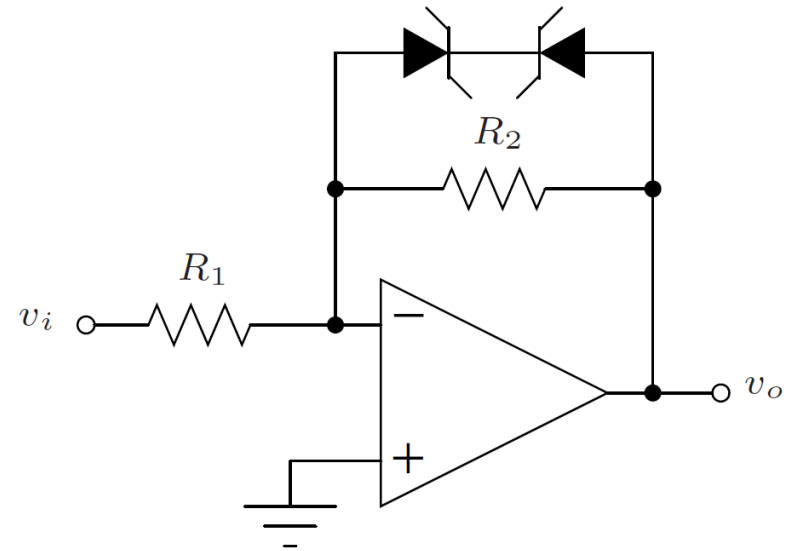
Limitadores de pico

Circuito que limita tanto o valor do pico positivo como do negativo.

Existem dois díodos de zener em paralelo com R_2 , na malha de realimentação.

Quando a tensão de saída tiver um valor abaixo da tensão de zener (V_z), os díodos não conduzem e a corrente circula apenas por R_2 .

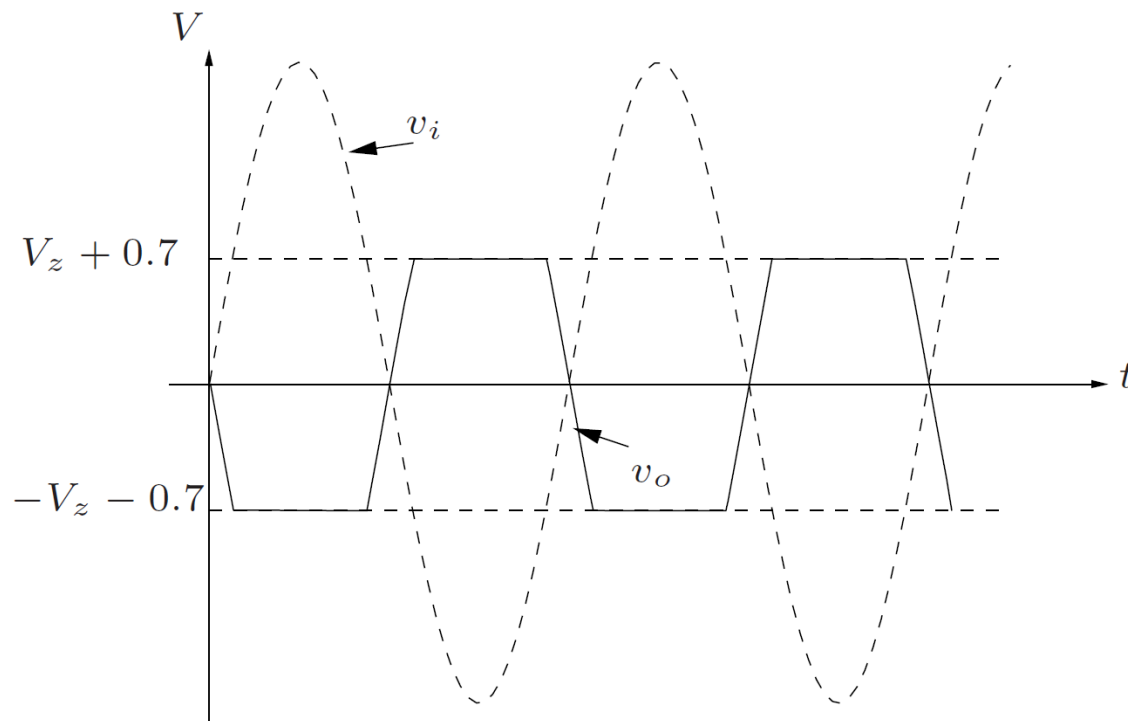
Nesse caso, o ganho do circuito é dado por $-R_2/R_1$, pois trata-se de uma montagem inversora.



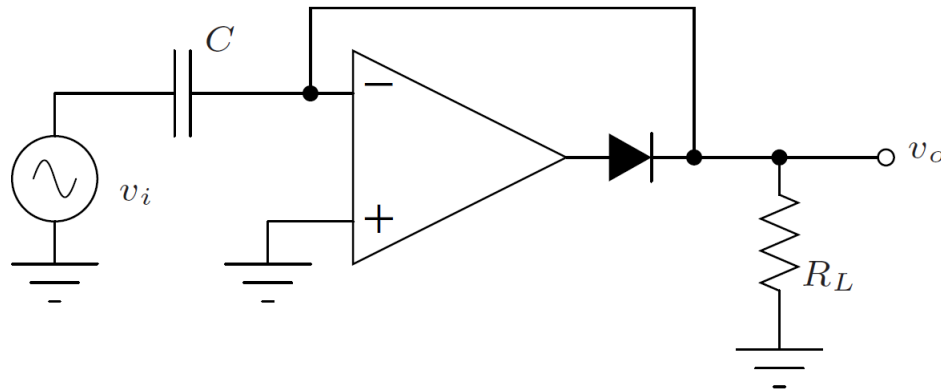
Quando a tensão de saída atingir o valor de $\pm(V_z + 0.7)$ os díodos entram em condução. Neste caso, a amplitude do sinal de saída fica limitada a $\pm(V_z + 0.7)$

Limitadores de pico

- Formas de onda da entrada e da saída do circuito limitador de pico nos dois semiciclos, para o caso em que $R_1 = R_2$.

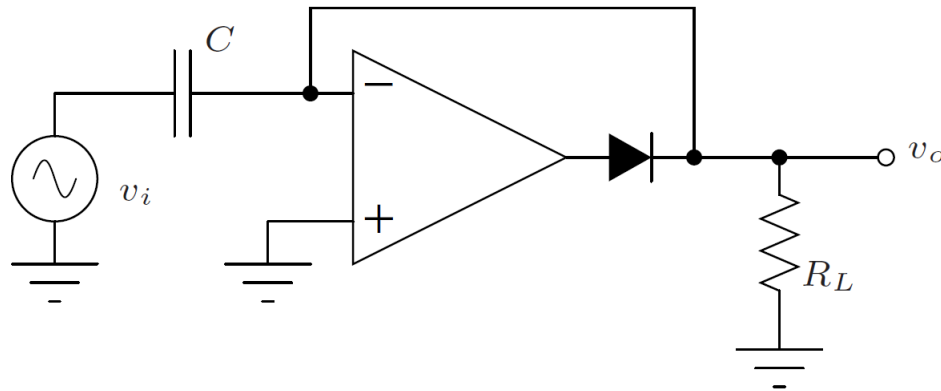


Deslocador de nível positivo



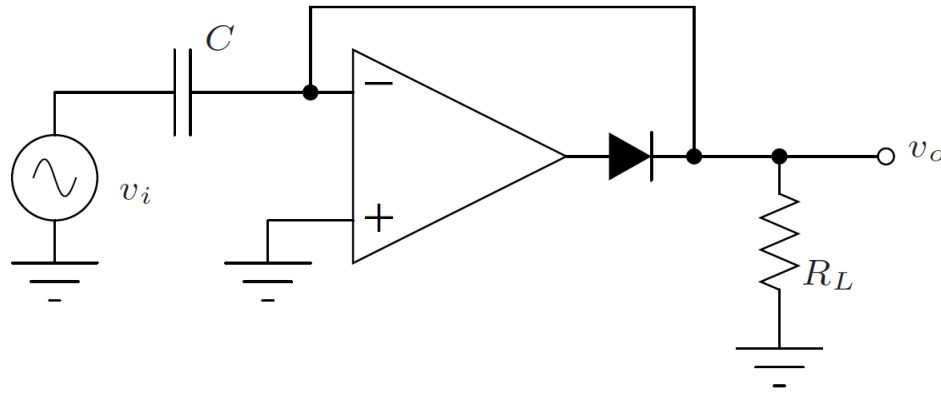
- Considerando que o condensador está inicialmente descarregado, no primeiro semi-ciclo negativo do sinal de entrada, a saída do amplificador operacional vai ser positiva, o diodo entra em condução e fecha a malha de realimentação negativa.
- A entrada inversora do amplificador operacional vai funcionar como terra virtual e o condensador fica ligado em paralelo com a fonte de sinal de entrada, carregando-se com o pico da sua tensão.

Deslocador de nível positivo



- No semiciclo positivo do sinal de entrada, o díodo deixa de conduzir, não existindo realimentação negativa.
- Neste caso o terminal não inversor do amplificador operacional deixa de funcionar como terra virtual.
- A tensão de saída é dada apenas pela soma da tensão de entrada v_i com a tensão do condensador V_p .
- Como a tensão no condensador é constante e igual ao pico negativo da tensão v_i , a tensão de saída irá variar entre 0 e $2V_p$.

Deslocador de nível positivo

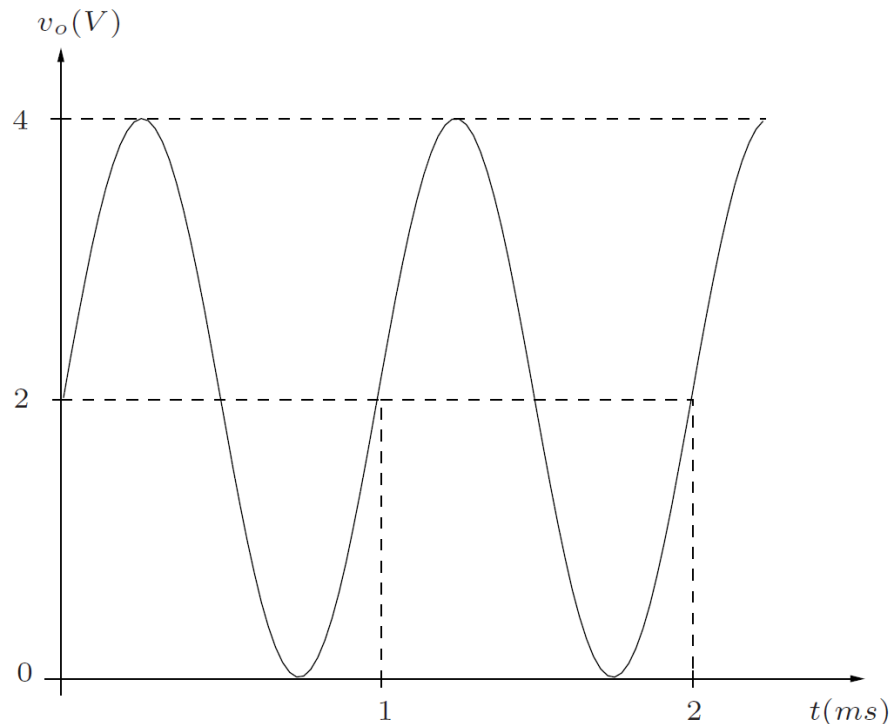


Exemplo: Considere o circuito da figura, em que $v_i = 2 \sin(2000\pi t)$. Esboce a forma de onda da saída.

Qual seria a forma de onda da saída se a senoide tivesse uma componente contínua de 0.5 V ? E se a componente contínua fosse de -1 V ?

Deslocador de nível positivo

R: Durante o semi-ciclo negativo, o condensador vai carregar-se com a tensão de pico negativa, que neste caso é de -2 V . Durante o semi-ciclo positivo, a tensão do condensador vai somar-se à tensão de entrada. Como a tensão de entrada varia entre $\pm 2\text{ V}$, a tensão de saída irá variar entre 0 e 4 V .



Deslocador de nível positivo

Se o sinal de entrada tiver uma componente contínua de 0.5 V, significa que vai variar entre -1.5 V e 2.5 V . O condensador irá carregar-se com a tensão de pico negativa, ou seja, com 1.5 V . Esta tensão irá ser somada à de entrada para formar a saída, que irá variar entre 0 e 4 V , tal como no caso anterior.

Se o sinal de entrada tiver uma componente contínua de -1 V , vai variar entre -3 V e 1 V . Neste caso o condensador irá ser carregado com 3 V e a tensão de saída irá variar entre 0 e 4 V , tal como nos casos anteriores.

Daqui se pode concluir que a componente contínua do sinal de entrada não tem qualquer influência no funcionamento do deslocador de nível. Isto significa que este circuito pode ser utilizado para eliminar as tensões de offset dos circuitos com amplificadores.