

• Aplicações com OpAmp

A quantidade de circuitos que podem ser implementados com opamps é ilimitada. Seleccionamos aqueles circuitos mais comuns na prática e agrupamos por categorias. A seguir passaremos a descrever estes circuitos de forma sucinta.

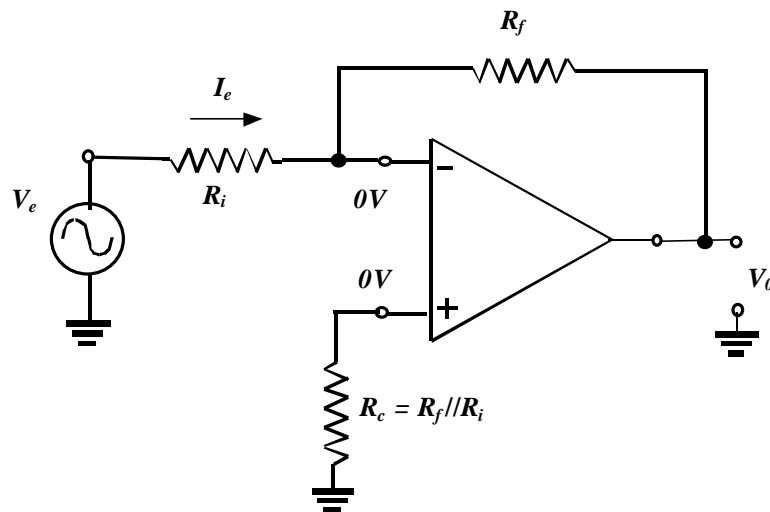
1) Amplificadores básicos

A principal função do amplificador operacional é a de amplificar tensão. Dentre as várias destas aplicações, mostramos a seguir as mais básicas e/ou comuns encontradas na prática.

✓ Amplificador Inversor

Um dos circuitos com opamp mais comum é o amplificador inversor já estudado anteriormente. A figura abaixo mostra a configuração padrão. Note que a impedância de entrada é igual a R_i . Como já foi visto, o ganho de tensão é dado por:

$$A_v = -R_f/R_i$$



Amplificador inversor

Note que a impedância de entrada é dada por

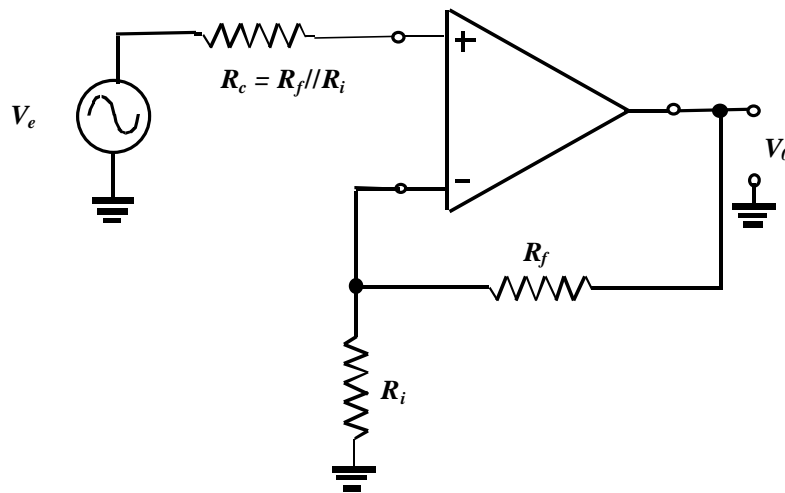
$$R_i = V_e/I_e$$

Como vimos anteriormente, o resistor R_c , minimiza o efeito da corrente de polarização e só deve estar presente em amplificador com corrente de polarização relativamente altas, da ordem de micro ampères (opamp em tecnologia bipolar).

✓ Amplificador não Inversor

Outro circuito com opamp bem comum é o amplificador não inversor também já estudado anteriormente. A figura abaixo mostra a configuração padrão. Como já foi visto, o ganho de tensão é dado por:

$$A_v = 1 + R_f/R_i$$



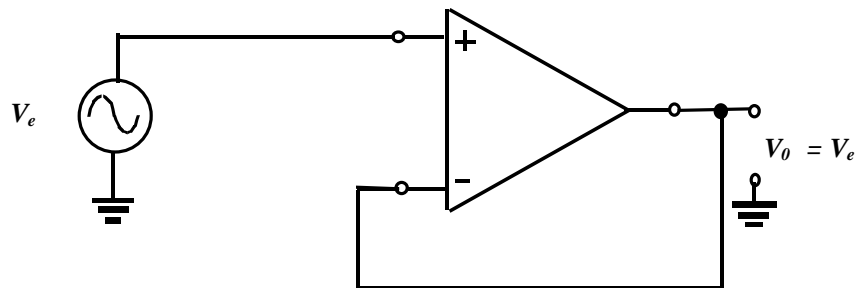
Amplificador não inversor

Note que a impedância de entrada é bastante elevada. Além de não inversão de fase desta configuração a impedância de entrada elevada é a principal diferença do amplificador inversor.

Como vimos anteriormente, novamente o resistor R_c , minimiza o efeito da corrente de polarização e só deve estar presente em amplificador com corrente de polarização relativamente altas, da ordem de micro ampères (opamp em tecnologia bipolar).

✓ *Buffer de tensão*

Um circuito de buffer fornece um meio de isolar o sinal de entrada de uma carga, por meio de um estágio de ganho unitário, sem inversão de fase ou polarização, agindo como um circuito ideal de impedância de entrada muito alta, e baixa impedância de saída. A Fig. abaixo mostra um opamp conectado de forma a proporcionar a operação de buffer citada.



Buffer de tensão

Note que o buffer é um caso particular de um amplificador não inversor com ganho igual a 1, isto é,

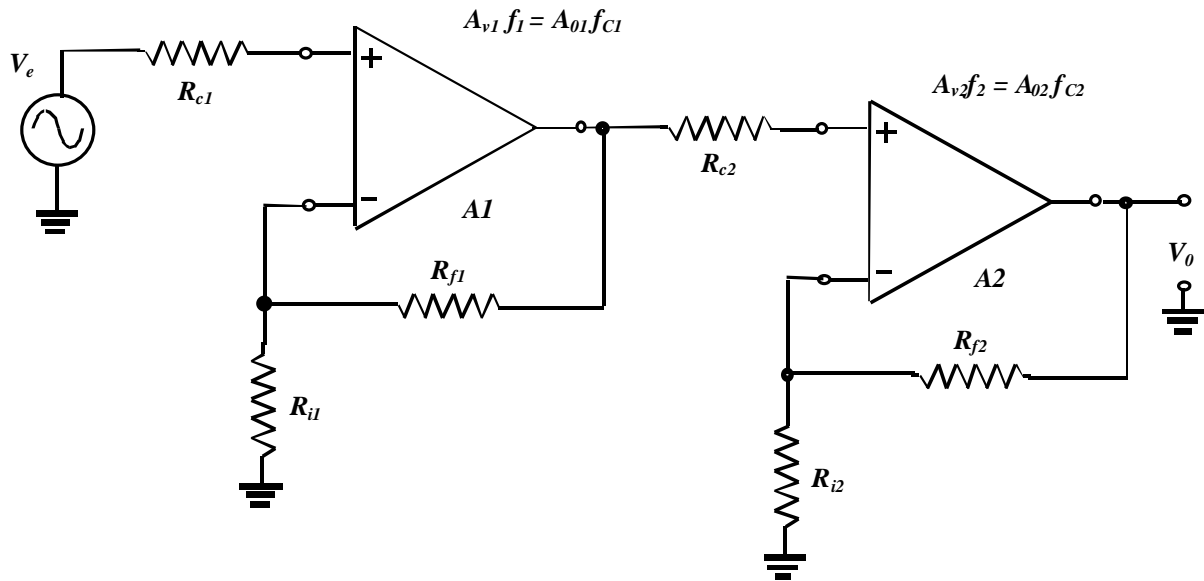
$$A_v = 1 + R_f/R_i$$

$$\text{Se } R_f = 0 \text{ e } R_i = \infty$$

$$A_v = 1$$

✓ Ganho com múltiplos estágios

Como o produto ganho banda de um amplificador com opamp é constante e aproximadamente igual ao produto ganho banda do opamp, as vezes um só estágio de ganho não fornece o ganho e a banda necessária para a atingir as especificação do projeto. Uma possível solução seria cascatear vários estágios para alcançar a especificação desejada. A figura mostra uma conexão com dois estágios.



Conexão de amplificador com dois estágios

O ganho total é o produto dos ganhos de cada estágio, portanto

$$A_T = V_0/V_e = A_{V1} \cdot A_{V2}$$

$$\text{Onde } A_{V1} = 1 + R_{f1}/R_{i1} \text{ e } A_{V2} = 1 + R_{f2}/R_{i2}$$

Admitindo que os opamp's ($A_{01}f_{C1} = A_{02}f_{C2} = A_0f_C$) e os ganhos de tensão ($A_{V1} = A_{V2} = A_v$) sejam idênticos, a banda total (f_{total}) é praticamente igual à banda de cada estágio, portanto o produto ganho banda desta conexão é

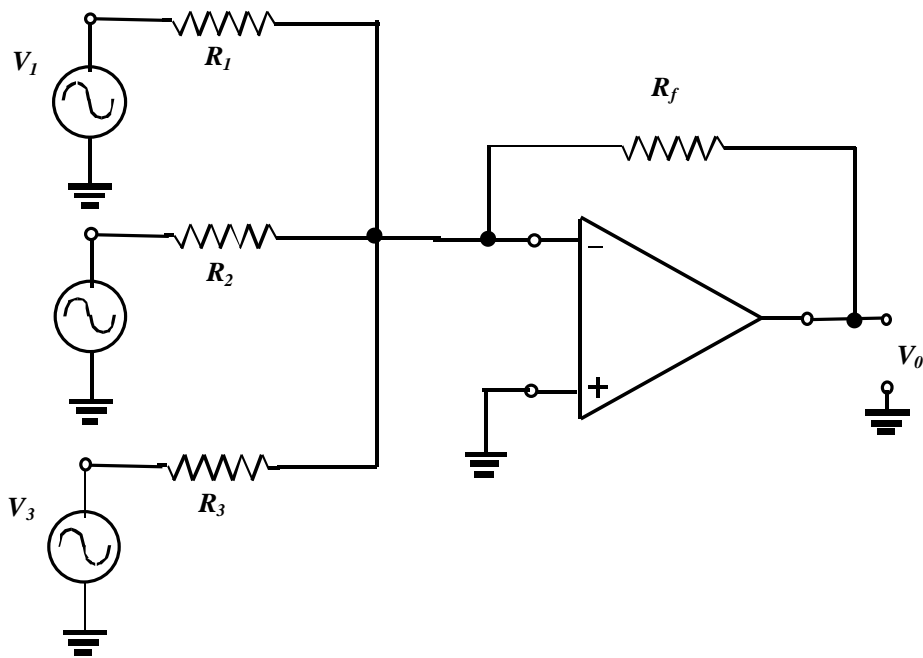
$$A_T \cdot f_{total} = A_v \cdot A_v f_{total} \gg A_v \cdot A_v f_1 = A_v \cdot A_v f_2 = A_v \cdot A_0 f_C = A'_0 f_C$$

$$\text{Onde } A'_0 = A_v \cdot A_0$$

Ou seja, o produto ganho banda da conexão é igual equivalente aquela alcançada com um opamp de produto ganho banda A_v maior.

✓ Amplificador de soma

Outra aplicação bastante comum com o opamp é o amplificador de soma de tensões ou amplificado somador. A Figura abaixo mostra a saída como sendo a soma de três entradas, cada uma multiplicada por um fator diferente.



Amplificador de soma

$$V_0 = -(R_f/R_1 V_1 + R_f/R_2 V_2 + R_f/R_3 V_3)$$

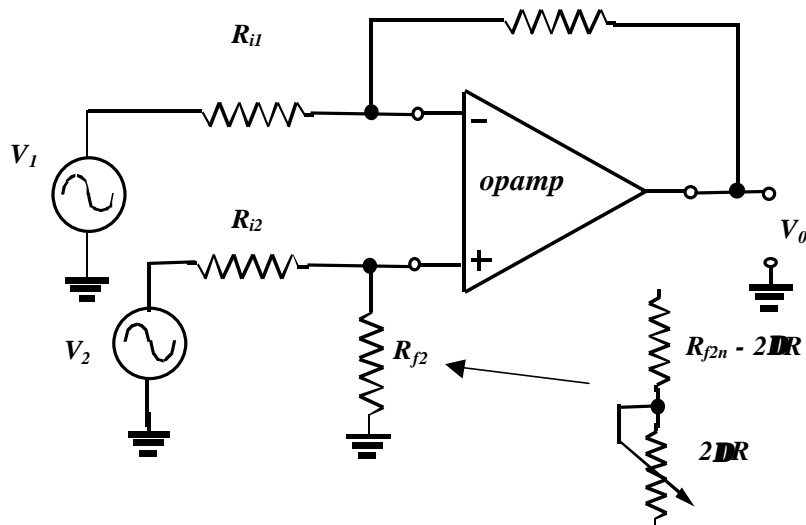
Um caso particular é fazer $R_1 = R_2 = R_3 = R$, assim

$$V_0 = -R_f/R(V_1 + V_2 + V_3)$$

Uma aplicação para tipo de circuito seria por exemplo, na mixagem de sinais de áudio.

✓ Amplificador de diferença

Este amplificador pode ser utilizado quando a informação que se deseja extrair está na diferença de duas tensões.



Amplificador de diferença

Normalmente, os resistores $R_{f1} = R_{f2} = R_f$ e $R_{e1} = R_{e2} = R_e$, assim

$$V_0 = R_f / R_e (V_2 - V_1)$$

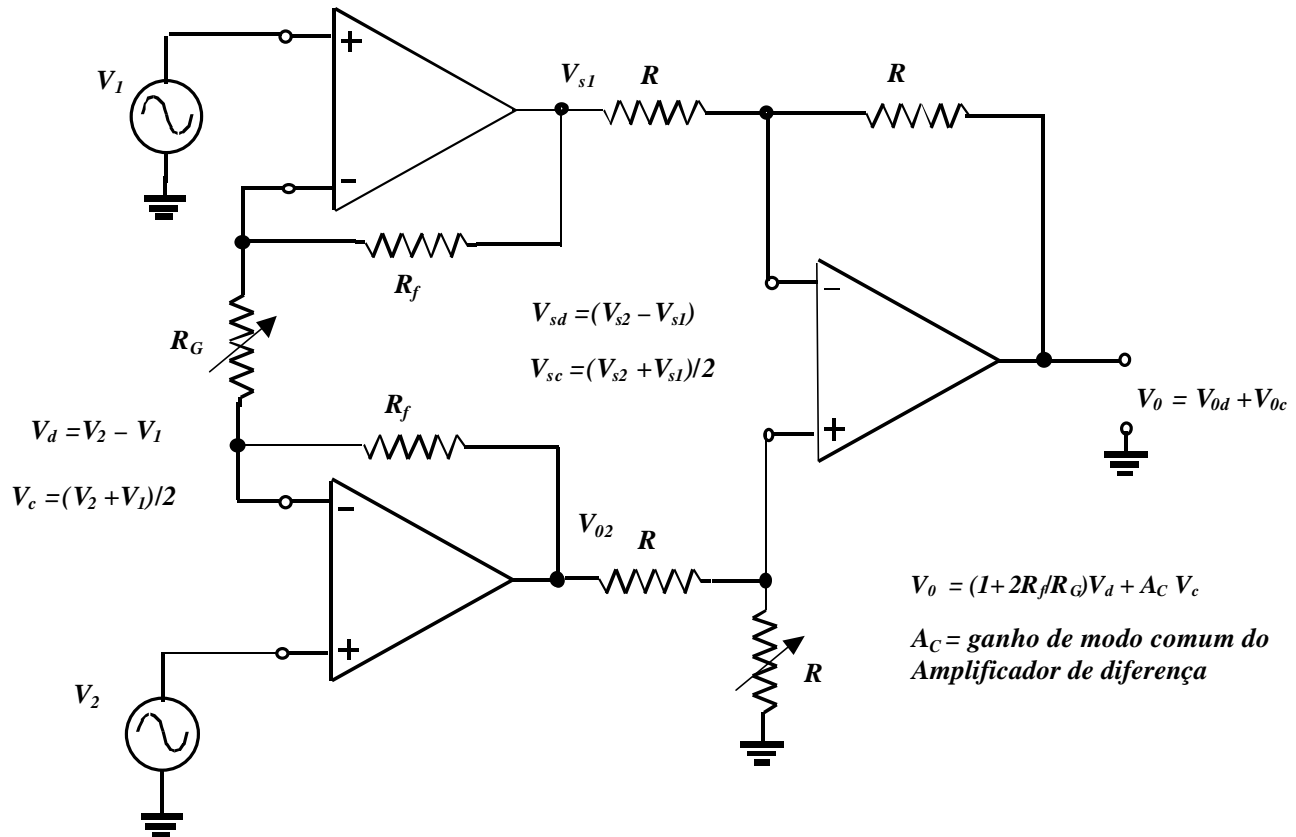
Como na prática a diferença de tensão entre V_2 e V_1 é muito pequena, se existe um sinal de modo comum, isto $V_2 + V_1 \neq 0$, um cuidado especial deve ser tomado no casamento dos resistores. Quando este é o caso é comum substituir o resistor R_{f2} por um resistor em série com um potenciômetro de ajuste (trimpot). O valor deste resistor de ser igual ao valor nominal de R_f menos duas vezes a tolerância e o trimpot deve ser igual à duas vezes o valor da tolerância.

O principal inconveniente deste amplificador é a sua baixa impedância de entrada.

✓ Amplificador de instrumentação

O opamp é muito empregado em circuitos de instrumentação, tais como voltímetros dc ou ac. Dentre estes o mais importante certamente é o amplificador de instrumentação.

Um circuito que fornece uma saída baseada na diferença entre duas entradas (vezes um fator de escala) uma alta impedância de entrada e uma alta rejeição a sinal de modo comum é considerado um amplificador de instrumentação. Uma das configurações clássica é o circuito formado por três opamp como mostra a figura abaixo. O resistor R_G ajusta o ganho do amplificador e o resistor R_{CM} maximiza a CMR. Os dois opamp de entrada fornecem todo o ganho diferencial e o opamp de saída (amplificador de diferença) converte a diferença de tensão em uma saída simples rejeitando o sinal de modo comum.



É deixado como exercício para mostrar que

$$V_{sd} = V_{0d} = (1 + 2R_f/R_G)V_d \quad e \quad V_{0c} = A_c V_{sc} = A_c V_c$$

$$V_0 = (1 + 2R_f/R_G)V_d + A_c V_c$$

Portanto, a rejeição de modo comum deste amplificador é igual

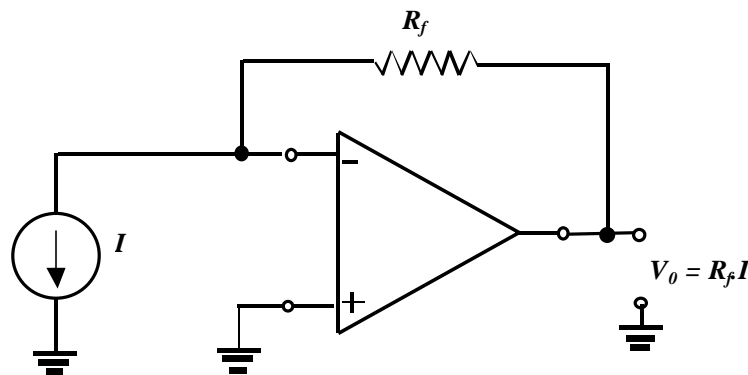
$$CMRR = (1 + 2R_f/R_G)/A_c$$

2) Conversores

Existem várias aplicações, tais como, conversão DA, conversão AD, fotoconversão, etc, onde o sinal de entrada está na forma de corrente, ou a se deseja uma saída em corrente. Portanto, o uso de conversores corrente tensão e tensão corrente são necessários.

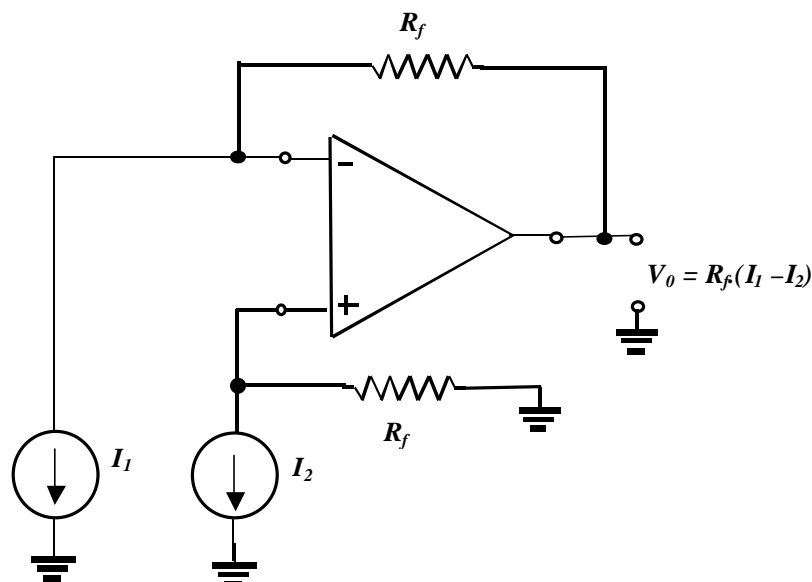
✓ Conversor corrente tensão

Quando se deseja converter uma corrente fornecida por um dispositivo qualquer, como por exemplo, um fotocorrente, em uma tensão, podemos fazer uso dos conversores de corrente tensão, ou também conhecidos como amplificador de transimpedância, já que a constante que relaciona a saída com a entrada é uma resistência. A figura abaixo mostra um conversor corrente tensão simples.



Conversor corrente tensão

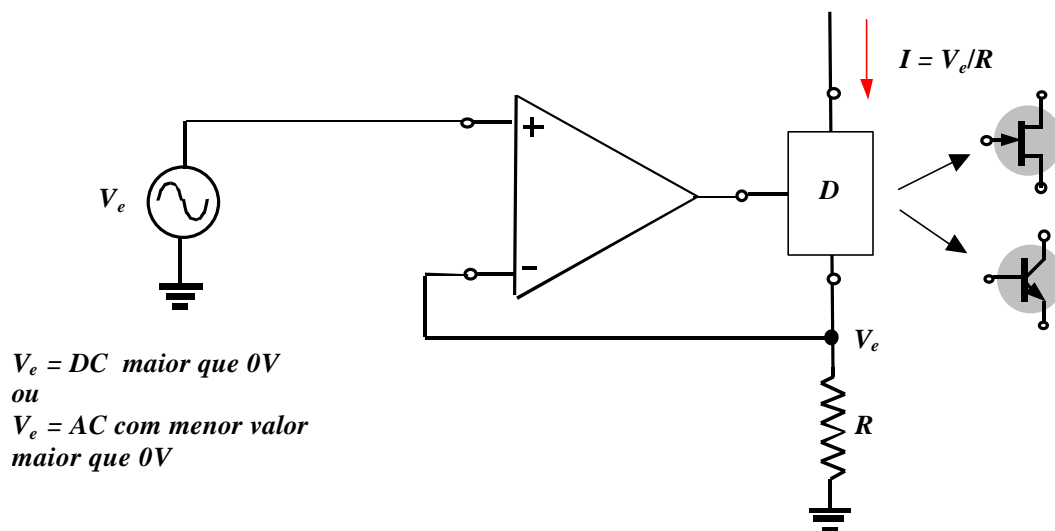
A figura abaixo mostra um conversor diferença de corrente tensão.



Conversor diferença de corrente tensão

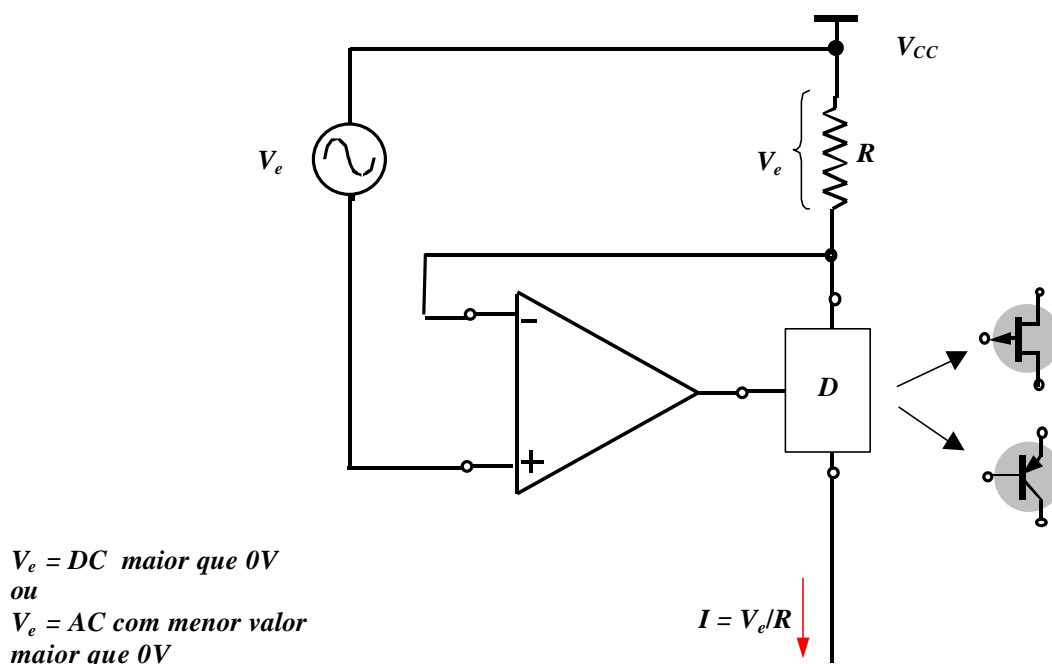
✓ *Conversor tensão corrente.*

Quando se deseja converter uma tensão em uma corrente podemos fazer uso dos conversores de tensão corrente. A figura abaixo mostra um conversor tensão corrente onde a corrente é “puxada” (sink). O dispositivo, D pode ser um transistor bipolar NPN ou, no caso de uma fonte de corrente precisa, um transistor jfet canal N.



Conversor tensão corrente (sink)

A figura abaixo mostra um conversor tensão corrente onde esta é “empurrada” (source). O dispositivo D pode ser um transistor bipolar PNP ou um transistor jfet canal P.



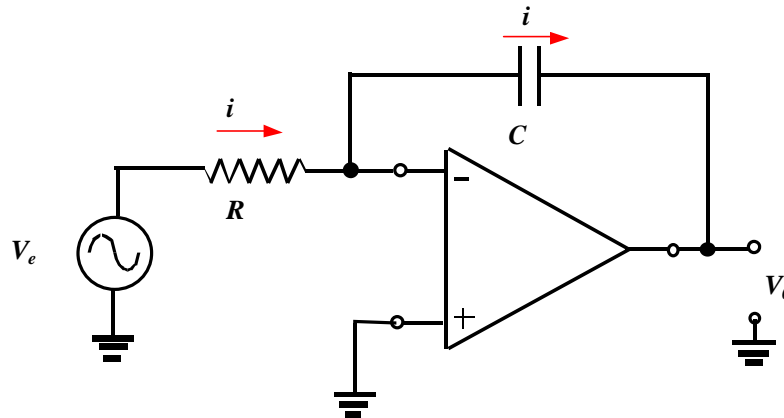
Conversor tensão corrente (source)

3) Operadores

Os opamp's podem ser utilizados para implementar funções de operadores, tais como, d/dt (operador diferencial) e \int (operador integral). Estes circuitos são muito utilizados em malha de controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo).

✓ Integrador

O circuito básico de um integrador com opamp está mostrado abaixo.



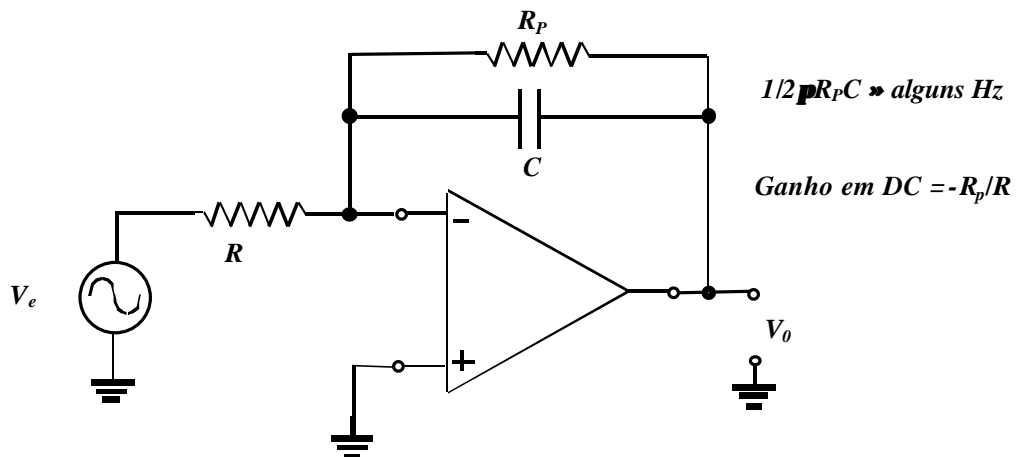
Integrador básico

Da figura, temos

$$i = V_e/R \quad e \quad V_o = -Q/C \quad \text{onde} \quad Q = \int i dt = \int V_e/R dt \quad \text{portanto}$$

$$V_o = -1/RC \int V_e dt$$

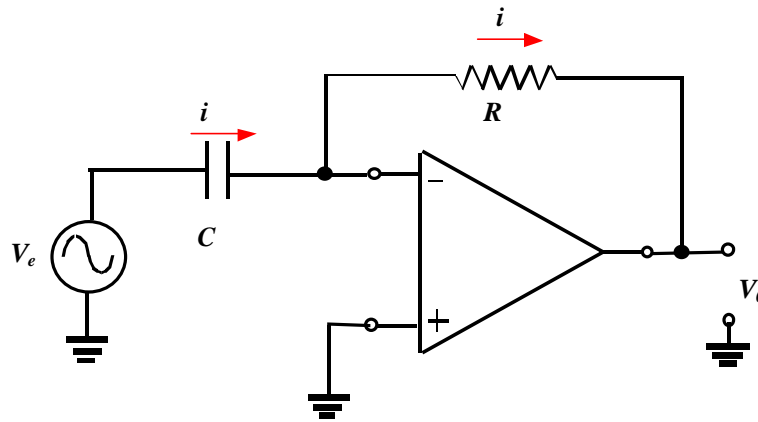
Na prática, devido a corrente de polarização e tensão de offset diferentes de zero, um resistor que limita o ganho em DC é colocado em paralelo com o capacitor C. A figura abaixo mostra o integrador prático.



Integrador prático

✓ Diferenciador

O circuito básico de um diferenciador com opamp está mostrado abaixo. Note que o capacitor C trocou de posição com o resistor R .



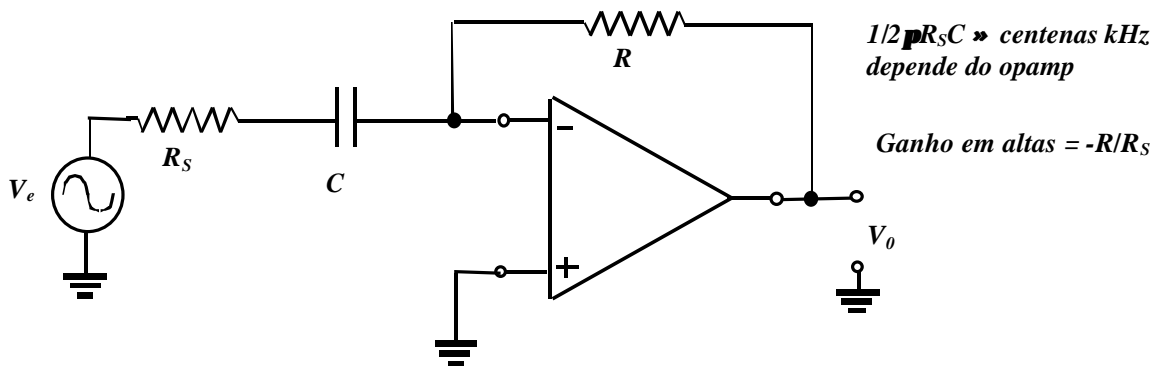
Diferenciador básico

Da figura, temos

$$V_0 = Ri \quad \text{e} \quad V_e = Q/C \quad \text{onde} \quad i = dQ/dt = CdV_e/dt \quad \text{portanto}$$

$$V_0 = -RCdV_e/dt$$

Na prática, devido a dependência do ganho de malha aberto do opamp diminuir (tipicamente -20dB/década) para evitar picos na resposta em altas frequências ou instabilidades, um resistor que limita o ganho em altas frequências é colocado em série com o capacitor C . A figura abaixo mostra o diferenciador prático.



Diferenciador prático

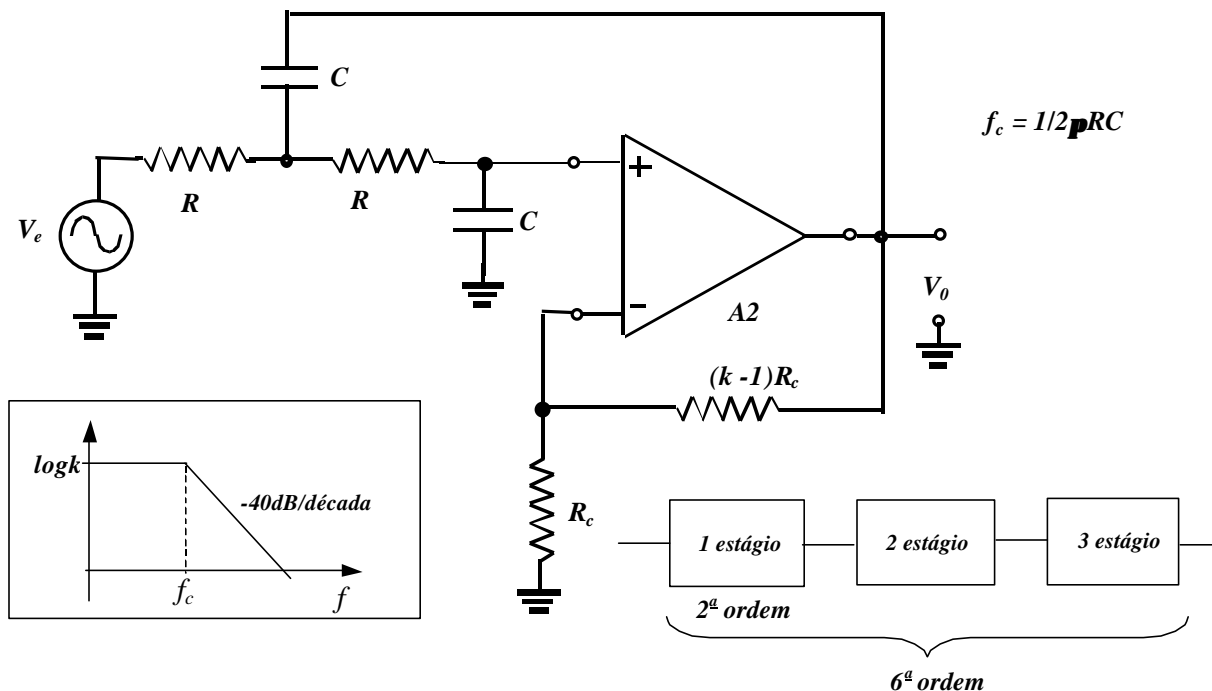
4) Filtros ativos

Os opamps são empregados também na montagem de filtros ativos. Um filtro pode ser constituído, utilizando-se componentes passivos: resistores, capacitores e indutores. Além destes, um filtro ativo possui um amplificador para produzir amplificação de tensão e “bufferização” ou isolamento do sinal.

Os filtros ativos é um tema bastante extenso e está fora dos objetivos deste curso. Apenas para exemplificar apresentaremos uma classe de filtro ativo bastante popular chamados circuitos VCVS (do inglês, *voltage-controlled voltage-source*), também conhecidos simplesmente como filtro com fonte controlada (*controlled-source filter*).

✓ Filtro Passa-Baixas

Um filtro com fonte controlada passa-baixas de segunda ordem tipo Butterworth é mostrado na figura abaixo. A tabela abaixo mostra os valores de k para filtro de ordens superiores feito com este filtro.



Filtro Passa-Baixas de 2ª ordem

Tabela dos valores de k 's para 1, 2 ou 3 estágios

n° de estágios	n	k_1	k_2	k_3
1	2	1,586	----	-----
2	4	1,152	2,235	-----
3	6	1,068	1,586	2,484

✓ *Filtro Passa-Altas*

Um filtro com fonte controlada passa-altas de segunda ordem tipo Butterworth é mostrado na figura abaixo. A tabela abaixo mostra os valores de k para filtro de ordens superiores feito com este filtro.

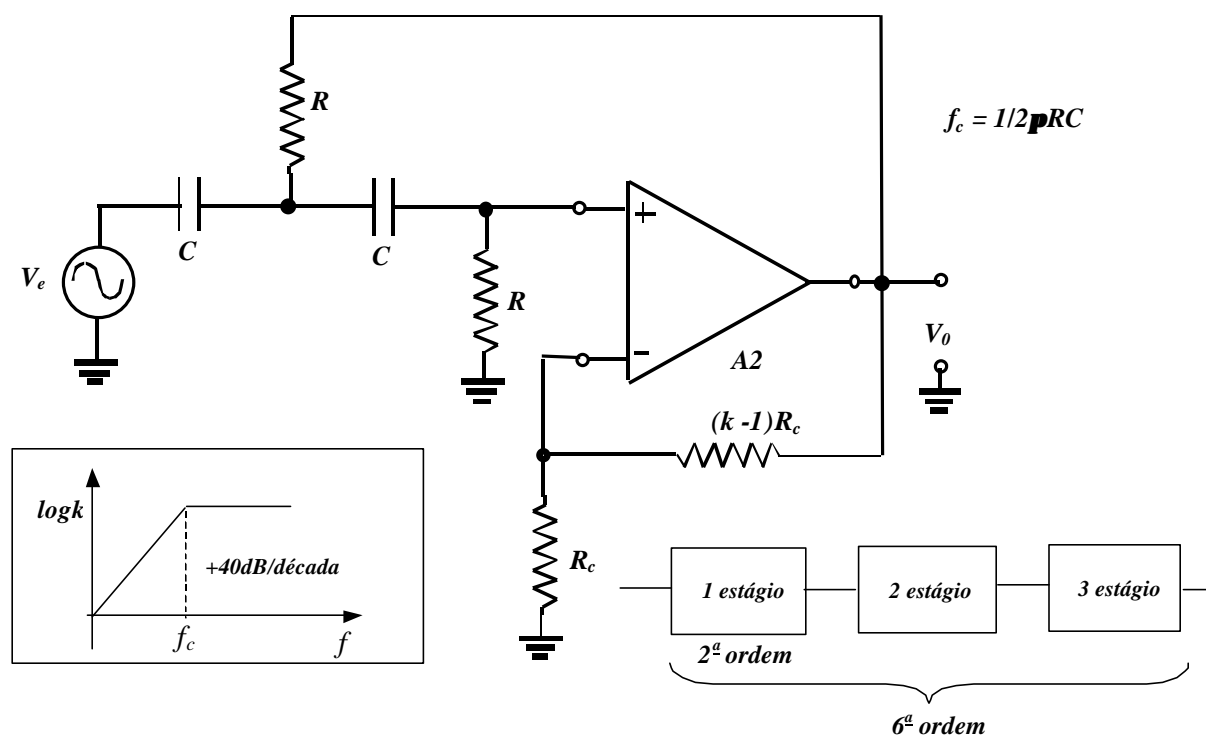
***Filtro Passa-Altas de 2ª ordem***

Tabela dos valores de k 's para 1, 2 ou 3 estágios

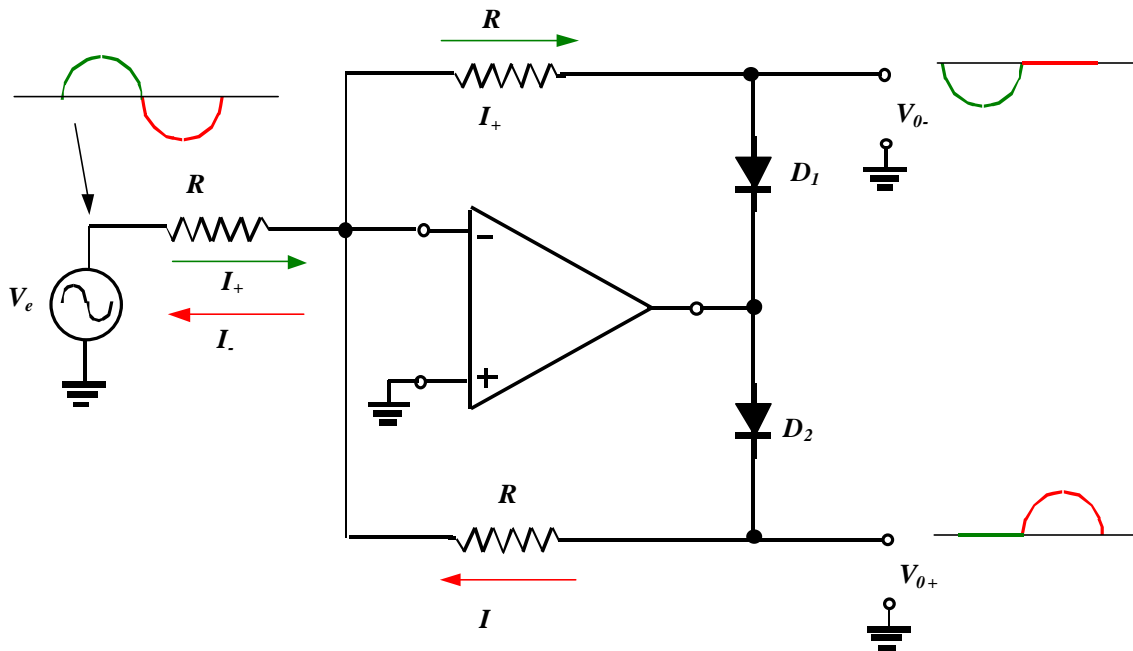
n° de estágios	n	k_1	k_2	k_3
1	2	1,586	----	-----
2	4	1,152	2,235	-----
3	6	1,068	1,586	2,484

5) Circuitos não lineares

Os circuitos não lineares exploram as características não lineares dos diodos e a dependência exponencial da corrente versus tensão numa junção PN.

✓ Retificador de precisão de meia onda

O retificador de meia onda mostrado na figura abaixo fornece duas saídas, uma que é a porção positiva do sinal de entrada e outra que fornece a porção negativa do sinal de entrada.



Retificador de precisão de meia onda

Quando o sinal de entrada é positivo a malha se fecha no ramo superior da malha de realimentação ($R - D_1$), portanto

$$V_{0-} = -R/RV_e = -V_e \quad \text{e} \quad V_{0-} = 0 \text{ p/ } V_e \nless 0$$

Quando o sinal de entrada é negativo a malha se fecha no ramo inferior da malha de realimentação ($R - D_2$), portanto

$$V_{0+} = -R/RV_e = -V_e \quad \text{e} \quad V_{0+} = 0 \text{ p/ } V_e \nless 0$$

Obs: É importante observar que se um dos ramos de realimentação não existe, o opamp satura quando não está com a malha fechada; isto reduz bastante a resposta do retificador.

✓ *Retificador de precisão de onda completa (circuito de módulo)*

O retificador de onda completa mostrado na figura abaixo fornece uma saída que é o módulo do sinal de entrada. Este circuito é uma combinação de retificador de meia onda com um amplificador somador.

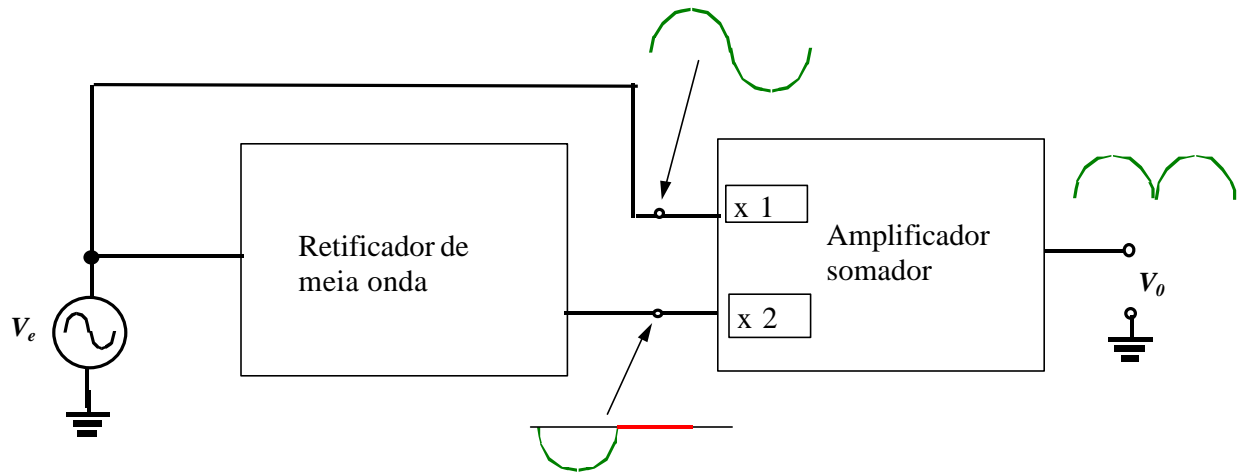
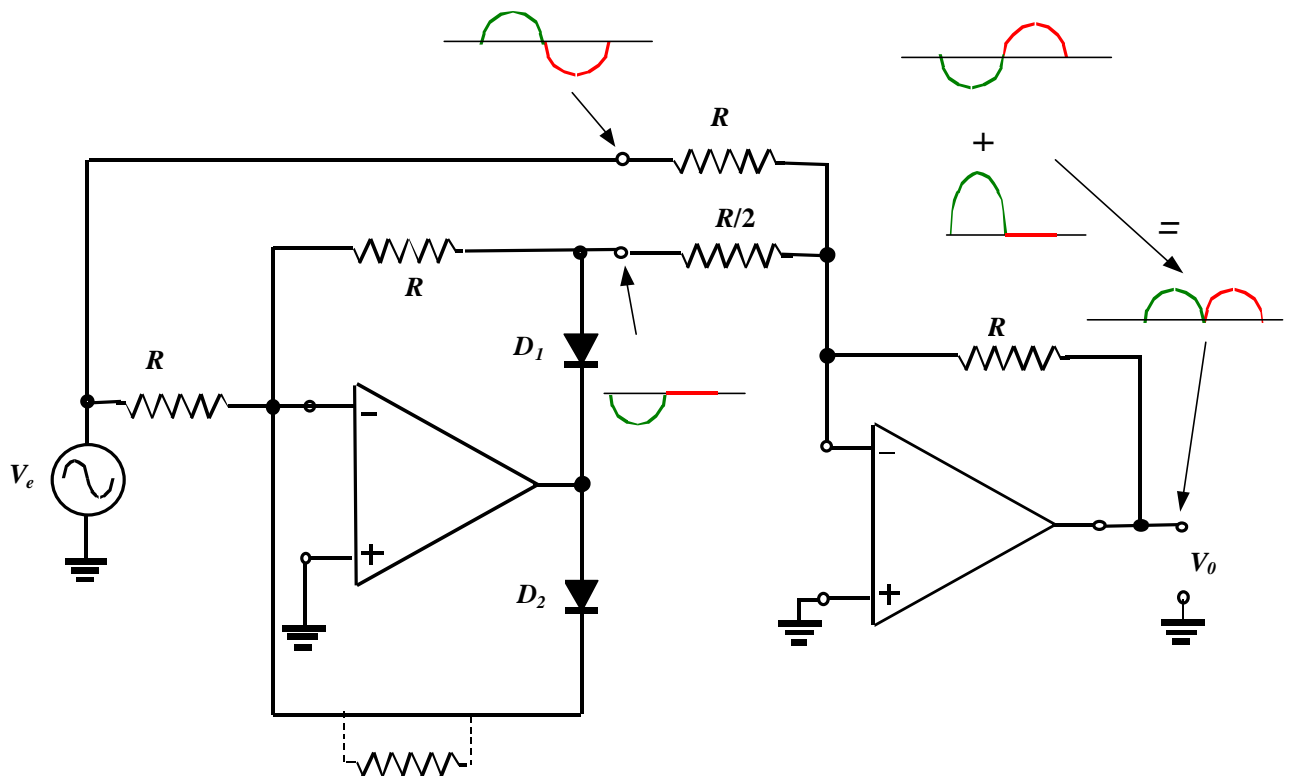


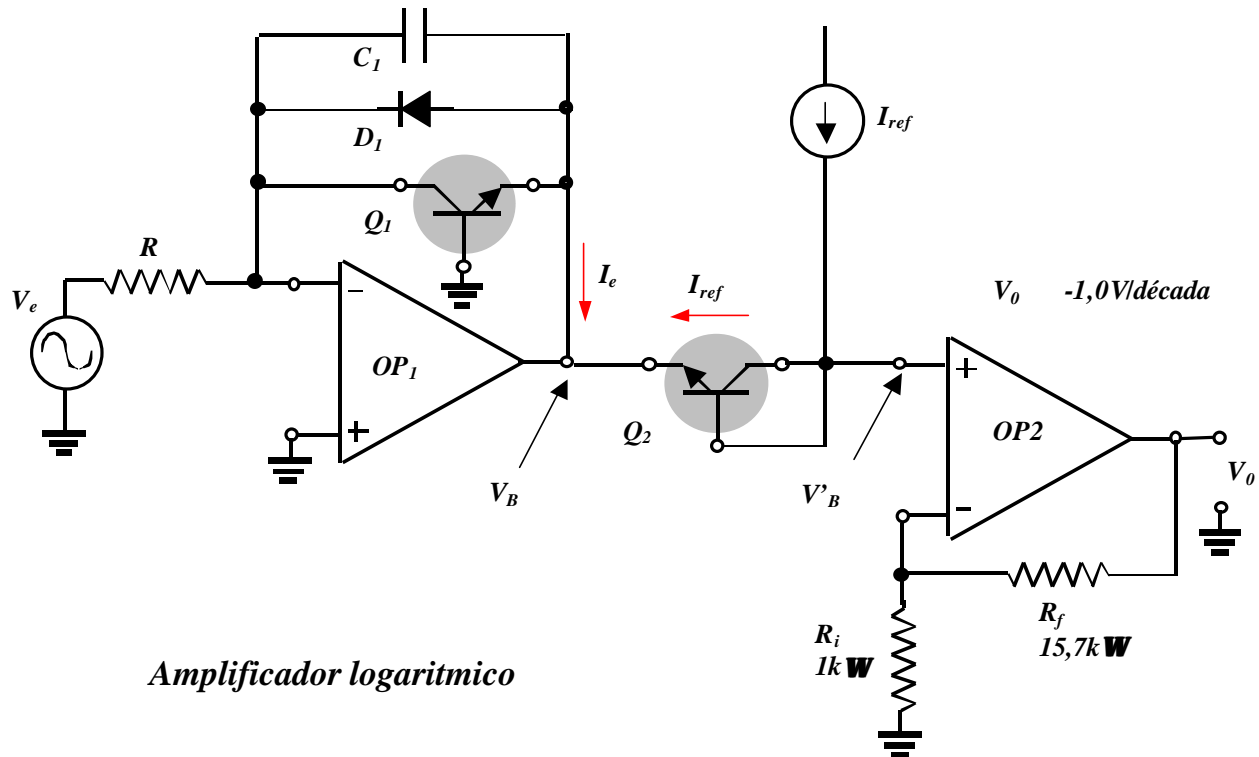
Diagrama em bloco do retificador de onda completa



Retificador de onda completa

✓ Amplificador logarítmico

A figura abaixo mostra um circuito que explora a dependência logarítmica de V_{BE} com I_C para produzir uma saída proporcional ao logaritmo da tensão de entrada ($V_e \geq 0V$). Este circuito funciona muito bem até sete décadas de corrente desde que se use os opamp's e o par Q_1 e Q_2 adequados.



Amplificador logarítmico

O circuito funciona da seguinte forma: a voltagem de entrada é convertida na corrente I por

$$I_e = V_e / R$$

A tensão V_B é igual a tensão $-V_{BE}$ do transistor Q_1 , que deve fazer parte de um par casado com Q_2 . A tensão V'_B é igual a tensão V_{BE} do transistor Q_2 mais a tensão V_B . Escrevendo isto, resulta

$$V'_B = V_{BE}(Q_2) - V_{BE}(Q_1) = V_T \ln I_{ref} / I_s - V_T \ln I_e / I_s = -V_T \ln I_e / I_{ref} = V_T \ln V_e / R I_{ref}$$

Ou na base 10

$$V'_B = -2,302 V_T \log V_e / R I_{ref} \quad \text{e na saída } V_0$$

$$V_0 = -(1+15,7)(2,302) V_T \log V_e / R I_{ref} = -(16,7)(2,302)(26mV) \log V_e / R I_{ref}$$

$$V_0 = -(1,0V) \log V_e / R I_{ref}$$