Circuitos Eletrônicos Analógicos:

Circuitos com Amplificadores Operacionais

Prof. Pedro S. Almeida

Conteúdo da aula

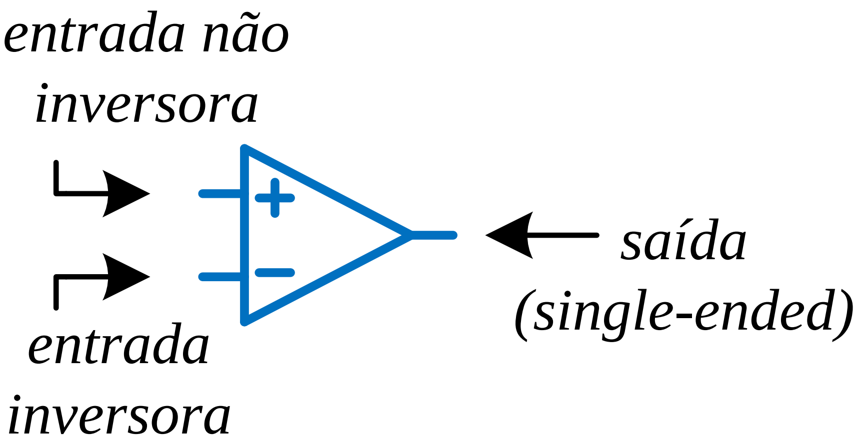
- Introdução ao amplificador operacional
  - Conceito idealizado
  - Análise com circuitos idealizados
  - O operacional real – circuito e limitações
- Aplicações como amplificador linear
- Aplicações não-lineares
  - Comparadores
  - Osciladores
  - Amplificadores não-lineares

Introdução

- Antes mesmo de ser um dispositivo prático, o **amplificador operacional** é uma entidade teórica da eletrônica analógica:

- Características:

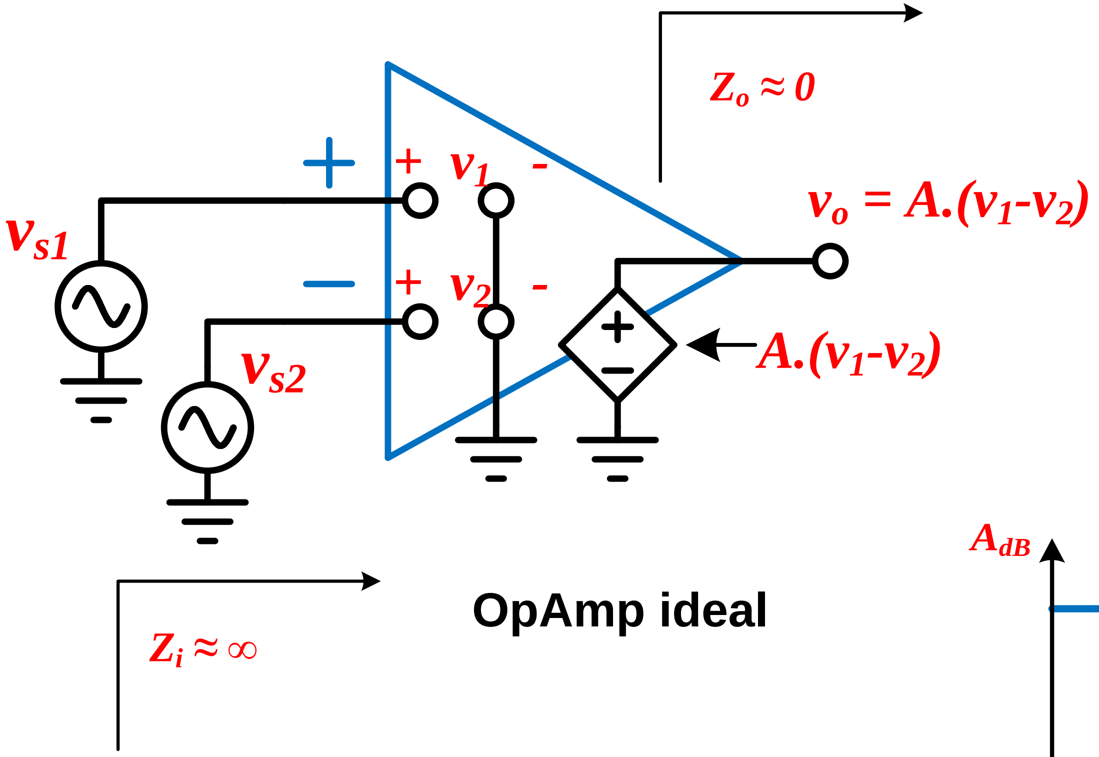
- Amplificador diferencial
- Ganho diferencial infinito
- Ganho de modo comum nulo
- Banda passante infinita
- Impedância de entrada infinita
- Impedância de saída nula



OpAmp ideal

Introdução

- Modelo interno – amplificador diferencial de tensão ideal

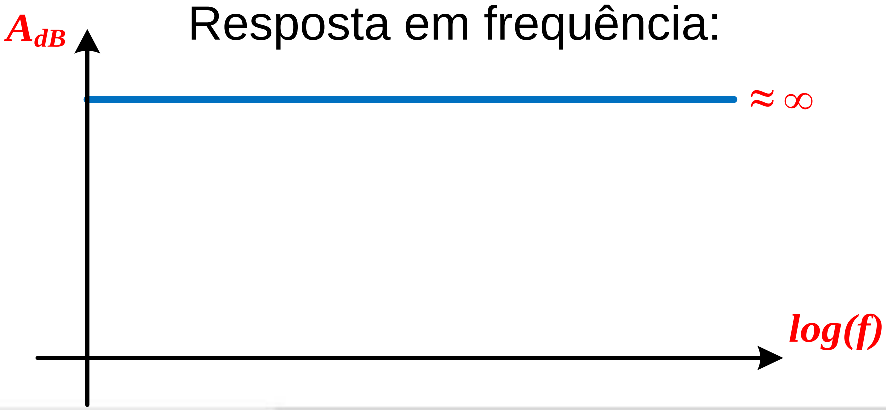


OpAmp ideal

A = ganho diferencial (idealmente infinito; muito grande na prática: > 100 dB)

Ganho de sinais de modo comum é nulo
(se $v_{s1} = v_{s2}$, $v_o = 0$)

Resposta em frequência:

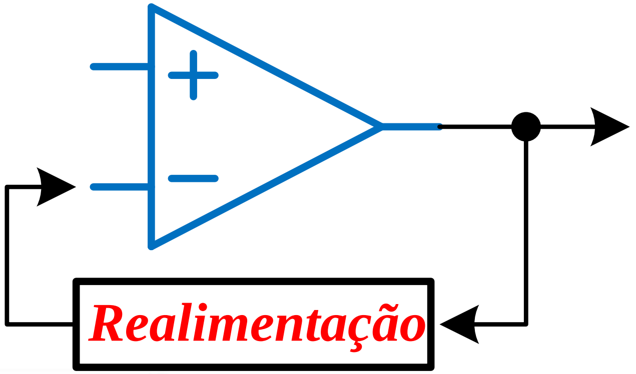


Introdução

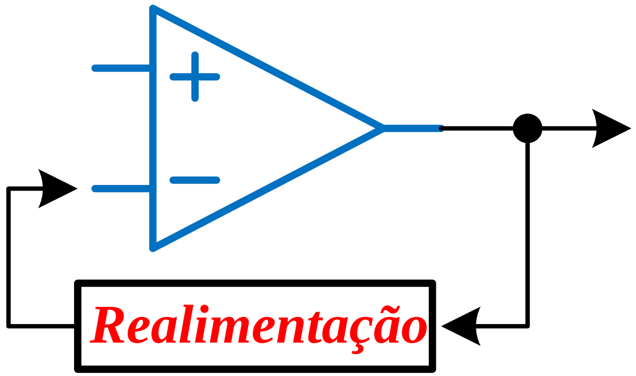
- O ganho idealmente infinito não tem aplicação linear para o amplificador em malha aberta!

  → única aplicação é como comparador
- É necessário operar o amplificador com alguma realimentação negativa para realizar funções lineares (amplificadores)
- É possível operar com realimentação positiva para aplicações não lineares (comparadores e osciladores)

Realimentação negativa:



Introdução



Realimentação negativa: parte da saída é retornada à entrada, subtraindo-se.

$$v_o = A.(v_1 - v_2) \longrightarrow$$ Equação do amplificador diferencial

$$v_2 = k.v_o \longrightarrow$$ Parcela "k" da saída que é realimentada à entrada

Daí a equação se torna:

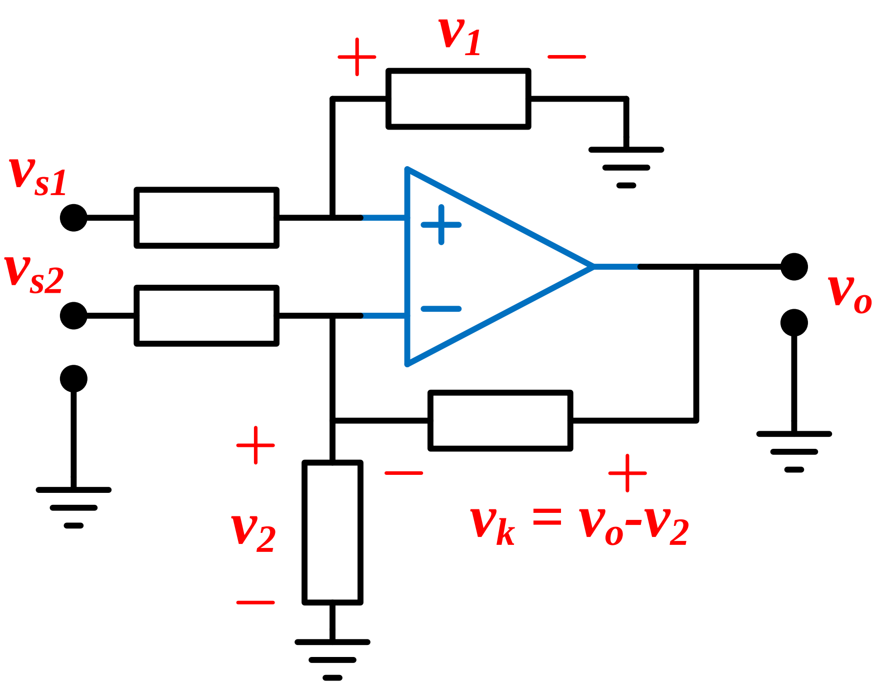
$$v_o = A.(v_1 - k.v_o) \Rightarrow v_o = \frac{A}{A.k+1} v_1$$

No limite, como A é muito grande: $$v_o = \lim_{A \to \infty} \frac{A}{A.k+1} v_1 = \frac{1}{k} v_1$$

Ou seja, a saída agora só depende da parcela de realimentação k e da entrada!

Introdução

Um circuito com impedâncias genéricas



Outra propriedade interessante:
curto circuito virtual entre + e -

Por KVL:

$$v_k = (v_o - v_2) = A(v_1 - v_2) - v_2$$

Proporcionalidade entre a tensão na porta inversora e a tensão realimentada é o coeficiente de realimentação:

$$\frac{v_k}{v_2} = k$$

Portanto:

$$k.v_2 = A(v_1 - v_2) - v_2 \Rightarrow v_2 = \frac{A}{A+k+1} v_1$$

No limite, como A é muito grande:

$$v_2 = \lim_{A\to\infty} \frac{A}{A+k+1} v_1 = v_1$$

Com realimentação negativa, a tensão nas duas portas se torna obrigatoriamente igual!

(note que isto independe de k !)

Análise de circuitos com operacionais

- Portanto, estas **duas diretrizes** podem ser seguidas para análise de circuitos com operacionais operando c/ realimentação negativa:

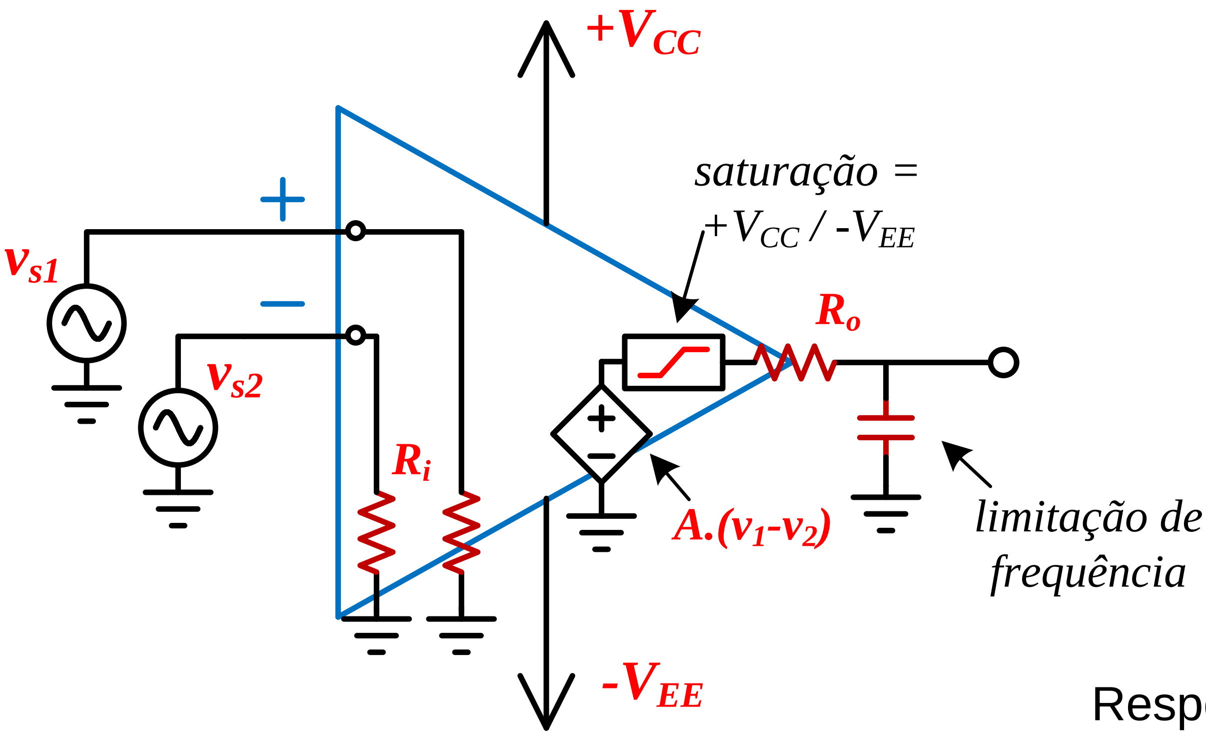
  - Supor que a tensão nas duas portas é igual ***(curto-circuito virtual)***
  - Supor que nenhuma corrente circula para dentro do amplificador ***(impedância de entrada infinita)***

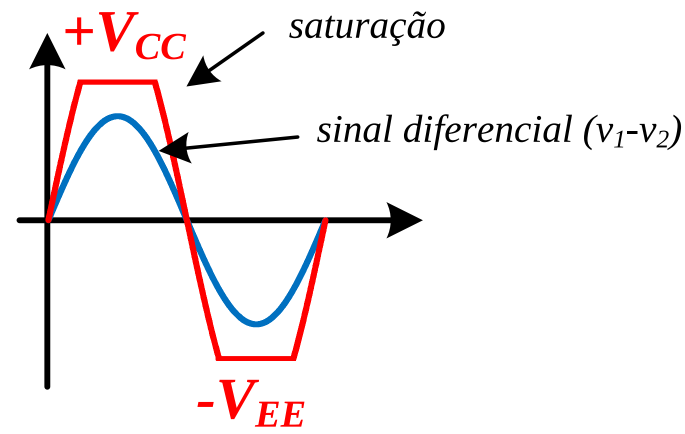
- A partir disto, é possível derivar vários circuitos lineares empregando operacionais.

O amplificador operacional real

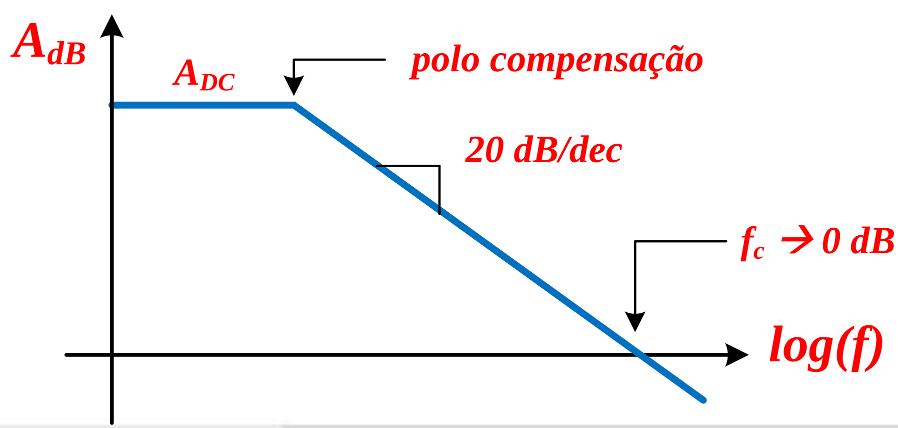
- O circuito real possui limitações:
  - Não tem impedância de entrada infinita – mas é muito grande.
  - Não tem impedância de saída nula – mas é muito pequena.
  - Não possui banda passante infinita.
  - Não possui ganho de modo diferencial infinito – mas é muito grande, como dito.
  - Não possui ganho de modo comum nulo – mas possui alta **rejeição de modo comum** (CMRR > 100 dB).
  - Sua saída está limitada a, no máximo, os níveis de alimentação (saturação do operacional).
  - Máximo dv/dt de saída – “slew rate”, V/µs

O amplificador operacional real



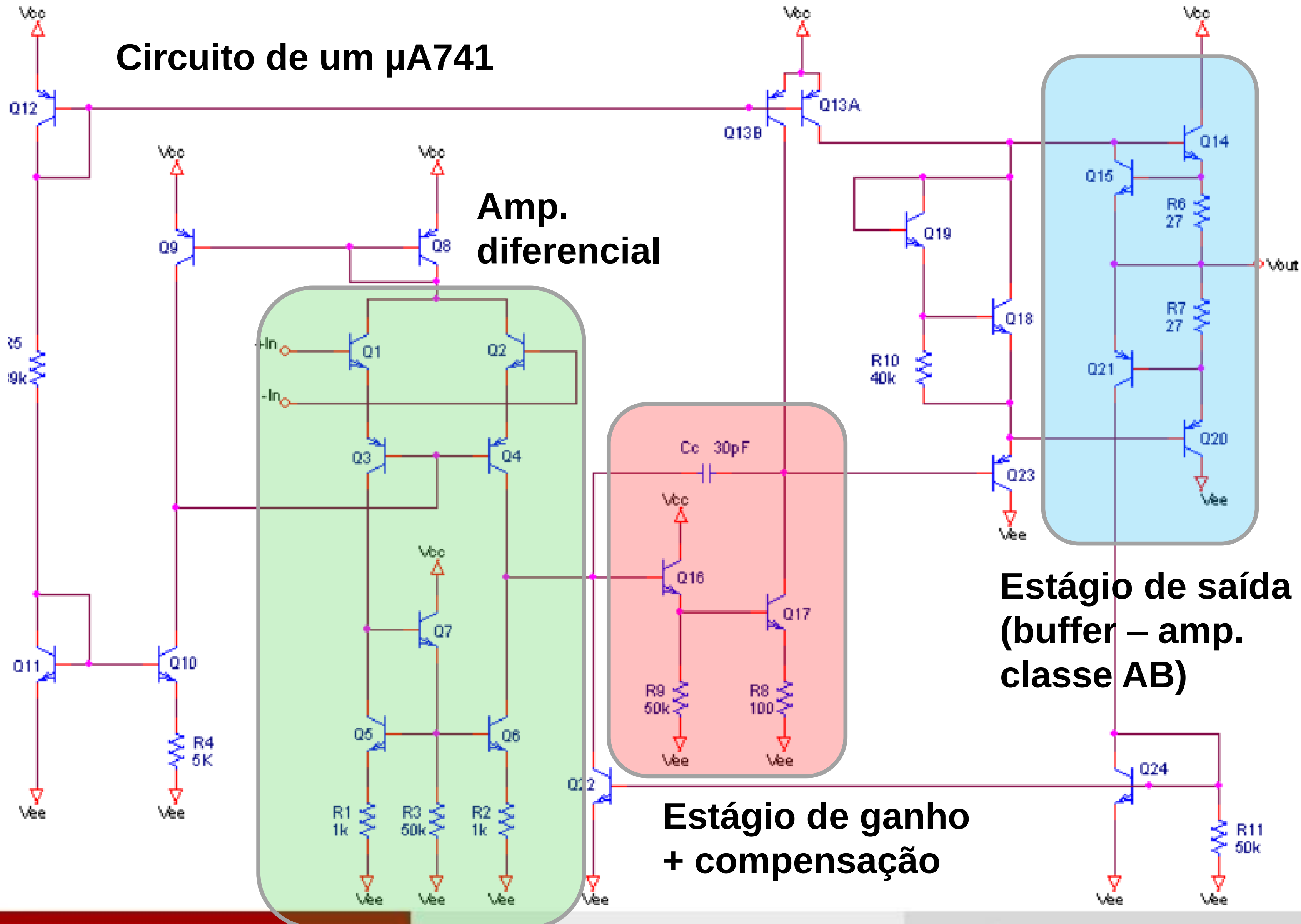


Resposta em frequência real:



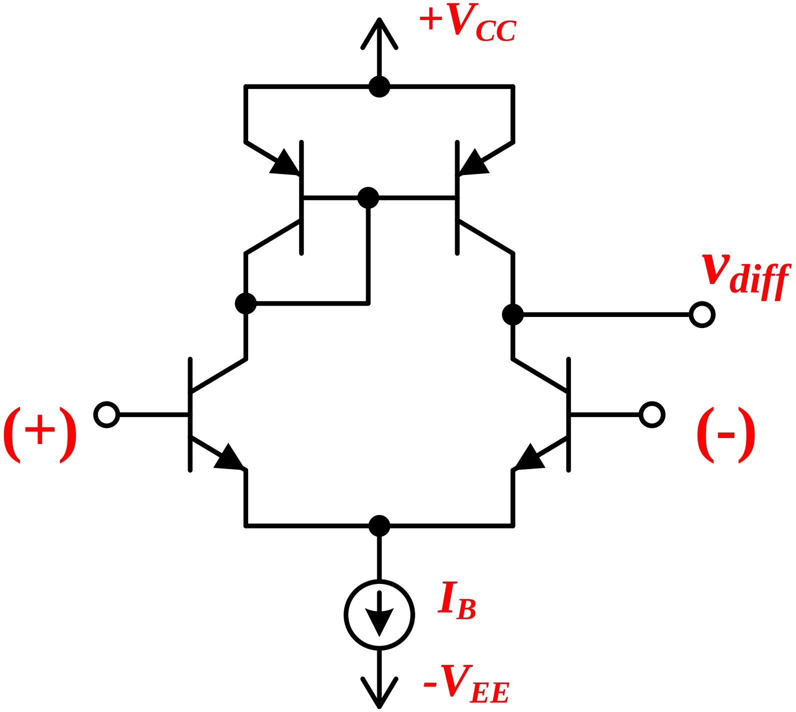
Compensação c/ polo se faz necessária também por questões de estabilidade →

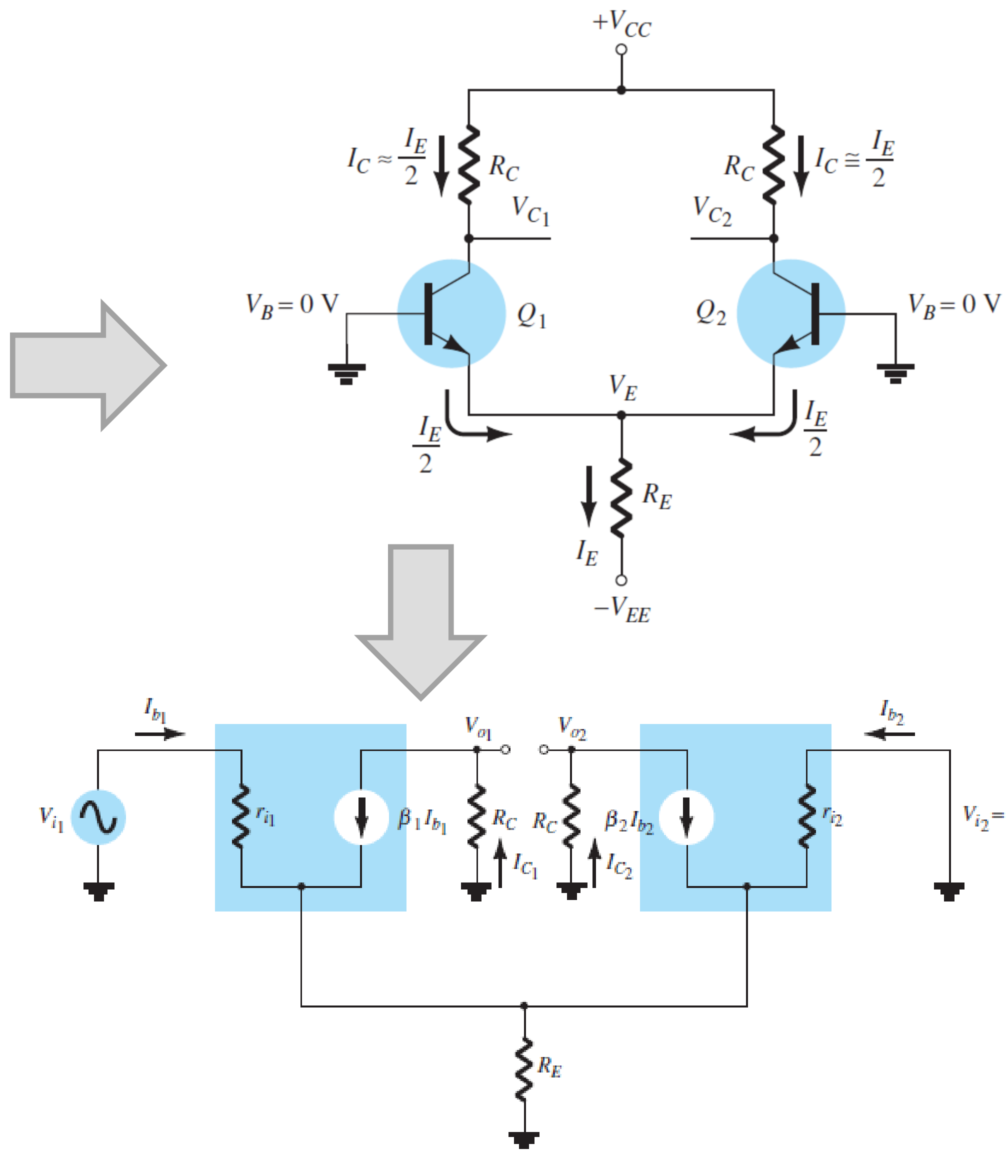
Circuito interno de um operacional



Circuito interno de um operacional

Amp. Diferencial – “long-tailed pair”

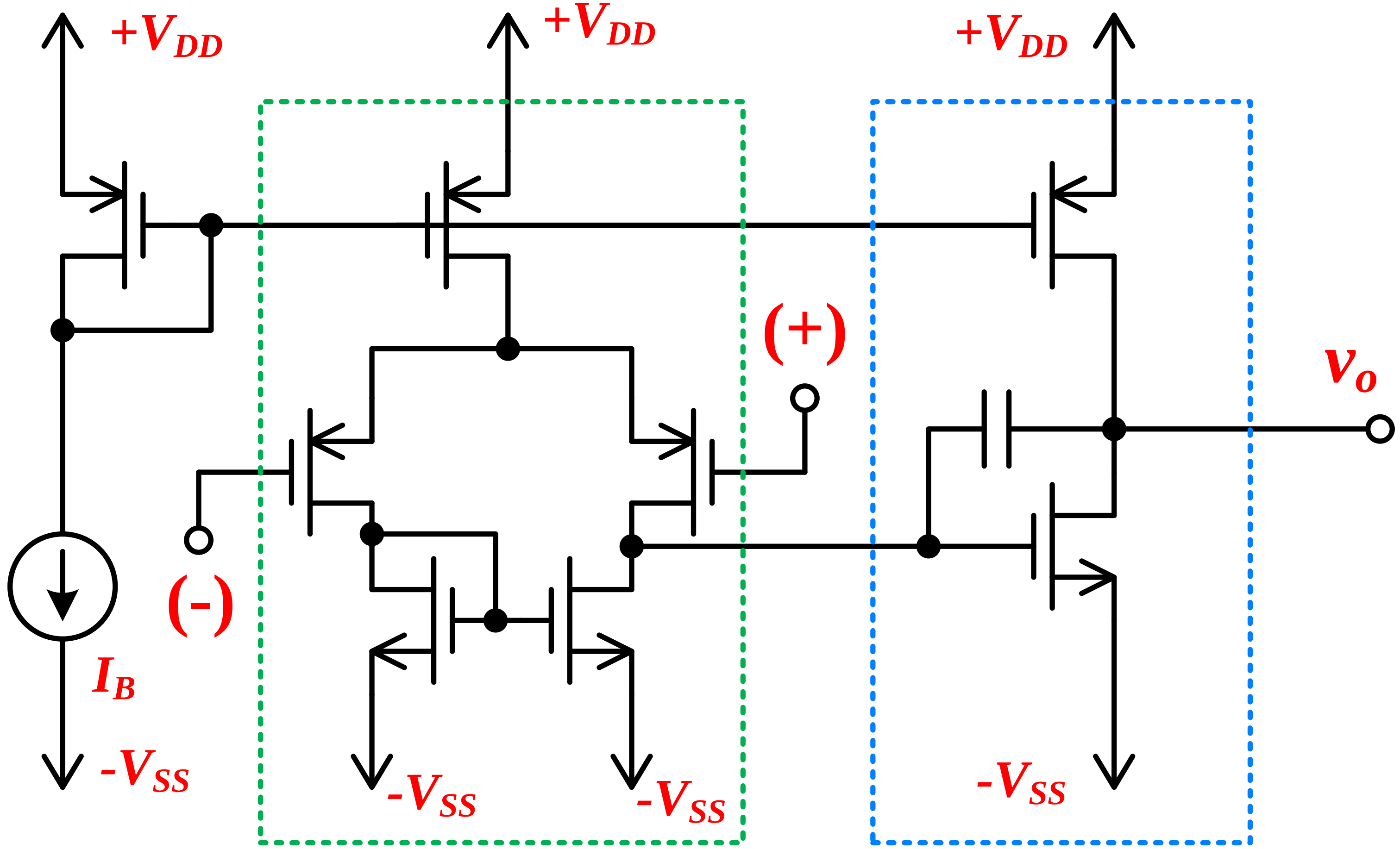




Coração do amplificador operacional moderno

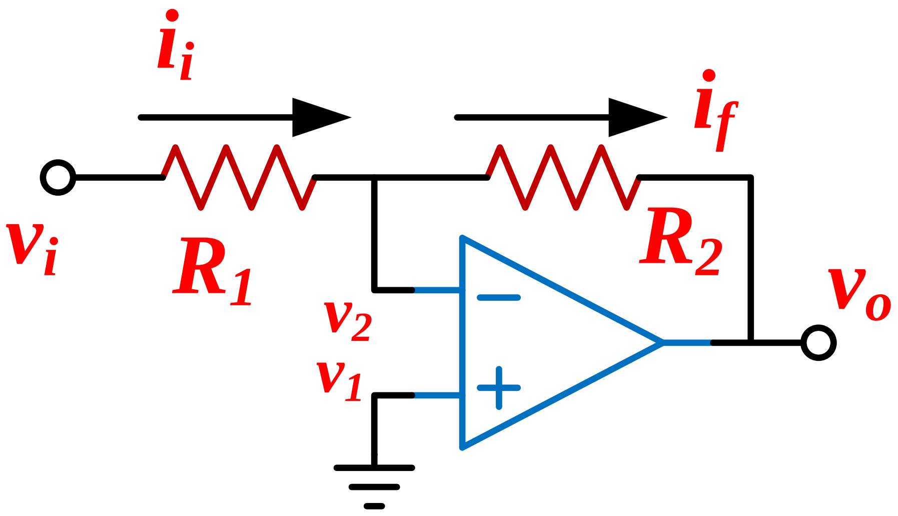
Circuito interno de um operacional

Implementação de um simples opamp CMOS:



Aplicações lineares

Amplificador inversor



Lembrando das 2 diretrizes básicas para análise:

$$v_1 = v_2$$
$$i_i = i_f$$

Portanto, neste circuito:

$$v_2 = v_1 = 0$$
$$v_i = R_1 i_i$$
$$R_2 i_f = v_2 - v_o = -v_o$$

O que resulta no ganho do amplificador inversor:

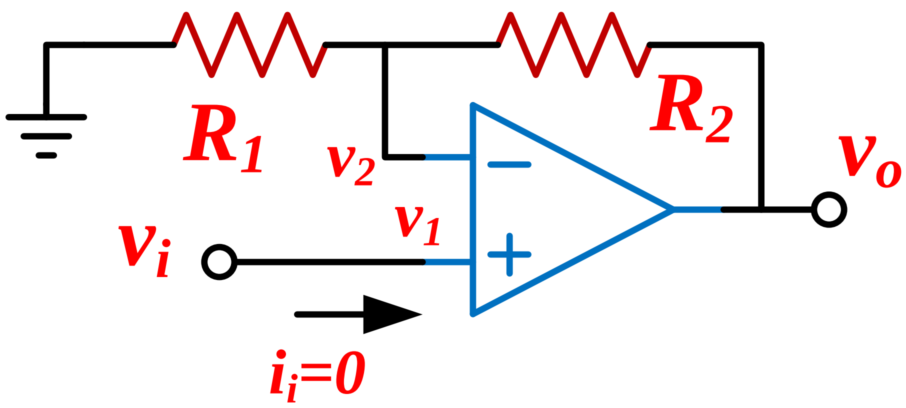
$$\therefore \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

A impedância de entrada será:

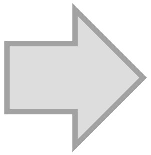
$$Z_i = \frac{v_i}{i_i} = R_1$$

Aplicações lineares

Amplificador não inversor



Novamente:



$$v_1 = v_2$$
$$i_i = 0$$

Neste circuito:

$$v_1 = v_i$$

$$v_2 = v_o \frac{R_1}{R_1 + R_2} = v_o \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1}}$$

Portanto o ganho do amplificador não inversor é:

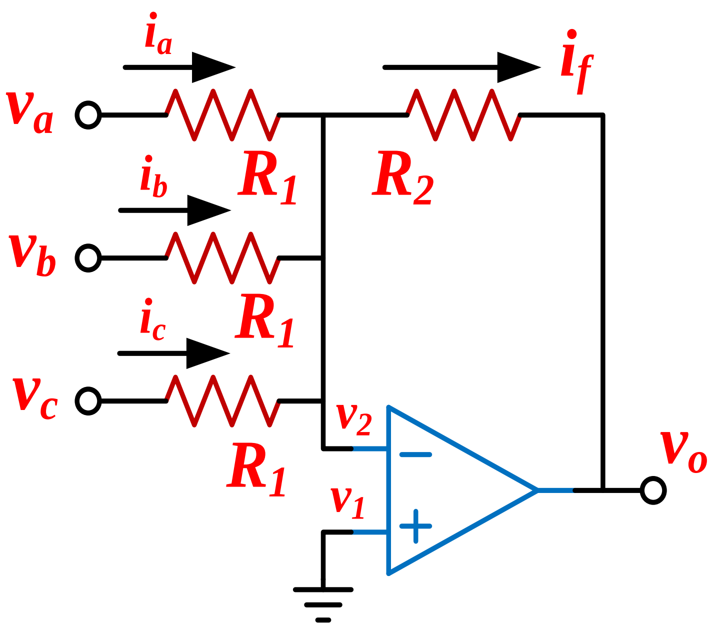
$$\therefore \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

A impedância de entrada será:

$$Z_i = \frac{v_i}{i_i} \rightarrow \infty$$

Aplicações lineares

Somador inversor



Neste circuito:

$$i_f = i_a + i_b + i_c$$

$$v_2 = v_1 = 0$$

As correntes são:

$$i_a = {}^{v_a}\!/_{R_1}$$

$$i_b = {}^{v_b}\!/_{R_1}$$

$$i_c = {}^{v_c}\!/_{R_1}$$

E a tensão de saída: $v_o = -R_2 i_f$

Portanto a saída será uma combinação linear das entradas:

$$\therefore v_o = -\frac{R_2}{R_1}\left(v_a + v_b + v_c\right) = -\frac{R_2}{R_1}\sum_k v_k$$

para k entradas

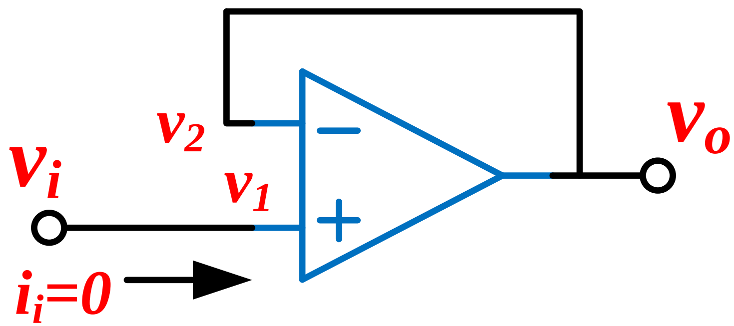
A impedância de entrada será:

$$Z_i = \frac{v_k}{i_k} = R_1$$

para cada entrada

Aplicações lineares

Buffer unitário
(ou seguidor de tensão)



Neste circuito:

$$v_2 = v_o$$

$$v_1 = v_i$$

Portanto a saída será igual à entrada:

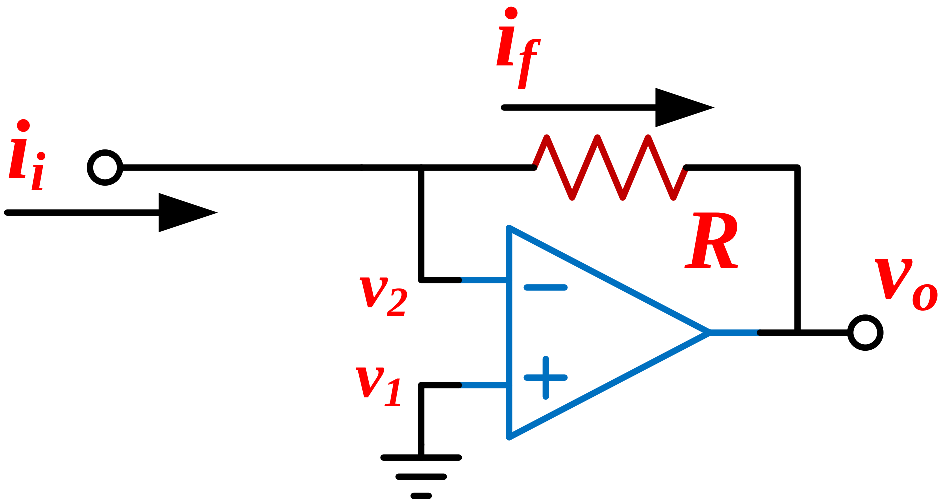
$$\therefore v_o = v_i$$

A impedância de entrada será infinita, pois $i_i = 0$

Circuito muito útil para o "isolamento" de sinais – um sinal com alta impedância pode alimentar uma carga de baixa impedância, por exemplo; ou um sinal de impedância Z_s pode ser conectado a uma carga de impedância Z_L diferente de Z_S sem que haja reflexão do sinal (casam-se as impedâncias, colocando Z_S = Z_L na saída do operacional)

Aplicações lineares

Amplificador de transresistência (ou conversor corrente-tensão)



Neste circuito:

$$i_i = i_f$$

$$v_2 = v_1 = 0$$

Portanto relacionam-se tensão de saída com a corrente de entrada:

$$\therefore v_o = -R i_i$$

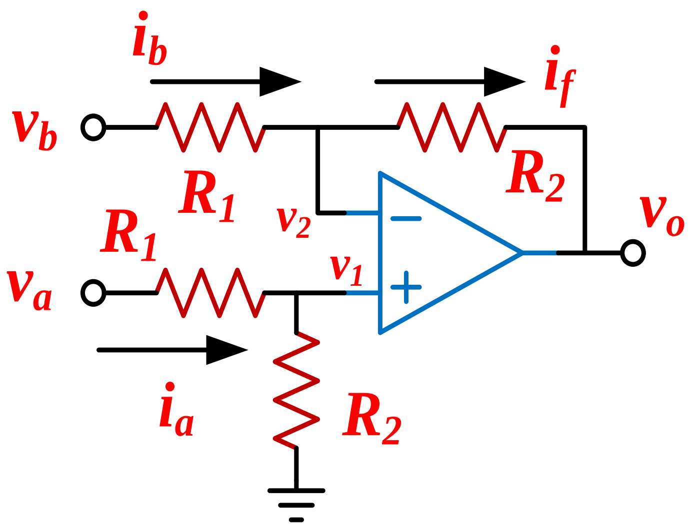
A impedância de entrada vista pela corrente injetada no circuito é:

$$Z_i = \frac{v_2}{i_i} = 0$$

→ caso ideal de um amplificador com entrada em corrente (como os de transresitência – V/I – e o amplificador de corrente – I/I)

Aplicações lineares

Amplificador diferencial



Neste circuito:

$$i_b = i_f = \frac{v_b - v_o}{R_1 + R_2}$$

$$i_a = \frac{v_a}{R_1 + R_2}$$

$$v_1 = v_a \frac{R_2}{R_2 + R_1} = v_2$$

E as malhas:

$$v_b - v_2 = R_1 i_b$$

$$v_2 - v_o = R_2 i_b$$

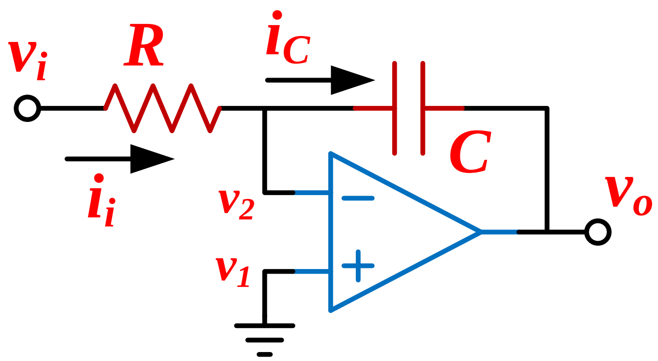
$$\begin{cases} v_b - v_a \dfrac{R_2}{R_2 + R_1} = R_1 \dfrac{v_b - v_o}{R_1 + R_2} \\ v_a \dfrac{R_2}{R_2 + R_1} - v_o = R_2 \dfrac{v_b - v_o}{R_1 + R_2} \end{cases}$$

Resolvendo para v_o:

$$\therefore v_o = \frac{R_2}{R_1}\left(v_a - v_b\right)$$

Aplicações lineares

Integrador (inversor)



Neste circuito: $v_2 = v_1 = 0$

$$i_C = i_i = \frac{v_i}{R}$$

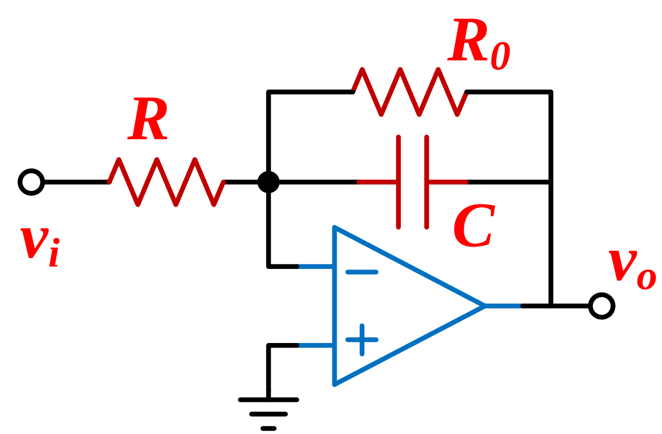
Utilizando a relação clássica de circuitos:

$$i_C = C\frac{d}{dt}[v_2 - v_o] = -C\frac{d}{dt}v_o$$

Substituindo i_C e resolvendo para v_o:

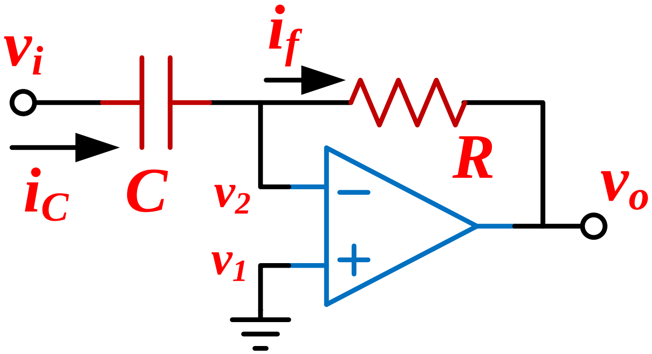
$$\therefore v_o = -\frac{1}{RC}\int v_i\, dt$$

Numa implementação prática, utiliza-se um resistor para limitar o ganho DC:



Aplicações lineares

Diferenciador (inversor)



Neste circuito: $v_2 = v_1 = 0$

$$i_f = i_C = C\frac{d}{dt}v_i$$

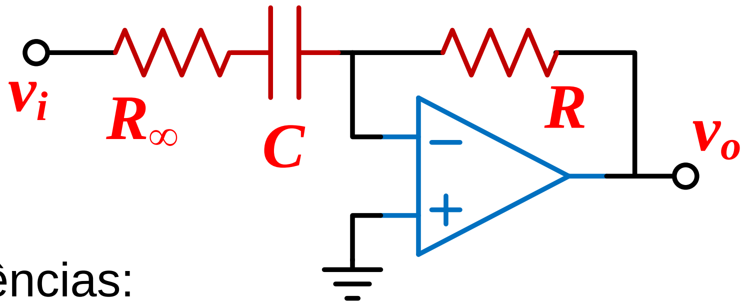
A saída será:

$$v_o = -Ri_f = -Ri_C$$

Resolvendo para v_o:

$$\therefore v_o = -RC\frac{d}{dt}v_i$$

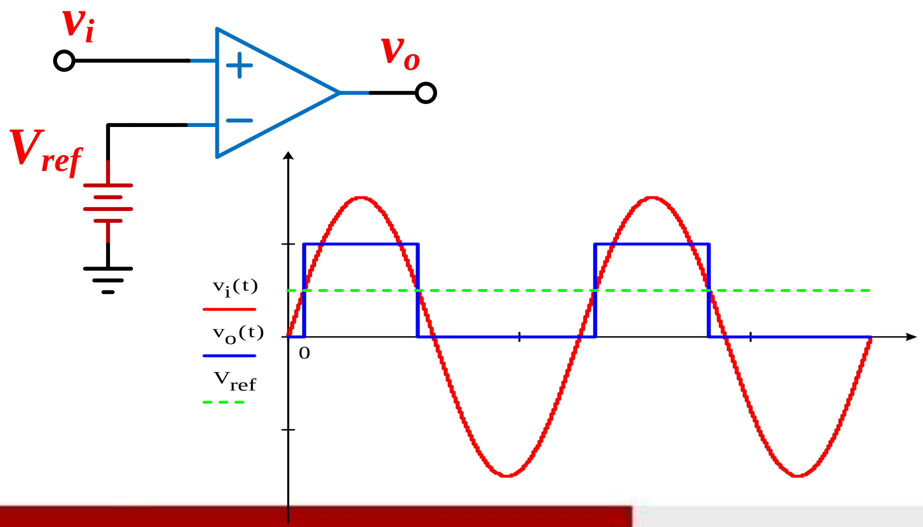
Numa implementação prática, utiliza-se um resistor para limitar o ganho em altas frequências:



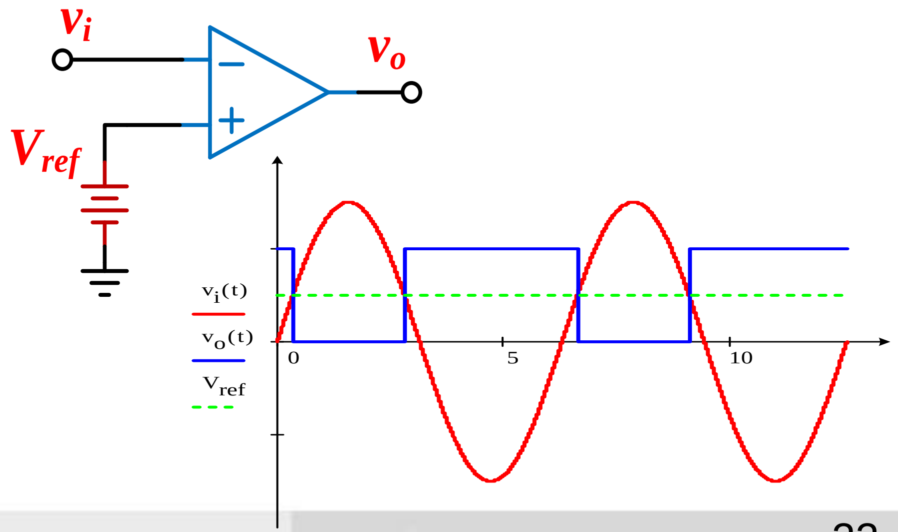
Aplicações não lineares

- As aplicações não lineares, em geral, envolvem **realimentação positiva** (para produzir oscilação ou biestabilidade) ou nenhuma realimentação (e.g., comparadores sem histerese).
- São utilizadas em geradores de forma de onda, osciladores e comparadores, entre outros.
- Existem também amplificadores não lineares (i.e., aqueles cuja saída é uma função não linear da entrada) – a exemplo, amplificadores **logarítmicos** e **exponenciais.**

Comparador não inversor:

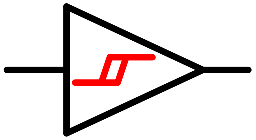


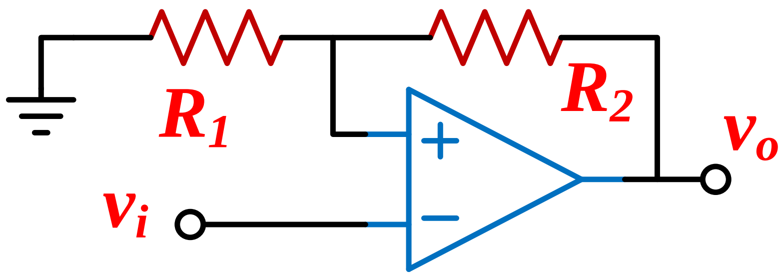
Comparador inversor:

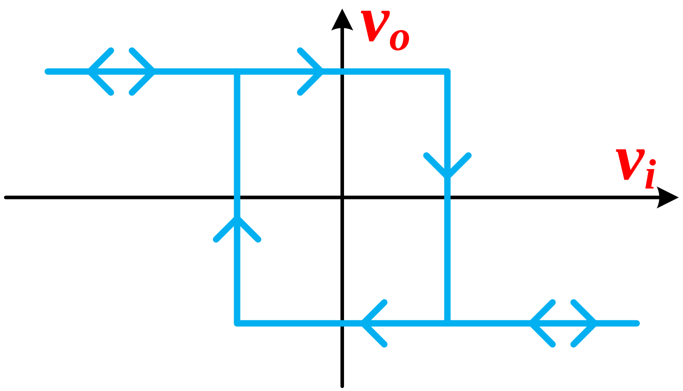


Aplicações não lineares

Comparadores com histerese – "Schmitt Trigger"

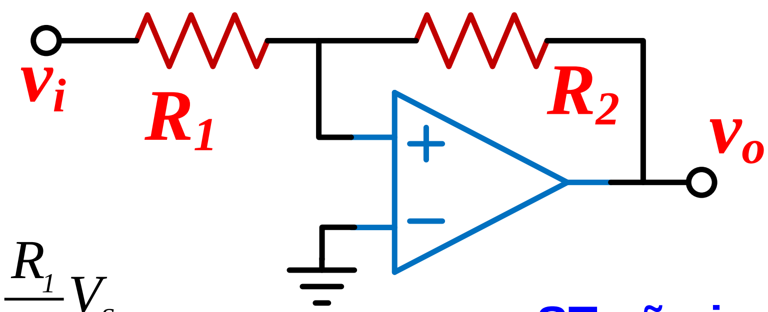


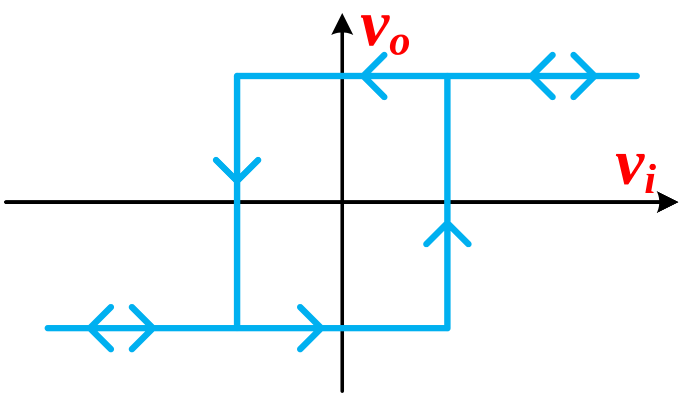




$$T = \pm \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_S$$

ST inversor



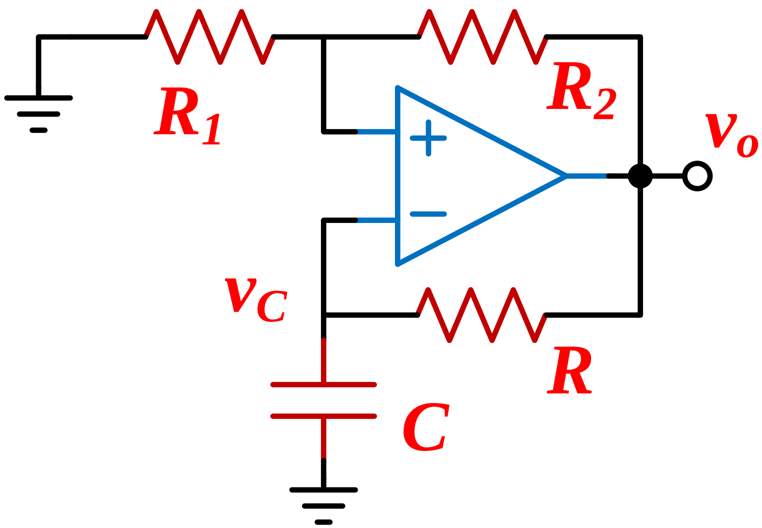


$$T = \pm \frac{R_1}{R_2} V_S$$

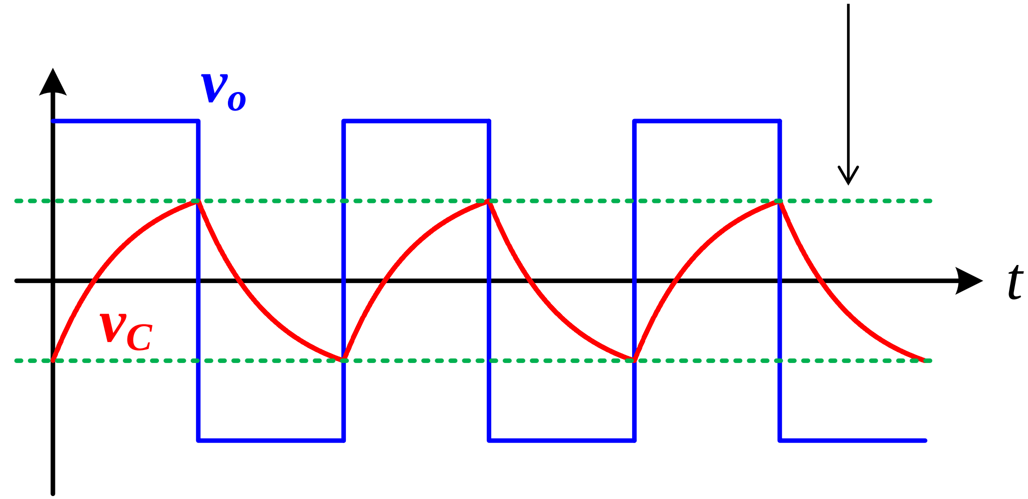
ST não inversor

Aplicações não lineares

Comparador com histerese como gerador de onda quadrada:
Oscilador de relaxamento com operacional



Se $R_1 = R_2$, o nível de comutação (trigger) do comparador é ±½ V_S



Com a carga e descarga exponencial do capacitor, é possível calcular o período:

$$\frac{V_S}{2} = V_S\left(1 - \frac{3}{2}e^{-\frac{T}{2RC}}\right)$$

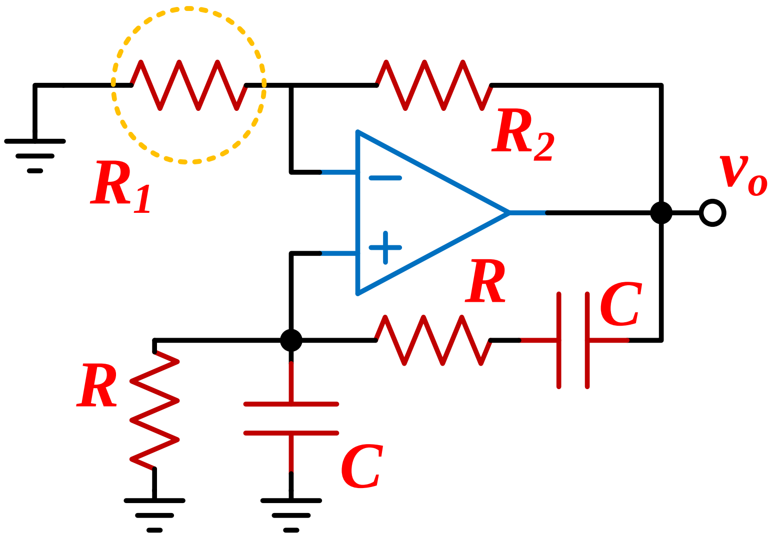
equação para
meio período (T/2)

$$T = 2RC.\ln(3)$$

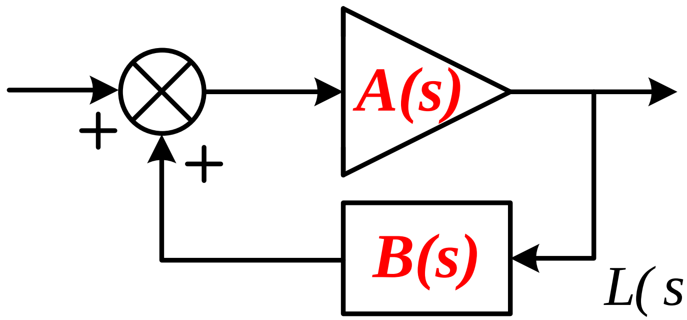
$$f = \frac{1}{2RC.\ln(3)}$$

Aplicações não lineares

Oscilador em ponte de Wien



Sistema c/ realimentação positiva



$$L(s) \triangleq A(s).B(s)$$

Eq. Característica: $1 - L(s) = 0$

Critério para oscilação (Barkhausen):

$$L(j\omega_o) = 1 \Rightarrow \begin{cases} \text{módulo}: & |L(j\omega_o)| = 1 \\ \text{fase}: & \measuredangle L(j\omega_o) = 0 \end{cases}$$

Para este circuito:

$$A(s) = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$ → Ganho do amplificador (não inversor)

$$B(s) = \frac{1}{3 + sRC + \frac{1}{sRC}}$$ → Ganho da malha de realimentação positiva

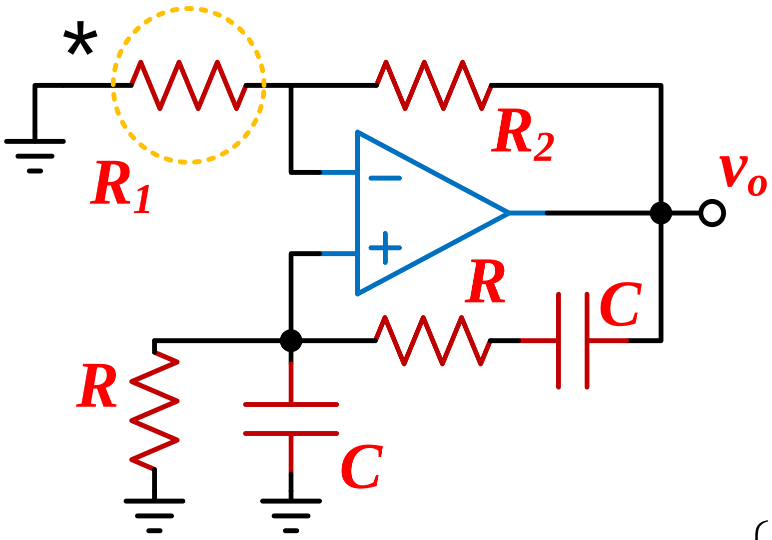
Critério ⇒

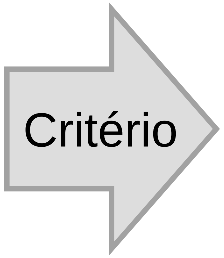
$$\left[1 + \frac{R_2}{R_1}\right]\frac{1}{3} = 1$$

$$\omega_o RC = \frac{1}{\omega_o RC}$$

Aplicações não lineares

Oscilador em ponte de Wien





$$\left[1+\frac{R_2}{R_1}\right]\frac{1}{3}=1$$

$$\omega_o RC=\frac{1}{\omega_o RC}$$

Oscilador senoidal na frequência angular ω_o

$$Resulta\ que: \begin{cases} \omega_o=\dfrac{1}{RC} \\ R_2=2R_1 \end{cases}$$

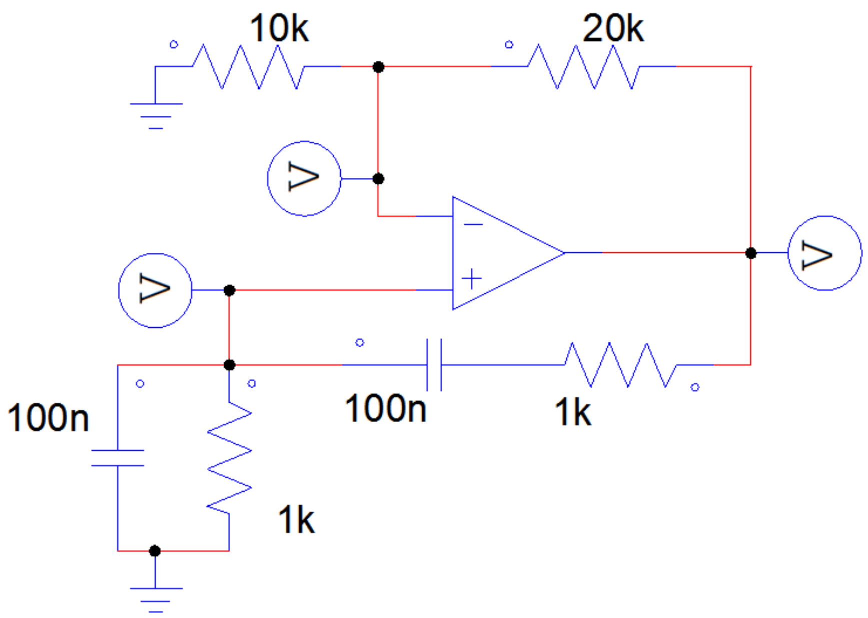
Frequência da oscilação

Condição para oscilação se manter

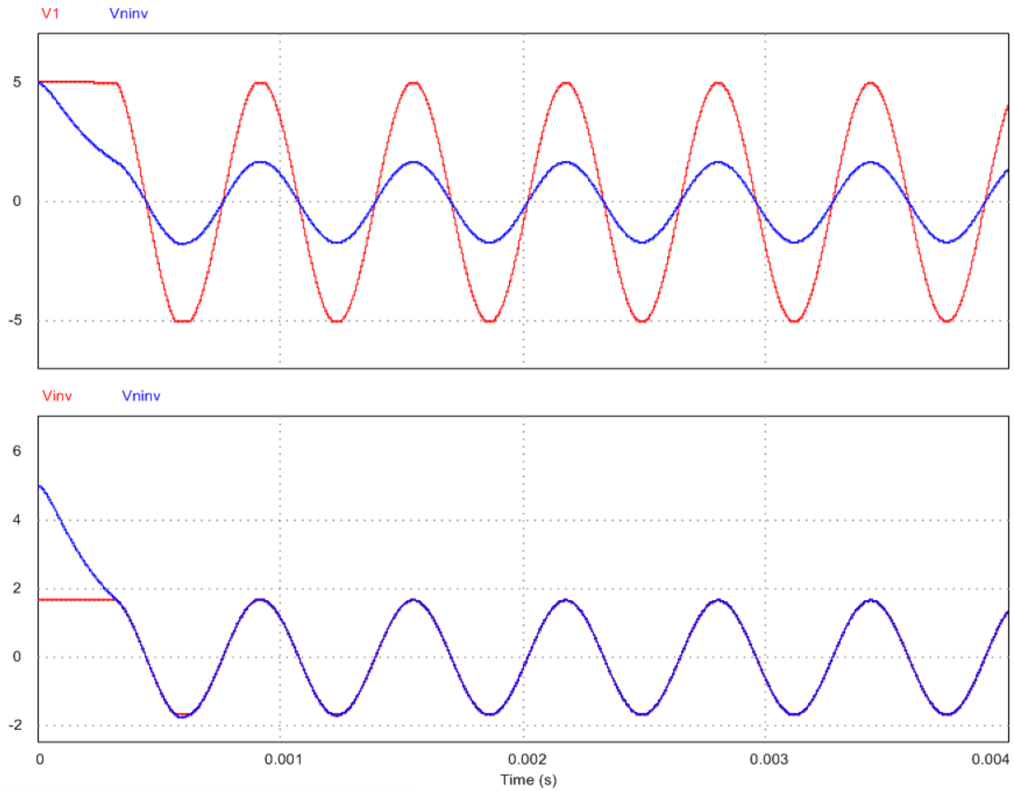
** Lâmpada como "gain control": solução elegante do mestrado de William Hewlett (fundador da HP); HP200A: oscilador de precisão em ponte de Wien.*

Aplicações não lineares

Oscilador em ponte de Wien - simulação



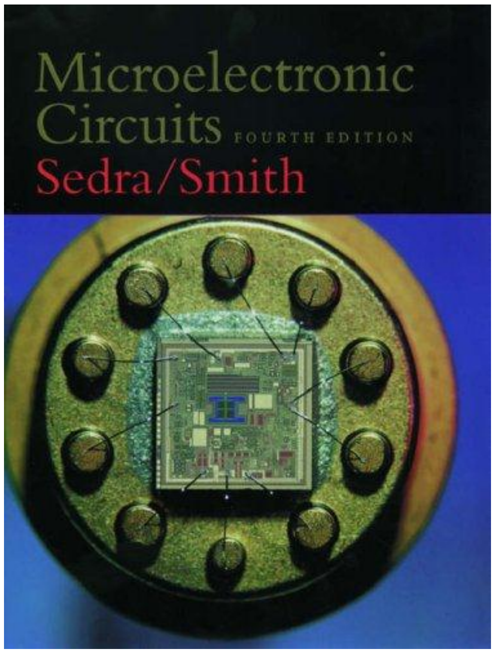
$$f \approx 1{,}6kHz$$

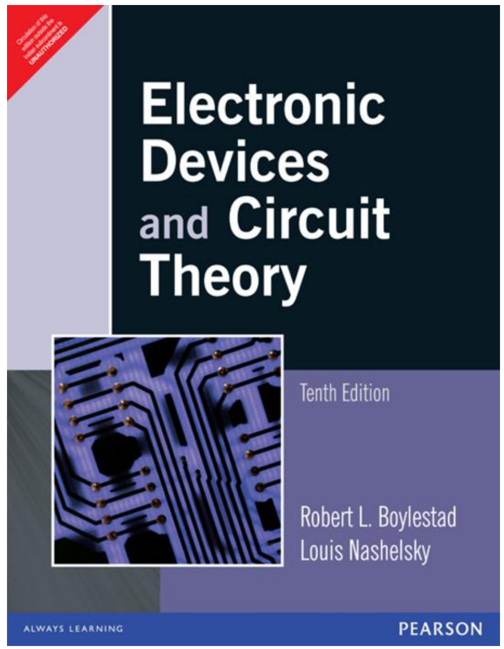


Resumo

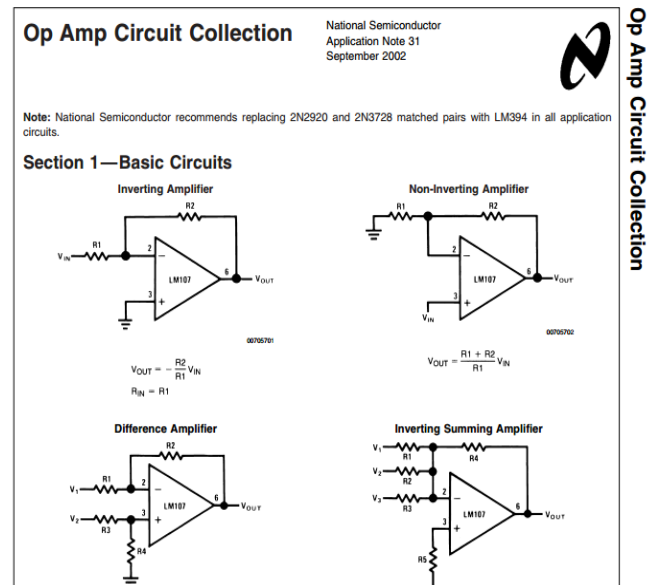
- Os amplificadores operacionais possuem amplas aplicações, tanto lineares quanto não lineares.
- Foi introduzido o conceito do amplificador operacional, seu funcionamento básico como elemento idealizado e as técnicas de análise que se destinam à sua operação como amplificador e/ou oscilador.
- Foi apresentada a construção básica dos operacionais modernos transistorizados, e seu funcionamento.
- Algumas características dos operacionais reais foram apresentadas, mostrando que o circuito real (integrado) se aproxima muito bem do circuito idealizado, o que permite que análises idealizadas sejam feitas para sintetizar circuitos analógicos com operacionais.
- Foram apresentados vários circuitos empregando operacionais, suas aplicações e características.

Bibliografia





AN-31 da National Semiconductor


Op Amp Circuit Collection

National Semiconductor
Application Note 31
September 2002

Note: National Semiconductor recommends replacing 2N2920 and 2N3728 matched pairs with LM394 in all application circuits.

Section 1—Basic Circuits

$V_{OUT} = -\frac{R2}{R1} V_{IN}$

$R_{IN} = R1$

$V_{OUT} = \frac{R1 + R2}{R1} V_{IN}$