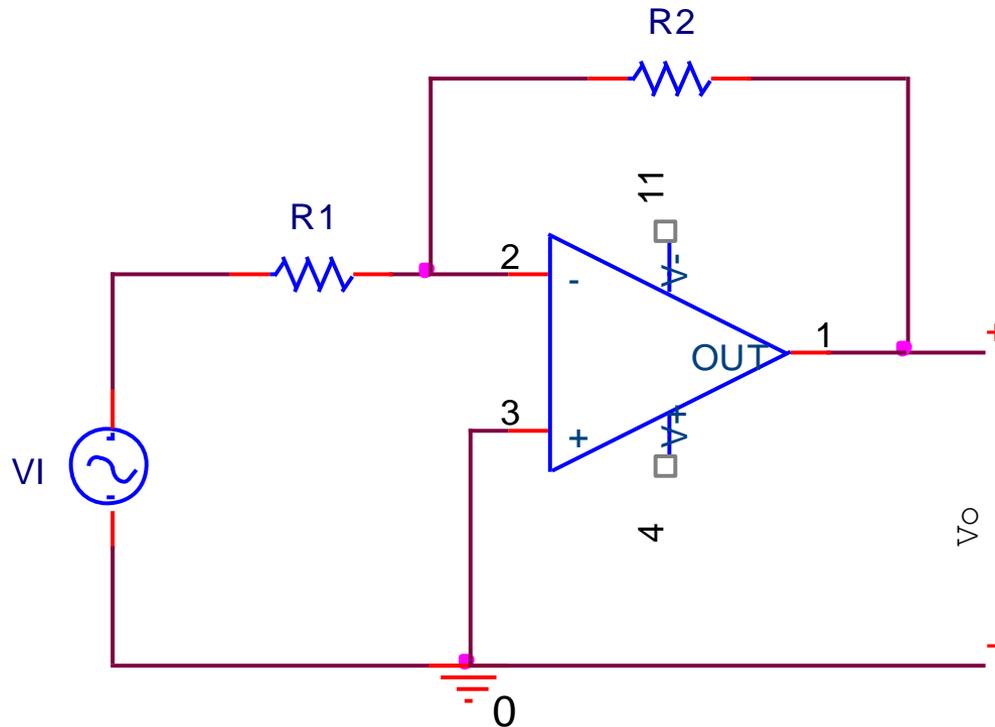


A decorative horizontal bar at the top of the slide, consisting of an orange square on the left and a blue rectangle extending to the right.

Aplicações com AMP-OP

Aplicações com Amp-Op

□ Amplificador Inversor



Aplicações com Amp-Op

- Amplificador Inversor
 - ▣ O resistor R_2 é um resistor que conecta a saída à entrada do circuito.
 - ▣ Caracteriza uma **realimentação**
 - Como conecta a saída a entrada negativa, é chamada de realimentação negativa.

Aplicações com Amp-Op

□ Amplificador Inversor

▣ Análise do circuito

- Considere que o ganho do amp-op (A) seja infinito.
- Sabemos que:

$$v_{\text{out}} = A (v_+ - v_-)$$

- Isso implica em:

Aplicações com Amp-Op

□ Amplificador Inversor

▣ Análise do circuito

- Considere que o ganho do amp-op (A) seja infinito.
- Sabemos que:

$$v_{\text{out}} = A (v_+ - v_-)$$

- Isso implica em:

$$v_+ - v_- = v_{\text{out}}/A = 0$$

$$v_- = v_+$$

▣ **Conceito de curto circuito virtual**

- Como v_- segue v_+ , aparece um curto-circuito virtual durante a operação do amp-op ideal.

Aplicações com Amp-Op

□ Amplificador Inversor

▣ Análise do circuito

- Considere que o ganho do amp-op (A) seja infinito.
- Sabemos que:

$$v_{\text{out}} = A (v_+ - v_-)$$

- Isso implica em:

$$v_+ - v_- = v_{\text{out}}/A = 0$$

$$v_- = v_+$$

- Curto circuito virtual

Aplicações com Amp-Op

- Amplificador Inversor
 - ▣ Conceito de **curto circuito virtual**
 - Como v_- segue v_+ , aparece um curto-circuito virtual durante a operação do amp-op ideal.
 - Não existe um fio ligando v_- e v_+ .
 - Isso ocorre devido a representação teórica do dispositivo e a suposição do ganho em circuito aberto infinito.

Aplicações com Amp-Op

□ Amplificador Inversor

▣ Análise do circuito

- A corrente de entrada é:

$$i_1 = (v_{in} - v_+) / R_1 = v_{in} / R_1$$

- E para onde vai esta corrente?

Aplicações com Amp-Op

□ Amplificador Inversor

▣ Análise do circuito

- A corrente de entrada é:

$$i_1 = (v_{in} - v_+) / R_1 = v_{in} / R_1$$

- E para onde vai esta corrente?

- Como a impedância de entrada do ampop ideal é infinita, não há corrente entrando no dispositivo.
- Logo essa corrente i_1 deve seguir para o resistor R_2 .

- No resistor R_2 temos:

$$v_{out} - v_+ = -i_1 R_2 \quad \Rightarrow \quad v_{out} - 0 = -(v_{in} / R_1) R_2$$

Aplicações com Amp-Op

□ Amplificador Inversor

▣ Análise do circuito

■ Logo:

- $v_{\text{out}} / v_{\text{in}} = - R_2 / R_1 = G$

■ G é o ganho em circuito fechado (com realimentação)

- É diferente do ganho A (em circuito aberto)

■ A amplificação **depende** apenas da relação entre os resistores R_1 e R_2 .

■ O sinal negativo significa que esta configuração de amplificador inverte o sinal de entrada na saída.

- Daí o termo amplificador **inversor**.

Aplicações com Amp-Op

- Amplificador Inversor
 - ▣ Análise do circuito
 - E se o ganho A fosse finito? Calculem...

Aplicações com Amp-Op

□ Amplificador Inversor

▣ Análise do circuito

- E se o ganho A fosse finito?

$$v_{\text{out}} = A (v_+ - v_-) \Rightarrow (v_+ - v_-) = v_{\text{out}} / A$$

- Mas como v_+ (entrada positiva do amp-op) está aterrado

$$v_- = -v_{\text{out}}/A$$

- A corrente de entrada é:

$$i_1 = (v_{\text{in}} - v_-) / R_1 = (v_{\text{in}} + v_{\text{out}}/A) / R_1$$

Aplicações com Amp-Op

□ Amplificador Inversor

▣ Análise do circuito

- A corrente de entrada é:

$$i_1 = (v_i - v_-) / R_1 = (v_i + v_o/A) / R_1$$

- Com a impedância infinita, a corrente flui para o resistor R_2 (como antes), onde temos:

$$v_{out} - v_- = -i_1 R_2 \Rightarrow v_{out} + v_{out}/A = - (v_{in} + v_{out}/A) R_2 / R_1$$

- Reorganizando, temos:

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{-R_2/R_1}{1 + \left(1 + R_2/R_1\right)/A}$$

Aplicações com Amp-Op

□ Amplificador Inversor

▣ Análise do circuito

$$\frac{v_{\text{out}}}{v_{\text{in}}} = \frac{-R_2/R_1}{1 + \left(1 + R_2/R_1\right) / A}$$

- Se $A \gg (1 + R_2/R_1)$, retornamos a $v_{\text{out}}/v_{\text{in}} = -R_2/R_1$.

Aplicações com Amp-Op

- Amplificador Inversor
 - ▣ A impedância de entrada (R_i) no amp-op ideal, na configuração amplificador inversor, é R_1 .
 - ▣ Para evitar que o amp-op perda de tensão na entrada, $R_i \rightarrow \infty \Rightarrow R_1 \rightarrow \infty$.
 - ▣ Assim, ganhos elevados (G) do amplificador inversor significam...

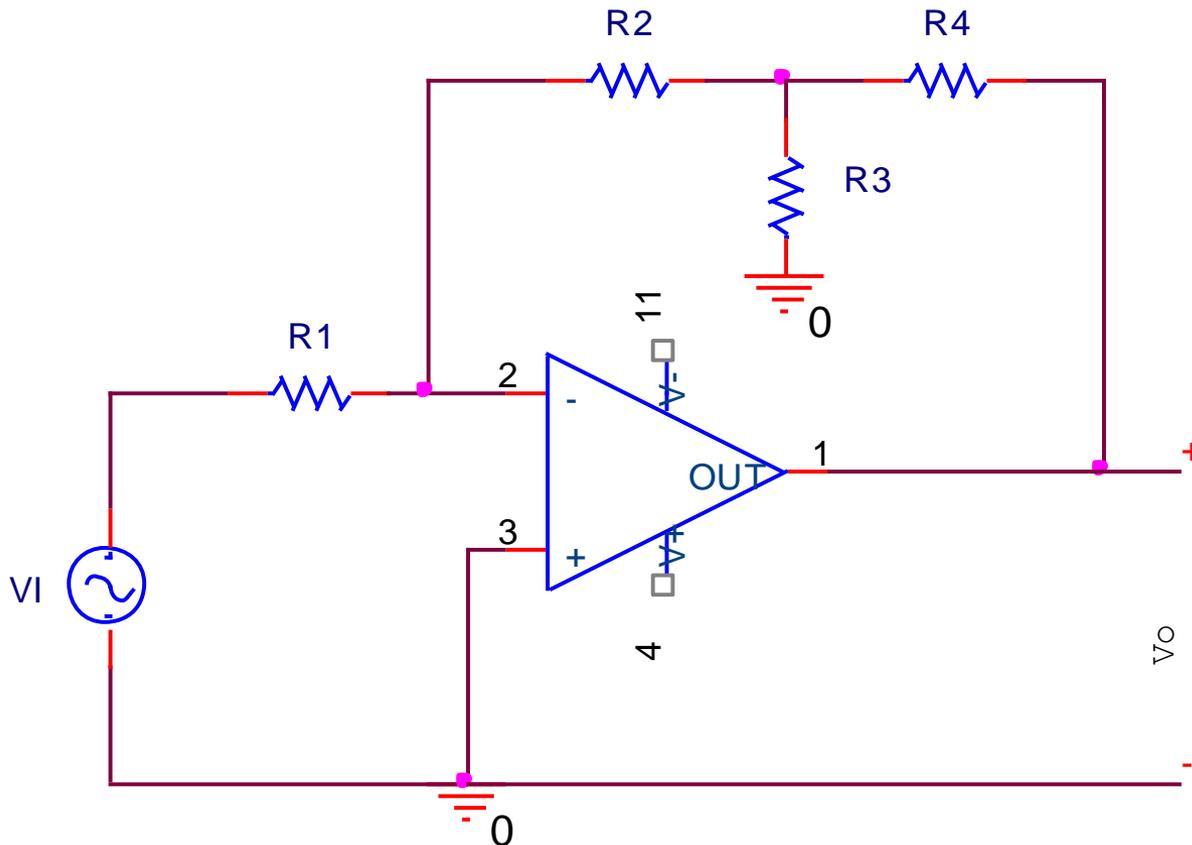
Aplicações com Amp-Op

- Amplificador Inversor
 - ▣ A impedância de entrada (R_i) no amp-op ideal, na configuração amplificador inversor, é R_1 .
 - ▣ Para evitar que o amp-op perca de tensão na entrada, $R_i \rightarrow \infty \Rightarrow R_1 \rightarrow \infty$.
 - ▣ Assim, ganhos elevados (G) do amplificador inversor significam **valores proibitivos de R_2** .

Aplicações com Amp-Op

□ Amplificador Inversor

▣ Solução:



Aplicações com Amp-Op

□ Amplificador Inversor

▣ Solução:

- A corrente nos resistores R_1 e R_2 é a mesma:

$$i_1 = i_2 = v_{in} / R_1$$

- No ponto de encontros dos resistores temos:

- Chamá-lo-emos de ponto x.

$$v_- - v_x = i_1 R_2 \Rightarrow v_x = -v_{in} R_2 / R_1$$

- A corrente no resistor R_3 é

$$0 - v_x = i_3 R_3 \Rightarrow i_3 = v_{in} R_2 / (R_1 R_3)$$

Aplicações com Amp-Op

□ Amplificador Inversor

▣ Solução:

- No resistor R_4 temos a seguinte ddp:

$$v_x - v_o = i_4 R_4 \quad \leftarrow$$

$$v_{\text{out}} = v_x - (i_2 + i_3) R_4 \quad \leftarrow$$

$$v_{\text{out}} = - (R_2/R_1) v_i - [v_{\text{in}}/R_1 + (v_{\text{in}} R_2)/(R_1 R_3)] R_4$$

- Manipulando, temos:

$$G = v_{\text{out}}/v_{\text{in}} = - (R_2/R_1) [1 + (R_4/R_2) + (R_4/R_3)]$$

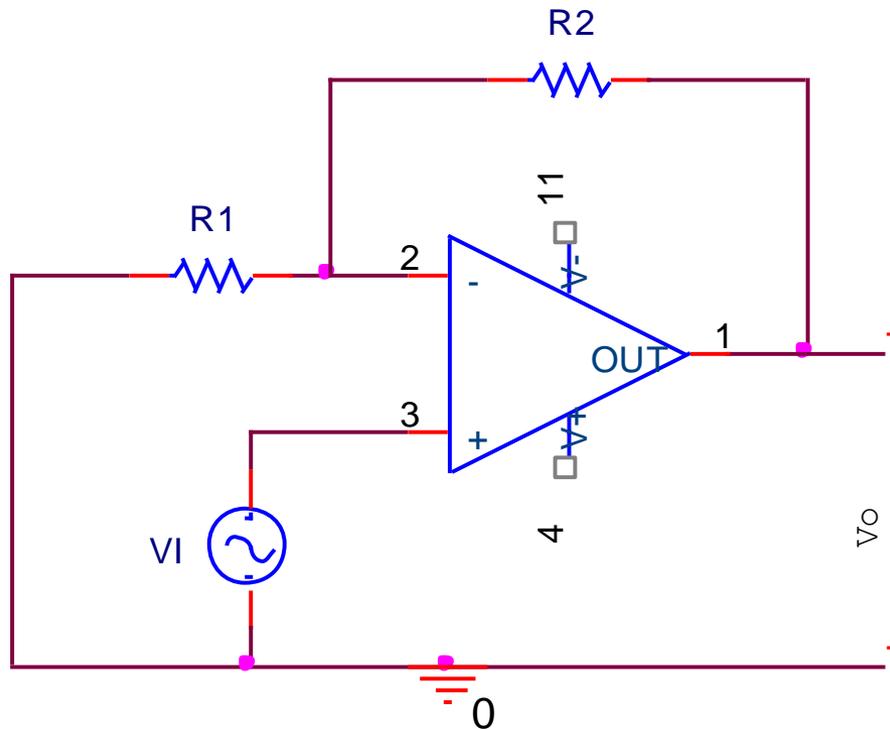
- Agora temos 3 resistores para manipular (graus de liberdade) para atender uma especificação de G .

Aplicações com Amp-Op

- Amplificador Inversor
 - ▣ Note que R_2 e R_3 estão em paralelo
 - Por quê?
 - ▣ Com isso, um desbalanço desses valores produz diretamente um desbalanço de corrente.
 - ▣ Essa corrente adicional “puxada” em R_3 permite uma tensão elevada em v_o com resistores não tão elevados.

Aplicações com Amp-Op

□ Amplificador Não-Inversor



Aplicações com Amp-Op

□ Amplificador Não-Inversor

▣ Análise do circuito

- Fazendo as mesmas considerações do amp-op ideal:

$$v_- = v_+$$

- Calculando a corrente no resistor R_1

$$v_{in} - 0 = i_1 R_1 \Rightarrow i_1 = v_{in} / R_1$$

- Pela impedância interna do amp-op ser infinita

$$v_{out} - v_{in} = i_2 R_2 = v_{in} (R_2 / R_1)$$

- Ou seja

- $G = v_{out} / v_{in} = (1 + R_2/R_1)$

Aplicações com Amp-Op

□ Amplificador Não-Inversor

▣ Análise do circuito

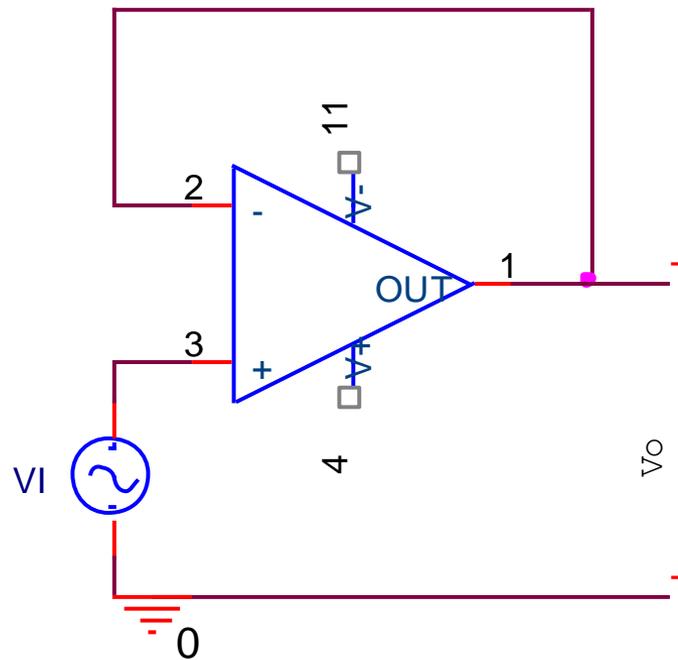
- Note que uma fração da tensão de saída retorna para a porta inversora do amp-op

$$v_- = v_{in} = v_{out} [R_1 / (R_1 + R_2)]$$

- Então, o ganho infinito – e curto circuito virtual – **forçam** a entrada a saída a produzir tensão proporcional a $v_{out} = (1 + R_2/R_1) v_{in}$.
 - Tudo para garantir que $v_+ - v_- = 0$.
 - Conceito de **realimentação degenerativa**.

Aplicações com Amp-Op

□ Seguidor de fonte



Aplicações com Amp-Op

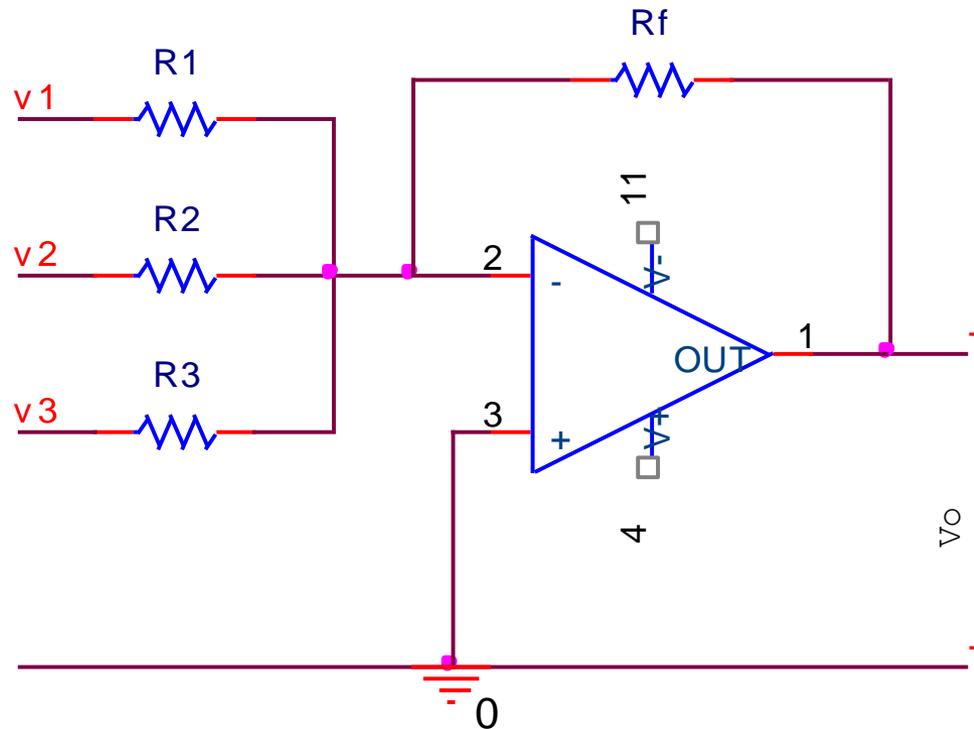
- Seguidor de fonte
 - Do amplificador não-inversor temos:
 - $v_{\text{out}} = (1 + R_2/R_1) v_{\text{in}}$
 - usamos o amplificador não-inversor como referência pois o circuito é estruturalmente o mesmo.
 - Por comparação, temos:
 - $R_2 = \text{zero}$
 - $R_1 = \infty$
 - Logo, $v_{\text{out}} = v_{\text{in}}$.

Aplicações com Amp-Op

- Seguidor de fonte
 - ▣ Qual o uso:
 - Casamento de impedância
 - Conecta circuitos de alta impedância (resistência) com circuitos de baixa impedância.
 - Evita perdas de tensão e corrente nessa conexão.
 - Amp-op tem:
 - alta impedância de entrada.
 - baixa impedância de saída.

Aplicações com Amp-Op

□ Somador



Aplicações com Amp-Op

□ Somador

□ Configuração estruturalmente similar ao amplificador **inversor**.

□ Por causa do terra virtual, temos:

■ $i_1 = v_1/R_1$

■ $i_2 = v_2/R_2$

■ $i_3 = v_3/R_3$

□ A soma das correntes ($I = i_1 + i_2 + i_3$) segue por R_f .

□ Logo

■ $v_{\text{out}} = - i R_f = - [(R_f/R_1) v_1 + (R_f/R_2) v_2 + (R_f/R_3) v_3]$

Aplicações com Amp-Op

□ Somador

□ $v_{\text{out}} = - i R_f = - [(R_f/R_1) v_1 + (R_f/R_2) v_2 + (R_f/R_3) v_3]$

- Soma ponderada de v_1 , v_2 e v_3 .

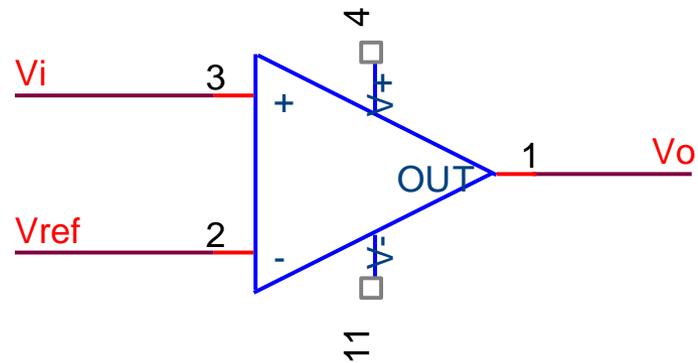
□ Note que não conseguimos subtrair.

- Para fazer isto, basta **cascatear** dois somadores:

- Os coeficientes do 1º somador produzirão termos +coef.
- Os coeficientes do 2º somador produzirão termos -coef.
 - $\text{coef} = R_{\text{realimentação}}/R_x$.

Aplicações com Amp-Op

□ Comparador



Aplicações com Amp-Op

- Comparador
 - ▣ Lembre que o Amp-Op possui um **ganho** em malha aberta **muito alto** (ideal = ∞)
 - ▣ Assim, qualquer diferença ($V_{in} - V_{ref}$) é amplificada significativamente.
 - ▣ Podemos ter $V_{out} = \infty$?

Aplicações com Amp-Op

□ Comparador

■ Quando a saída é muito alta, o amp-op **satura**.

- É um ceifamento a partir de tensões limites
 - Tensão de saturação.

□ Logo

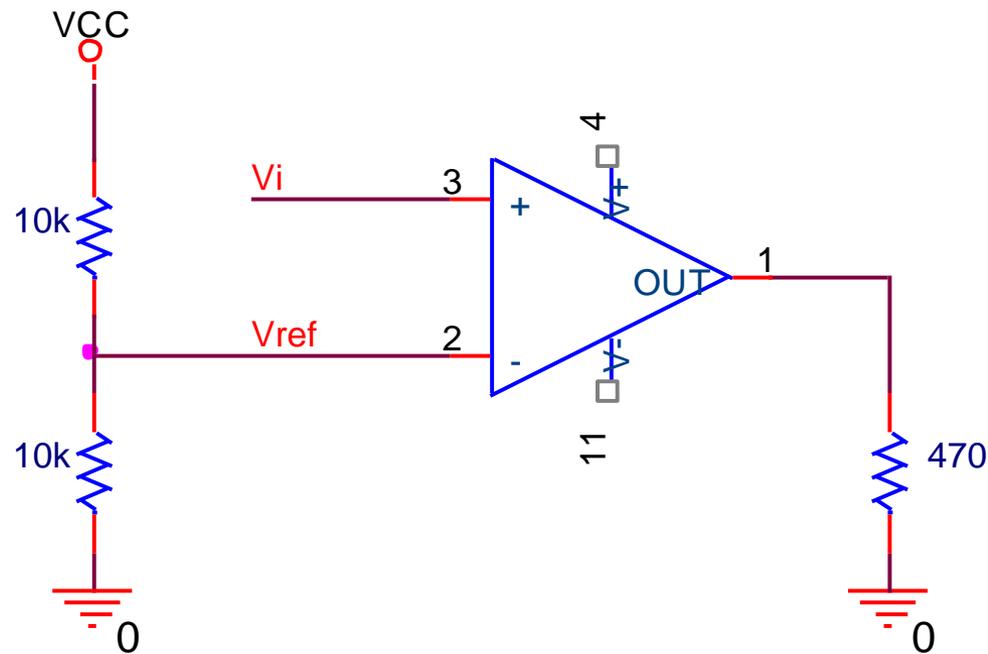
- $V_{in} > V_{ref} \Rightarrow V_{out} = V_{sat+}$
- $V_{in} < V_{ref} \Rightarrow V_{out} = V_{sat-}$
- $V_{in} = V_{ref} \Rightarrow V_{out} = \text{zero}$
 - Esta última opção ocorre raramente.

Aplicações com Amp-Op

Comparador

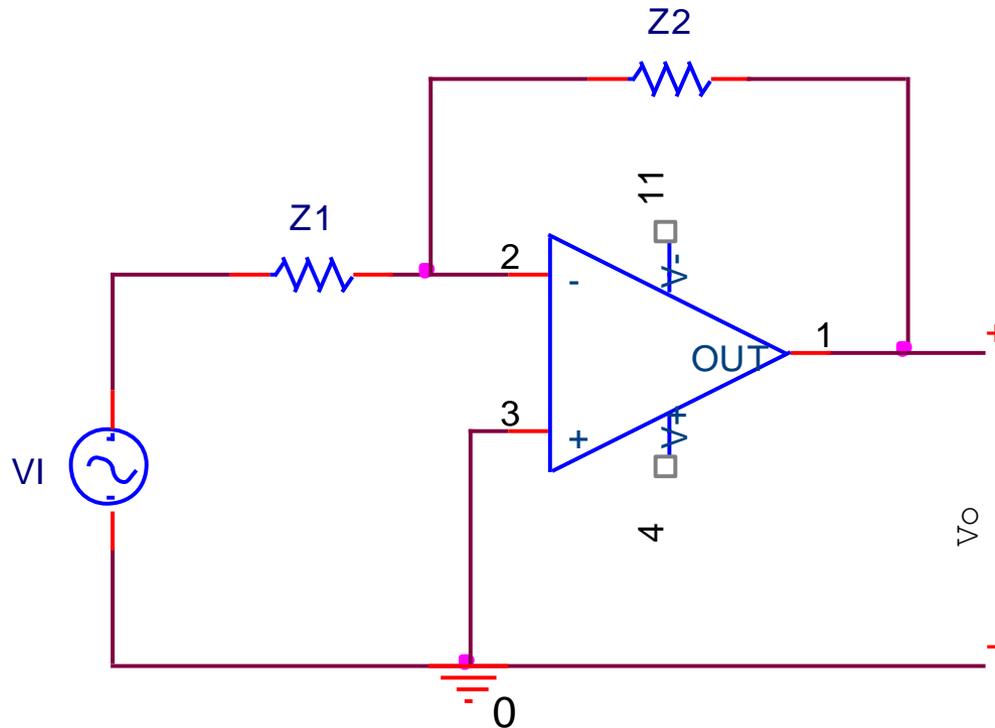
Analise (V_o x V_i) o circuito abaixo para

$V_{cc} = 12V$, $V_{in} = 10 \text{ sen}(\omega t)$, $V_{sat} = 12V$



Aplicações com Amp-Op

□ Integrador e Diferenciador

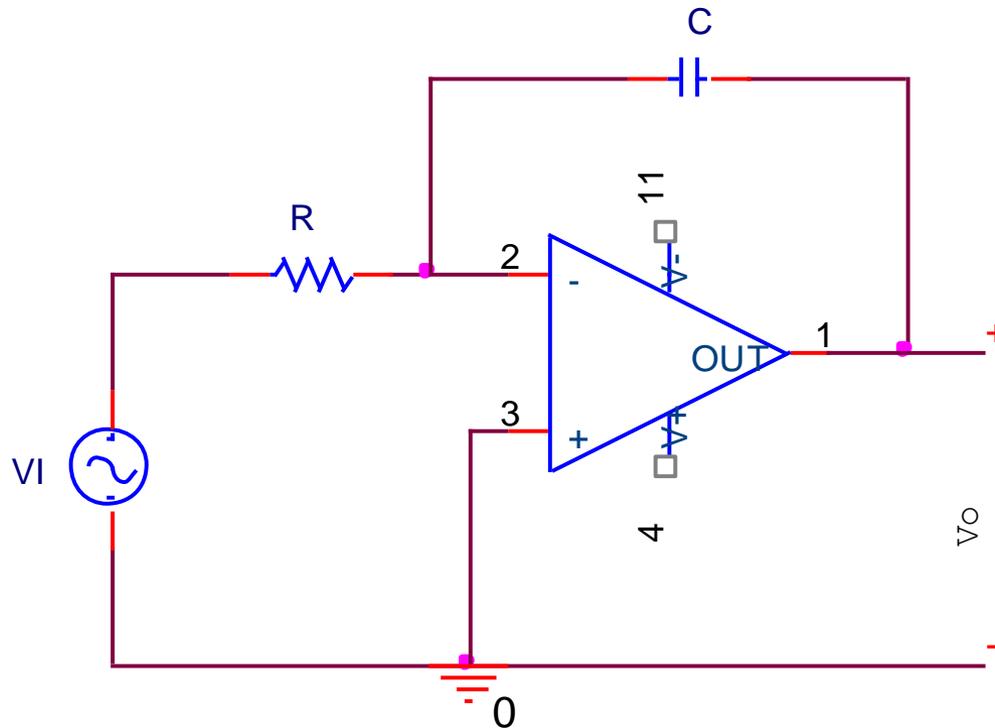


Aplicações com Amp-Op

- Integrador e Diferenciador
 - ▣ Generalizando o amplificador inversor:
 - $V_{\text{out}}/V_{\text{in}} = -z_2/z_1$.
 - ▣ z_1 e z_2 podem ser circuitos passivos com:
 - Indutor
 - Capacitor
 - Resistor

Aplicações com Amp-Op

- Integrador
 - ▣ *Ou integrador de Miller.*



Aplicações com Amp-Op

- Integrador
 - Suavização de sinais (passa-baixa)
 - Neste caso:
 - $z_1 = R$
 - $z_2 = 1/(sC) = 1 / (j\omega C)$
 - Da transformada de Laplace (ou de Fourier).
 - Ou seja:
 - $V_{\text{out}} / V_{\text{in}} = - 1 / (sRC) = - 1 / (j\omega RC)$
 - Que é a expressão de uma integral e permite análises no domínio da frequência.

Aplicações com Amp-Op

□ Integrador

□ No tempo:

- $i_r(t) = v_{in}(t)/R$

- Devido ao terra virtual

□ Esta corrente passa totalmente pelo capacitor.

- $v_c(t) = V_c + (1/C) \int_0^t i_r(\tau) d\tau$

- V_c é carga inicial no capacitor.

□ Naturalmente $v_o(t) = -v_c(t)$

□ Então:

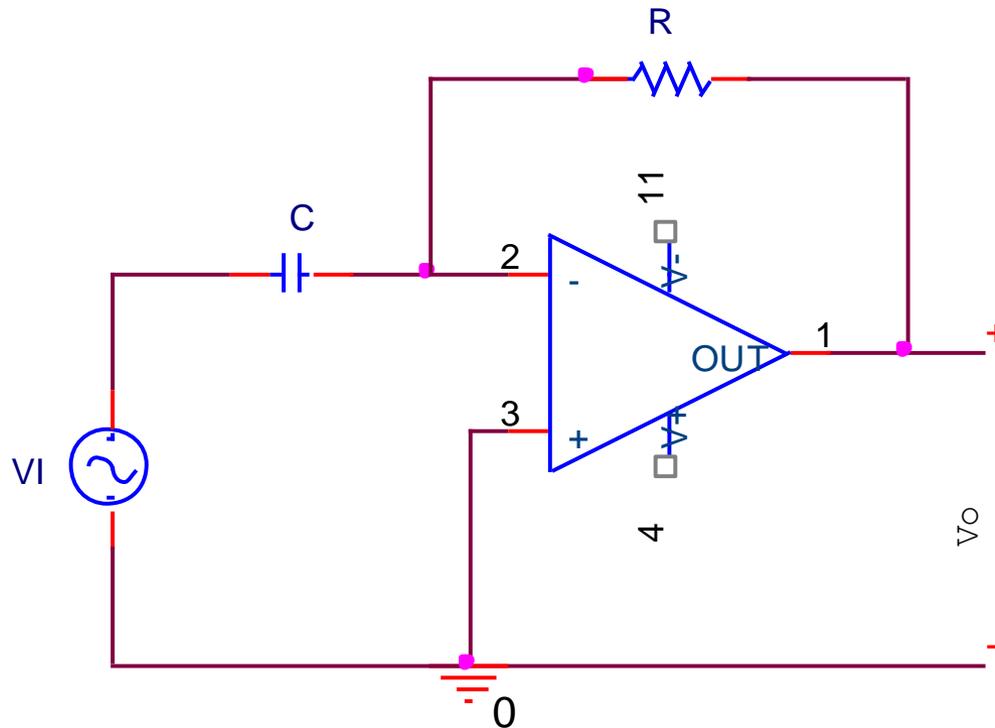
- $v_{out}(t) = - (1/RC) \int_0^t v_{in}(t) dt + V_c \Rightarrow v_{out} = - v_{in} / (sRC)$

Aplicações com Amp-Op

- Integrador
 - ▣ O que acontece se um sinal contínuo é aplicado na entrada?

Aplicações com Amp-Op

□ Diferenciador



Aplicações com Amp-Op

□ Diferenciador

□ Detector de variações (passa-alta)

□ Neste caso:

- $z_1 = 1/(sC) = 1/(j\omega C)$

- Da transformada de Laplace (ou de Fourier).

- $z_2 = R$

□ Ou seja:

- $v_{\text{out}} / v_{\text{in}} = -sRC = -j\omega RC.$

- Que é a expressão de uma derivada e permite análises no domínio da frequência.

Aplicações com Amp-Op

□ Diferenciador

□ No tempo:

- $i_c(t) = C dv_{in}(t)/dt$

- Devido ao terra virtual

□ Esta corrente passa totalmente pelo capacitor.

- $v_r(t) = R i_r(t) = R i_c(t)$

□ Naturalmente $v_{out}(t) = -v_c(t)$

□ Então:

- $v_{out}(t) = -RC dv_{in}(t)/dt \Rightarrow v_{out} = -sRC v_{in}$

Aplicações com Amp-Op

- Diferenciador
 - ▣ O que acontece se um sinal com variação abrupta é aplicado na entrada?