Amplificadores Operacionais

Prof. Carlos Fernando Teodósio Soares

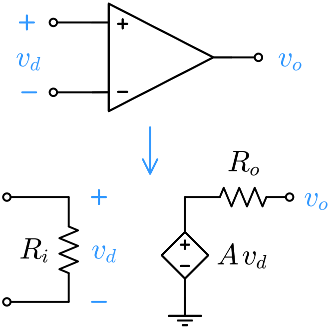
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA POLITÉCNICA
Departamento de Engenharia Eletrônica e de Computação

Agenda da Aula - Capítulo 10

- **O Amplificador Operacional Ideal**
- **Aplicações do Amplificador Operacional**
- **Filtros Ativos Analógicos**
- **Comparadores**

Amplificador Operacional Ideal

O Amplificador Operacional é o bloco básico usado na construção de inúmeros circuitos analógicos. Em virtude da sua versatilidade, ele pode ser usado para realizar praticamente qualquer processamento analógico de sinal.



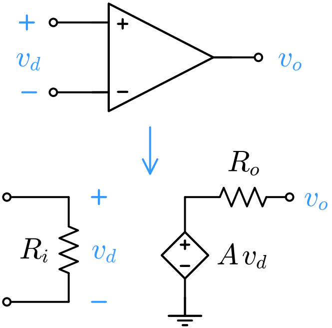
Amplificador Operacional Ideal

O Amplificador Operacional é o bloco básico usado na construção de inúmeros circuitos analógicos. Em virtude da sua versatilidade, ele pode ser usado para realizar praticamente qualquer processamento analógico de sinal.

Características Ideais

A razão da grande utilidade do Amplificador Operacional em circuitos analógico está relacionada com as suas características ideais:

- Resistência de entrada infinita ($R_i \to \infty$).
- Resistência de saída zero ($R_o = 0$).
- Ganho de tensão infinito ($A \to \infty$)



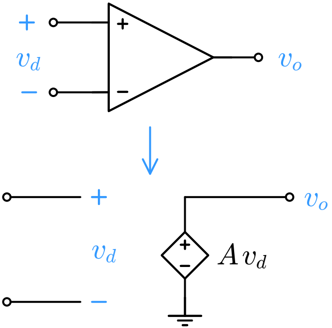
Amplificador Operacional Ideal

O Amplificador Operacional é o bloco básico usado na construção de inúmeros circuitos analógicos. Em virtude da sua versatilidade, ele pode ser usado para realizar praticamente qualquer processamento analógico de sinal.

Características Ideais

A razão da grande utilidade do Amplificador Operacional em circuitos analógico está relacionada com as suas características ideais:

- Resistência de entrada infinita ($R_i \to \infty$).
- Resistência de saída zero ($R_o = 0$).
- Ganho de tensão infinito ($A \to \infty$)



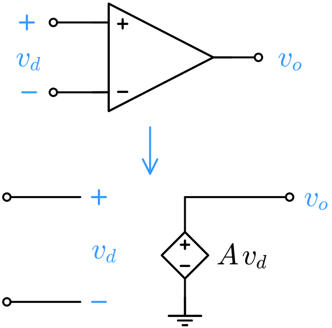
Amplificador Operacional Ideal

O Amplificador Operacional é o bloco básico usado na construção de inúmeros circuitos analógicos. Em virtude da sua versatilidade, ele pode ser usado para realizar praticamente qualquer processamento analógico de sinal.

Características Ideais

A razão da grande utilidade do Amplificador Operacional em circuitos analógico está relacionada com as suas características ideais:

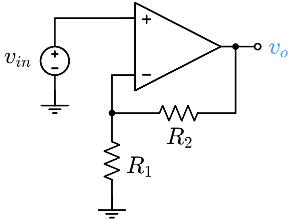
- Resistência de entrada infinita ($R_i \to \infty$).
- Resistência de saída zero ($R_o = 0$).
- Ganho de tensão infinito ($A \to \infty$)

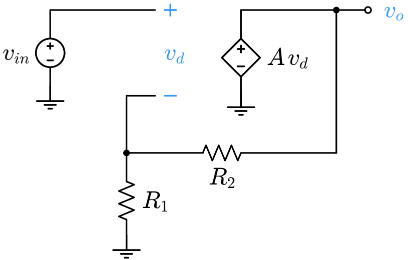


OBSERVAÇÃO: O ganho de tensão muito alto permite construir circuitos com excelente linearidade, desde que uma realimentação negativa seja aplicada ao Amplificador Operacional.

Amplificador com Realimentação Negativa

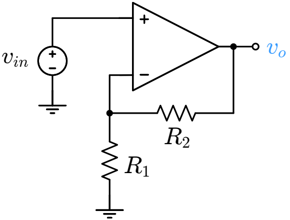
- O elevado ganho do Amplificador Operacional aliado ao emprego de realimentação negativa permite construir circuitos analógicos com excelente linearidade:

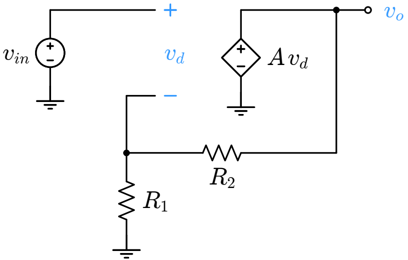




Amplificador com Realimentação Negativa

- O elevado ganho do Amplificador Operacional aliado ao emprego de realimentação negativa permite construir circuitos analógicos com excelente linearidade:

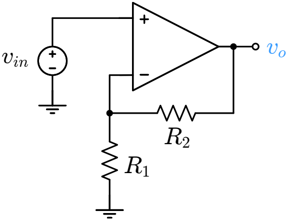


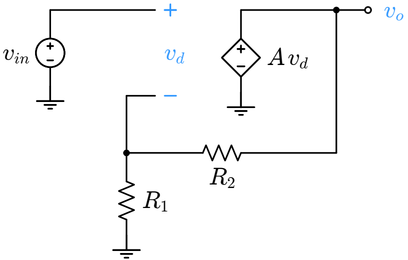


$$v_d = v_{in} - R_1\left(\frac{v_o}{R_1 + R_2}\right)$$

Amplificador com Realimentação Negativa

- O elevado ganho do Amplificador Operacional aliado ao emprego de realimentação negativa permite construir circuitos analógicos com excelente linearidade:



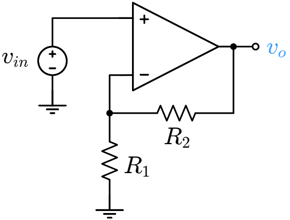


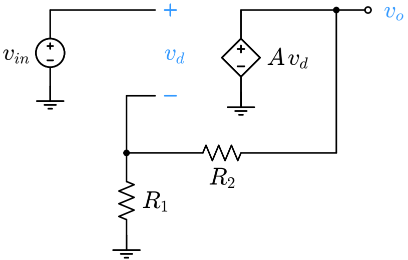
$$v_d = v_{in} - R_1\left(\frac{v_o}{R_1 + R_2}\right)$$

$$v_d = v_{in} - R_1\left(\frac{A\,v_d}{R_1 + R_2}\right)$$

Amplificador com Realimentação Negativa

- O elevado ganho do Amplificador Operacional aliado ao emprego de realimentação negativa permite construir circuitos analógicos com excelente linearidade:





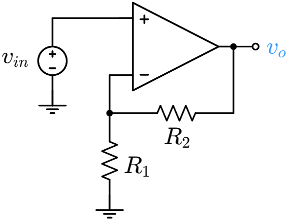
$$v_d = v_{in} - R_1\left(\frac{v_o}{R_1 + R_2}\right)$$

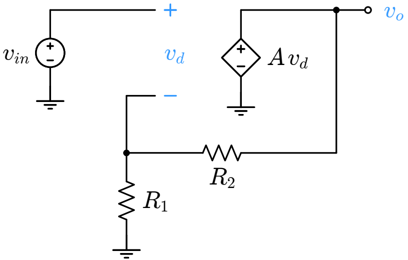
$$v_d = v_{in} - R_1\left(\frac{A\,v_d}{R_1 + R_2}\right)$$

$$v_d + R_1\left(\frac{A\,v_d}{R_1 + R_2}\right) = v_{in}$$

Amplificador com Realimentação Negativa

- O elevado ganho do Amplificador Operacional aliado ao emprego de realimentação negativa permite construir circuitos analógicos com excelente linearidade:





$$v_d = v_{in} - R_1 \left(\frac{v_o}{R_1 + R_2} \right)$$

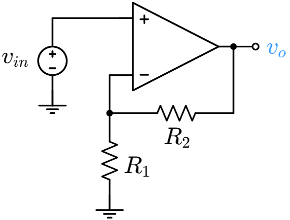
$$v_d = v_{in} - R_1 \left(\frac{A\,v_d}{R_1 + R_2} \right)$$

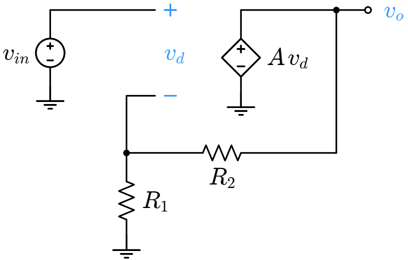
$$v_d + R_1 \left(\frac{A\,v_d}{R_1 + R_2} \right) = v_{in}$$

$$v_d \left(1 + \frac{A\,R_1}{R_1 + R_2} \right) = v_{in}$$

Amplificador com Realimentação Negativa

- O elevado ganho do Amplificador Operacional aliado ao emprego de realimentação negativa permite construir circuitos analógicos com excelente linearidade:

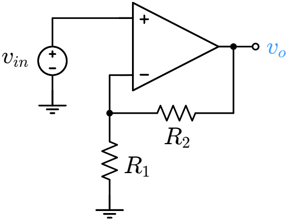


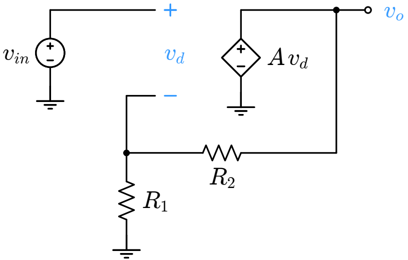


$$v_d = \frac{v_{in}}{\left(1 + \frac{A\,R_1}{R_1+R_2}\right)}$$

Amplificador com Realimentação Negativa

- O elevado ganho do Amplificador Operacional aliado ao emprego de realimentação negativa permite construir circuitos analógicos com excelente linearidade:



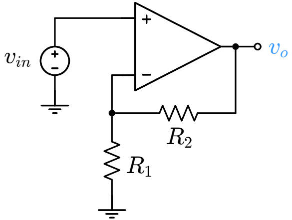


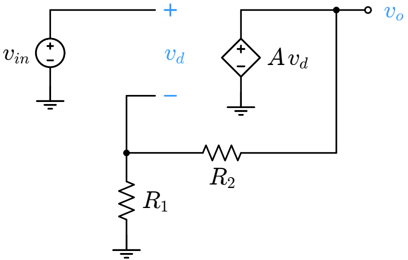
$$v_d = \frac{v_{in}}{\left(1 + \frac{A\,R_1}{R_1+R_2}\right)}$$

$$v_o = A\,v_d = \frac{A}{\left(1 + \frac{A\,R_1}{R_1+R_2}\right)} v_{in}$$

Amplificador com Realimentação Negativa

- O elevado ganho do Amplificador Operacional aliado ao emprego de realimentação negativa permite construir circuitos analógicos com excelente linearidade:





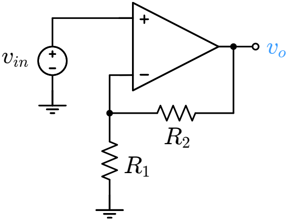
$$v_d = \frac{v_{in}}{\left(1 + \frac{A\,R_1}{R_1+R_2}\right)}$$

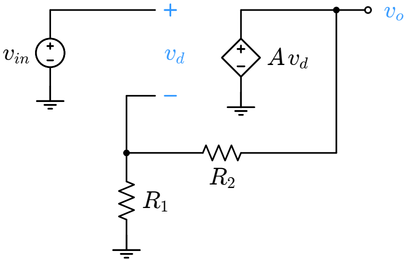
$$v_o = A\,v_d = \frac{A}{\left(1 + \frac{A\,R_1}{R_1+R_2}\right)} v_{in}$$

$$v_o \approx \frac{A}{\left(\frac{A\,R_1}{R_1+R_2}\right)} v_{in}$$

Amplificador com Realimentação Negativa

- O elevado ganho do Amplificador Operacional aliado ao emprego de realimentação negativa permite construir circuitos analógicos com excelente linearidade:





$$v_d = \frac{v_{in}}{\left(1 + \frac{A\,R_1}{R_1+R_2}\right)}$$

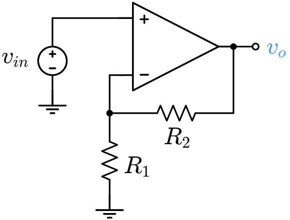
$$v_o = A\,v_d = \frac{A}{\left(1 + \frac{A\,R_1}{R_1+R_2}\right)} v_{in}$$

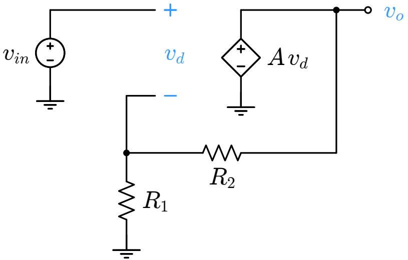
$$v_o \approx \frac{A}{\left(\frac{A\,R_1}{R_1+R_2}\right)} v_{in}$$

$$v_o \approx \frac{R_1 + R_2}{R_1} v_{in}$$

Amplificador com Realimentação Negativa

- O elevado ganho do Amplificador Operacional aliado ao emprego de realimentação negativa permite construir circuitos analógicos com excelente linearidade:



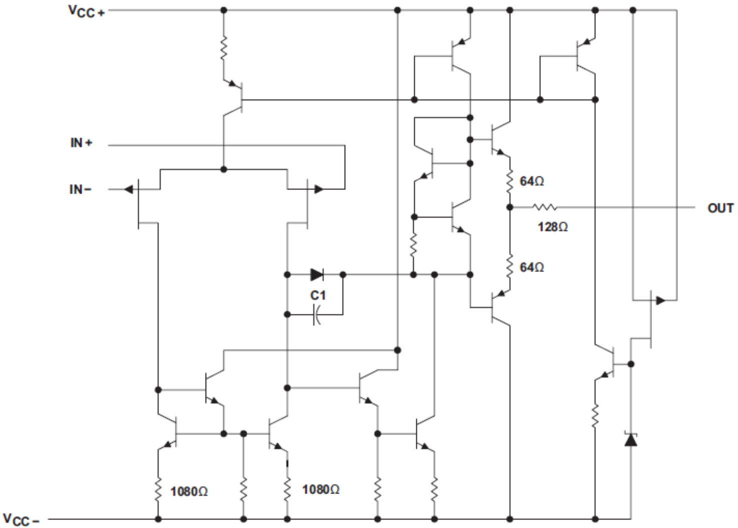


- Ganho de Tensão Ideal quando $A \to \infty$:

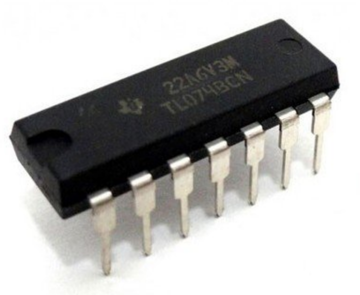
$$\frac{v_o}{v_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

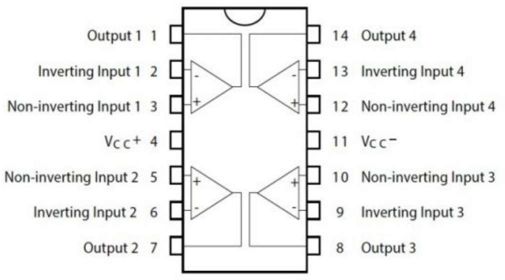
- Para calcular o ganho de tensão v_o/v_{in}, não é necessário analisar o circuito interno do amplificador operacional.

Amplificador Operacional Real - TL074



Amplificador Operacional Real - TL074

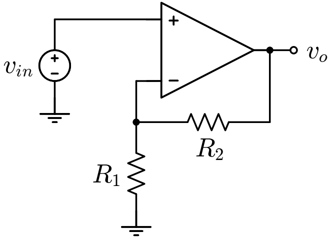




PARAMETER		TEST CONDITIONS [(1)] [(2)]		MIN	TYP	MAX	UNIT
V_{OM}	Maximum peak output voltage swing	$R_L = 10\ k\Omega$	$T_A = 25°C$	±12	±13.5		V
		$R_L \geq 10\ k\Omega$	T_A = Full range	±12			
		$R_L \geq 2\ k\Omega$		±10			
A_{VD}	Large-signal differential voltage amplification	$V_O = \pm 10$ V, $R_L \geq 2\ k\Omega$	$T_A = 25°C$	50	200		V/mV
			T_A = Full range	25			
r_i	Input resistance	$T_A = 25°C$			10^{12}		Ω

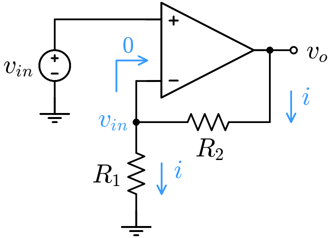
Análise de Circuitos com Amplificadores Operacionais

- A análise de circuitos com amplificadores operacionais pode ser bastante simplificada se aplicarmos suas características ideais diretamente no circuito. O ganho infinito, aliado com a realimentação negativa, obriga que a diferença de tensão na entrada do amplificador seja zero (caso contrário, teríamos uma situação impossível: $v_o \rightarrow \infty$).



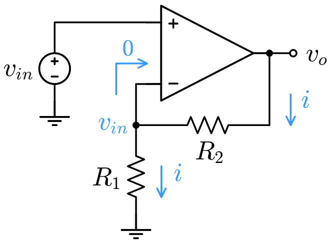
Análise de Circuitos com Amplificadores Operacionais

- A análise de circuitos com amplificadores operacionais pode ser bastante simplificada se aplicarmos suas características ideais diretamente no circuito. O ganho infinito, aliado com a realimentação negativa, obriga que a diferença de tensão na entrada do amplificador seja zero (caso contrário, teríamos uma situação impossível: $v_o \to \infty$).



Análise de Circuitos com Amplificadores Operacionais

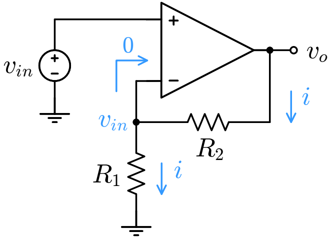
- A análise de circuitos com amplificadores operacionais pode ser bastante simplificada se aplicarmos suas características ideais diretamente no circuito. O ganho infinito, aliado com a realimentação negativa, obriga que a diferença de tensão na entrada do amplificador seja zero (caso contrário, teríamos uma situação impossível: $v_o \rightarrow \infty$).



$$i = \frac{v_{in}}{R_1}$$

Análise de Circuitos com Amplificadores Operacionais

- A análise de circuitos com amplificadores operacionais pode ser bastante simplificada se aplicarmos suas características ideais diretamente no circuito. O ganho infinito, aliado com a realimentação negativa, obriga que a diferença de tensão na entrada do amplificador seja zero (caso contrário, teríamos uma situação impossível: $v_o \to \infty$).

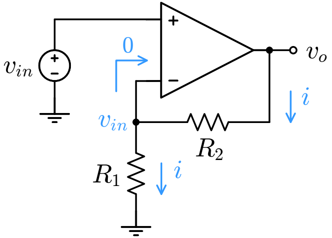


$$i = \frac{v_{in}}{R_1}$$

$$v_o = v_{in} + R_2\, i$$

Análise de Circuitos com Amplificadores Operacionais

- A análise de circuitos com amplificadores operacionais pode ser bastante simplificada se aplicarmos suas características ideais diretamente no circuito. O ganho infinito, aliado com a realimentação negativa, obriga que a diferença de tensão na entrada do amplificador seja zero (caso contrário, teríamos uma situação impossível: $v_o \to \infty$).



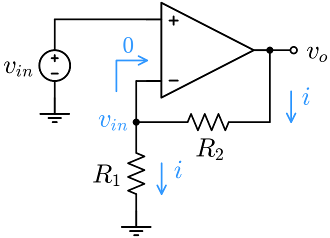
$$i = \frac{v_{in}}{R_1}$$

$$v_o = v_{in} + R_2\, i$$

$$v_o = v_{in} + R_2 \frac{v_{in}}{R_1}$$

Análise de Circuitos com Amplificadores Operacionais

- A análise de circuitos com amplificadores operacionais pode ser bastante simplificada se aplicarmos suas características ideais diretamente no circuito. O ganho infinito, aliado com a realimentação negativa, obriga que a diferença de tensão na entrada do amplificador seja zero (caso contrário, teríamos uma situação impossível: $v_o \to \infty$).



$$i = \frac{v_{in}}{R_1}$$

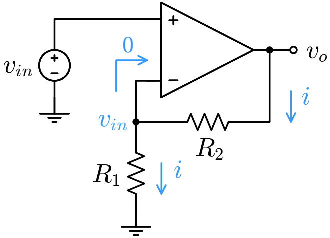
$$v_o = v_{in} + R_2\, i$$

$$v_o = v_{in} + R_2 \frac{v_{in}}{R_1}$$

$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_{in}$$

Análise de Circuitos com Amplificadores Operacionais

- A análise de circuitos com amplificadores operacionais pode ser bastante simplificada se aplicarmos suas características ideais diretamente no circuito. O ganho infinito, aliado com a realimentação negativa, obriga que a diferença de tensão na entrada do amplificador seja zero (caso contrário, teríamos uma situação impossível: $v_o \to \infty$).



$$i = \frac{v_{in}}{R_1}$$

$$v_o = v_{in} + R_2\, i$$

$$v_o = v_{in} + R_2 \frac{v_{in}}{R_1}$$

$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_{in}$$

- Ganho de Tensão Ideal:

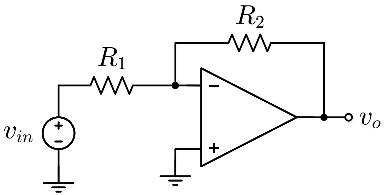
$$\frac{v_o}{v_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Agenda da Aula - Capítulo 11

- O Amplificador Operacional Ideal
- **Aplicações do Amplificador Operacional**
- Filtros Ativos Analógicos
- Comparadores

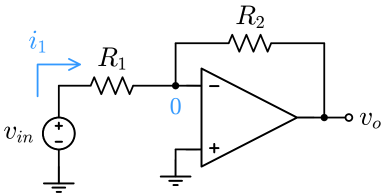
Amplificador Inversor

- Além do amplificador com realimentação negativa apresentado anteriormente, outra aplicação de Amplificador Operacional bastante comum é o Amplificador Inversor apresentado abaixo:



Amplificador Inversor

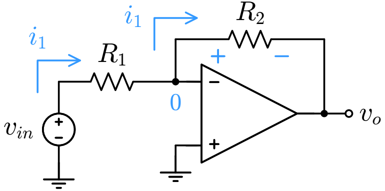
- Além do amplificador com realimentação negativa apresentado anteriormente, outra aplicação de Amplificador Operacional bastante comum é o Amplificador Inversor apresentado abaixo:



$$i_1 = \frac{v_{in} - 0}{R_1}$$

Amplificador Inversor

- Além do amplificador com realimentação negativa apresentado anteriormente, outra aplicação de Amplificador Operacional bastante comum é o Amplificador Inversor apresentado abaixo:

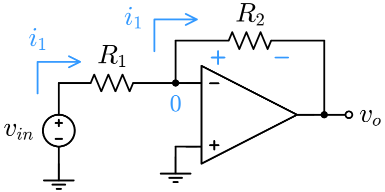


$$i_1 = \frac{v_{in} - 0}{R_1}$$

$$v_o = 0 - R_2 i_1$$

Amplificador Inversor

- Além do amplificador com realimentação negativa apresentado anteriormente, outra aplicação de Amplificador Operacional bastante comum é o Amplificador Inversor apresentado abaixo:



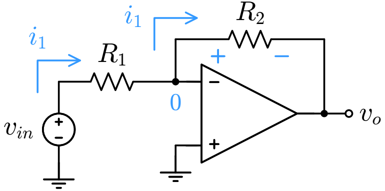
$$i_1 = \frac{v_{in} - 0}{R_1}$$

$$v_o = 0 - R_2 i_1$$

$$v_o = -R_2 \cdot \frac{v_{in}}{R_1}$$

Amplificador Inversor

- Além do amplificador com realimentação negativa apresentado anteriormente, outra aplicação de Amplificador Operacional bastante comum é o Amplificador Inversor apresentado abaixo:



$$i_1 = \frac{v_{in} - 0}{R_1}$$

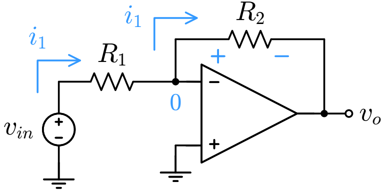
$$v_o = 0 - R_2 i_1$$

$$v_o = -R_2 \cdot \frac{v_{in}}{R_1}$$

$$\frac{v_o}{v_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Amplificador Inversor

- Além do amplificador com realimentação negativa apresentado anteriormente, outra aplicação de Amplificador Operacional bastante comum é o Amplificador Inversor apresentado abaixo:



$$i_1 = \frac{v_{in} - 0}{R_1}$$

$$v_o = 0 - R_2 i_1$$

$$v_o = -R_2 \cdot \frac{v_{in}}{R_1}$$

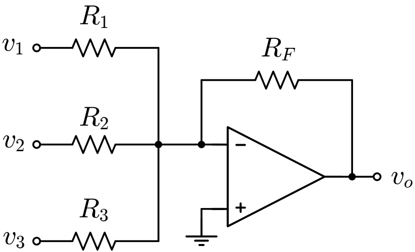
$$\frac{v_o}{v_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Observação

O nome *Amplificador Operacional* se deve ao fato de que esse amplificador é frequentemente usado para construir circuitos que realizam operações matemáticas com sinais de tensão, tais como soma, subtração e integração.

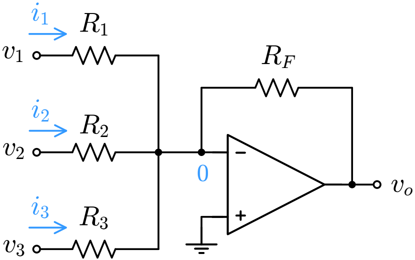
Amplificador Somador

- Com o Amplificador Operacional também é possível somar sinais, usando o Amplificador Somador apresentado abaixo:



Amplificador Somador

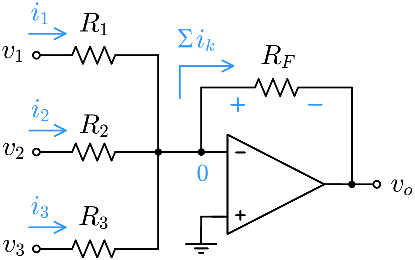
- Com o Amplificador Operacional também é possível somar sinais, usando o Amplificador Somador apresentado abaixo:



$$i_k = \frac{v_k - 0}{R_k}, \qquad k = 1, 2, 3.$$

Amplificador Somador

- Com o Amplificador Operacional também é possível somar sinais, usando o Amplificador Somador apresentado abaixo:

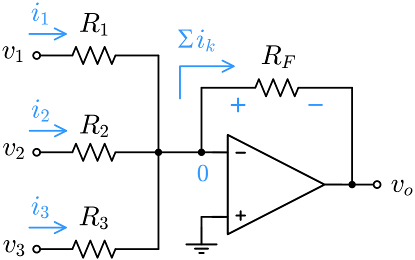


$$i_k = \frac{v_k - 0}{R_k}, \qquad k = 1, 2, 3.$$

$$v_o = 0 - R_F \cdot \sum_{k=1}^{3} i_k$$

Amplificador Somador

- Com o Amplificador Operacional também é possível somar sinais, usando o Amplificador Somador apresentado abaixo:



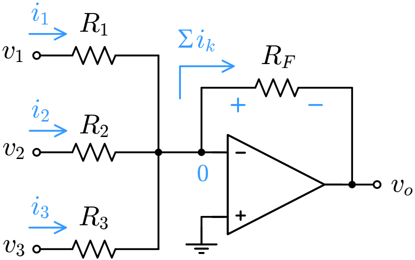
$$i_k = \frac{v_k - 0}{R_k}, \qquad k = 1, 2, 3.$$

$$v_o = 0 - R_F \cdot \sum_{k=1}^{3} i_k$$

$$v_o = -R_F \cdot \left(\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \frac{v_3}{R_3} \right)$$

Amplificador Somador

- Com o Amplificador Operacional também é possível somar sinais, usando o Amplificador Somador apresentado abaixo:



$$i_k = \frac{v_k - 0}{R_k}, \qquad k = 1, 2, 3.$$

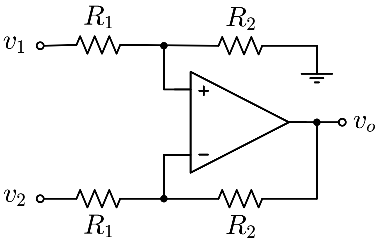
$$v_o = 0 - R_F \cdot \sum_{k=1}^{3} i_k$$

$$v_o = -R_F \cdot \left(\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \frac{v_3}{R_3} \right)$$

- **OBSERVAÇÃO:** O amplificador somador pode ser expandido para admitir mais sinais de entrada, desde que o amplificador operacional seja capaz de lidar com o somatório de todas as correntes.

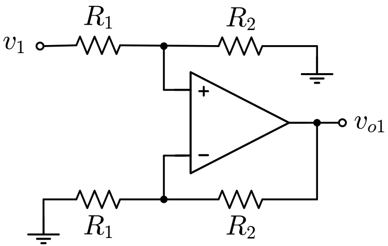
Amplificador Diferencial

- Com o Amplificador Diferencial abaixo é possível subtrair dois sinais. Como o circuito é linear, é possível analisá-lo através da superposição.



Amplificador Diferencial

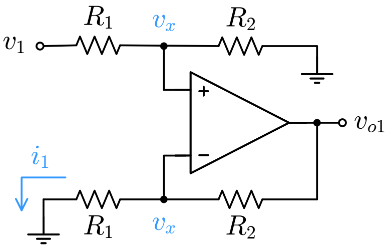
- Com o Amplificador Diferencial abaixo é possível subtrair dois sinais. Como o circuito é linear, é possível analisá-lo através da superposição.



- Aplicando apenas a entrada v_1:

Amplificador Diferencial

- Com o Amplificador Diferencial abaixo é possível subtrair dois sinais. Como o circuito é linear, é possível analisá-lo através da superposição.

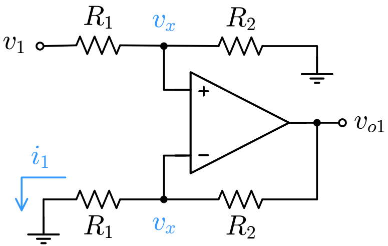


- Aplicando apenas a entrada v_1:

$$v_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_1$$

Amplificador Diferencial

- Com o Amplificador Diferencial abaixo é possível subtrair dois sinais. Como o circuito é linear, é possível analisá-lo através da superposição.



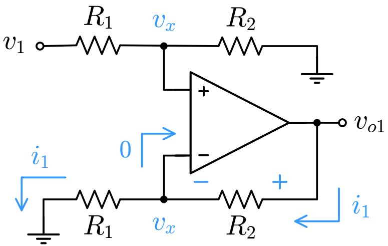
- Aplicando apenas a entrada v_1:

$$v_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_1$$

$$i_1 = \frac{v_x - 0}{R_1}$$

Amplificador Diferencial

- Com o Amplificador Diferencial abaixo é possível subtrair dois sinais. Como o circuito é linear, é possível analisá-lo através da superposição.



- Aplicando apenas a entrada v_1:

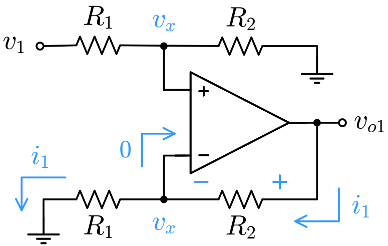
$$v_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_1$$

$$i_1 = \frac{v_x - 0}{R_1}$$

$$v_{o1} = v_x + R_2 i_1$$

Amplificador Diferencial

- Com o Amplificador Diferencial abaixo é possível subtrair dois sinais. Como o circuito é linear, é possível analisá-lo através da superposição.



- Aplicando apenas a entrada v_1:

$$v_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_1$$

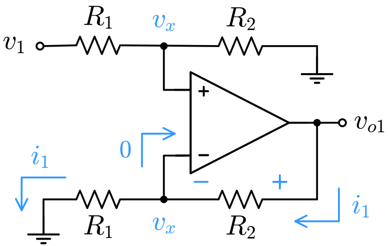
$$i_1 = \frac{v_x - 0}{R_1}$$

$$v_{o1} = v_x + R_2 i_1$$

$$v_{o1} = v_x + R_2 \cdot \frac{v_x}{R_1}$$

Amplificador Diferencial

- Com o Amplificador Diferencial abaixo é possível subtrair dois sinais. Como o circuito é linear, é possível analisá-lo através da superposição.



- Aplicando apenas a entrada v_1:

$$v_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_1$$

$$i_1 = \frac{v_x - 0}{R_1}$$

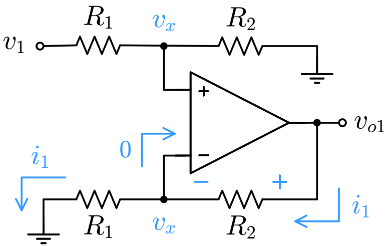
$$v_{o1} = v_x + R_2 i_1$$

$$v_{o1} = v_x + R_2 \cdot \frac{v_x}{R_1}$$

$$v_{o1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_x$$

Amplificador Diferencial

- Com o Amplificador Diferencial abaixo é possível subtrair dois sinais. Como o circuito é linear, é possível analisá-lo através da superposição.



- Aplicando apenas a entrada v_1:

$$v_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_1$$

$$i_1 = \frac{v_x - 0}{R_1}$$

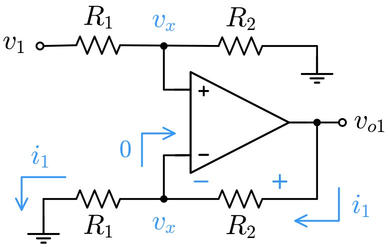
$$v_{o1} = v_x + R_2 i_1$$

$$v_{o1} = v_x + R_2 \cdot \frac{v_x}{R_1}$$

$$v_{o1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_1$$

Amplificador Diferencial

- Com o Amplificador Diferencial abaixo é possível subtrair dois sinais. Como o circuito é linear, é possível analisá-lo através da superposição.



- Aplicando apenas a entrada v_1:

$$v_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_1$$

$$i_1 = \frac{v_x - 0}{R_1}$$

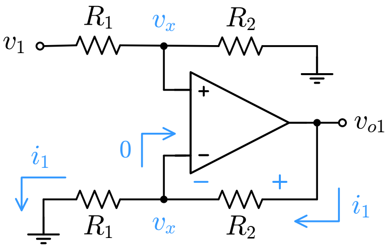
$$v_{o1} = v_x + R_2 i_1$$

$$v_{o1} = v_x + R_2 \cdot \frac{v_x}{R_1}$$

$$v_{o1} = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_1$$

Amplificador Diferencial

- Com o Amplificador Diferencial abaixo é possível subtrair dois sinais. Como o circuito é linear, é possível analisá-lo através da superposição.



- Aplicando apenas a entrada v_1:

$$v_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_1$$

$$i_1 = \frac{v_x - 0}{R_1}$$

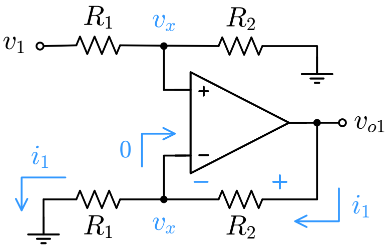
$$v_{o1} = v_x + R_2 i_1$$

$$v_{o1} = v_x + R_2 \cdot \frac{v_x}{R_1}$$

$$v_{o1} = \left(\frac{\cancel{R_1 + R_2}}{R_1}\right) \cdot \frac{R_2}{\cancel{R_1 + R_2}} \cdot v_1$$

Amplificador Diferencial

- Com o Amplificador Diferencial abaixo é possível subtrair dois sinais. Como o circuito é linear, é possível analisá-lo através da superposição.



- Aplicando apenas a entrada v_1:

$$v_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_1$$

$$i_1 = \frac{v_x - 0}{R_1}$$

$$v_{o1} = v_x + R_2 i_1$$

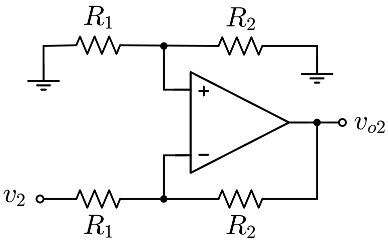
$$v_{o1} = v_x + R_2 \cdot \frac{v_x}{R_1}$$

$$v_{o1} = \left(\frac{\cancel{R_1 + R_2}}{R_1}\right) \cdot \frac{R_2}{\cancel{R_1 + R_2}} \cdot v_1$$

$$v_{o1} = \frac{R_2}{R_1} \cdot v_1$$

Amplificador Diferencial

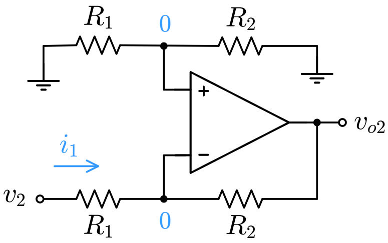
- Com o Amplificador Diferencial abaixo é possível subtrair dois sinais. Como o circuito é linear, é possível analisá-lo através da superposição.



- Aplicando apenas a entrada v_2:

Amplificador Diferencial

- Com o Amplificador Diferencial abaixo é possível subtrair dois sinais. Como o circuito é linear, é possível analisá-lo através da superposição.

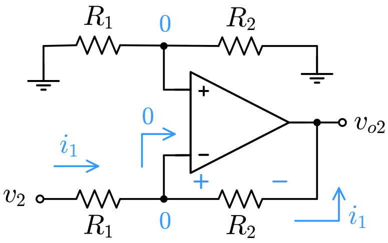


- Aplicando apenas a entrada v_2:

$$i_1 = \frac{v_2 - 0}{R_1}$$

Amplificador Diferencial

- Com o Amplificador Diferencial abaixo é possível subtrair dois sinais. Como o circuito é linear, é possível analisá-lo através da superposição.



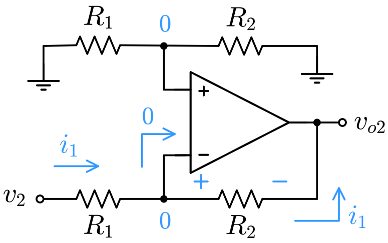
- Aplicando apenas a entrada v_2:

$$i_1 = \frac{v_2 - 0}{R_1}$$

$$v_{o2} = 0 - R_2 i_1$$

Amplificador Diferencial

- Com o Amplificador Diferencial abaixo é possível subtrair dois sinais. Como o circuito é linear, é possível analisá-lo através da superposição.



- Aplicando apenas a entrada v_2:

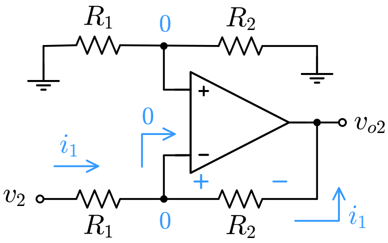
$$i_1 = \frac{v_2 - 0}{R_1}$$

$$v_{o2} = 0 - R_2 i_1$$

$$v_{o2} = -R_2 \cdot \frac{v_2}{R_1}$$

Amplificador Diferencial

- Com o Amplificador Diferencial abaixo é possível subtrair dois sinais. Como o circuito é linear, é possível analisá-lo através da superposição.



- Aplicando apenas a entrada v_2:

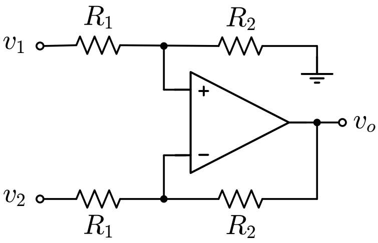
$$i_1 = \frac{v_2 - 0}{R_1}$$

$$v_{o2} = 0 - R_2 i_1$$

$$v_{o2} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot v_2$$

Amplificador Diferencial

- Com o Amplificador Diferencial abaixo é possível subtrair dois sinais. Como o circuito é linear, é possível analisá-lo através da superposição.

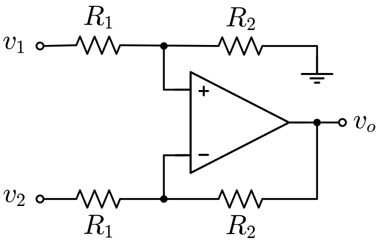


- Superpondo as entradas v_1 e v_2:

$$v_o = v_{o1} + v_{o2}$$

Amplificador Diferencial

- Com o Amplificador Diferencial abaixo é possível subtrair dois sinais. Como o circuito é linear, é possível analisá-lo através da superposição.



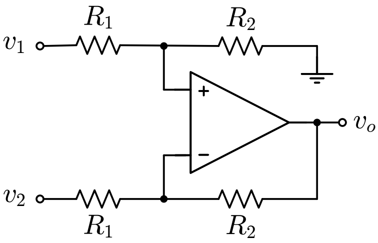
- Superpondo as entradas v_1 e v_2:

$$v_o = v_{o1} + v_{o2}$$

$$v_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot v_1 - \frac{R_2}{R_1} \cdot v_2$$

Amplificador Diferencial

- Com o Amplificador Diferencial abaixo é possível subtrair dois sinais. Como o circuito é linear, é possível analisá-lo através da superposição.



- Superpondo as entradas v_1 e v_2:

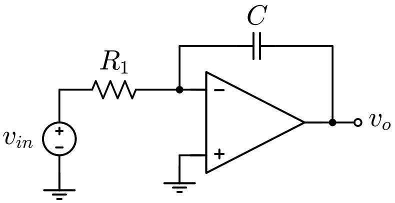
$$v_o = v_{o1} + v_{o2}$$

$$v_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot v_1 - \frac{R_2}{R_1} \cdot v_2$$

$$v_o = \frac{R_2}{R_1} (v_1 - v_2)$$

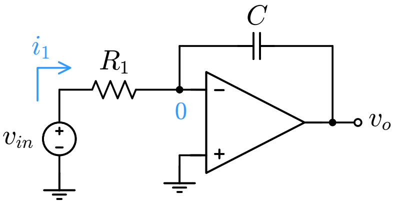
Circuito Integrador

- Com o circuito abaixo, é possível produzir um sinal na saída $v_o(t)$ proporcional à integral do sinal de entrada $v_{in}(t)$.



Circuito Integrador

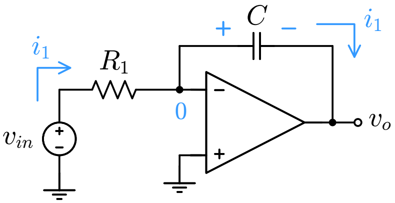
- Com o circuito abaixo, é possível produzir um sinal na saída $v_o(t)$ proporcional à integral do sinal de entrada $v_{in}(t)$.



$$i_1 = \frac{v_{in} - 0}{R_1}$$

Circuito Integrador

- Com o circuito abaixo, é possível produzir um sinal na saída $v_o(t)$ proporcional à integral do sinal de entrada $v_{in}(t)$.

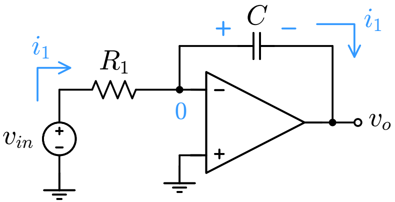


$$i_1 = \frac{v_{in} - 0}{R_1}$$

$$v_o = 0 - \frac{1}{C}\int_{-\infty}^{t} i_1(t)dt$$

Circuito Integrador

- Com o circuito abaixo, é possível produzir um sinal na saída $v_o(t)$ proporcional à integral do sinal de entrada $v_{in}(t)$.



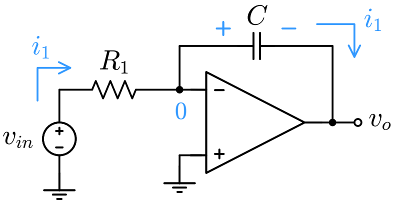
$$i_1 = \frac{v_{in} - 0}{R_1}$$

$$v_o = 0 - \frac{1}{C}\int_{-\infty}^{t} i_1(t)dt$$

$$v_o = 0 - \frac{1}{C}\int_{-\infty}^{t} \frac{v_{in}(t)}{R_1}dt$$

Circuito Integrador

- Com o circuito abaixo, é possível produzir um sinal na saída $v_o(t)$ proporcional à integral do sinal de entrada $v_{in}(t)$.



$$i_1 = \frac{v_{in} - 0}{R_1}$$

$$v_o = 0 - \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t} i_1(t)\,dt$$

$$v_o = 0 - \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t} \frac{v_{in}(t)}{R_1}\,dt$$

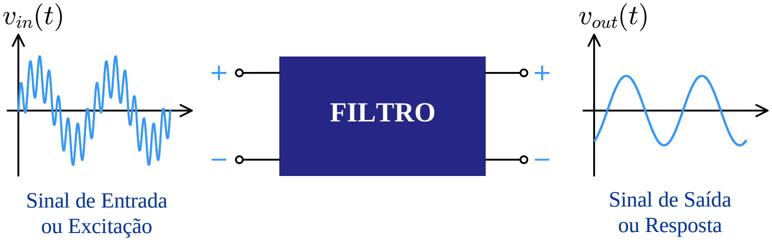
$$v_o = -\frac{1}{R_1 C} \int_{-\infty}^{t} v_{in}(t)\,dt$$

Agenda da Aula - Capítulo 11

- O Amplificador Operacional Ideal
- Aplicações do Amplificador Operacional
- **Filtros Ativos Analógicos**
- Comparadores

Filtros Ativos

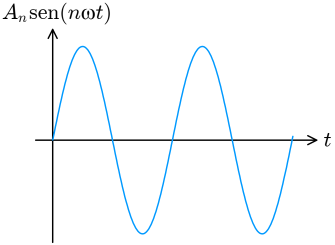
- **Filtro** é o nome dado ao circuito eletrônico que tem como objetivo selecionar as parcelas desejadas de um sinal de entrada v_{in} e rejeitar as parcelas indesejadas.
- Nesse sentido, o sinal v_{out} produzido na saída do filtro é formado exclusivamente pelas parcelas desejadas do sinal de entrada v_{in}.

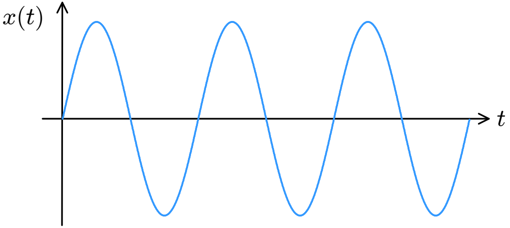


- Filtros encontram aplicações em Processamento de Sinais, Telecomunicações, Eletrônica de Áudio, Instrumentação e Conversão Analógico/Digital.

Composição Espectral dos Sinais

- Sinais periódicos podem ser descritos matematicamente como uma soma infinita de senoides com frequências harmônicas. Um exemplo disso é a Onda Quadrada:

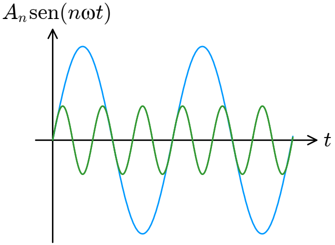


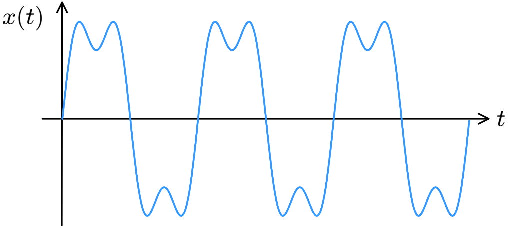


$$x(t) = \frac{4A_0}{\pi} \, \mathrm{sen}\,(\omega t)$$

Composição Espectral dos Sinais

- Sinais periódicos podem ser descritos matematicamente como uma soma infinita de senoides com frequências harmônicas. Um exemplo disso é a Onda Quadrada:

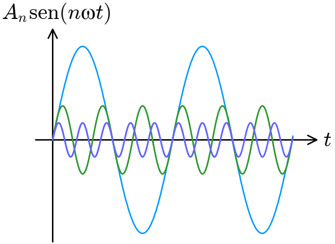


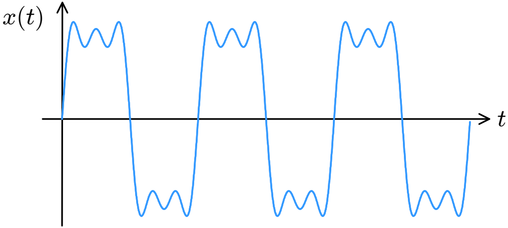


$$x(t) = \frac{4A_0}{\pi}\left[\mathrm{sen}\,(\omega t) + \frac{1}{3}\,\mathrm{sen}\,(3\omega t)\right]$$

Composição Espectral dos Sinais

- Sinais periódicos podem ser descritos matematicamente como uma soma infinita de senoides com frequências harmônicas. Um exemplo disso é a Onda Quadrada:

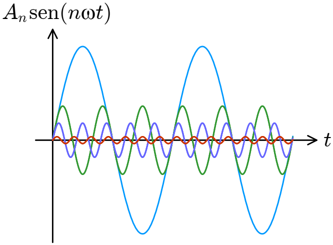


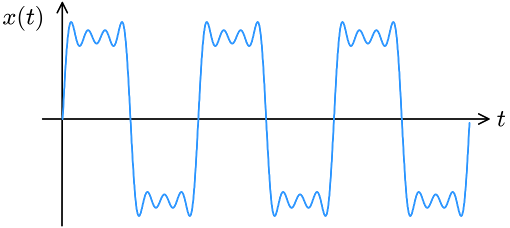


$$x(t) = \frac{4A_0}{\pi}\left[\operatorname{sen}(\omega t) + \frac{1}{3}\operatorname{sen}(3\omega t) + \frac{1}{5}\operatorname{sen}(5\omega t)\right]$$

Composição Espectral dos Sinais

- Sinais periódicos podem ser descritos matematicamente como uma soma infinita de senoides com frequências harmônicas. Um exemplo disso é a Onda Quadrada:

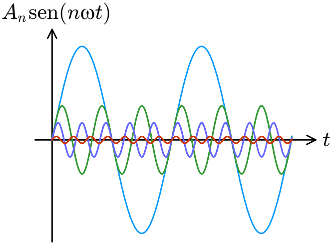


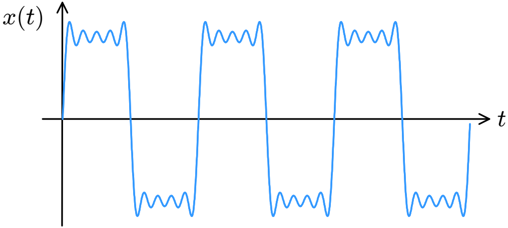


$$x(t) = \frac{4A_0}{\pi}\left[\mathrm{sen}\,(\omega t) + \frac{1}{3}\,\mathrm{sen}\,(3\omega t) + \frac{1}{5}\,\mathrm{sen}\,(5\omega t) + \frac{1}{7}\,\mathrm{sen}\,(7\omega t)\right]$$

Composição Espectral dos Sinais

- Sinais periódicos podem ser descritos matematicamente como uma soma infinita de senoides com frequências harmônicas. Um exemplo disso é a Onda Quadrada:

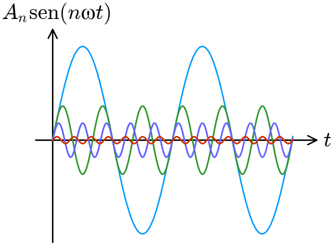


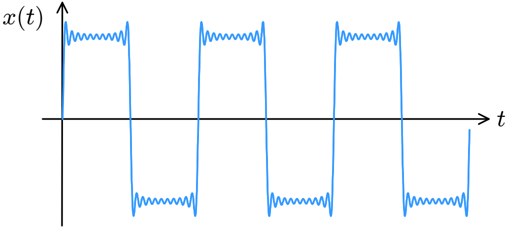


$$x(t) = \frac{4A_0}{\pi}\left[\operatorname{sen}(\omega t) + \frac{1}{3}\operatorname{sen}(3\omega t) + \frac{1}{5}\operatorname{sen}(5\omega t) + \frac{1}{7}\operatorname{sen}(7\omega t) + + \frac{1}{9}\operatorname{sen}(9\omega t)\right]$$

Composição Espectral dos Sinais

- Sinais periódicos podem ser descritos matematicamente como uma soma infinita de senoides com frequências harmônicas. Um exemplo disso é a Onda Quadrada:

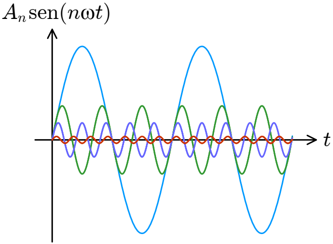


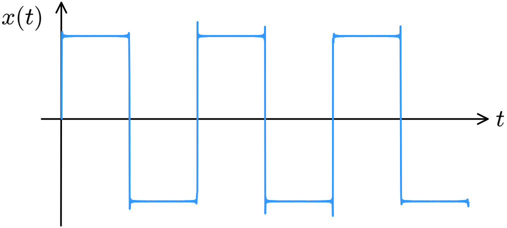


$$x(t) = \frac{4A_0}{\pi}\left[\mathrm{sen}\,(\omega t) + \frac{1}{3}\,\mathrm{sen}\,(3\omega t) + \ldots + \frac{1}{21}\,\mathrm{sen}\,(21\omega t)\right]$$

Composição Espectral dos Sinais

- Sinais periódicos podem ser descritos matematicamente como uma soma infinita de senoides com frequências harmônicas. Um exemplo disso é a Onda Quadrada:

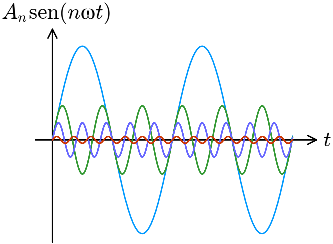


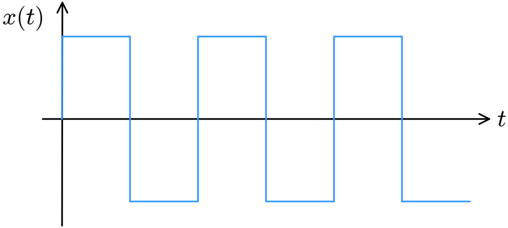


$$x(t) = \frac{4A_0}{\pi}\left[\operatorname{sen}(\omega t) + \frac{1}{3}\operatorname{sen}(3\omega t) + \ldots + \frac{1}{501}\operatorname{sen}(501\omega t)\right]$$

Composição Espectral dos Sinais

- Sinais periódicos podem ser descritos matematicamente como uma soma infinita de senoides com frequências harmônicas. Um exemplo disso é a Onda Quadrada:

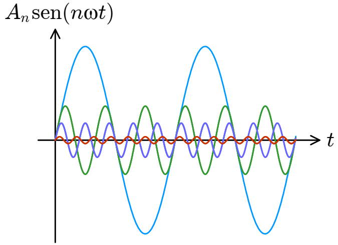


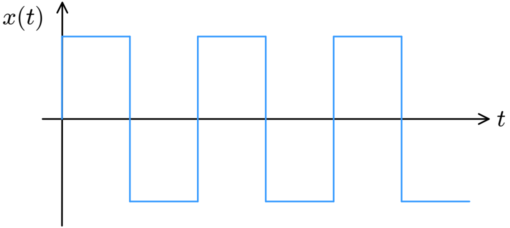


$$x(t) = \frac{4A_0}{\pi}\left[\text{sen}\,(\omega t) + \frac{1}{3}\,\text{sen}\,(3\omega t) + \frac{1}{5}\,\text{sen}\,(5\omega t) + \frac{1}{7}\,\text{sen}\,(7\omega t) + \ldots\right]$$

Composição Espectral dos Sinais

- Sinais periódicos podem ser descritos matematicamente como uma soma infinita de senoides com frequências harmônicas. Um exemplo disso é a Onda Quadrada:





$$x(t) = \frac{4A_0}{\pi}\left[\mathrm{sen}\,(\omega t) + \frac{1}{3}\,\mathrm{sen}\,(3\omega t) + \frac{1}{5}\,\mathrm{sen}\,(5\omega t) + \frac{1}{7}\,\mathrm{sen}\,(7\omega t) + \ldots\right]$$

- Já os sinais não periódicos podem ser expressos por uma soma contínua (integral) de sinais de diversas frequências (Espectro de Frequências).
- O objetivo do Filtro é justamente selecionar quais componentes de frequência do sinal de entrada serão preservadas na saída e quais serão atenuadas.

Conceito de Resposta em Frequência

- Uma importante propriedade de circuitos lineares é o fato de que um sinal de entrada senoidal $v_i(t)$ produzirá na saída $v_o(t)$ um sinal também senoidal, preservando a frequência do sinal de entrada, mas modificando a amplitude e o ângulo de fase.

- O modo como um circuito linear modifica a amplitude e o ângulo de fase depende diretamente da frequência do sinal aplicado à entrada.

Conceito de Resposta em Frequência

- Uma importante propriedade de circuitos lineares é o fato de que um sinal de entrada senoidal $v_i(t)$ produzirá na saída $v_o(t)$ um sinal também senoidal, preservando a frequência do sinal de entrada, mas modificando a amplitude e o ângulo de fase.

- O modo como um circuito linear modifica a amplitude e o ângulo de fase depende diretamente da frequência do sinal aplicado à entrada.
- Para que seja possível determinar como um circuito linear responde a entradas senoidais de qualquer frequência ω, foi definida uma função complexa $H(j\omega)$, denominada **Resposta em Frequência**:

$$v_i(t) = A_0 \,\text{sen}\,(\omega t)$$
$$v_o(t) = |H(j\omega)| \cdot A_0 \,\text{sen}\,(\omega t + \Phi\,\{H(j\omega)\})$$

Conceito de Resposta em Frequência

- A Resposta em Frequência é a propriedade mais importante de um Filtro, pois é ela que indica quais serão as componentes de frequência do sinal de entrada $v_i(t)$ que serão preservadas na saída $v_o(t)$ e quais serão as rejeitadas.

Conceito de Resposta em Frequência

- A Resposta em Frequência é a propriedade mais importante de um Filtro, pois é ela que indica quais serão as componentes de frequência do sinal de entrada $v_i(t)$ que serão preservadas na saída $v_o(t)$ e quais serão as rejeitadas.

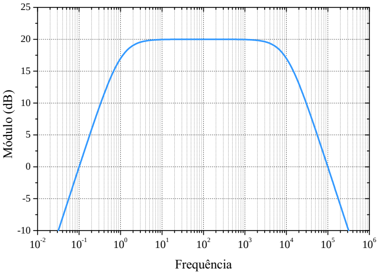
- Usando o Princípio da Superposição, característico de circuitos lineares, a Resposta em Frequência nos permite obter a resposta $v_o(t)$ de um circuito linear a qualquer sinal de entrada $v_i(t)$:

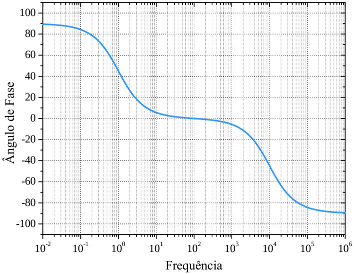
$$v_i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \operatorname{sen}(n\omega t)$$

$$v_o(t) = \sum_{n=1}^{\infty} |H(jn\omega)| \cdot A_n \operatorname{sen}(n\omega t + \Phi\{H(jn\omega)\})$$

Gráficos da Resposta em Frequência

- Como a Resposta em Frequência $H(j\omega)$ de um Circuito Linear é uma função complexa da frequência ω, ela é representada graficamente através de dois gráficos: o gráfico da **Resposta de Módulo** $|H(j\omega)|$, que indica como o circuito modifica a amplitude do sinal de entrada, e o gráfico da **Resposta de Fase** $\Phi\{H(j\omega)\}$, que indica como o circuito modifica o ângulo de fase do sinal de entrada.





- Para tornar mais adequada a visualização desses gráficos, normalmente usa-se uma escala logarítmica para o eixo das frequências e os ganhos de amplitude no gráfico de módulo são expressos em decibéis (dB):

$$A_V = 20\log|H(j\omega)| = 20\log\left|\frac{v_o}{v_i}(j\omega)\right|$$

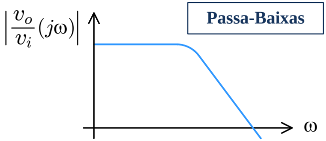
Classificação dos Tipos de Filtros

Os filtros eletrônicos são usualmente classificados de acordo com a faixa de frequências do sinal de entrada que será preservada na saída, ou seja, a faixa de frequências de interesse.

Classificação dos Tipos de Filtros

Os filtros eletrônicos são usualmente classificados de acordo com a faixa de frequências do sinal de entrada que será preservada na saída, ou seja, a faixa de frequências de interesse.

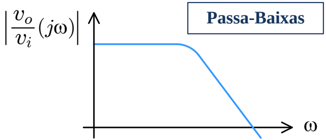
- **Passa-Baixas:** Filtro que preserva na saída apenas as componentes de baixa frequência do espectro do sinal de entrada, começando em $\omega = 0$ rad/s (Corrente Contínua - DC) e se estendendo até um limite máximo.



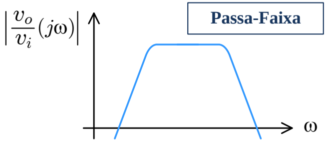
Classificação dos Tipos de Filtros

Os filtros eletrônicos são usualmente classificados de acordo com a faixa de frequências do sinal de entrada que será preservada na saída, ou seja, a faixa de frequências de interesse.

- **Passa-Baixas:** Filtro que preserva na saída apenas as componentes de baixa frequência do espectro do sinal de entrada, começando em $\omega = 0$ rad/s (Corrente Contínua - DC) e se estendendo até um limite máximo.



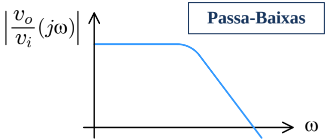
- **Passa-Faixa:** Filtro que preserva na saída apenas as componentes contidas em uma faixa de frequências do espectro do sinal de entrada.



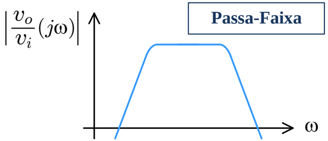
Classificação dos Tipos de Filtros

Os filtros eletrônicos são usualmente classificados de acordo com a faixa de frequências do sinal de entrada que será preservada na saída, ou seja, a faixa de frequências de interesse.

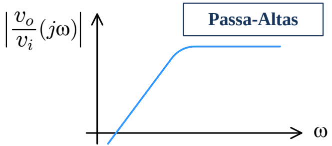
- **Passa-Baixas:** Filtro que preserva na saída apenas as componentes de baixa frequência do espectro do sinal de entrada, começando em $\omega = 0$ rad/s (Corrente Contínua - DC) e se estendendo até um limite máximo.



- **Passa-Faixa:** Filtro que preserva na saída apenas as componentes contidas em uma faixa de frequências do espectro do sinal de entrada.

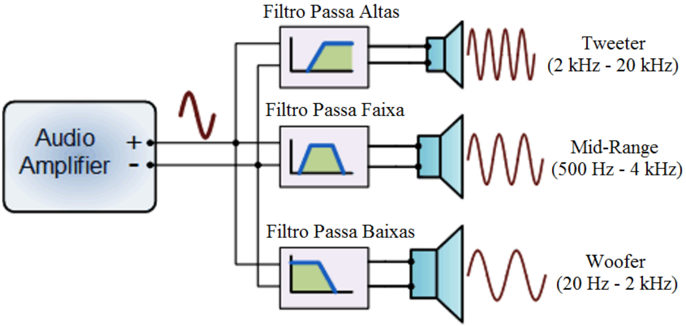


- **Passa-Altas:** Filtro que preserva na saída apenas as componentes de alta frequência do espectro do sinal de entrada, começando a partir de um limite mínimo de frequência.



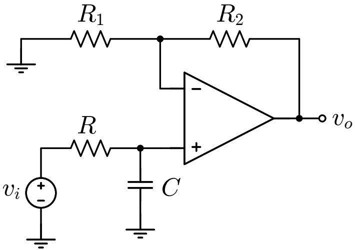
Classificação dos Tipos de Filtros

EXEMPLO: Seleção das três faixas de frequência de áudio para aplicação em um sistema de alto-falantes. Cada alto-falante em uma caixa de som (*Tweeter*, *Mid-Range* e *Woofer*) apresenta melhor desempenho na reprodução de sons em uma faixa específica de frequências. Combinando os três, obtém-se um desempenho bem melhor que o que seria obtido com apenas um único alto-falante.



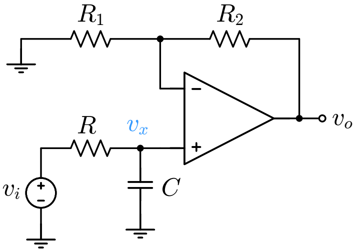
Filtro RC Ativo Passa-Baixas

- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Baixas:



Filtro RC Ativo Passa-Baixas

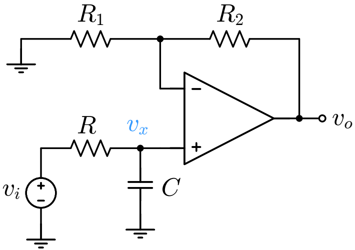
- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Baixas:



$$v_x = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \cdot v_i$$

Filtro RC Ativo Passa-Baixas

- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Baixas:

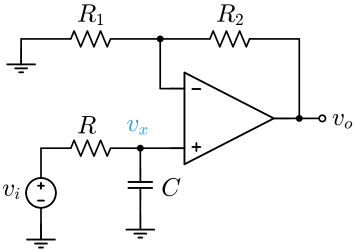


$$v_x = \frac{\dfrac{1}{j\omega C}}{R + \dfrac{1}{j\omega C}} \cdot v_i$$

$$v_x = \frac{1}{1 + j\omega\, RC} \cdot v_i$$

Filtro RC Ativo Passa-Baixas

- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Baixas:



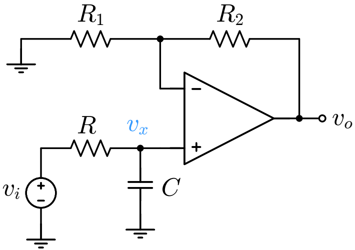
$$v_x = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \cdot v_i$$

$$v_x = \frac{1}{1 + j\omega RC} \cdot v_i$$

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

Filtro RC Ativo Passa-Baixas

- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Baixas:



$$v_x = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \cdot v_i$$

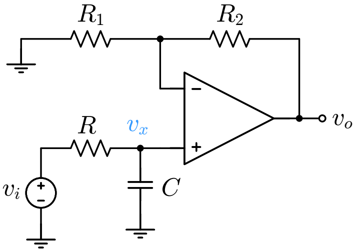
$$v_x = \frac{1}{1 + j\omega\, RC} \cdot v_i$$

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

$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{1}{1 + j\omega\, RC} \cdot v_i$$

Filtro RC Ativo Passa-Baixas

- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Baixas:



$$v_x = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \cdot v_i$$

$$v_x = \frac{1}{1 + j\omega\, RC} \cdot v_i$$

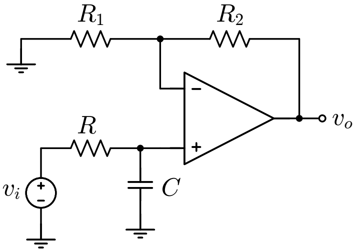
$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_x$$

$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{1}{1 + j\omega\, RC} \cdot v_i$$

$$\frac{v_o}{v_i} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{1}{1 + j\omega\, RC}$$

Filtro RC Ativo Passa-Baixas

- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Baixas:

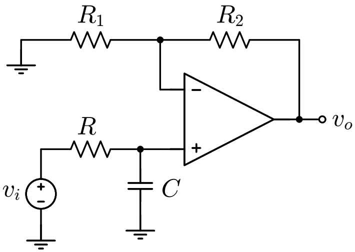


- Módulo da Resposta em Frequência:

$$\left|\frac{v_o}{v_i}\right| = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + (\omega\, RC)^2}}$$

Filtro RC Ativo Passa-Baixas

- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Baixas:



- Módulo da Resposta em Frequência:

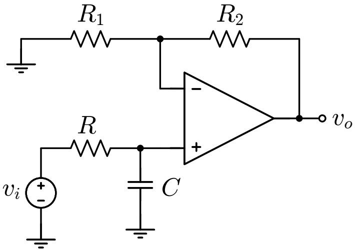
$$\left|\frac{v_o}{v_i}\right| = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + (\omega\, RC)^2}}$$

- Para frequências $\omega \ll \frac{1}{RC}$:

$$\left|\frac{v_o}{v_i}\right| \approx \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Filtro RC Ativo Passa-Baixas

- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Baixas:



- Módulo da Resposta em Frequência:

$$\left|\frac{v_o}{v_i}\right| = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + (\omega\, RC)^2}}$$

- Para frequências $\omega \ll \frac{1}{RC}$:

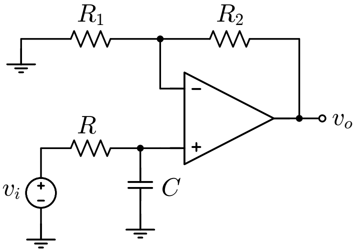
$$\left|\frac{v_o}{v_i}\right| \approx \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

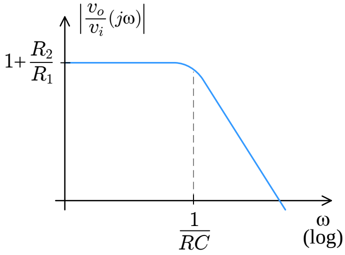
- Para frequências $\omega \gg \frac{1}{RC}$:

$$\left|\frac{v_o}{v_i}\right| \approx \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{1}{\omega\, RC}$$

Filtro RC Ativo Passa-Baixas

- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Baixas:





- Módulo da Resposta em Frequência:

$$\left|\frac{v_o}{v_i}\right| = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + (\omega\, RC)^2}}$$

- Para frequências $\omega \ll \frac{1}{RC}$:

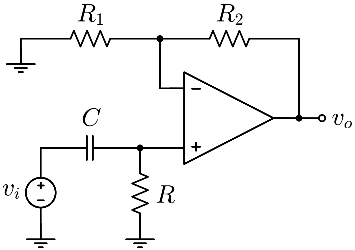
$$\left|\frac{v_o}{v_i}\right| \approx \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

- Para frequências $\omega \gg \frac{1}{RC}$:

$$\left|\frac{v_o}{v_i}\right| \approx \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{1}{\omega\, RC}$$

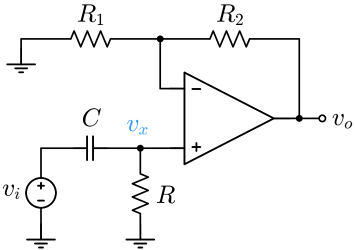
Filtro RC Ativo Passa-Altas

- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Altas:



Filtro RC Ativo Passa-Altas

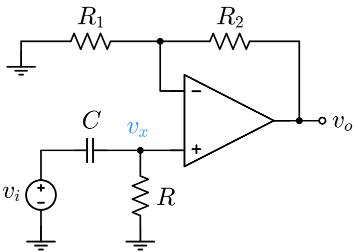
- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Altas:



$$v_x = \frac{R}{\frac{1}{j\omega C} + R} \cdot v_i$$

Filtro RC Ativo Passa-Altas

- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Altas:

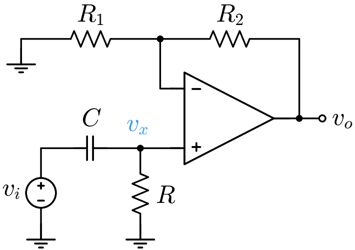


$$v_x = \frac{R}{\frac{1}{j\omega C} + R} \cdot v_i$$

$$v_x = \frac{j\omega\, RC}{1 + j\omega\, RC} \cdot v_i$$

Filtro RC Ativo Passa-Altas

- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Altas:



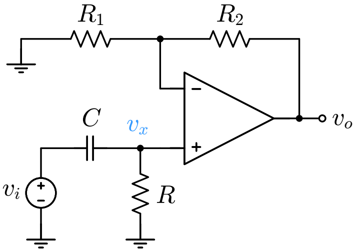
$$v_x = \frac{R}{\dfrac{1}{j\omega C} + R} \cdot v_i$$

$$v_x = \frac{j\omega\, RC}{1 + j\omega\, RC} \cdot v_i$$

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

Filtro RC Ativo Passa-Altas

- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Altas:



$$v_x = \frac{R}{\frac{1}{j\omega C} + R} \cdot v_i$$

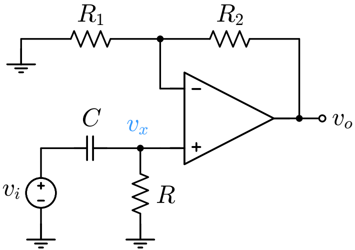
$$v_x = \frac{j\omega\, RC}{1 + j\omega\, RC} \cdot v_i$$

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

$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{j\omega\, RC}{1 + j\omega\, RC} \cdot v_i$$

Filtro RC Ativo Passa-Altas

- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Altas:



$$v_x = \frac{R}{\frac{1}{j\omega C} + R} \cdot v_i$$

$$v_x = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} \cdot v_i$$

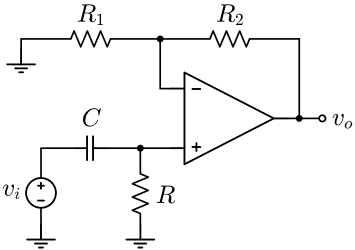
$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_x$$

$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} \cdot v_i$$

$$\frac{v_o}{v_i} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}$$

Filtro RC Ativo Passa-Altas

- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Altas:

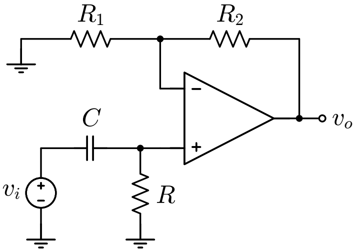


- Módulo da Resposta em Frequência:

$$\left|\frac{v_o}{v_i}\right| = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \sqrt{\frac{(\omega\, RC)^2}{1 + (\omega\, RC)^2}}$$

Filtro RC Ativo Passa-Altas

- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Altas:



- Módulo da Resposta em Frequência:

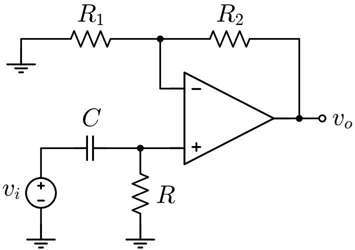
$$\left|\frac{v_o}{v_i}\right| = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \sqrt{\frac{(\omega\, RC)^2}{1 + (\omega\, RC)^2}}$$

- Para frequências $\omega \ll \frac{1}{RC}$:

$$\left|\frac{v_o}{v_i}\right| \approx \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \omega\, RC$$

Filtro RC Ativo Passa-Altas

- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Altas:



- Módulo da Resposta em Frequência:

$$\left|\frac{v_o}{v_i}\right| = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \sqrt{\frac{(\omega\, RC)^2}{1 + (\omega\, RC)^2}}$$

- Para frequências $\omega \ll \frac{1}{RC}$:

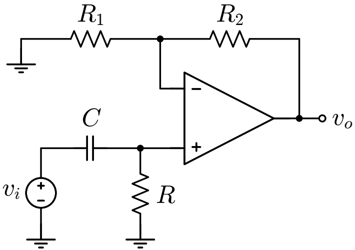
$$\left|\frac{v_o}{v_i}\right| \approx \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \omega\, RC$$

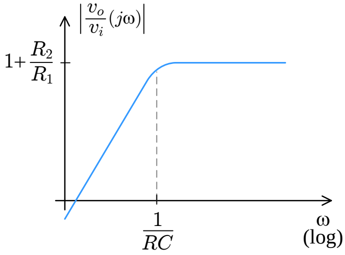
- Para frequências $\omega \gg \frac{1}{RC}$:

$$\left|\frac{v_o}{v_i}\right| \approx \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Filtro RC Ativo Passa-Altas

- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Altas:





- Módulo da Resposta em Frequência:

$$\left|\frac{v_o}{v_i}\right| = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \sqrt{\frac{(\omega\, RC)^2}{1 + (\omega\, RC)^2}}$$

- Para frequências $\omega \ll \frac{1}{RC}$:

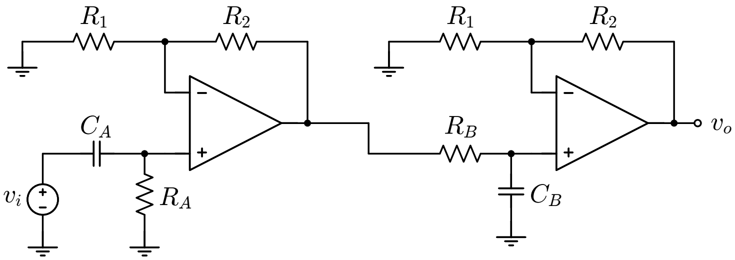
$$\left|\frac{v_o}{v_i}\right| \approx \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \omega\, RC$$

- Para frequências $\omega \gg \frac{1}{RC}$:

$$\left|\frac{v_o}{v_i}\right| \approx \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

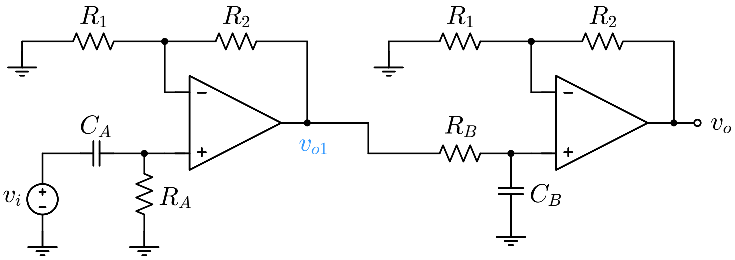
Filtro RC Ativo Passa-Faixa

- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Faixa construído a partir da cascata de um filtro passa-baixas e um passa-altas:



Filtro RC Ativo Passa-Faixa

- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Faixa construído a partir da cascata de um filtro passa-baixas e um passa-altas:

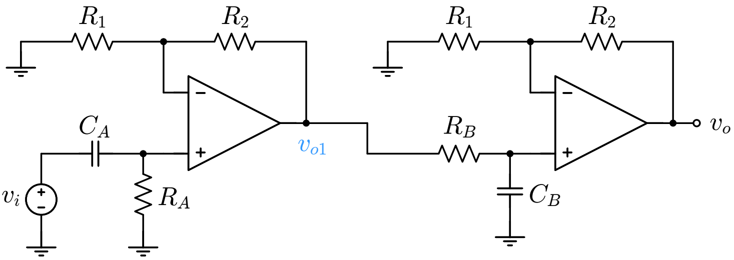


- Resposta em Frequência do filtro passa-faixa:

$$\frac{v_o}{v_i}(j\omega) = \frac{v_{o1}}{v_i}(j\omega) \cdot \frac{v_o}{v_{o1}}(j\omega)$$

Filtro RC Ativo Passa-Faixa

- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Faixa construído a partir da cascata de um filtro passa-baixas e um passa-altas:



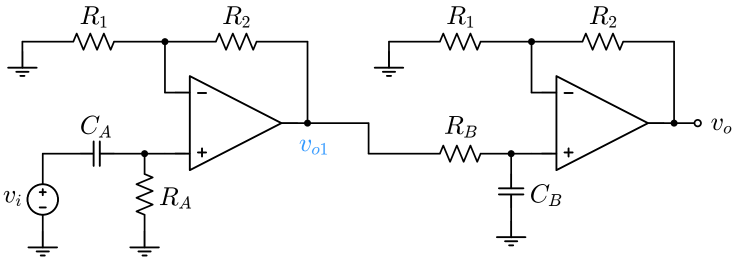
- Resposta em Frequência do filtro passa-faixa:

$$\frac{v_o}{v_i}(j\omega) = \frac{v_{o1}}{v_i}(j\omega) \cdot \frac{v_o}{v_{o1}}(j\omega)$$

$$\frac{v_o}{v_i}(j\omega) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{j\omega\, R_A\, C_A}{1 + j\omega\, R_A\, C_A} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{1 + j\omega\, R_B\, C_B}$$

Filtro RC Ativo Passa-Faixa

- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Faixa construído a partir da cascata de um filtro passa-baixas e um passa-altas:



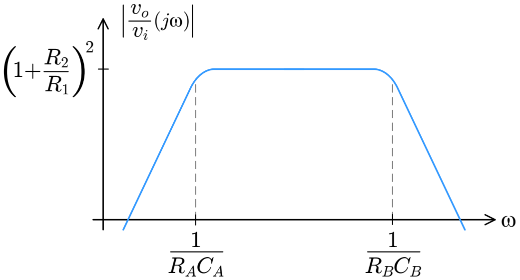
- Resposta em Frequência do filtro passa-faixa:

$$\frac{v_o}{v_i}(j\omega) = \frac{v_{o1}}{v_i}(j\omega) \cdot \frac{v_o}{v_{o1}}(j\omega)$$

$$\frac{v_o}{v_i}(j\omega) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 \cdot \frac{j\omega\, R_A\, C_A}{(1 + j\omega\, R_A\, C_A) \cdot (1 + j\omega\, R_B\, C_B)}$$

Filtro RC Ativo Passa-Faixa

- Exemplo de Filtro RC Ativo do tipo Passa-Faixa construído a partir da cascata de um filtro passa-baixas e um passa-altas:

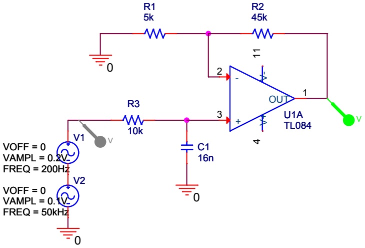


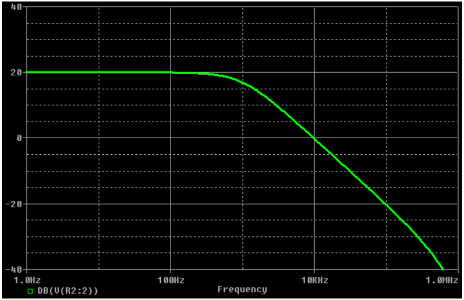
- Resposta em Frequência do filtro passa-faixa:

$$\frac{v_o}{v_i}(j\omega) = \frac{v_{o1}}{v_i}(j\omega) \cdot \frac{v_o}{v_{o1}}(j\omega)$$

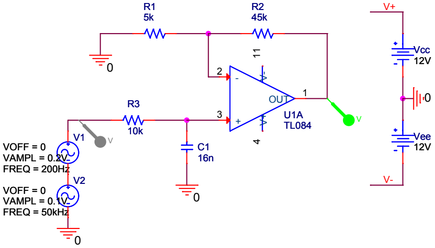
$$\frac{v_o}{v_i}(j\omega) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 \cdot \frac{j\omega\, R_A\, C_A}{(1 + j\omega\, R_A\, C_A) \cdot (1 + j\omega\, R_B\, C_B)}$$

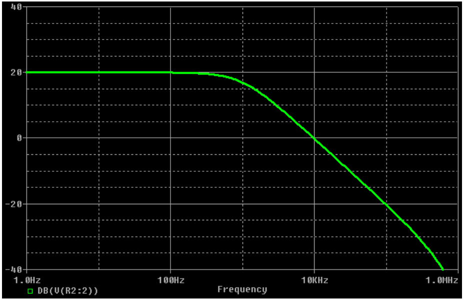
Simulação do Filtro Passa-Baixas





Simulação do Filtro Passa-Baixas





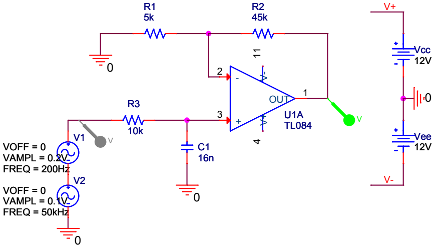
- Frequência de corte da banda passante da resposta em frequência:

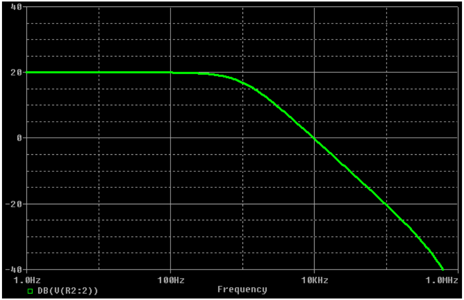
$$f_H = \frac{1}{2\pi\, RC} = \frac{1}{2\pi \times 10 \cdot 10^3 \times 16 \cdot 10^{-9}} = 1{,}0 \text{ kHz}$$

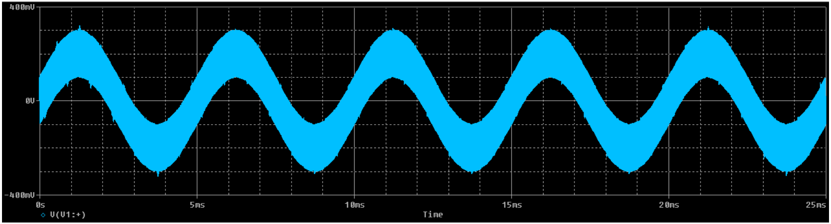
- Ganho na banda passante:

$$A_V = 20 \log \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 20 \log \left(1 + \frac{45}{5}\right) = 20 \text{ dB}$$

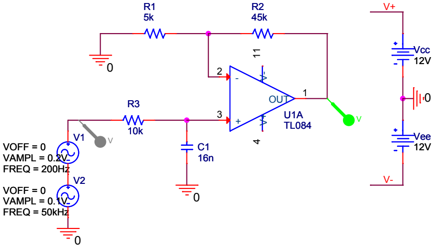
Simulação do Filtro Passa-Baixas

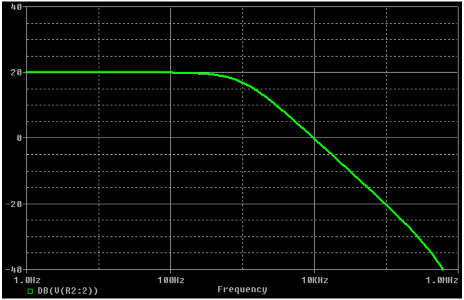






Simulação do Filtro Passa-Baixas





Agenda da Aula

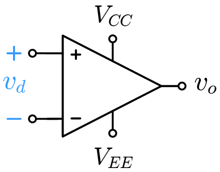
- O Amplificador Operacional Ideal
- Aplicações do Amplificador Operacional
- Filtros Ativos Analógicos
- **Comparadores**

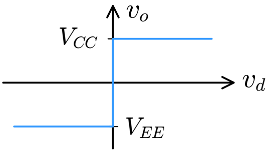
Amplificadores Operacionais como Comparadores

- **Comparador** é um bloco de circuito capaz de comparar duas tensões analógicas aplicadas na entrada e produz como resposta um determinado nível de tensão constante na saída que indica qual das duas tensões comparadas é a maior.

Amplificadores Operacionais como Comparadores

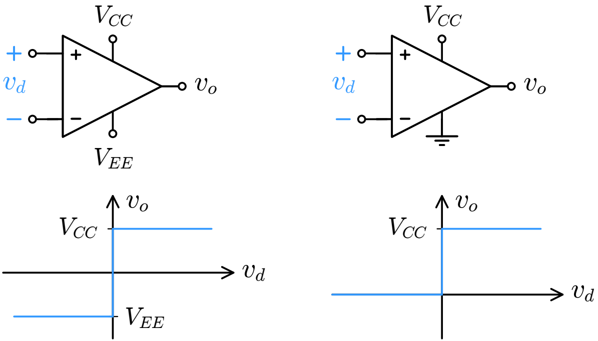
- **Comparador** é um bloco de circuito capaz de comparar duas tensões analógicas aplicadas na entrada e produz como resposta um determinado nível de tensão constante na saída que indica qual das duas tensões comparadas é a maior.
- O elevado ganho de tensão diferencial combinado com os limites de excursão de sinal na saída estabelecidos pelas fontes de polarização V_{CC} e V_{EE} permitem utilizar um amplificador operacional real como comparador:





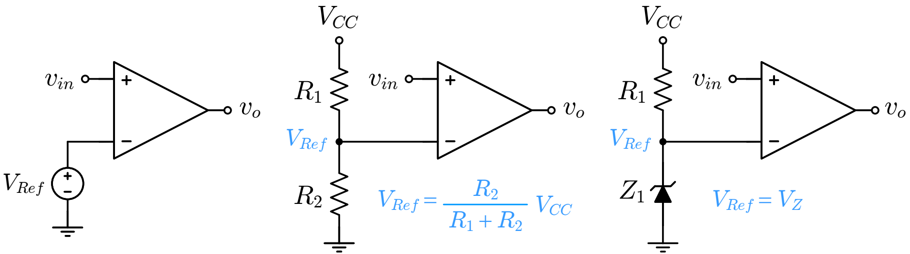
Amplificadores Operacionais como Comparadores

- **Comparador** é um bloco de circuito capaz de comparar duas tensões analógicas aplicadas na entrada e produz como resposta um determinado nível de tensão constante na saída que indica qual das duas tensões comparadas é a maior.
- O elevado ganho de tensão diferencial combinado com os limites de excursão de sinal na saída estabelecidos pelas fontes de polarização V_{CC} e V_{EE} permitem utilizar um amplificador operacional real como comparador:



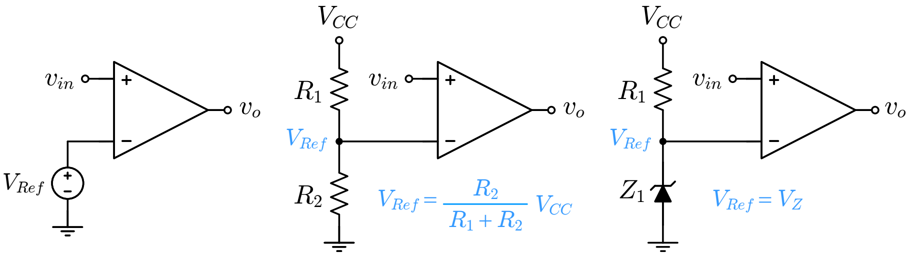
Amplificadores Operacionais como Comparadores

- Na maioria das aplicações práticas, os comparadores são utilizados para comparar uma tensão analógica v_{in} com uma tensão de referência V_{Ref}:



Amplificadores Operacionais como Comparadores

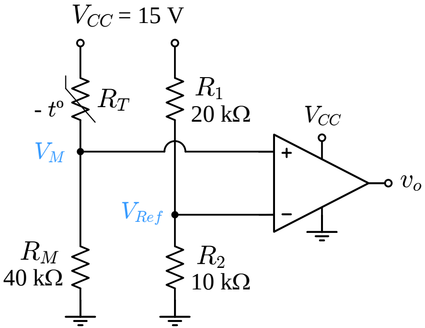
- Na maioria das aplicações práticas, os comparadores são utilizados para comparar uma tensão analógica v_{in} com uma tensão de referência V_{Ref}:

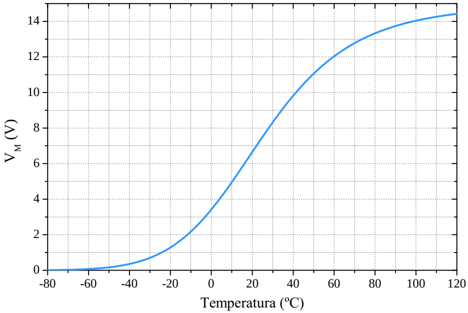


- Encontramos comparadores em diversos tipos de aplicação:
  - Instrumentação Eletrônica
  - Sistemas de Controle
  - Conversores Analógico/Digitais (DAC)

Amplificadores Operacionais como Comparadores

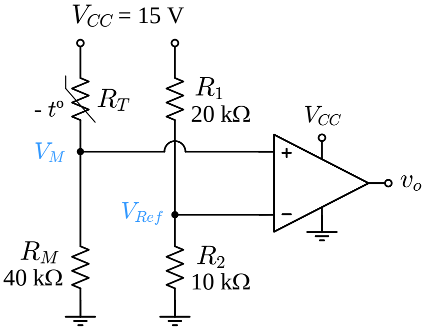
- Comparadores podem ser combinados com termistores para realizar medições de temperatura bastante simples, como em um termostato de refrigeração:

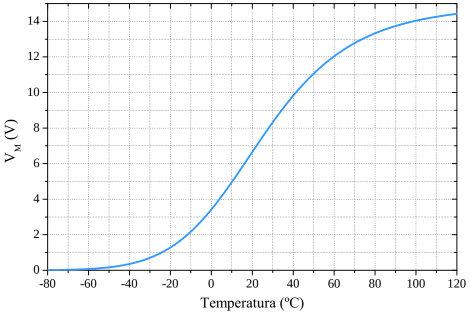


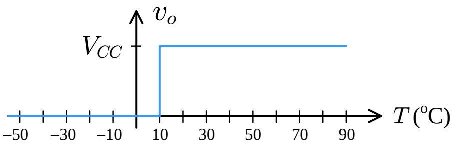


Amplificadores Operacionais como Comparadores

- Comparadores podem ser combinados com termistores para realizar medições de temperatura bastante simples, como em um termostato de refrigeração:

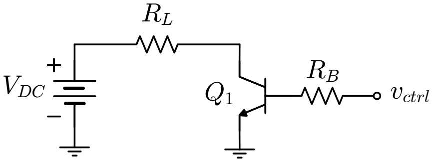






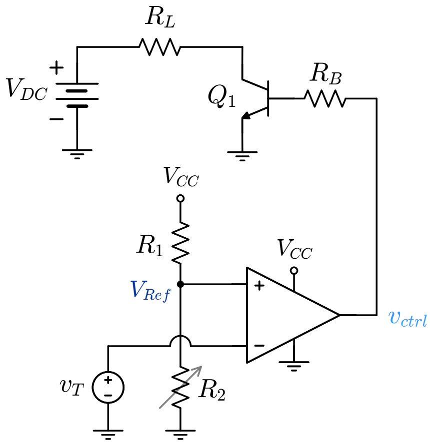
Amplificadores Operacionais como Comparadores

- Comparadores são elementos fundamentais em sistemas de controle por PWM (*Pulse Width Modulation*), ou Controle por Modulação de Largura de Pulso:



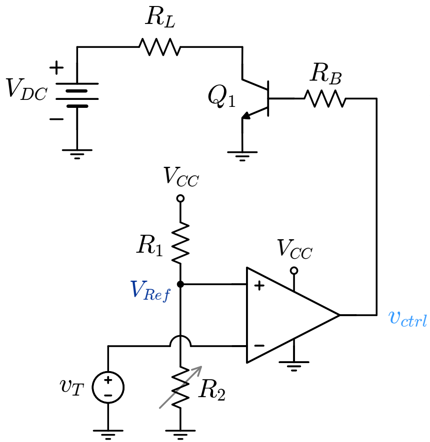
Amplificadores Operacionais como Comparadores

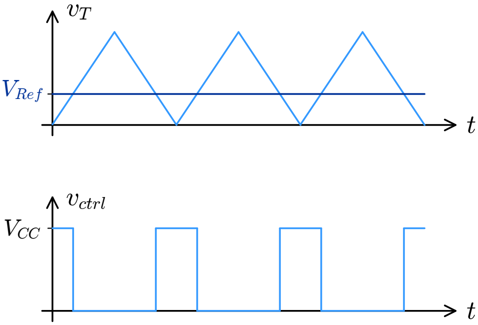
- Comparadores são elementos fundamentais em sistemas de controle por PWM (*Pulse Width Modulation*), ou Controle por Modulação de Largura de Pulso:



Amplificadores Operacionais como Comparadores

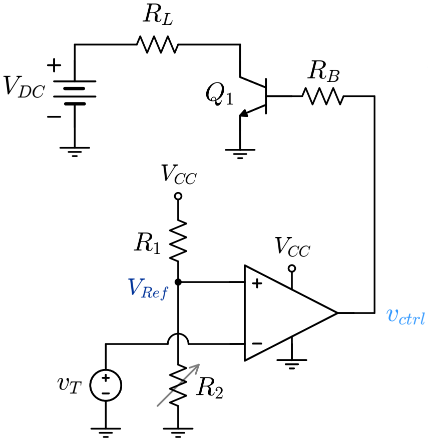
- Comparadores são elementos fundamentais em sistemas de controle por PWM (*Pulse Width Modulation*), ou Controle por Modulação de Largura de Pulso:

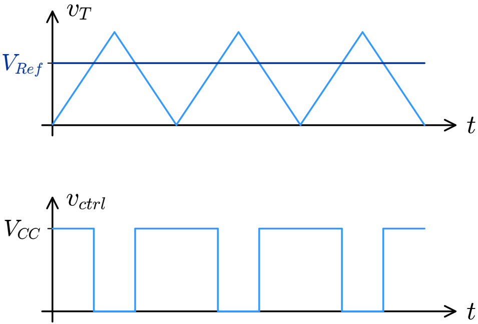




Amplificadores Operacionais como Comparadores

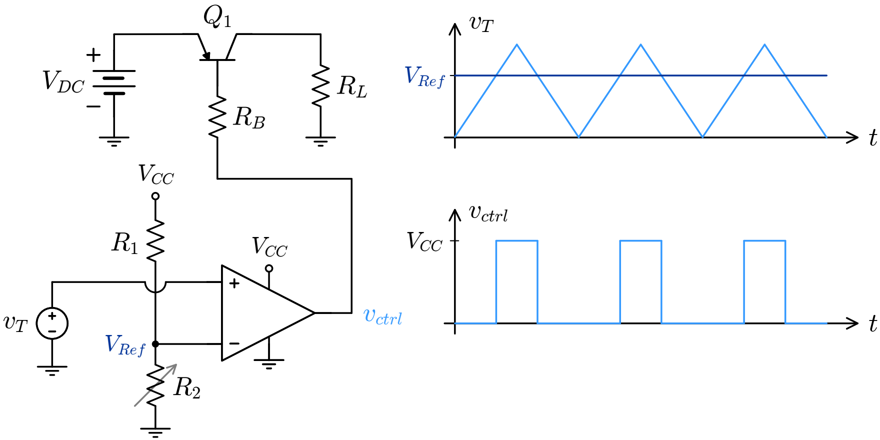
- Comparadores são elementos fundamentais em sistemas de controle por PWM (*Pulse Width Modulation*), ou Controle por Modulação de Largura de Pulso:





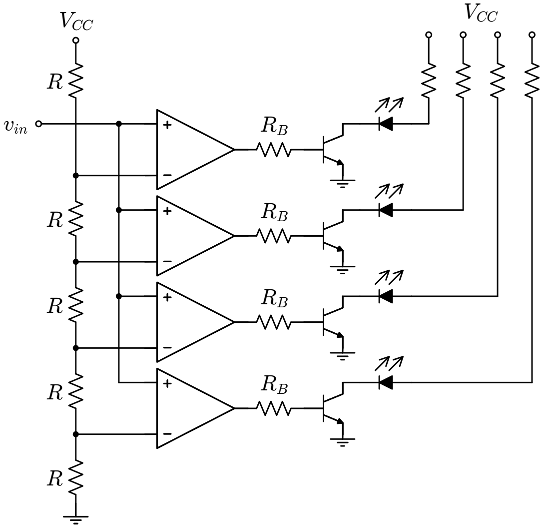
Amplificadores Operacionais como Comparadores

- Comparadores são elementos fundamentais em sistemas de controle por PWM (*Pulse Width Modulation*), ou Controle por Modulação de Largura de Pulso:



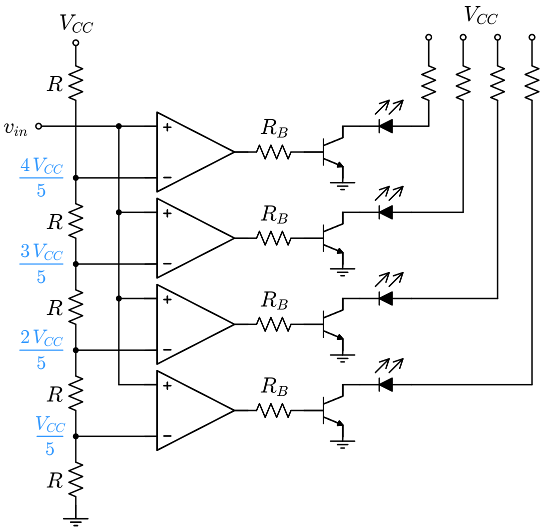
Amplificadores Operacionais como Comparadores

- Exemplo de detector de nível de tensão com comparadores:



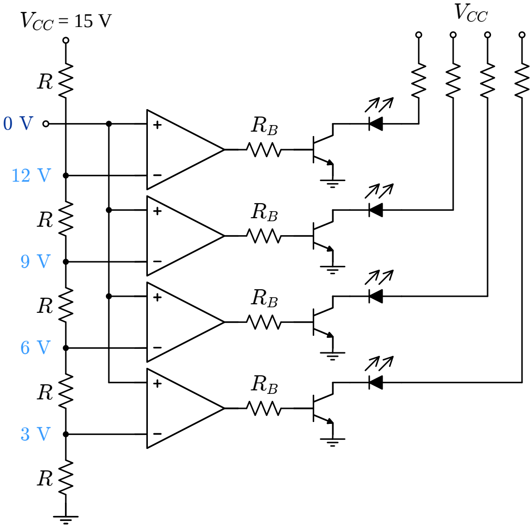
Amplificadores Operacionais como Comparadores

- Exemplo de detector de nível de tensão com comparadores:



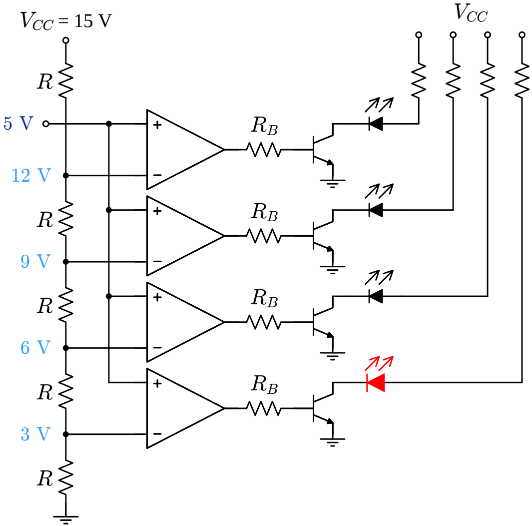
Amplificadores Operacionais como Comparadores

- Exemplo de detector de nível de tensão com comparadores:



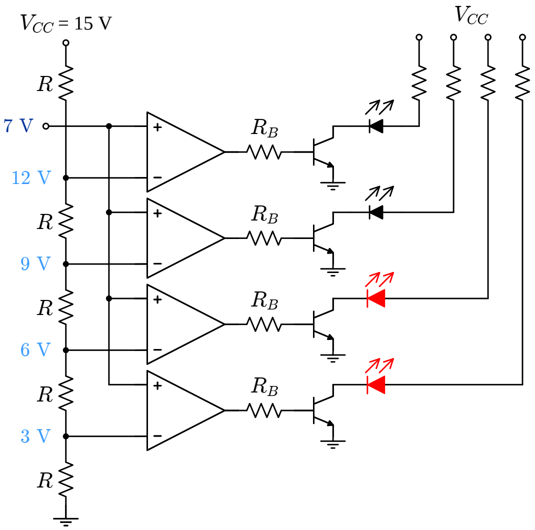
Amplificadores Operacionais como Comparadores

- Exemplo de detector de nível de tensão com comparadores:



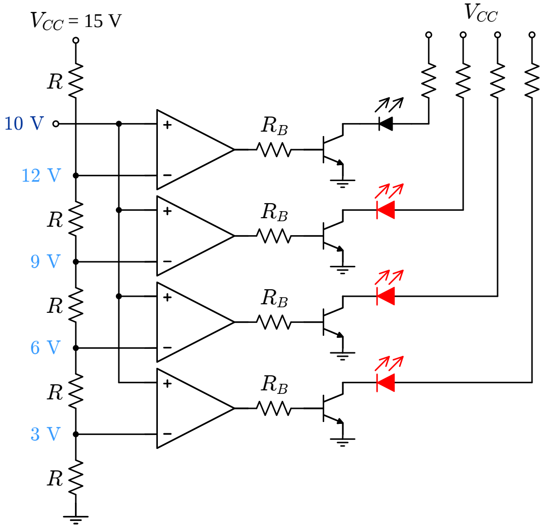
Amplificadores Operacionais como Comparadores

- Exemplo de detector de nível de tensão com comparadores:



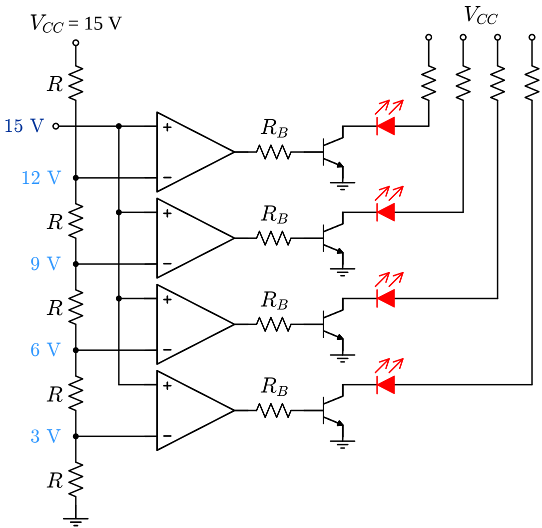
Amplificadores Operacionais como Comparadores

- Exemplo de detector de nível de tensão com comparadores:



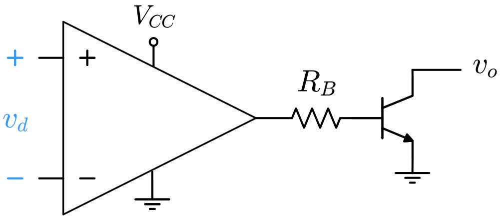
Amplificadores Operacionais como Comparadores

- Exemplo de detector de nível de tensão com comparadores:



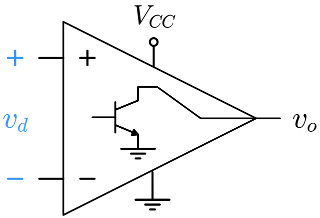
Comparadores com Saída em Coletor Aberto

- A grande maioria dos circuitos comparadores comerciais engloba o transistor de saída dentro do próprio circuito do comparador, disponibilizando uma saída em coletor aberto.



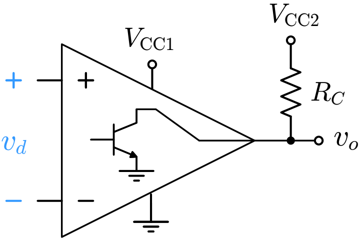
Comparadores com Saída em Coletor Aberto

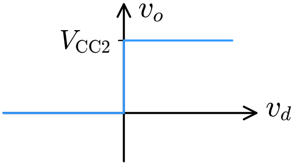
- A grande maioria dos circuitos comparadores comerciais engloba o transistor de saída dentro do próprio circuito do comparador, disponibilizando uma saída em coletor aberto.



Comparadores com Saída em Coletor Aberto

- A grande maioria dos circuitos comparadores comerciais engloba o transistor de saída dentro do próprio circuito do comparador, disponibilizando uma saída em coletor aberto.
- Em geral, esse tipo de comparador requer um resistor de pull-up na saída para produzir os níveis de tensão alto ou baixo. Dessa forma, é possível produzir um nível alto de tensão na saída diferente da alimentação V_{CC} do comparador.



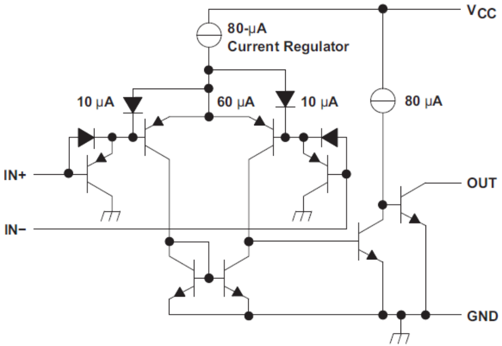


Comparadores com Saída em Coletor Aberto

TEXAS INSTRUMENTS

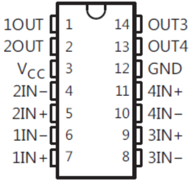
LM139, LM239, LM339, LM139A
LM239A, LM339A, LM2901, LM2901AV, LM2901V

LM339, LM239, LM139, LM2901 Quad Differential Comparators



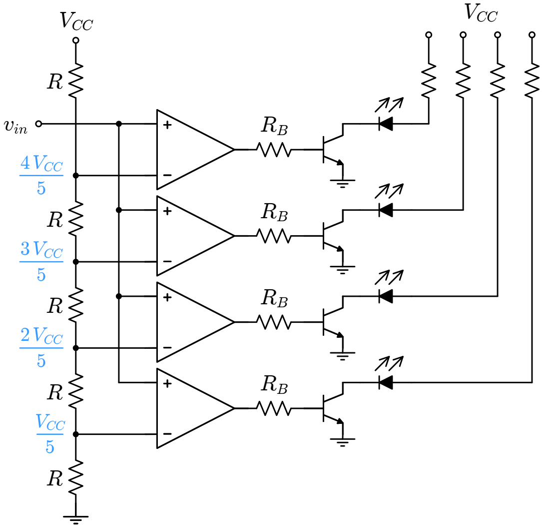
Pin Configuration and Functions

Top View



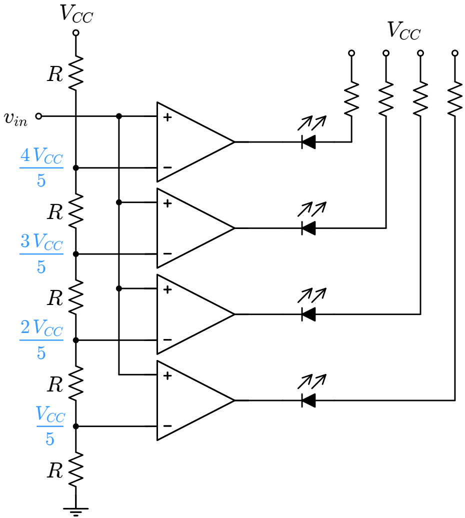
Comparadores com Saída em Coletor Aberto

- Usando comparadores com coletor aberto no detector de nível de tensão:



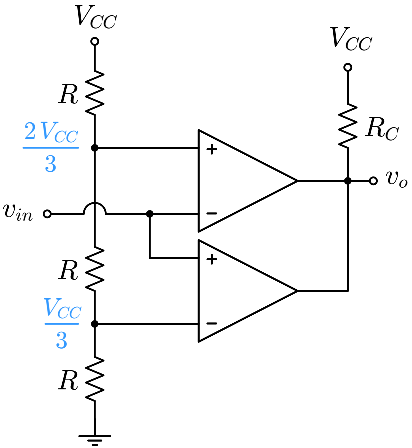
Comparadores com Saída em Coletor Aberto

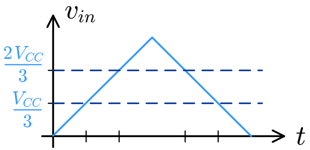
- Usando comparadores com coletor aberto no detector de nível de tensão:



Comparadores Multiníveis

- Uma vantagem dos comparadores com saída em coletor aberto é a possibilidade de se construir comparadores multiníveis:





Comparadores Multiníveis

- Uma vantagem dos comparadores com saída em coletor aberto é a possibilidade de se construir comparadores multiníveis: