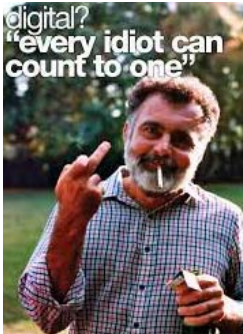


Sinais e Sistemas Electrónicos



Capítulo 6: Amplificadores operacionais

(parte 1)



Ernesto Martins
evm@ua.pt
DETI (gab. 4.2.38)
Universidade de Aveiro



Sinais e Sistemas Electrónicos – 2023/2024

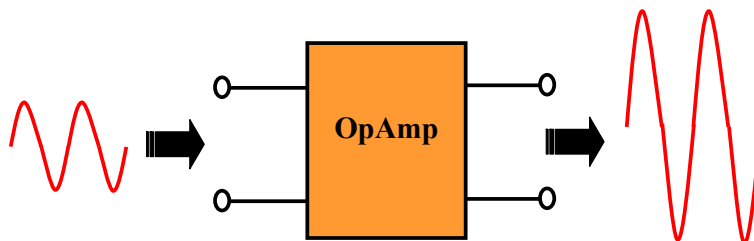
Sumário

- **Amplificador operacional: fundamentos;**
- **Modelo equivalente simplificado;**
- **Realimentação: configuração inversora;**
- **Calculo o ganho;**
- **Modelo ideal do OpAmp;**
- **Noção de curto-circuito virtual na entrada;**
- **Configuração não-inversora;**
- **Limites do modelo ideal.**

Fundamentos e modelo simplificado

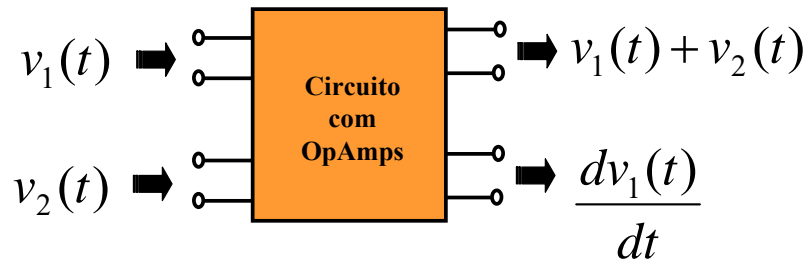
Amplificador Operacional ou *OpAmp*

Amplificador – Porque transforma (*amplifica*) um sinal eléctrico (tensão) de pequeno valor, numa réplica de maior valor.



Amplificador Operacional ou *OpAmp*

Operacional – Porque é usado em circuitos que realizam *operações* matemáticas (soma, multiplicação, derivação, etc.) em um ou mais sinais eléctricos.



Como se apresenta fisicamente?



K2-W (1953) primeiro OpAmp modular (alimentado a 600V)

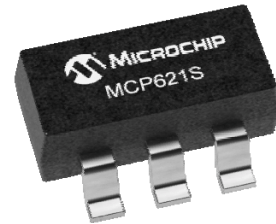
μ A709 (1965)

Segundo OpAmp monolítico da história. Primeiro a gozar de grande sucesso comercial.

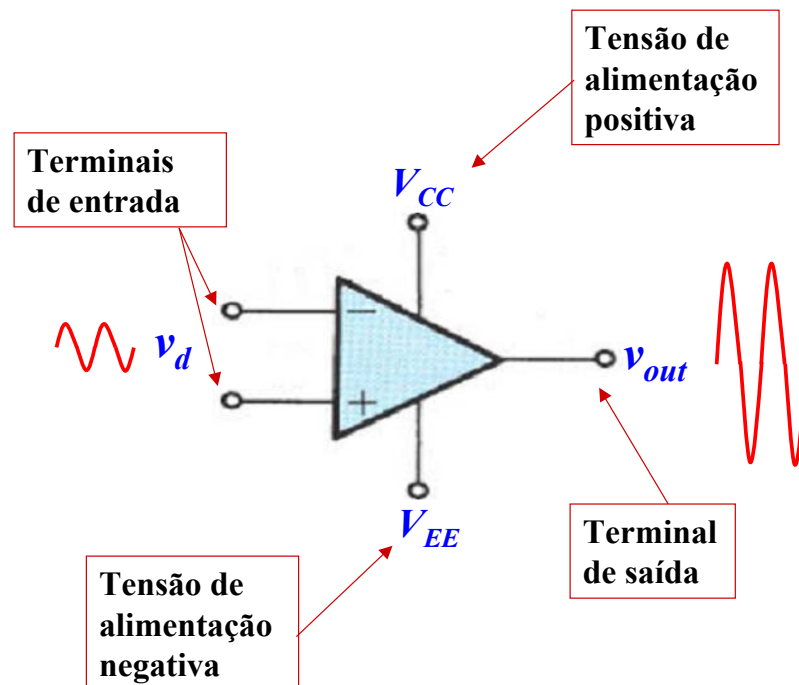


Como se apresenta fisicamente?

OpAmps modernos

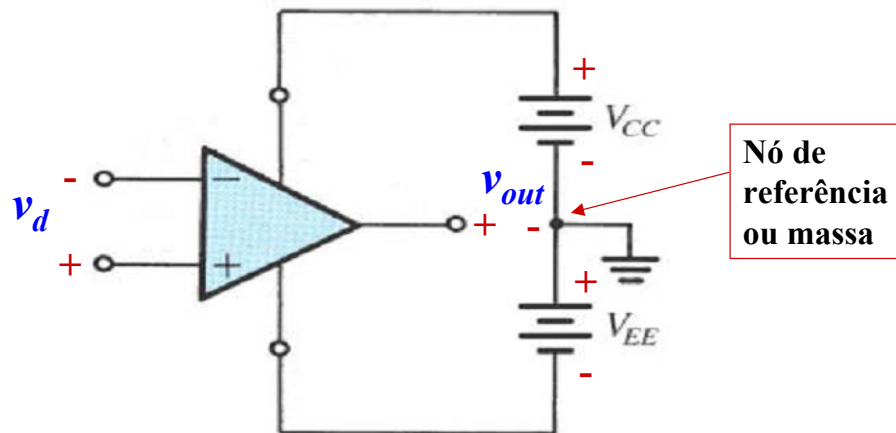


Simbolo e terminais



Sinais de entrada e saída

- O OpAmp amplifica a tensão v_d aplicada entre as duas entradas (+) e (-);
- A tensão de saída, v_{out} , é medida em relação ao ponto comum das duas tensões de alimentação – o **nó de referência** ou massa.



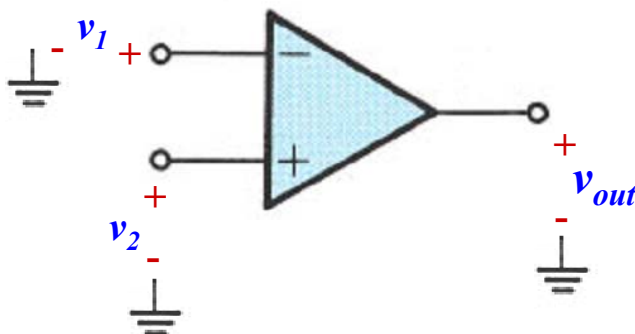
E. Martins, DETI Universidade de Aveiro

6.1-9

Ganho do OpAmp

- Para simplificar, é costume omitir-se as ligações de alimentação;
- V_d é a chamada **tensão diferencial** de entrada do OpAmp:

$$v_d = v_2 - v_1$$



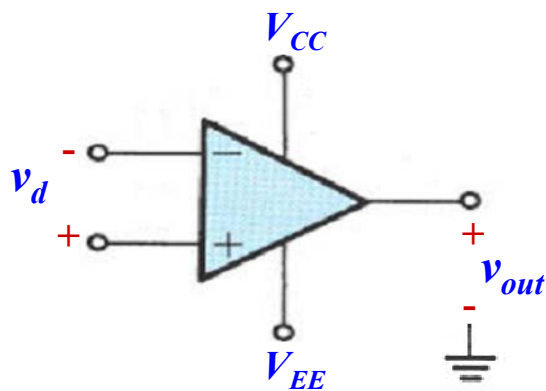
$$v_{out} = A(v_2 - v_1)$$

Ganho do OpAmp

E. Martins, DETI Universidade de Aveiro

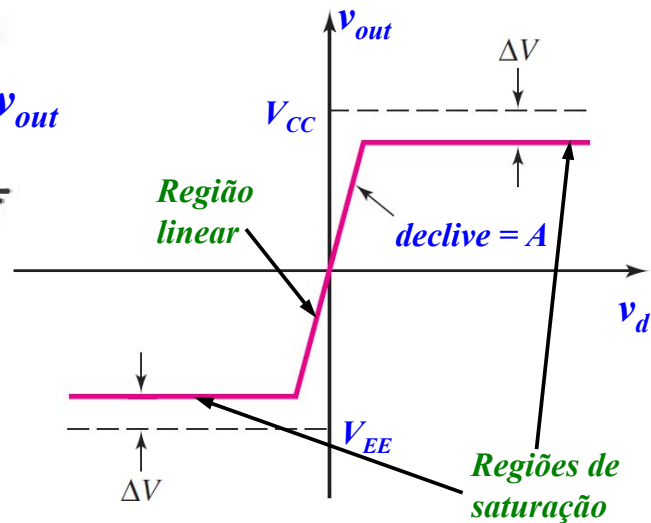
6.1-10

Característica entrada/saída do OpAmp



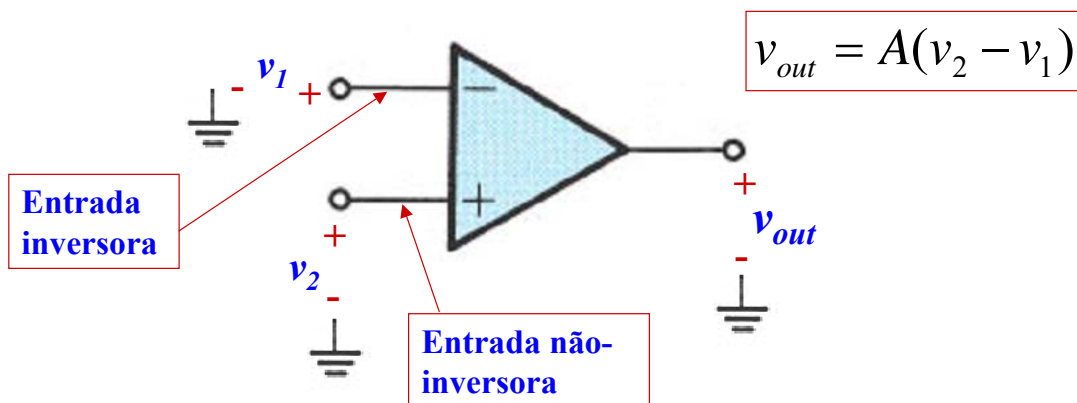
- V_{CC} e V_{EE} são **15** e **-15V** no máximo;
- A (ganho) pode ser da ordem de **10^6** .

- v_{out} é limitado;
- ΔV pode variar entre 0 e $\sim 2V$.

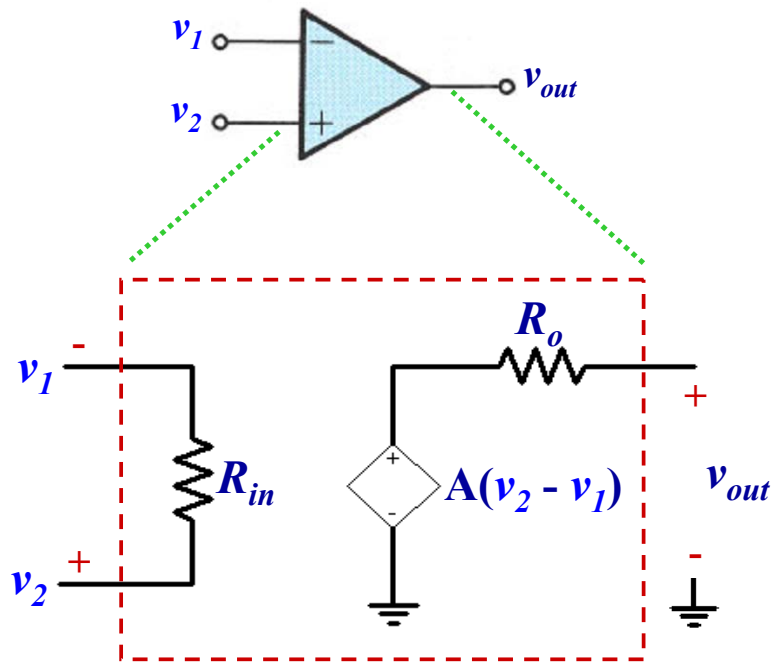


Entradas inversora e não-inversora

- Entrada **inversora**: marcada com (-) \Rightarrow Porque a tensão v_1 aparece na equação de v_{out} com o sinal (-): se v_1 aumentar v_{out} diminui;
- Entrada **não inversora**: marcada com (+) \Rightarrow Porque a tensão v_2 aparece na equação de v_{out} com o sinal (+): se v_2 aumentar v_{out} aumenta.



Modelo equivalente do OpAmp



- R_{in} – resistência de entrada;
- R_o – resistência de saída;
- A – ganho em tensão.

NOTA: Modelo só é válido se o OpAmp estiver a funcionar na região linear!

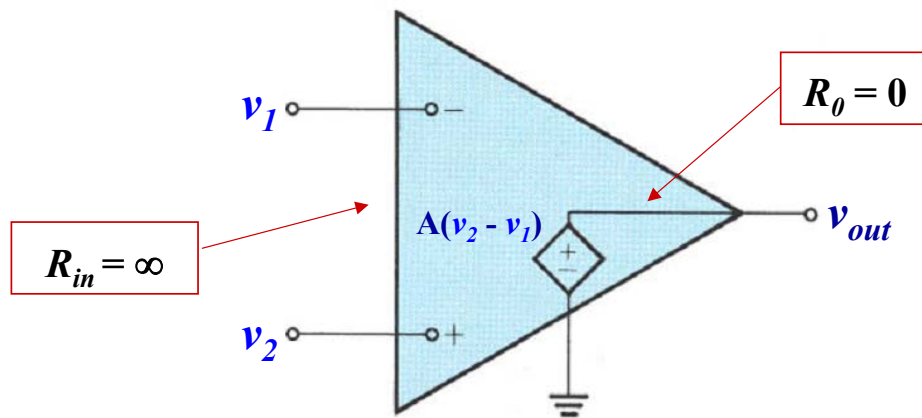
OpAmp – valores típicos

A – ganho em tensão, R_{in} – resistência de entrada; R_o – resistência de saída.

Part Number	$\mu A741$	LM324	LF411	AD549K
Description	General purpose	Low-power quad	Low-offset, low-drift JFET input	Ultralow input bias current
Open loop gain A	2×10^5 V/V	10^5 V/V	2×10^5 V/V	10^6 V/V
Input resistance	2 M Ω	*	1 T Ω	10 T Ω
Output resistance	75 Ω	*	~ 1 Ω	~ 15 Ω

Modelo simplificado do OpAmp

- Em geral R_{in} é muito elevado e R_o é muito pequeno comparado com os valores das resistências usadas nos circuitos;
- Pelo que, na prática, adopta-se um modelo mais simples para o OpAmp:



Realimentação

OpAmp e *feedback*

- Mas por que razão são os OpAmps fabricados com ganhos tão elevado?

R: Para serem usados em circuitos com **realimentação (feedback) negativa?**

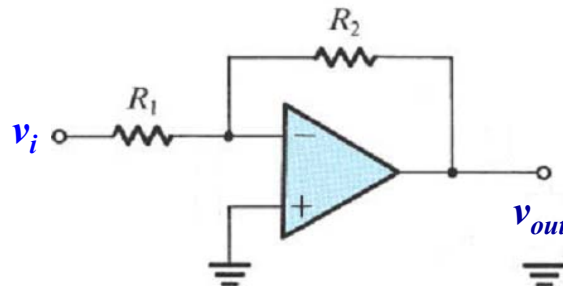
- Com realimentação negativa os circuitos resultantes não têm um ganho tão elevado, mas passam a gozar de vários benefícios:

- Ganho depende apenas de componentes exteriores ao OpAmp;
- Melhor linearidade (menor distorção);
- Maior largura de banda;
- Melhores características de resistência de entrada e saída.

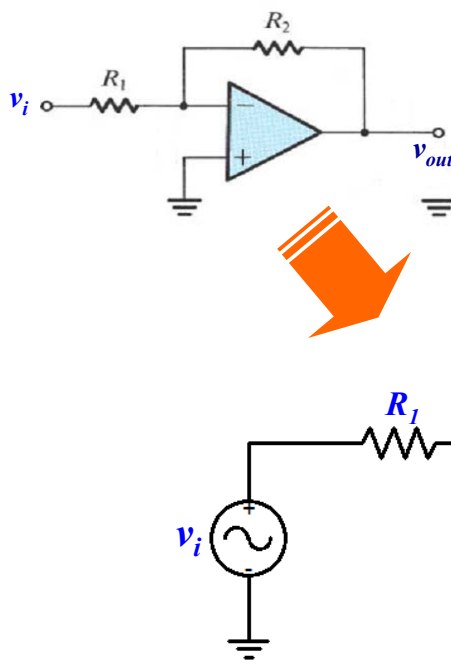
Configuração inversora

Configuração inversora do OpAmp

- Utiliza duas resistências numa configuração de **realimentação negativa** (ou *feedback* negativo);
- A configuração chama-se **inversora** porque quando a tensão de entrada, v_i , aumenta a tensão de saída, v_{out} , diminui.



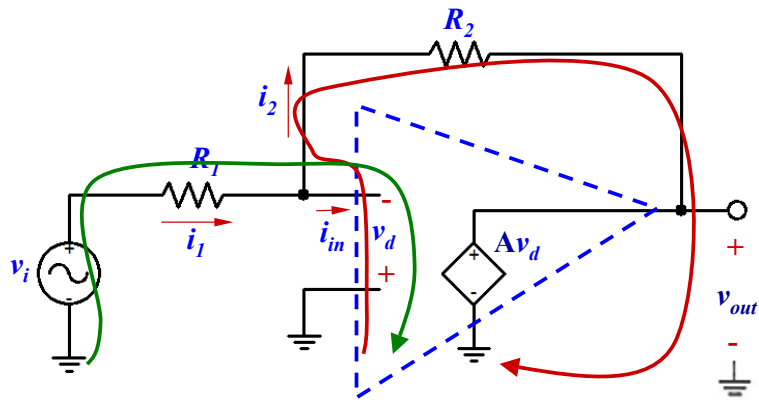
Configuração inversora do OpAmp



Para analisar o circuito
substituímos o OpAmp pelo
modelo equivalente

Configuração inversora do OpAmp

- Queremos obter o **ganho do circuito**, ou seja, uma relação matemática entre v_{out} e v_i .



- Loop de entrada (a verde): $-v_i + R_1 i_1 - v_d = 0$
- Loop de saída (a vermelho): $v_d + R_2 i_2 + v_{out} = 0$

Configuração inversora do OpAmp

- Sabemos que

$$i_{in} = 0 \Rightarrow i_2 = i_1$$

$$v_{out} = A v_d$$

- Substituindo nas equações anteriores:

$$\begin{cases} -v_i + R_1 i_1 - \frac{v_{out}}{A} = 0 \\ \frac{v_{out}}{A} + R_2 i_1 + v_{out} = 0 \end{cases}$$

- Eliminando i_1 , obtemos:

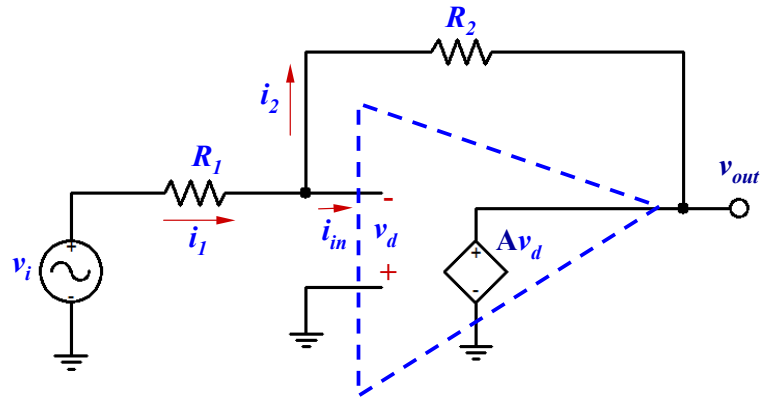
$$v_{out} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \frac{1}{A}} v_i$$

Configuração inversora do OpAmp

- À razão v_{out} / v_i chamamos **ganho em malha fechada**, ou apenas **ganho** do circuito.

$$G \equiv \frac{v_{out}}{v_i}$$

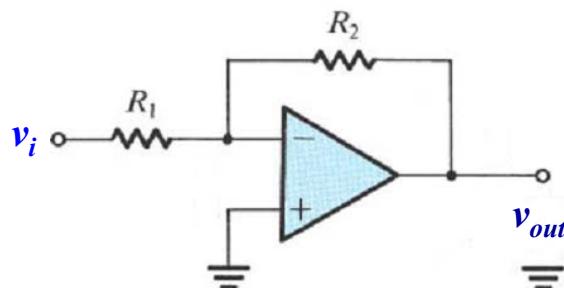
$$G = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_2}{R_1} + 1\right) \frac{1}{A}}$$



- Para os valores tipicamente muito elevados de A a equação do ganho reduz-se a

$$G = -\frac{R_2}{R_1}$$

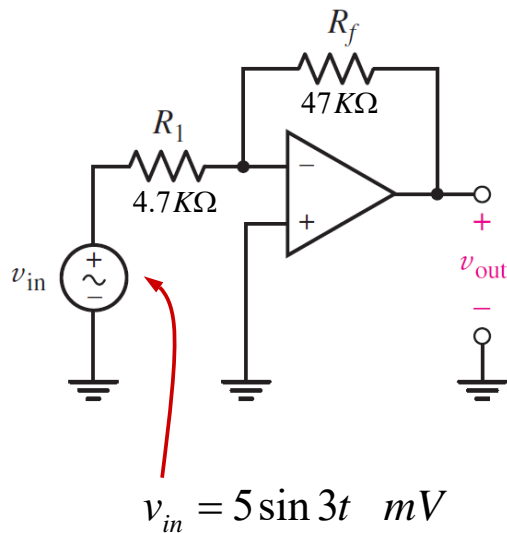
Configuração inversora do OpAmp



$$G \equiv \frac{v_{out}}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

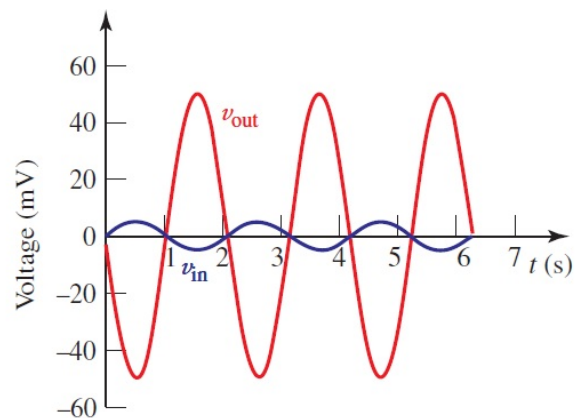
- Este é um **resultado notável** dos circuitos com feedback negativo em geral, e dos OpAmps em particular:
 - O Ganho **depende apenas do valor** de **resistências exteriores** ao OpAmp;
 - O valor do ganho em tensão do OpAmp, A , **não é relevante** desde que seja suficientemente elevado;
- O sinal $(-)$ no ganho indica que há inversão da entrada para a saída.

Configuração inversora - exemplo



$$G = -\frac{R_f}{R_1} = -\frac{47}{4.7} = -10$$

$$v_{out} = -50 \sin 3t \text{ mV}$$



Região linear da configuração inversora

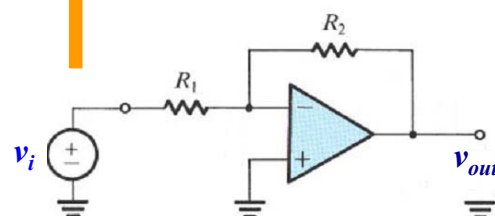
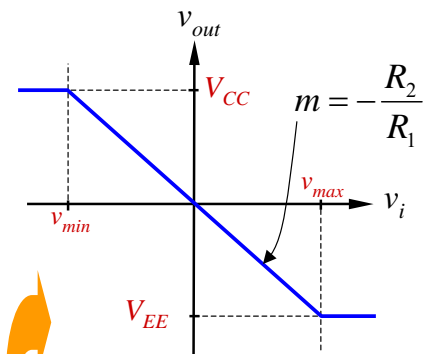
- Para que o OpAmp opere na região linear, o valor de v_i tem de se situar entre v_{min} e v_{max} .

- Substituindo $v_{out} = -\frac{R_2}{R_1} v_i$

em $V_{EE} < v_{out} < V_{CC}$

obtém-se:

$$-\frac{R_1}{R_2} V_{CC} < v_i < -\frac{R_1}{R_2} V_{EE}$$



- Assumiui-se aqui que os limites de v_{out} são as tensões de alimentação, o que nem sempre é o caso.

Modelo ideal do OpAmp

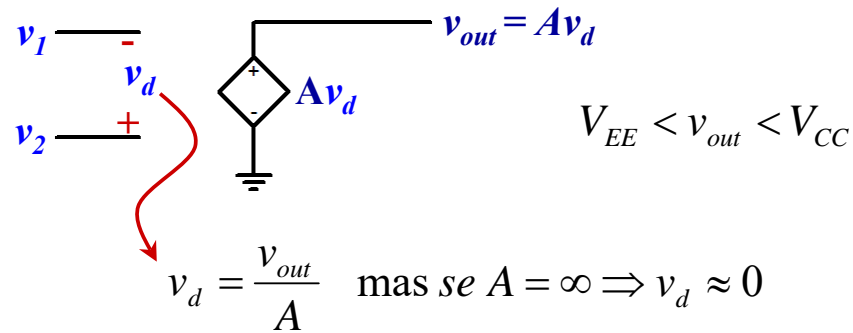
OpAmp ideal

- A análise de circuitos com OpAmps é muito mais simples se considerarmos o ganho em tensão do OpAmp infinito: $A = \infty$. Adicionando este pressuposto ao modelo simplificado do OpAmp, obtemos:

Modelo do OpAmp ideal

- $R_{in} = \infty$;
- Correntes nas entradas (+) e (-) do OpAmp são nulas;
- $R_o = 0$;
- $A = \infty$

Curto-circuito virtual no OpAmp



- Como v_{out} é uma tensão de valor compreendido entre as tensões de alimentação do OpAmp (e.g. -15 e $+15V$) e A é muito elevado, então v_d é forçosamente **quase nulo**:

⇒ Podemos então admitir que existe um **curto-circuito (virtual)** entre as entradas (-) e (+) do OpAmp.

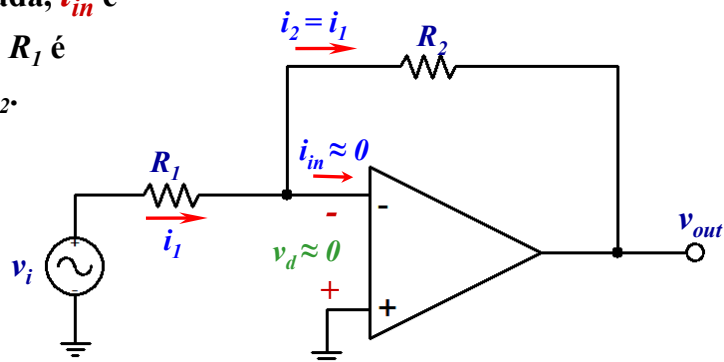
- Este curto-circuito virtual só existe se o amplificador estiver a funcionar na região linear (se não estiver saturado, ver pg. 6.1-11).

Análise da configuração inversora usando o modelo do OpAmp ideal

- A análise deste circuito torna-se muito fácil se tivermos em mente que:

1) A tensão diferencial de entrada, v_d é nula \Rightarrow a corrente i_1 depende apenas de v_i ;

2) A corrente de entrada, i_{in} é zero \Rightarrow a corrente em R_1 é igual à corrente em R_2 .



Análise da configuração inversora usando o modelo do OpAmp ideal

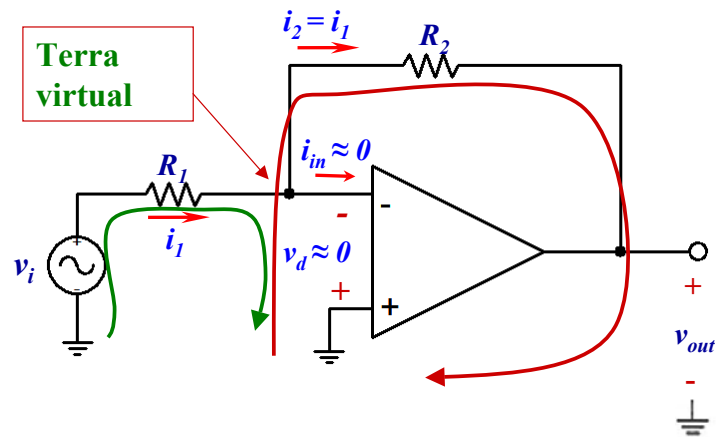
- As equações dos loops de entrada e de saída são agora:

$$-v_i + R_1 i_1 - 0 = 0$$

$$0 + R_2 i_1 + v_{out} = 0$$

- De onde se tira

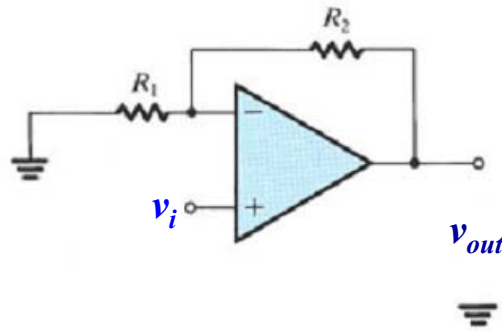
$$\frac{v_{out}}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$



- Usando o modelo do OpAmp ideal conseguimos portanto chegar ao mesmo resultado de uma forma mais simples.

Configuração não inversora

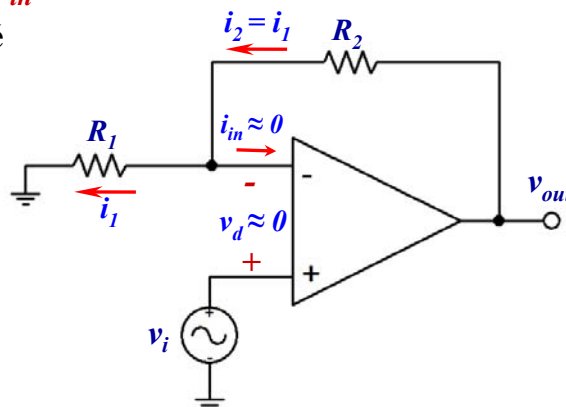
Configuração não-inversora do OpAmp



- Utiliza também duas resistências numa configuração de **realimentação negativa**;
- ... mas aqui o ganho **G** é positivo, razão porque a configuração se chama de não-inversora – quando a tensão de entrada, **v_i** , aumenta, a tensão de saída, **v_{out}** também aumenta.

Análise da configuração não-inversora

- É feita de forma idêntica à da configuração inversora:
 - 1) A tensão diferencial de entrada, **v_d** é nula \Rightarrow a corrente **i_1** depende apenas de **v_i** ;
 - 2) A corrente de entrada, **i_{in}** é zero \Rightarrow a corrente em **R_1** é igual à corrente em **R_2** .



Análise da configuração não-inversora

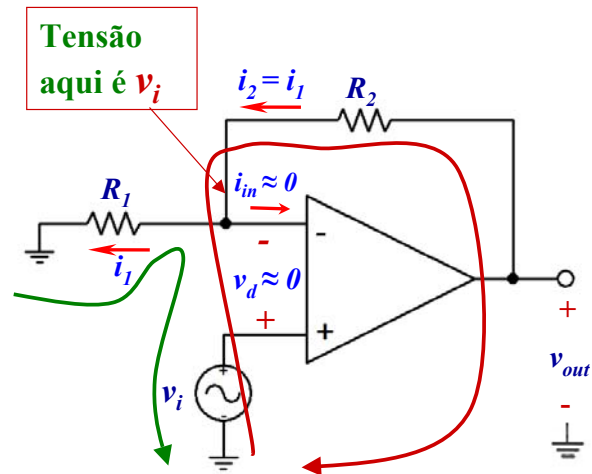
- As equações dos loops de entrada e de saída são agora:

$$-R_1 i_1 + v_i = 0$$

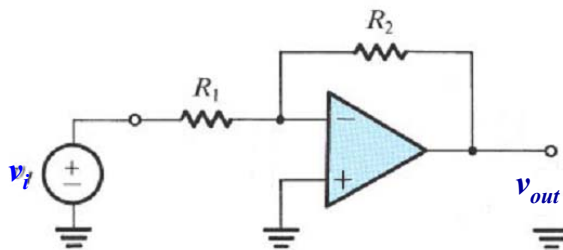
$$-v_i - R_2 i_1 + v_{out} = 0$$

- Eliminando i_1 nas equações obtemos

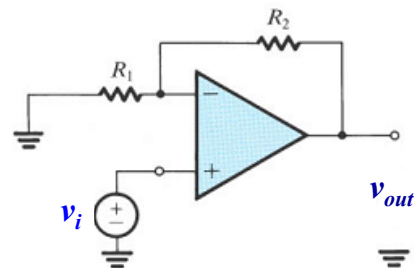
$$G \equiv \frac{v_{out}}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



Conclusão: configurações inversora e não-inversora



Inversora: $\frac{v_{out}}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$



Não-inversora: $\frac{v_{out}}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

Limite das aproximações obtidas com o modelo do OpAmp ideal

- Voltando à expressão precisa do ganho da configuração inversora:

$$G = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{A} \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{A} \right)}$$

- ...constatamos que as aproximações anteriores para o ganho são válidas se:

⇒ A for muito grande;

⇒ e $R_2/R_1 \ll A$.

- Ou seja, perdem a validade para ganhos em malha fechada, G , com valores da ordem de A .