Aula 5

Amplificador Operacional
Configurações II

Circuitos Elétricos II

Prof. Henrique Amorim - UNIFESP - ICT

Restrições para um AmpOp ideal

$$A \rightarrow \infty \quad \left(\frac{V_o}{\infty} = V_p - V_n\right)$$

$$R_i \rightarrow \infty \quad (i_p = 0\,;\; i_n = 0)$$

$$\boxed{V_p = V_n}$$

$$\boxed{i_p = i_n = 0}$$

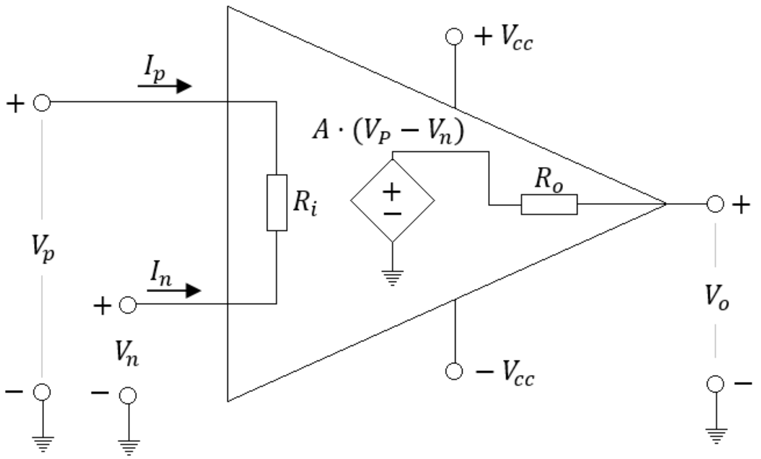
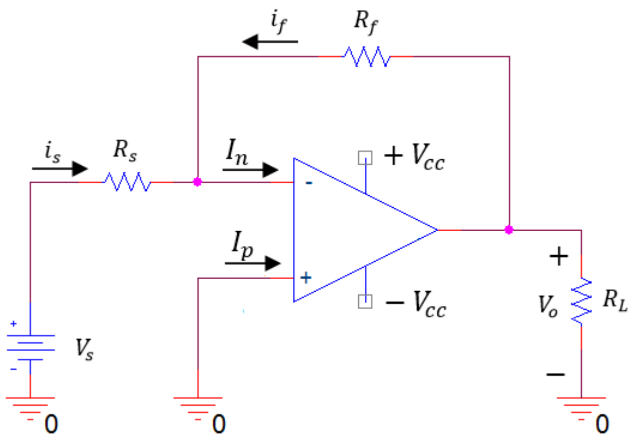


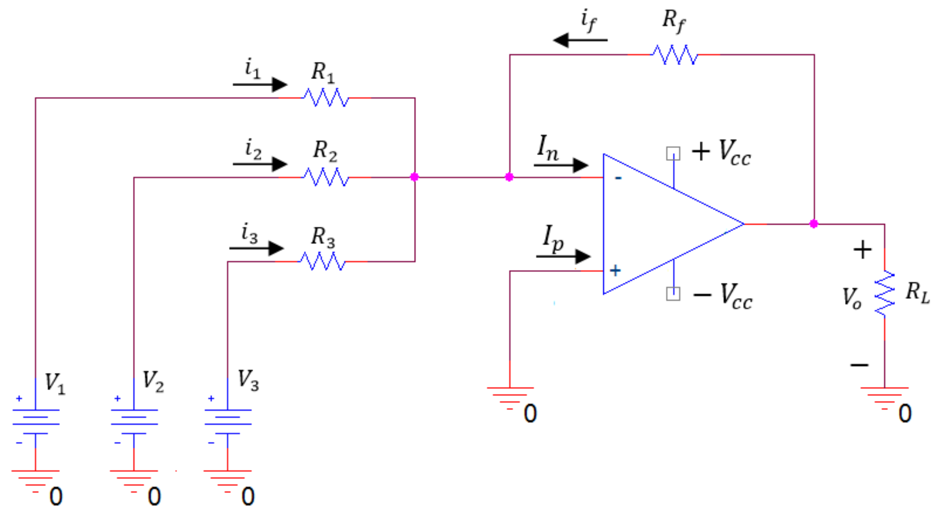
TABELA COMPARATIVA	
AmpOp Ideal	$\boldsymbol{CI\ \mu 741}$
$R_i \rightarrow \infty$	$R_i = 2M$
$R_o \rightarrow 0$	$R_o = 75\Omega$
$A \rightarrow \infty$	$A = 10^5$

Primeiras configurações de AmpOp

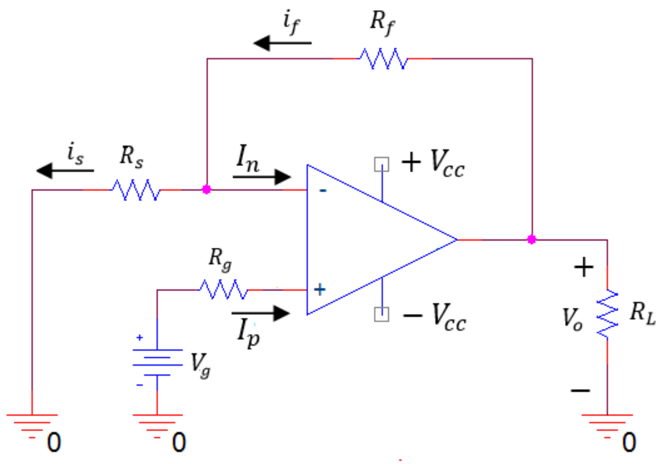
Amplificador inversor



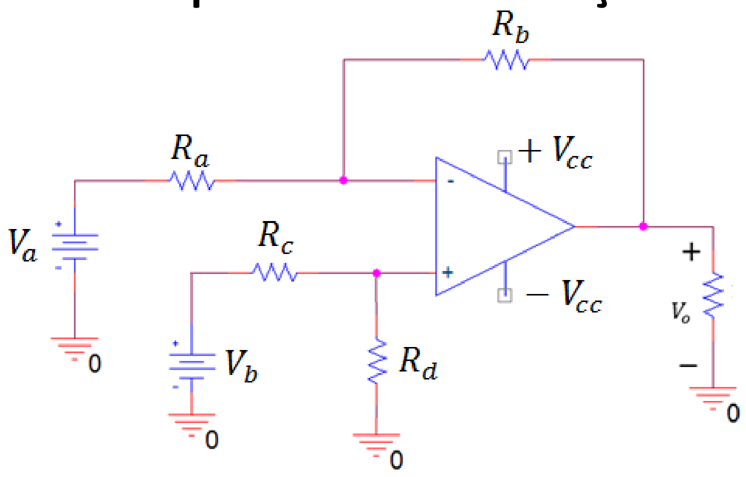
Amplificador somador inversor



Amplificador não inversor

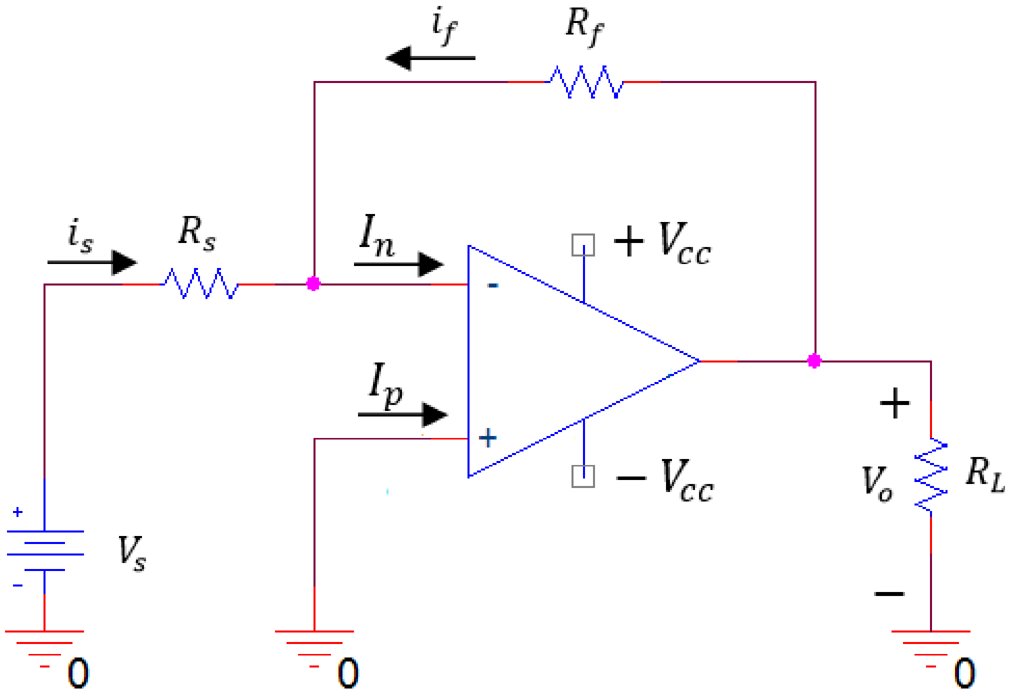


Amplificador da diferença



Configurações de AmpOp – Revisão

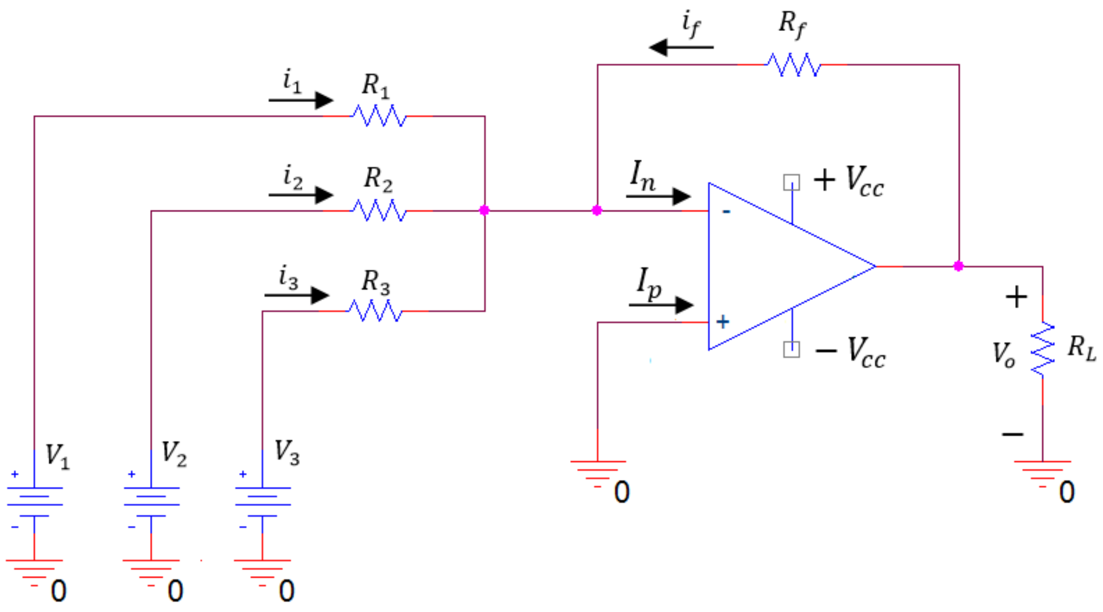
Amplificador Inversor



$$V_o = -\frac{R_f}{R_s} \cdot V_s$$

Configurações de AmpOp – Revisão

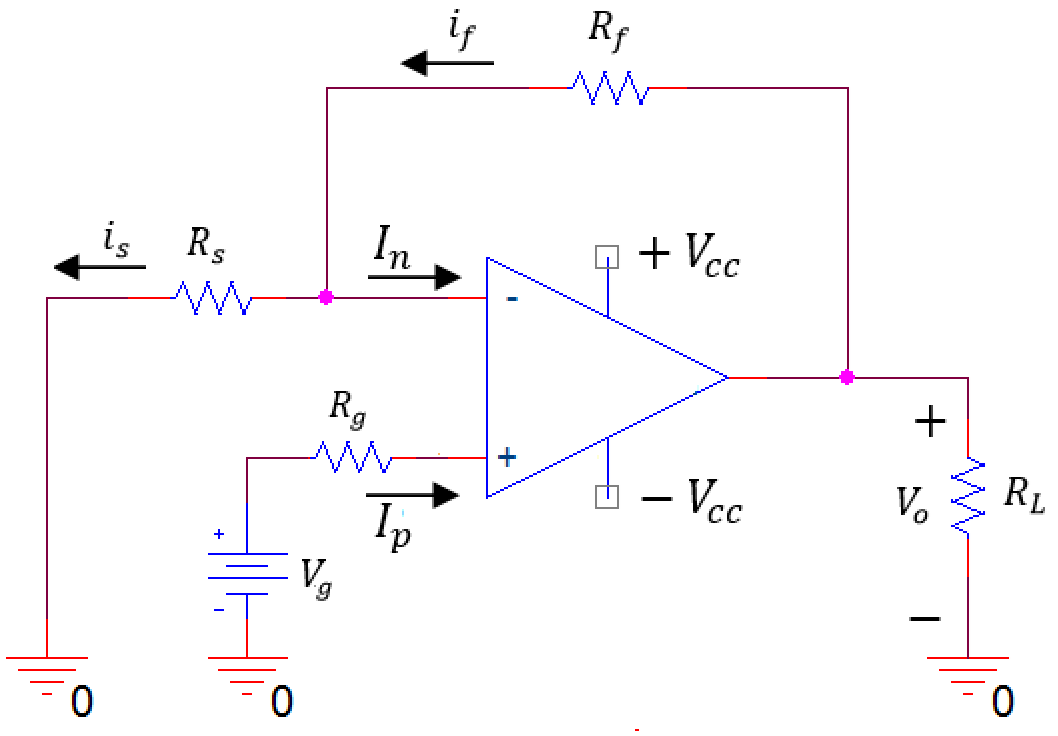
Amplificador Somador Inversor



$$V_o = -R_f \cdot \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3}\right)$$

Configurações de AmpOp – Revisão

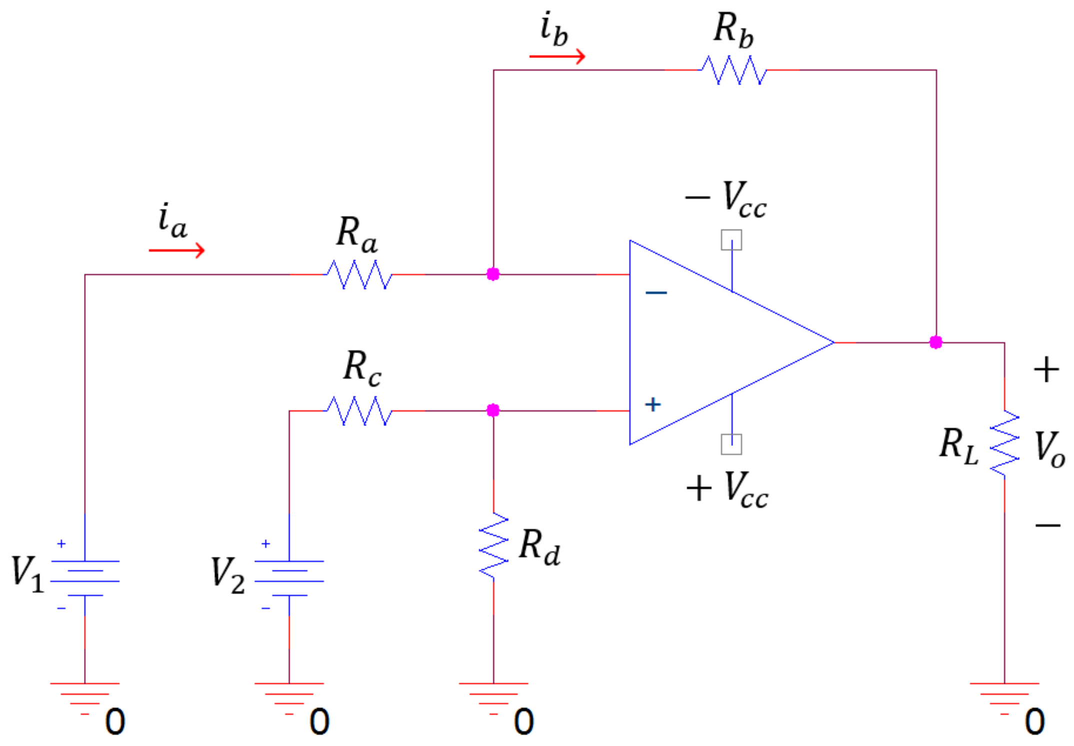
Amplificador não Inversor



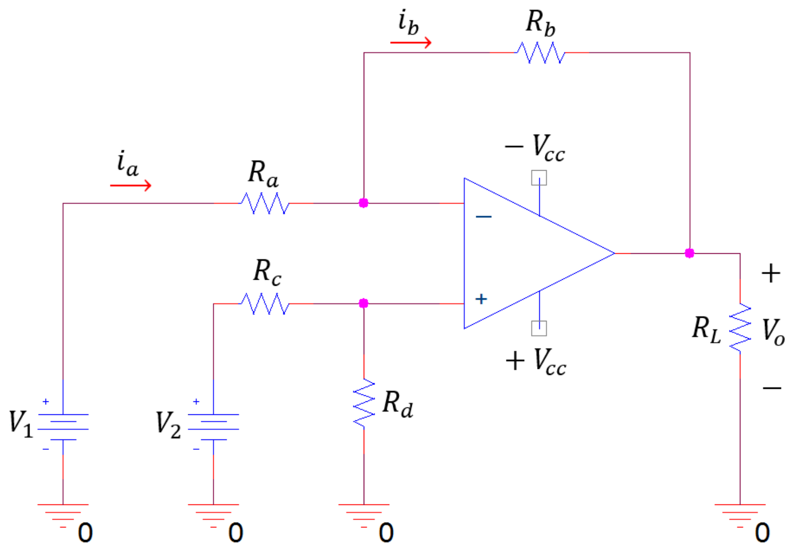
$$V_o = V_g\left(1 + \frac{R_f}{R_s}\right)$$

Amplificador da diferença

A tensão de saída de um amplificador da diferença é proporcional à diferença entre duas tensões de entrada. Abaixo a configuração padrão de um amplificador da diferença.



Amplificador da diferença – Dedução



$$\boldsymbol{V_p = V_n}$$

$$\boldsymbol{i_p = i_n = 0}$$

$$V_p = V_2 \cdot \frac{R_d}{R_c + R_d}$$

$$i_a = i_b = \frac{V_1 - V_n}{R_a}$$

$$-V_n + R_b \cdot \left(\frac{V_1 - V_n}{R_a}\right) + V_o = 0$$

$$V_o = V_n + R_b \cdot \left(\frac{V_n - V_1}{R_a}\right)$$

$$V_o = V_n + V_n \cdot \left(\frac{R_b}{R_a}\right) - V_1 \left(\frac{R_b}{R_a}\right)$$

$$V_o = V_n \cdot \left(1 + \frac{R_b}{R_a}\right) - V_1 \left(\frac{R_b}{R_a}\right)$$

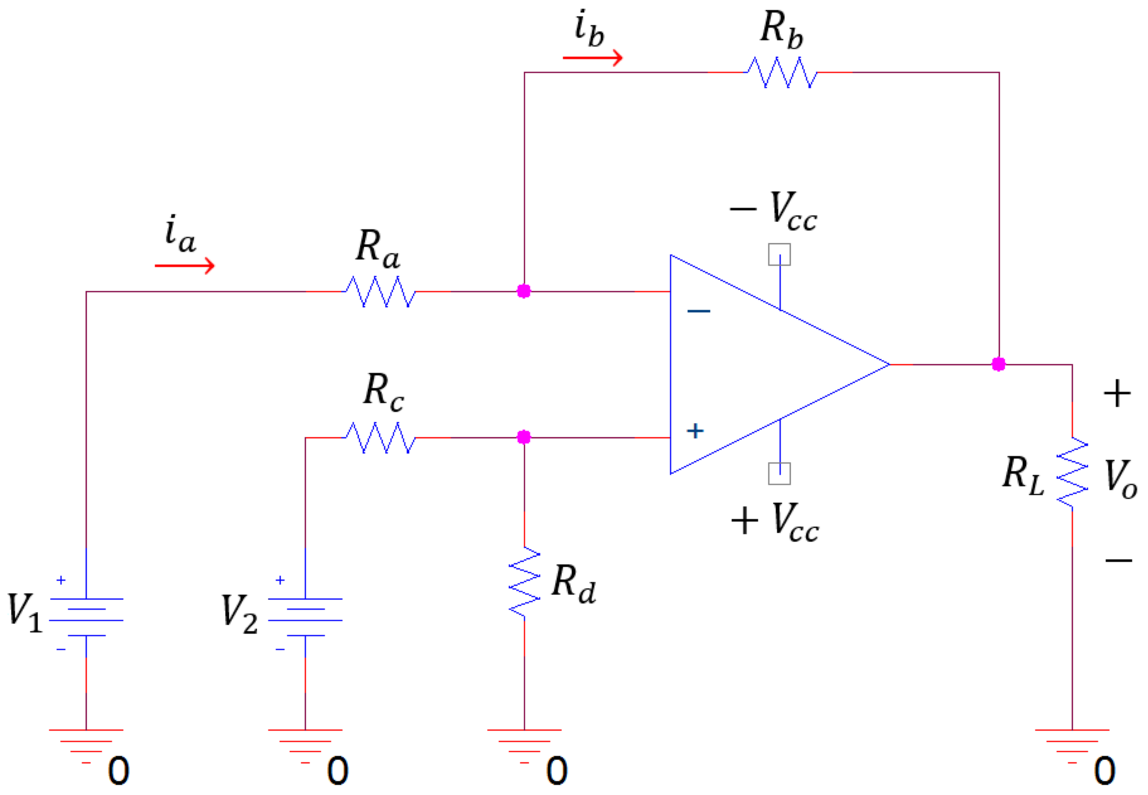
$$V_o = V_2 \cdot \left(\frac{R_d}{R_c + R_d}\right) \cdot \left(1 + \frac{R_b}{R_a}\right) - V_1 \left(\frac{R_b}{R_a}\right)$$

$$V_o = V_2 \cdot \left(\frac{R_d}{R_c + R_d} + \frac{R_d \cdot R_b}{(R_c + R_d) \cdot R_a}\right) - V_1 \left(\frac{R_b}{R_a}\right)$$

$$V_o = V_2 \cdot \left(\frac{R_a \cdot R_d + R_d \cdot R_b}{R_a \cdot (R_c + R_d)}\right) - V_1 \left(\frac{R_b}{R_a}\right)$$

$$\boxed{\boldsymbol{V_o = V_2 \cdot \left(\frac{R_d \cdot (R_a + R_b)}{R_a \cdot (R_c + R_d)}\right) - V_1 \left(\frac{R_b}{R_a}\right)}}$$

Amplificador da diferença – Dedução



$$V_o = V_2 \cdot \left(\frac{R_d \cdot (R_a + R_b)}{R_a \cdot (R_c + R_d)}\right) - V_1 \left(\frac{R_b}{R_a}\right)$$

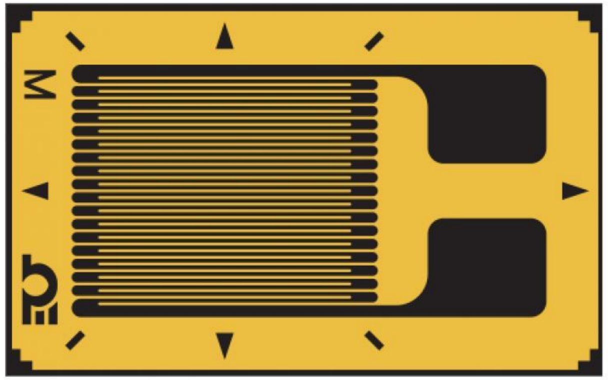
Se a relação abaixo for verdadeira, termos:

$$\frac{R_a}{R_b} = \frac{R_c}{R_d}$$

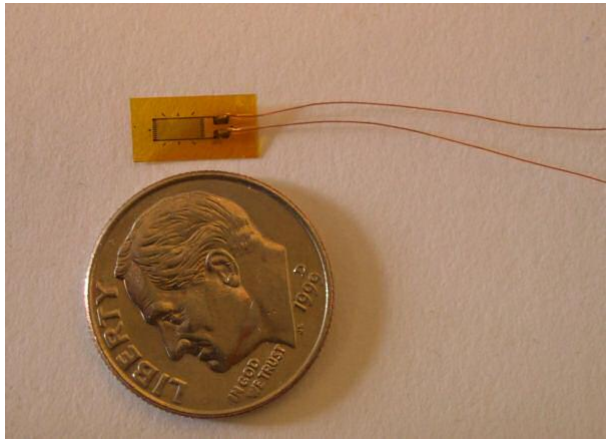
$$V_o = \frac{R_b}{R_a} \cdot (V_2 - V_1)$$

Estudo de caso I – Strain Gage

O *strain gage* é um transdutor capaz de medir deformações (resistência variável)



- Possui uma resistência de nominal R
- A tração ou compressão resulta em uma variação da resistência ΔR
- Possui um comprimento conhecido L
- A tração ou compressão resulta em uma variação de comprimento ΔL

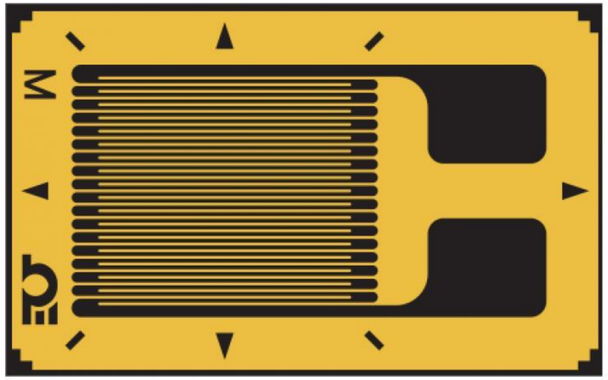


Os valores nominais de resistência variam de acordo com o componente, os valores mais comuns sâo 120Ω, 350Ω e 1000Ω.

Estudo de caso I – Strain Gage

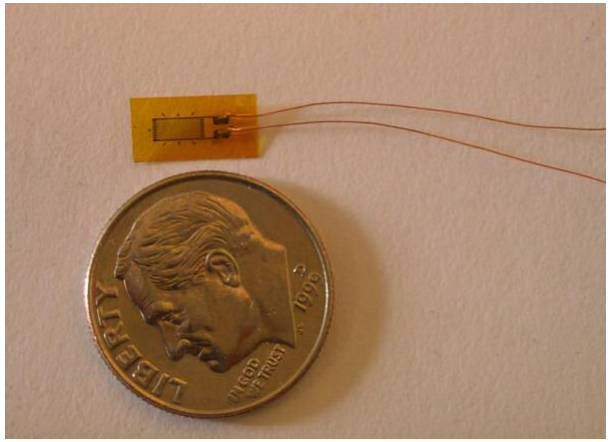
Os *strain gage* possuem um parâmetro particular conhecido por fator *gage* (FG), na maioria dos componentes esse fator é igual a 2 e é calcula pela fórmula :

$$FG = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}}$$



A razão entre a variação do comprimento e o comprimento é uma grandeza muito pequena conhecia por microstrain (μe). 100 microstrains representa $100 \cdot 10^{-6}$.

$$E = \frac{\Delta L}{L}$$



Se considerarmos um *strain gage* com o FG=2, resistência nominal de 120Ω, que sofreu uma distensão de 500μe. A variação da resistência será de:

$$FG = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{E} \qquad 2 = \frac{\frac{\Delta R}{120}}{500 \cdot 10^{-6}} \qquad \Delta R = 0{,}12\Omega$$

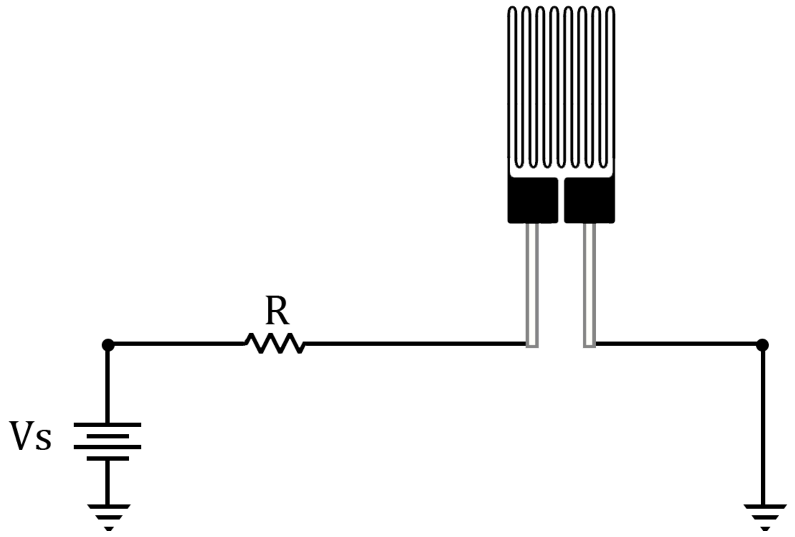
Estudo de caso I – Strain Gage

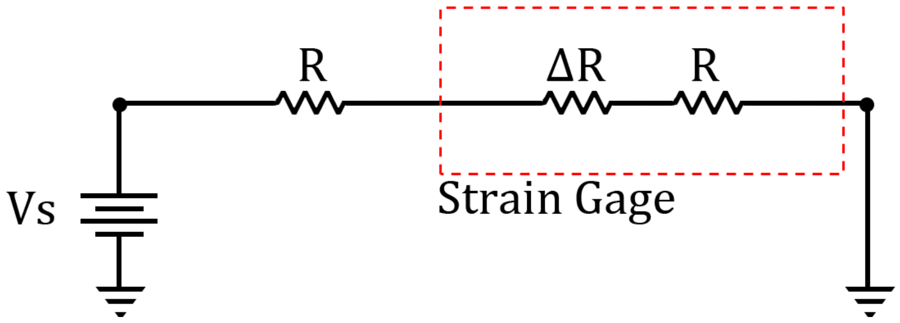
Considerando um strain gage com o FG =2, resistência nominal de 120Ω, o qual sofreu uma distensão de 500µe. A variação da resistência será de:

$$V_{SG} = \frac{12 \cdot 120{,}12}{120 + 120{,}12} = 6{,}0030V$$

Se a variação for de 250µe temos:

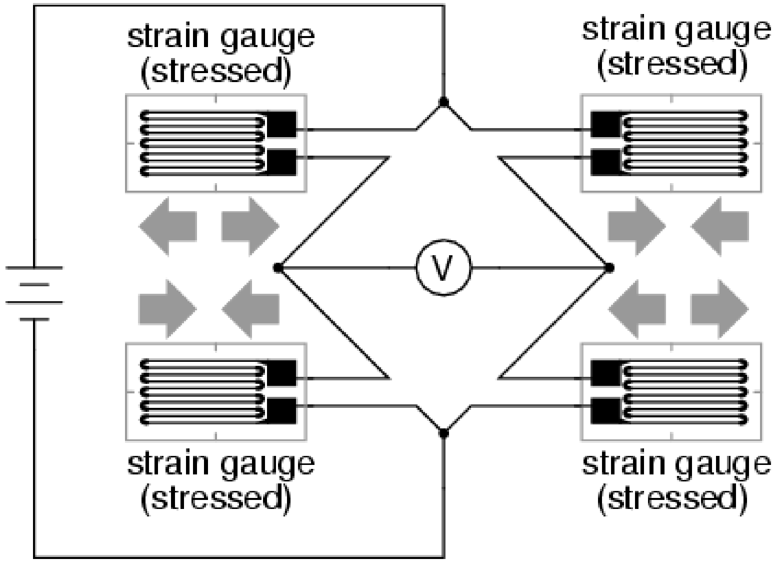
$$V_{SG} = \frac{12 \cdot 120{,}06}{120 + 120{,}06} = 6{,}0015V$$



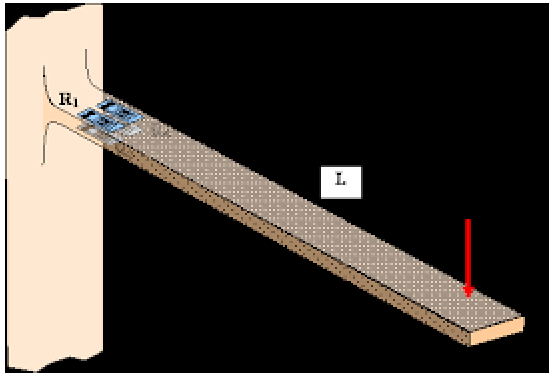


Estudo de caso I – Strain Gage

Se conectarmos o *Strain Gage* a uma ponte de wheatstone equilibrada, podemos gerar uma pequena variação de tensão, de acordo com variação de resistência do *Strain Gage.*



Existem diversas variações na construção de uma ponte com Strain Gages, vamos considerar a completa. Como pode ser visto na imagem abaixo e no circuito ao lado.

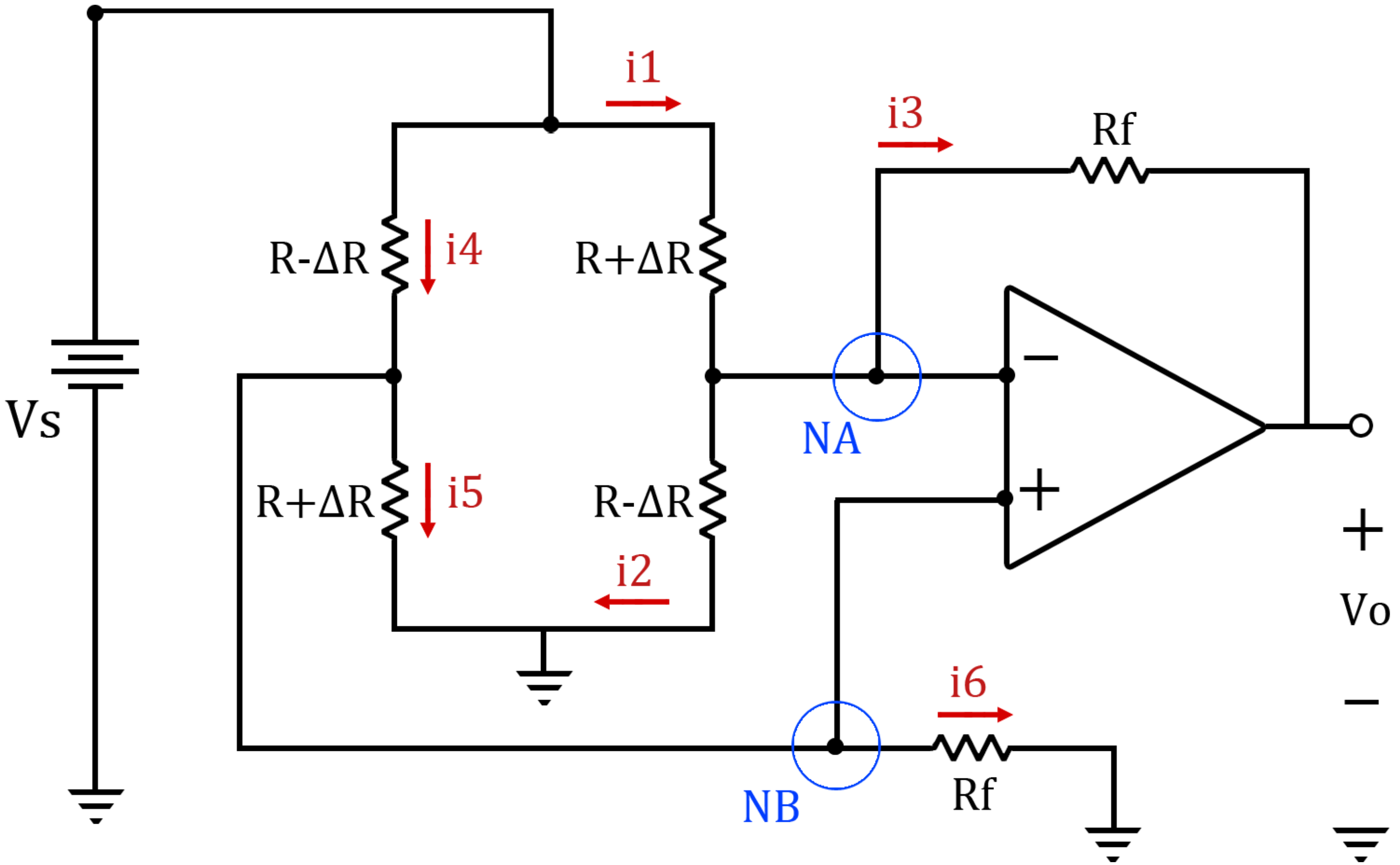


Lembrando que para obtermos a condição de equilíbrio da ponto usamos o produto cruzado das resistências:

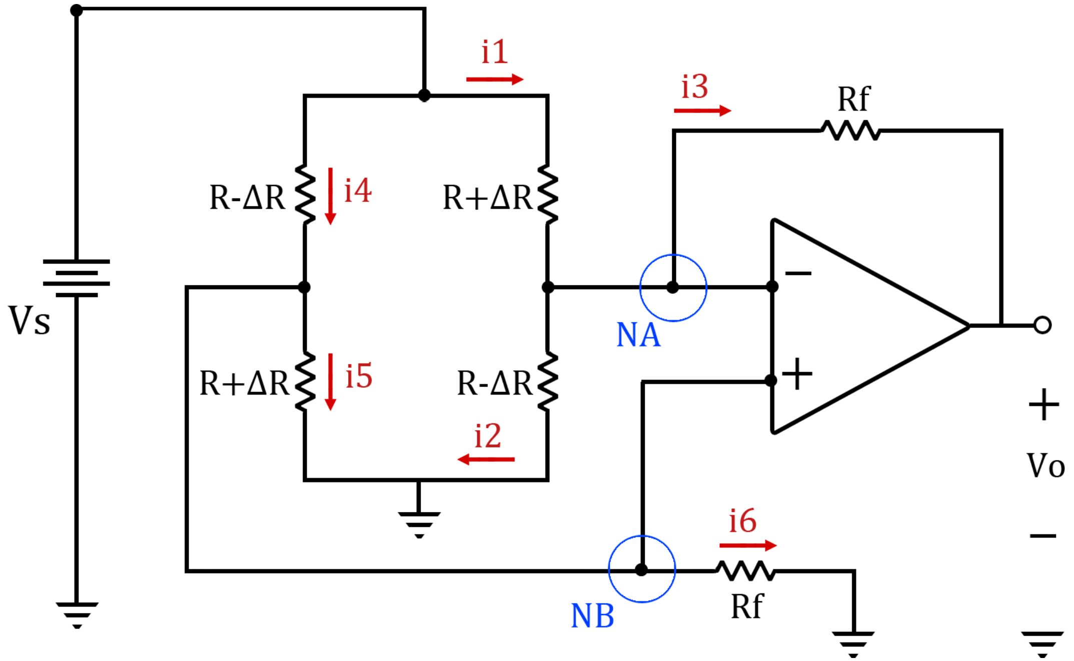
$$R_{SupDir} \cdot R_{InfEsq} = R_{SupEsq} \cdot R_{InfDir}$$

Estudo de caso I – Strain Gage

Exercício: Encontre a expressão que descreve o comportamento da saída do circuito em função de ΔR.



Estudo de caso I – Strain Gage



$$i_4 = \frac{v_s - v_p}{R - \Delta R} \qquad i_5 = \frac{v_p}{R + \Delta R}$$

$$i_6 = \frac{v_p}{R_f}$$

$$NA \rightarrow i_1 = i_2 + i_3$$

$$NB \rightarrow i_4 = i_5 + i_6$$

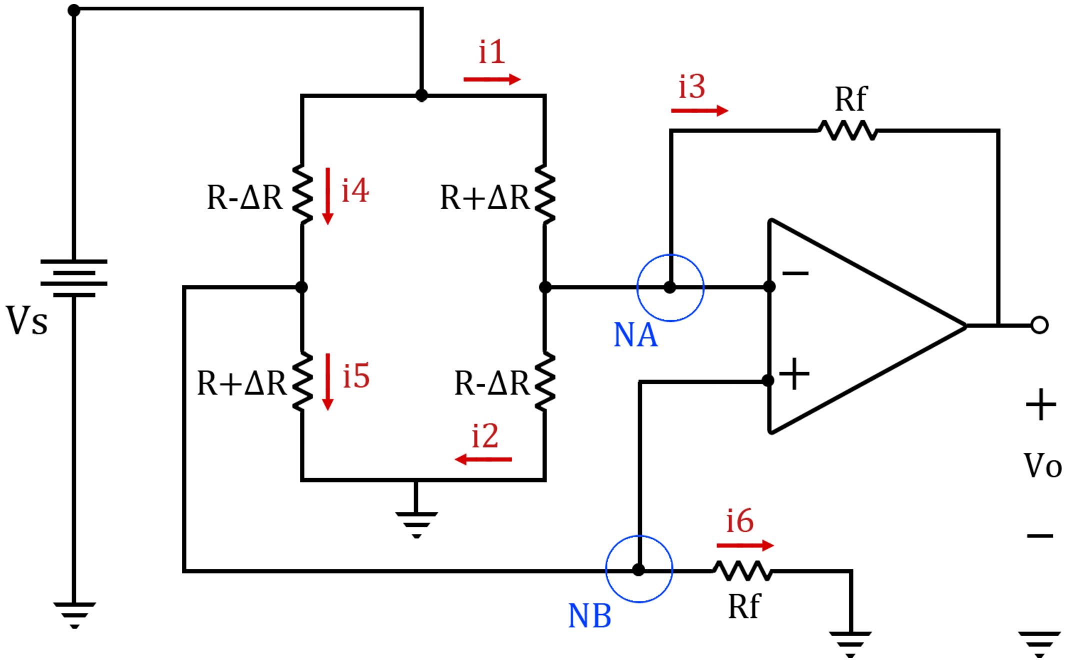
$$i_1 = \frac{v_s - v_n}{R + \Delta R} \qquad i_2 = \frac{v_n}{R - \Delta R}$$

$$i_3 = \frac{v_n - v_o}{R_f}$$

$$\boldsymbol{NA} \rightarrow \frac{\boldsymbol{v_s - v_n}}{\boldsymbol{R + \Delta R}} = \frac{\boldsymbol{v_n}}{\boldsymbol{R - \Delta R}} + \frac{\boldsymbol{v_n - v_o}}{\boldsymbol{R_f}}$$

$$\boldsymbol{NB} \rightarrow \frac{\boldsymbol{v_s - v_p}}{\boldsymbol{R - \Delta R}} = \frac{\boldsymbol{v_p}}{\boldsymbol{R + \Delta R}} + \frac{\boldsymbol{v_p}}{\boldsymbol{R_f}}$$

Estudo de caso I – Strain Gage



$$v_p = v_n$$

$$i_p = i_n = 0$$

$$NA \rightarrow \frac{v_s - v_n}{R + \Delta R} = \frac{v_n}{R - \Delta R} + \frac{v_n - v_o}{R_f}$$

$$NB \rightarrow \frac{v_s - v_p}{R - \Delta R} = \frac{v_p}{R + \Delta R} + \frac{v_p}{R_f}$$

$$NB \rightarrow \frac{v_s - v_p}{R - \Delta R} = \frac{v_p}{R + \Delta R} + \frac{v_p}{R_f}$$

$$\frac{v_s}{R - \Delta R} = \frac{v_p}{R - \Delta R} + \frac{v_p}{R + \Delta R} + \frac{v_p}{R_f}$$

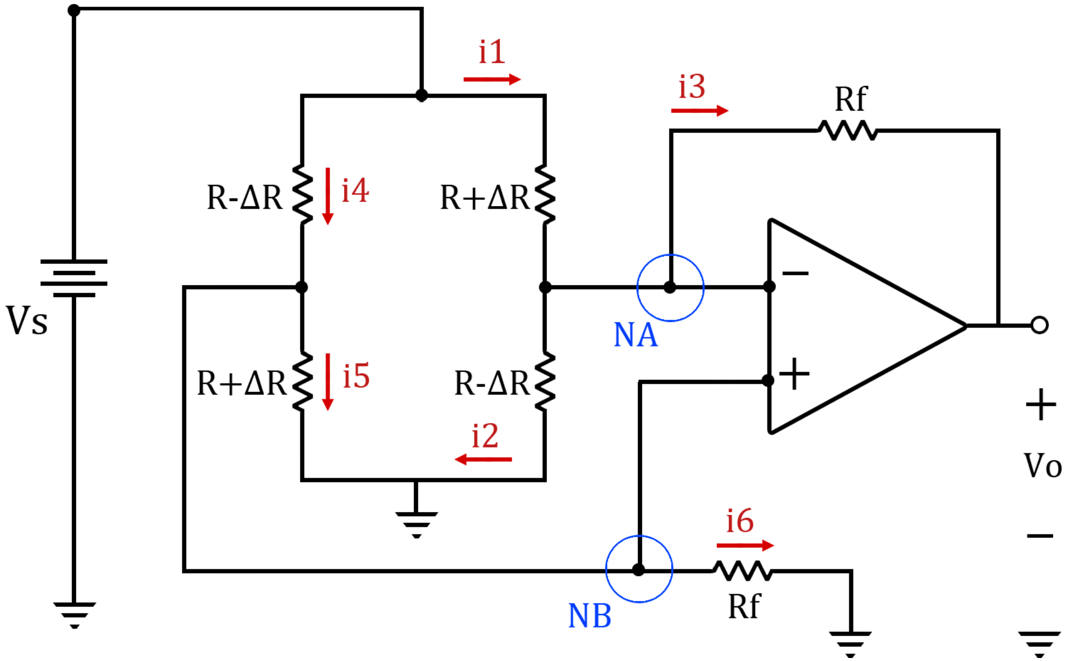
$$\frac{v_s}{R - \Delta R} = v_p \cdot \left(\frac{1}{R - \Delta R} + \frac{1}{R + \Delta R} + \frac{1}{R_f}\right)$$

$$v_p = \frac{v_s}{(R - \Delta R) \cdot \left(\frac{1}{R - \Delta R} + \frac{1}{R + \Delta R} + \frac{1}{R_f}\right)}$$

$$x = \left(\frac{1}{R - \Delta R} + \frac{1}{R + \Delta R} + \frac{1}{R_f}\right)$$

$$v_p = \frac{v_s}{(R - \Delta R) \cdot x}$$

Estudo de caso I – Strain Gage



$$\boldsymbol{v_p = v_n}$$

$$\boldsymbol{i_p = i_n = 0}$$

$$\boldsymbol{NA \rightarrow \frac{v_s - v_n}{R + \Delta R} = \frac{v_n}{R - \Delta R} + \frac{v_n - v_o}{R_f}}$$

$$\boldsymbol{NB \rightarrow \frac{v_s - v_p}{R - \Delta R} = \frac{v_p}{R + \Delta R} + \frac{v_p}{R_f}}$$

$$\boldsymbol{NA \rightarrow \frac{v_s - v_n}{R + \Delta R} = \frac{v_n}{R - \Delta R} + \frac{v_n - v_o}{R_f}}$$

$$v_p = \frac{v_s}{(R - \Delta R) \cdot x} = v_n$$

$$\frac{v_s}{R + \Delta R} = \frac{v_n}{R + \Delta R} + \frac{v_n}{R - \Delta R} + \frac{v_n}{R_f} - \frac{v_o}{R_f}$$

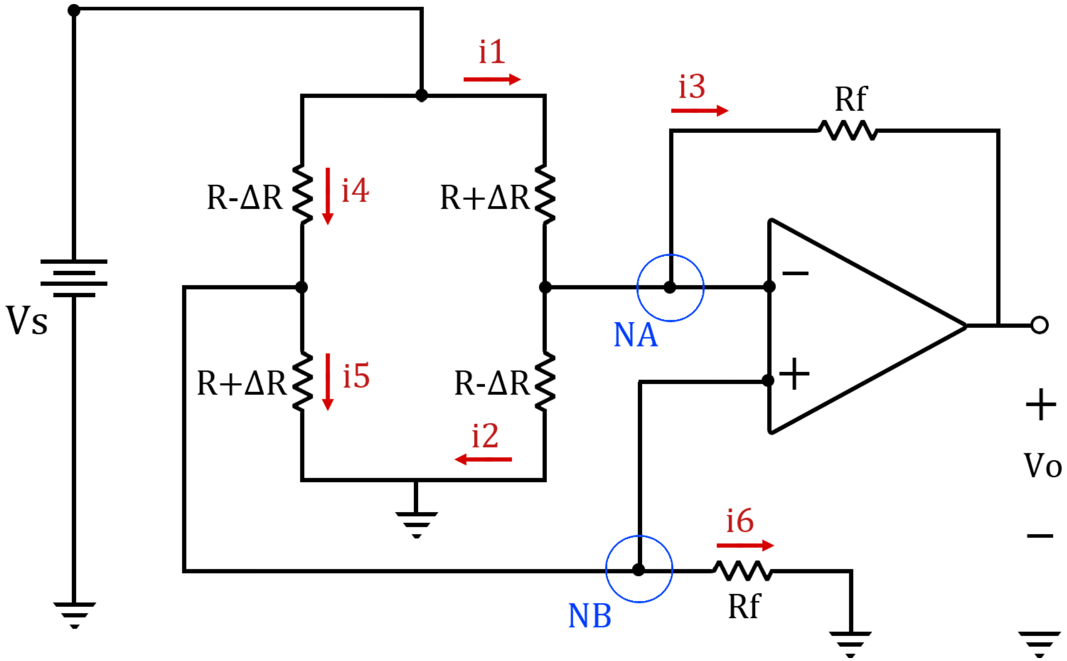
$$\frac{v_s}{R + \Delta R} = v_n \cdot \left(\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{R + \Delta R}} + \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{R - \Delta R}} + \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{R_f}} \right) - \frac{v_o}{R_f}$$

$$\frac{v_s}{R + \Delta R} = v_n \cdot x - \frac{v_o}{R_f}$$

$$\frac{v_o}{R_f} = \boldsymbol{v_n} \cdot x - \frac{v_s}{R + \Delta R}$$

$$\frac{v_o}{R_f} = \left(\frac{\boldsymbol{v_s}}{\boldsymbol{(R - \Delta R) \cdot \cancel{x}}} \right) \cdot \cancel{x} - \frac{v_s}{R + \Delta R}$$

Estudo de caso I – Strain Gage



$$\boldsymbol{v_p = v_n}$$

$$\boldsymbol{i_p = i_n = 0}$$

$$\boldsymbol{NA \rightarrow \frac{v_s - v_n}{R + \Delta R} = \frac{v_n}{R - \Delta R} + \frac{v_n - v_o}{R_f}}$$

$$\boldsymbol{NB \rightarrow \frac{v_s - v_p}{R - \Delta R} = \frac{v_p}{R + \Delta R} + \frac{v_p}{R_f}}$$

$$\frac{v_o}{R_f} = \frac{v_s}{R - \Delta R} - \frac{v_s}{R + \Delta R}$$

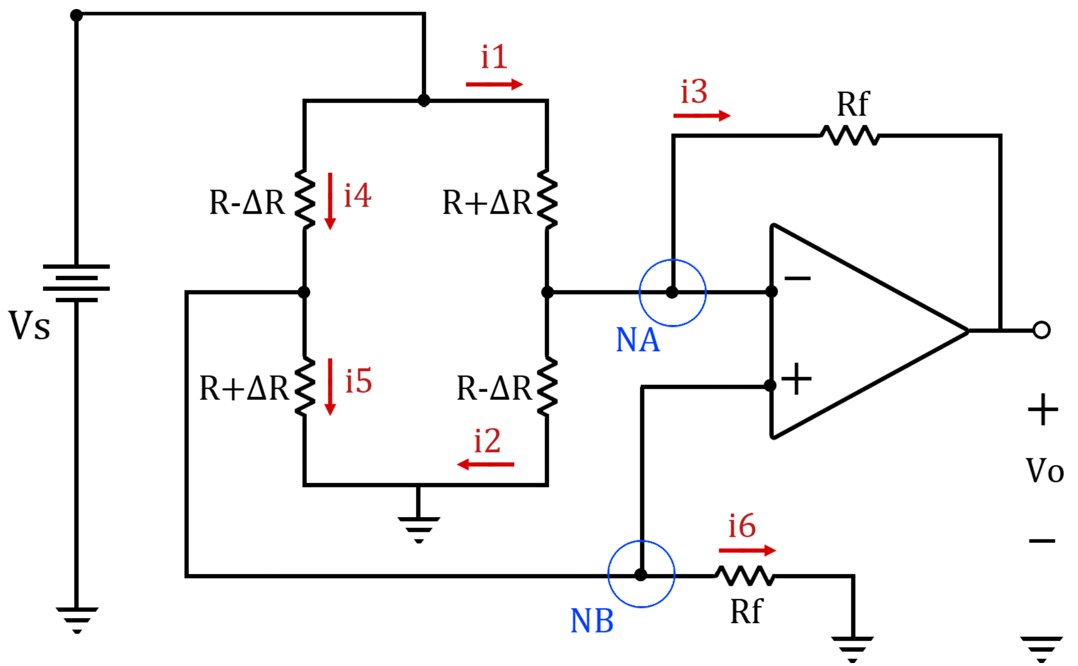
$$\frac{v_o}{R_f} = v_s \cdot \left(\frac{1}{R - \Delta R} - \frac{1}{R + \Delta R}\right)$$

$$\frac{v_o}{R_f} = v_s \cdot \left(\frac{R + \Delta R - R + \Delta R}{(R - \Delta R) \cdot (R + \Delta R)}\right)$$

$$\frac{v_o}{R_f} = v_s \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta R}{R^2 - \Delta R^2}\right)$$

$$\boldsymbol{v_o = v_s \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta R \cdot R_f}{R^2 - \Delta R^2}\right)}$$

Estudo de caso I – Strain Gage



$$\boldsymbol{v_p = v_n}$$

$$\boldsymbol{i_p = i_n = 0}$$

$$\boldsymbol{NA \rightarrow \frac{v_s - v_n}{R + \Delta R} = \frac{v_n}{R - \Delta R} + \frac{v_n - v_o}{R_f}}$$

$$\boldsymbol{NB \rightarrow \frac{v_s - v_p}{R - \Delta R} = \frac{v_p}{R + \Delta R} + \frac{v_p}{R_f}}$$

$$\boldsymbol{v_o = v_s \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta R \cdot R_f}{R^2 - \Delta R^2}\right)}$$

Como $\Delta R^2 \ll R^2$ temos:

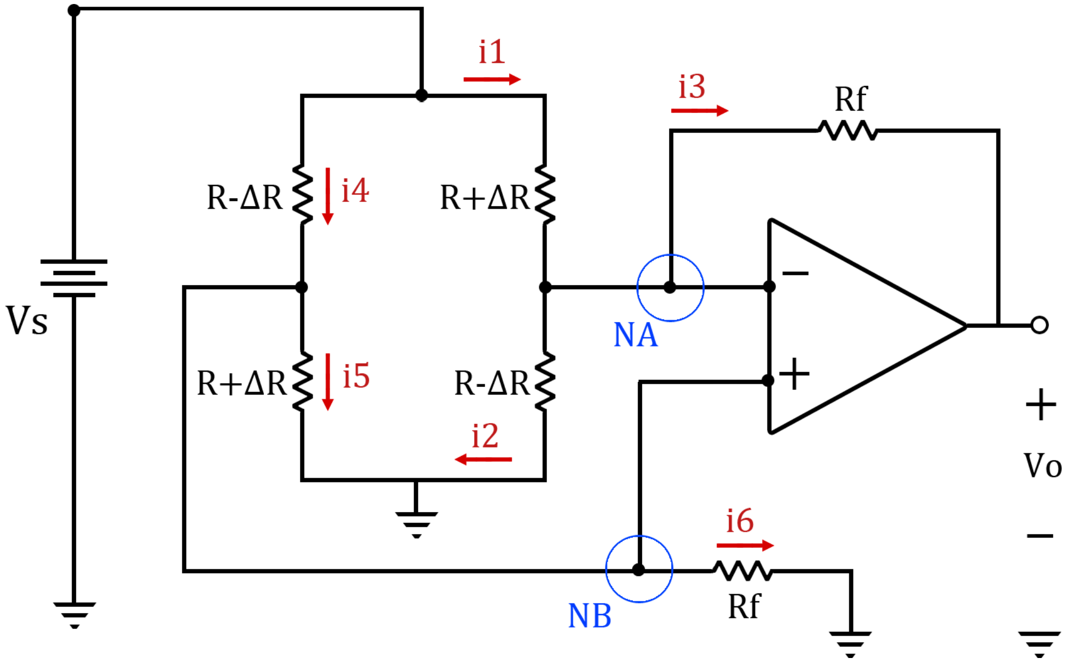
$$R^2 - \Delta R^2 \approx \mathrm{R}^2$$

então:

$$v_o \approx v_s \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta R \cdot R_f}{R^2}\right)$$

$$\boldsymbol{v_o \approx v_s \cdot 2 \cdot \left(\frac{R_f}{R}\right) \cdot \delta \quad onde \quad \delta = \frac{\Delta R}{R}}$$

Estudo de caso I – Strain Gage



$$v_o \approx v_s \cdot 2 \cdot \left(\frac{R_f}{R}\right) \cdot \delta \quad onde \quad \delta = \frac{\Delta R}{R}$$

Considerando:

$R_f = 50K\Omega \quad V_s = 5V \quad R = 120\Omega$

Se considerarmos um *Strain Gage* cuja a deformação resulte em uma variação de ΔR de $\pm\, 0.3\Omega$ termos uma variação na tensão de saída de aproximadamente $\pm 10V$. Sem deformação a ponte estará equilibrada