

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

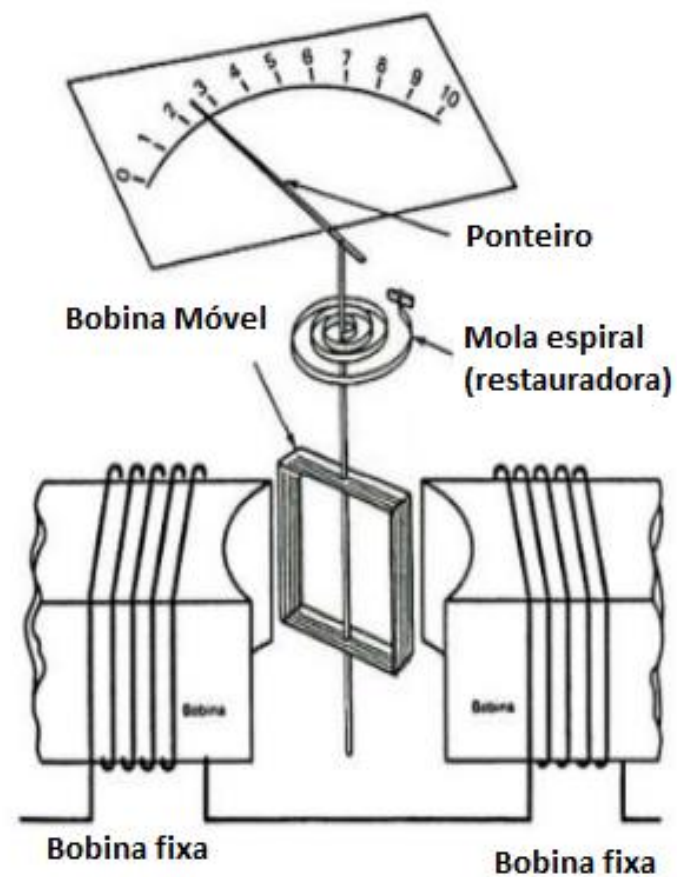
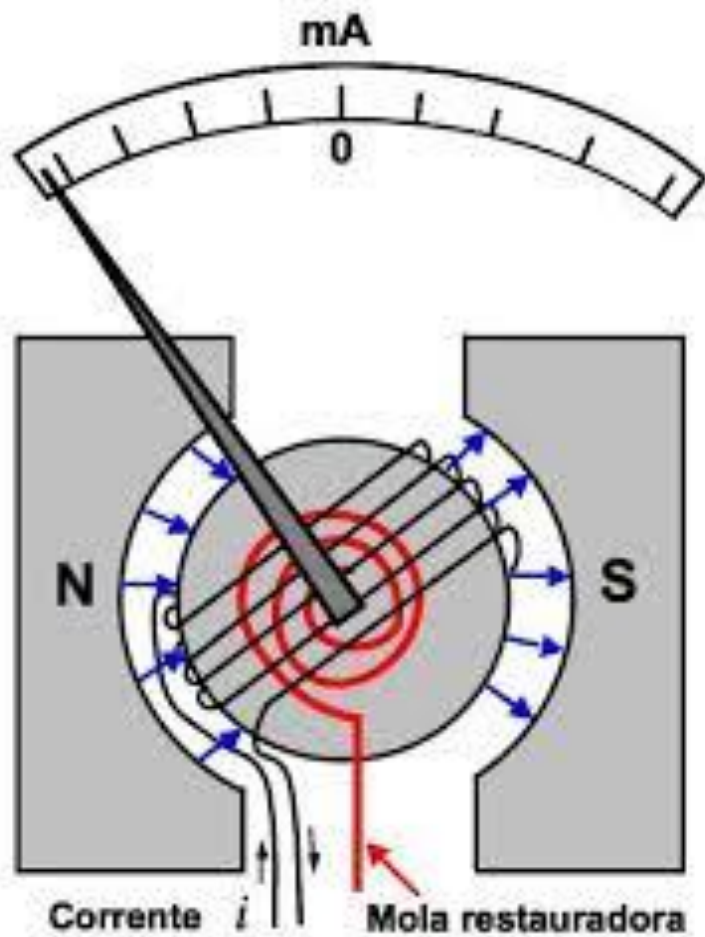
SEM5921 – Instrumentação e Sistemas
de Medidas

Prof. Assoc. Mário Luiz Tronco

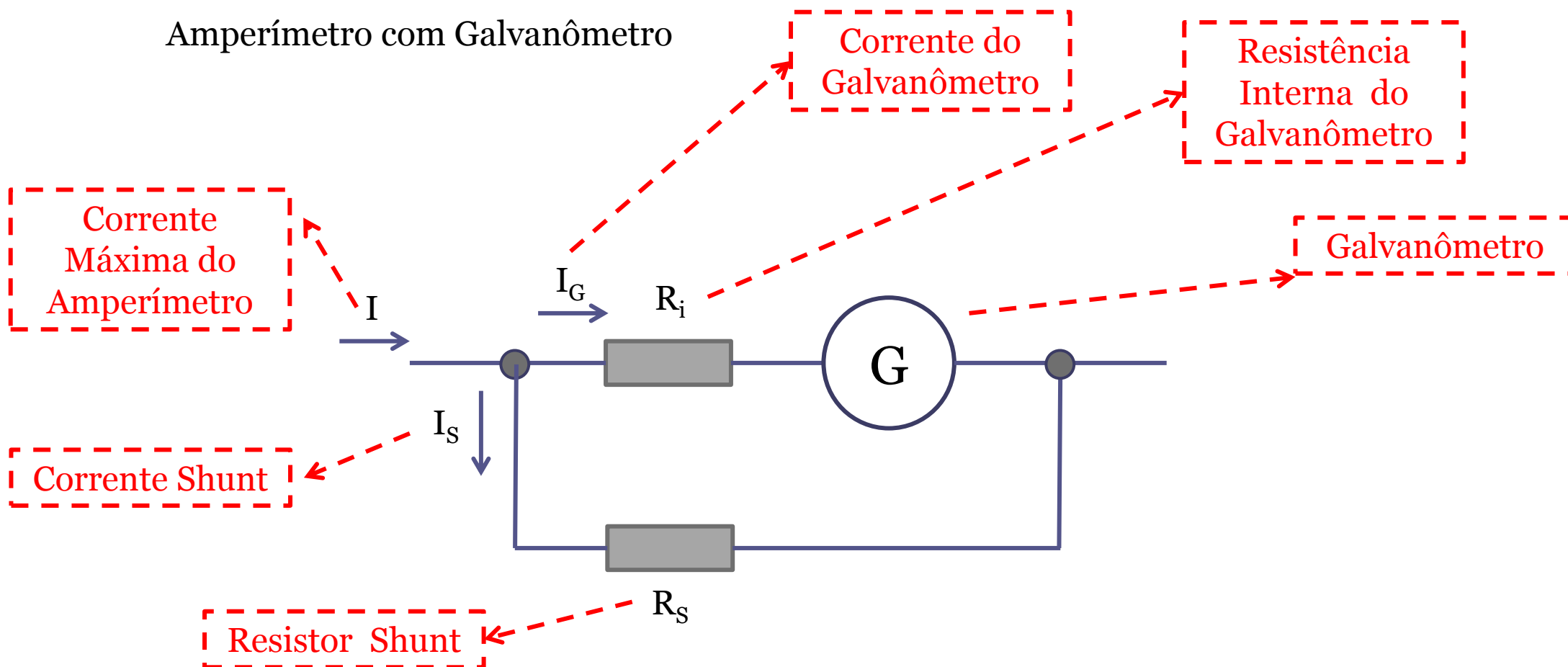
- Princípios de Instrumentos de Medição
 - ✓ Instrumentos de Bobina Móvel
 - ✓ Osciloscópios
 - ✓ Analisadores de Espectro
 - ✓ Frequencímetros, etc.

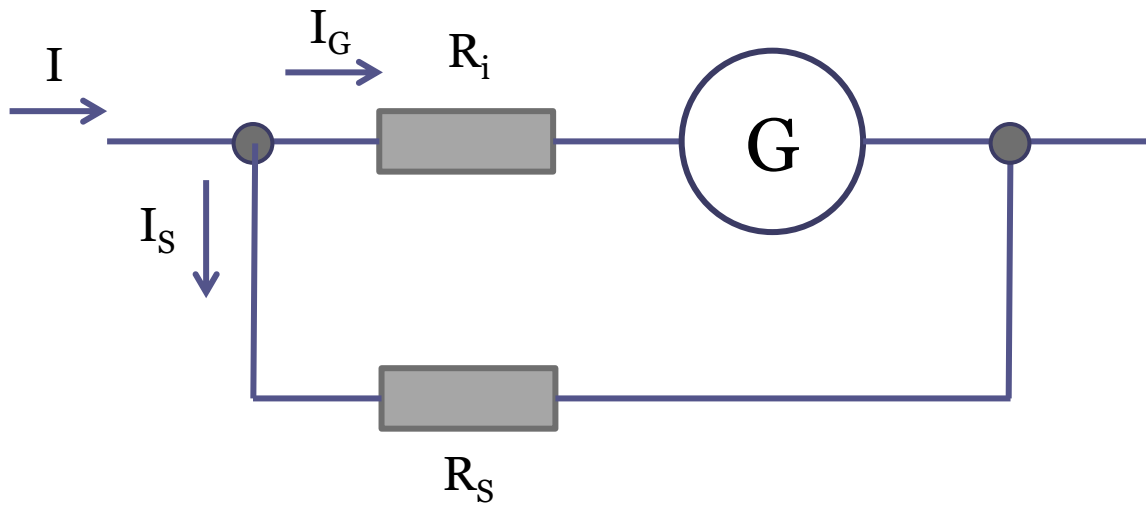
Instrumentos de Bobina Móvel

(Instrumentação Analógica)



Amperímetro com Galvanômetro





$$I = I_G + I_S$$

$$I_G R_i = I_S R_S$$

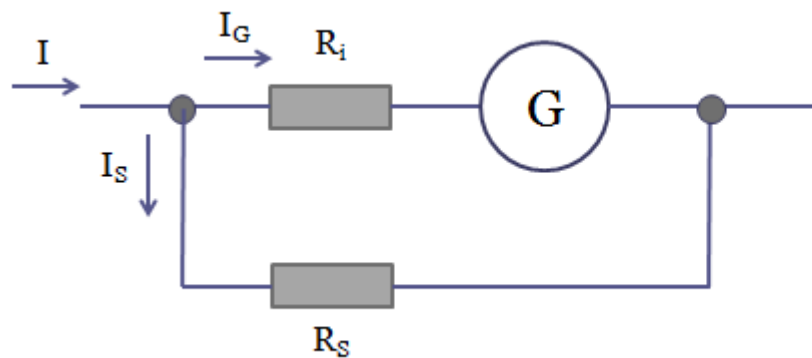


$$I_S = I_G \frac{R_i}{R_S}$$



$$I = I_G + I_G \left(\frac{R_i}{R_S} \right)$$

$$I = I_G \left(1 + \frac{R_i}{R_S} \right)$$

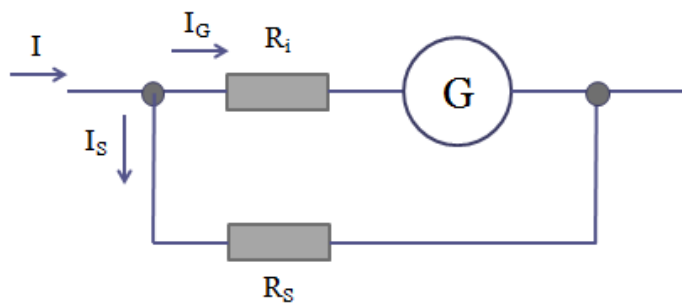


$$I = I_G \left(1 + \frac{R_i}{R_S} \right)$$

Exemplo:

Galvanômetro com $50\mu\text{A}$ de corrente de fundo de escala e $5\text{K}\Omega$ de Resistência interna

Projetar um Amperímetro para medir 10A



$$I = I_G \left(1 + \frac{R_i}{R_s} \right)$$

Exemplo:

Galvanômetro com $50\mu\text{A}$ de corrente de fundo de escala e $5\text{K}\Omega$ de Resistência interna

Projetar um Amperímetro para medir 10A

$$10 = 50 \cdot 10^{-6} \left(1 + \frac{5 \cdot 10^3}{R_s} \right)$$

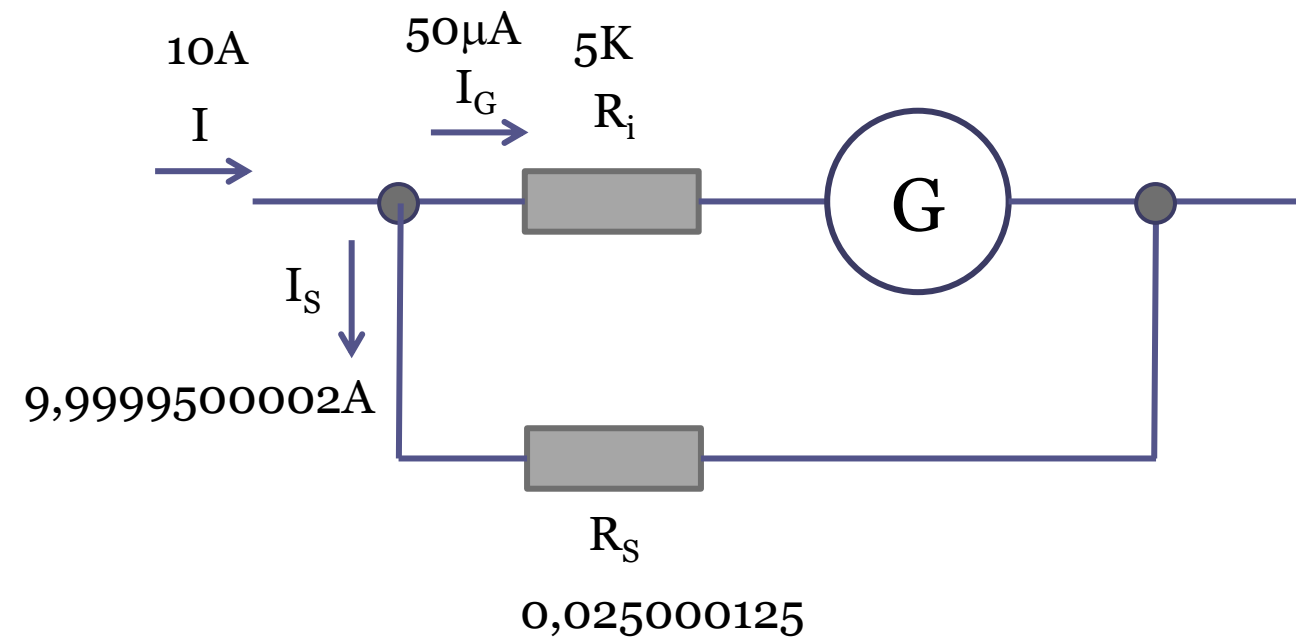
$$\frac{10}{50 \cdot 10^{-6}} = 1 + \frac{5 \cdot 10^3}{R_s}$$

$$0,2 \cdot 10^6 R_s = R_s + 5 \cdot 10^3$$



$$199999 R_s = 5 \cdot 10^3$$

$$R_s = \frac{5000}{199999} = 0,025000125\Omega$$

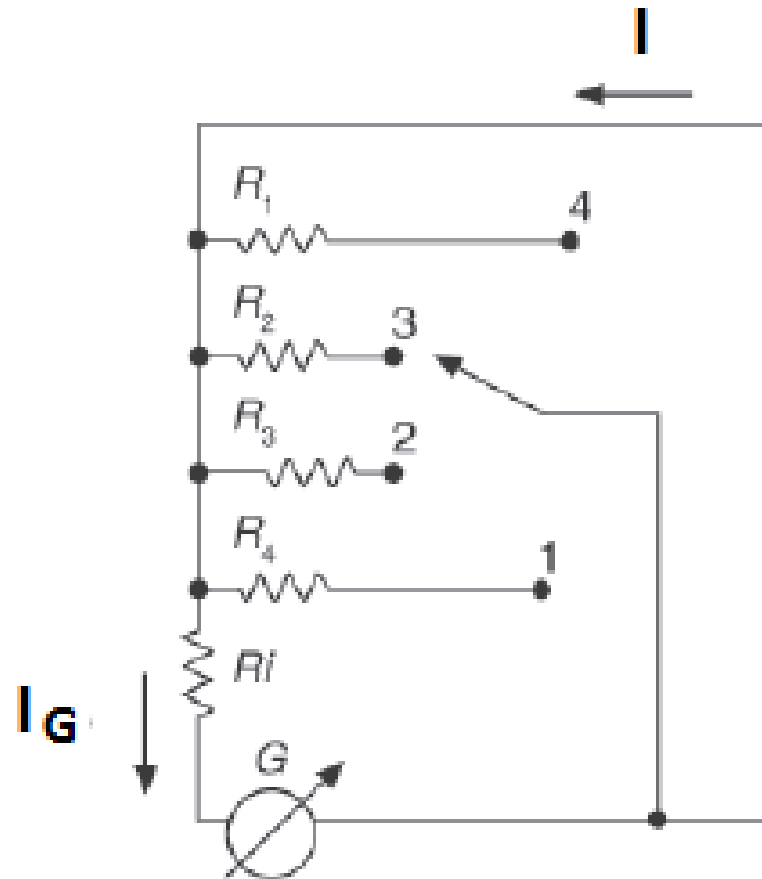


$$I_G R_i = I_s R_s$$

$$I_s = \frac{I_G R_i}{R_s}$$

$$I_s = \frac{50 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^3}{0,025000125}$$

$$I_s = 9,9999500002A$$



Cada resistência calculada individualmente, para cada corrente de fundo de escala

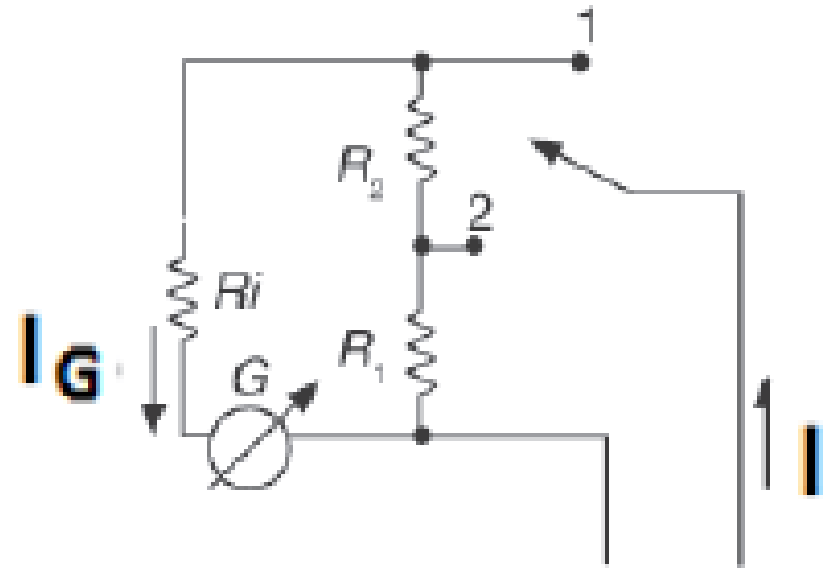
Exercício:

Galvanômetro de $50\mu\text{A}$ e $5\text{K}\Omega$

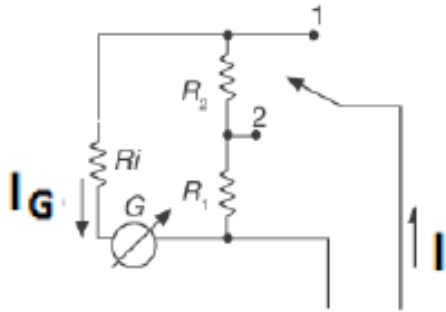
Implementar um amperímetro com escalas de:

- 10mA ;
- 100mA ;
- 1A ;
- 10A ;

Amperímetro com várias escalas de corrente.



Outra configuração de amperímetro com várias escalas de corrente.

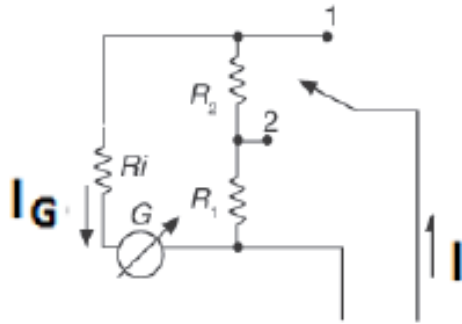


Outra configuração de amperímetro com várias escalas de corrente.

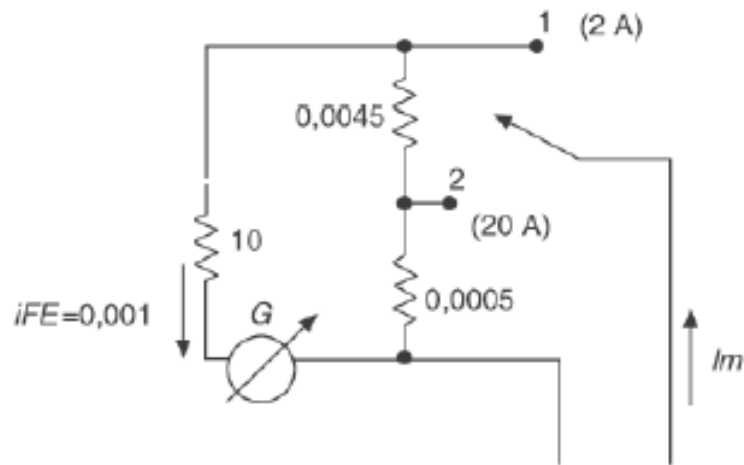
Exemplo:

Galvanômetro com 1mA de corrente de fundo de escala e 10Ω de Resistência interna

Projetar um Amperímetro para medir 2A e 20A



Outra configuração de amperímetro com várias escalas de corrente.



Circuito do amperímetro para escalas de corrente de 2 A e 20 A.

Equações de Malha:

Para 2A:

$$1,999R_1 + 1,999R_2 = 10 \times 0,001$$

Para 20A:

$$19,999R_1 = 10 \times 0,0001 + 0,0001R_2$$

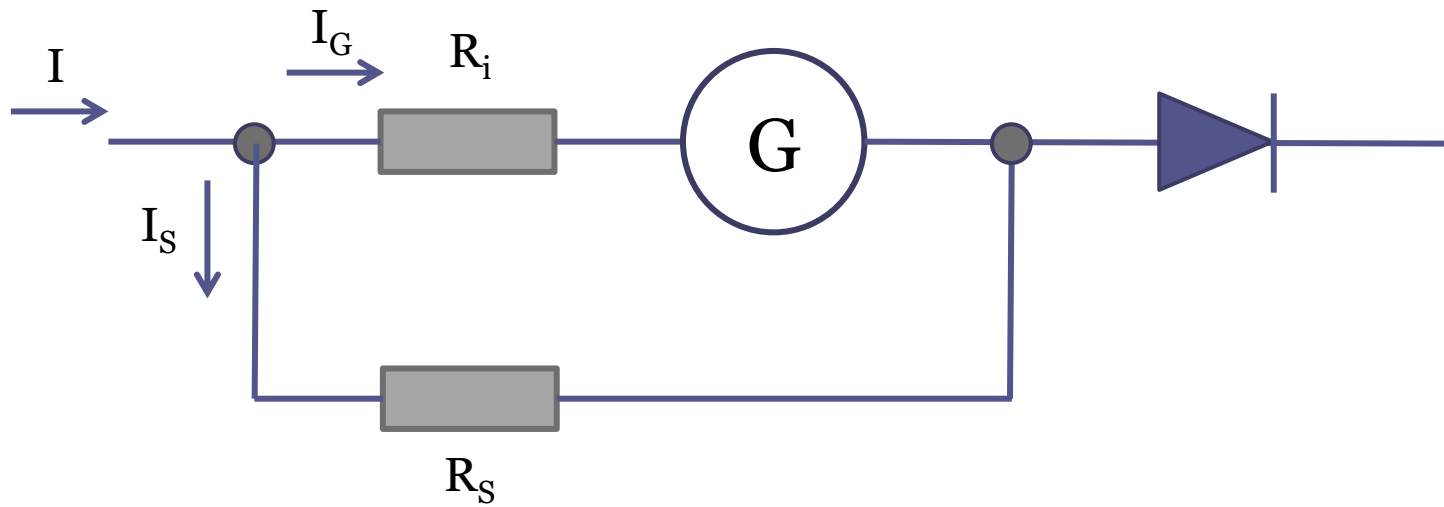
$$19,999R_1 - 0,0001R_2 = 10 \times 0,0001$$

Resolvendo o sistema:

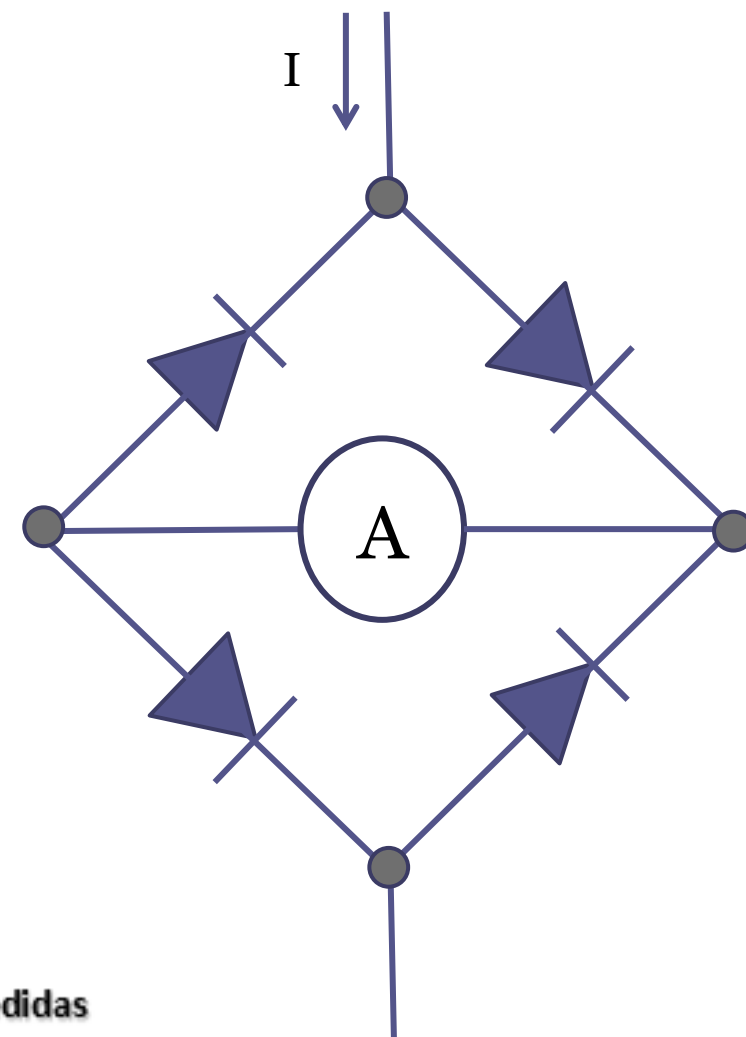
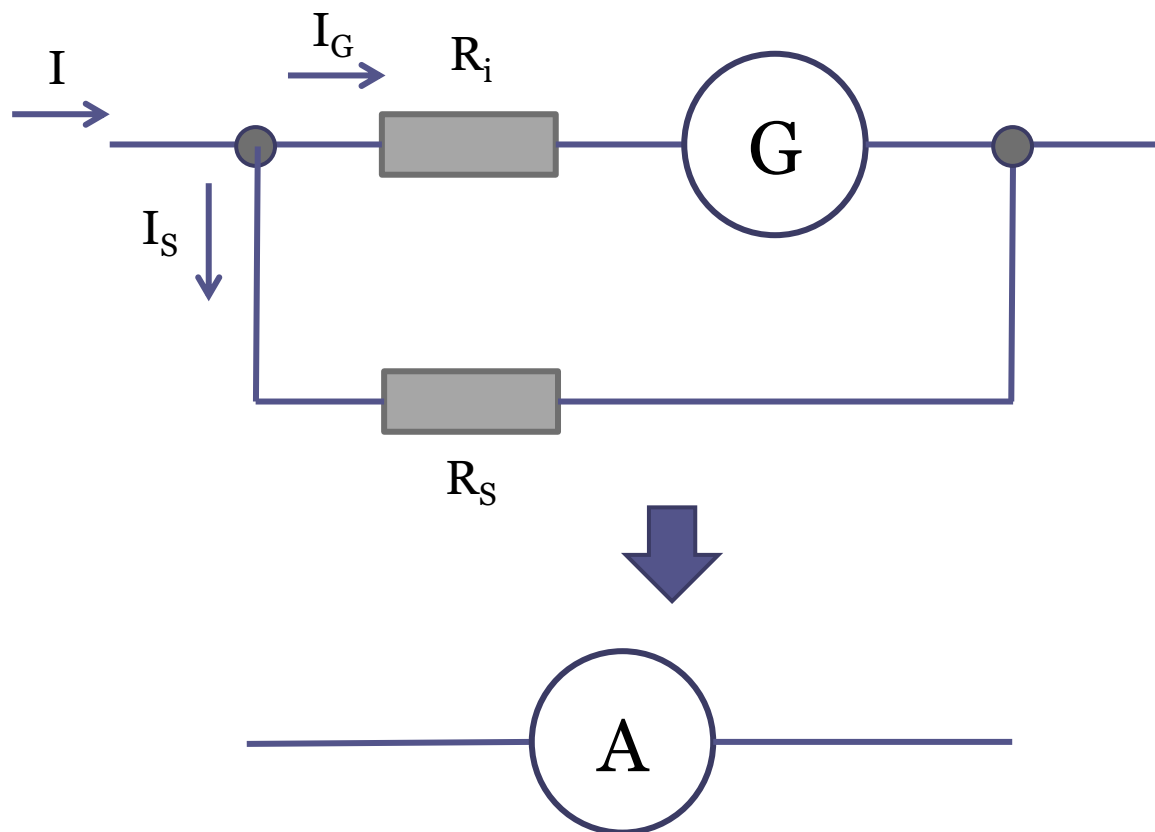
$$R_1 = 0,0005\Omega$$

$$R_2 = 0,0045\Omega$$

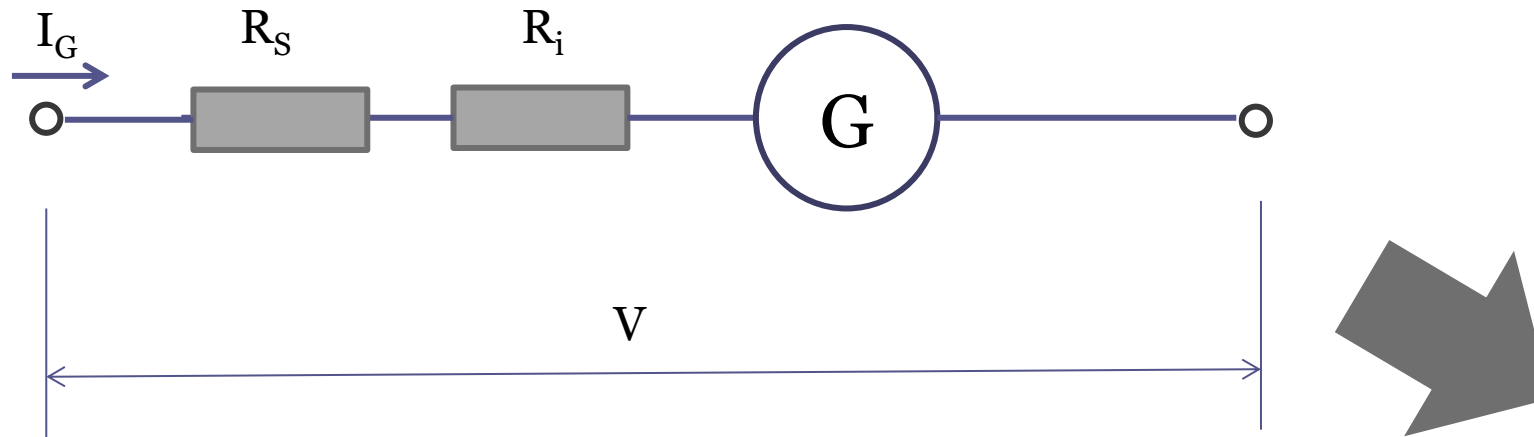
Medidas de Corrente Alternada



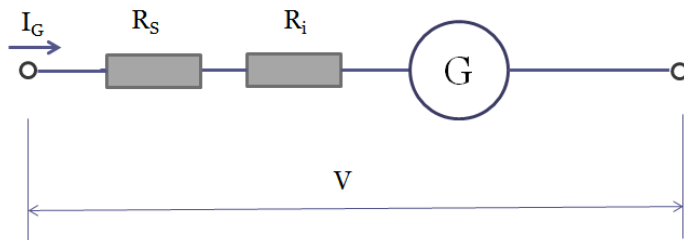
Medidas de Corrente Alternada



Voltímetro Analógico



$$V = I_G (R_S + R_i)$$



$$V = I_G (R_S + R_i)$$

Exemplo:

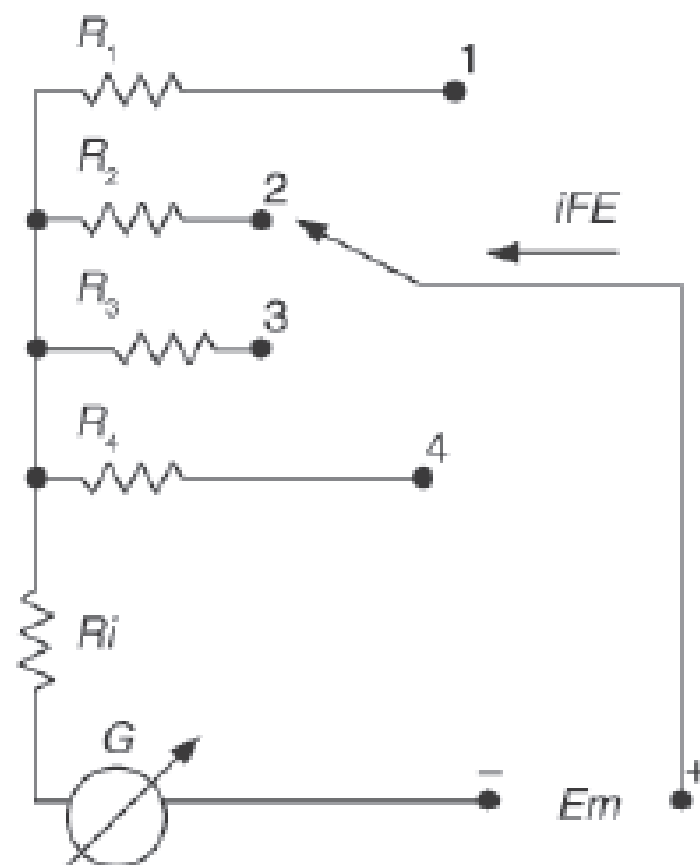
Voltímetro para medir 1000V

Galvanômetro de $50\mu\text{A}$ e $R_i = 5\text{K}\Omega$

$$I_G = \frac{1000}{R_S + 5 \cdot 10^3}$$

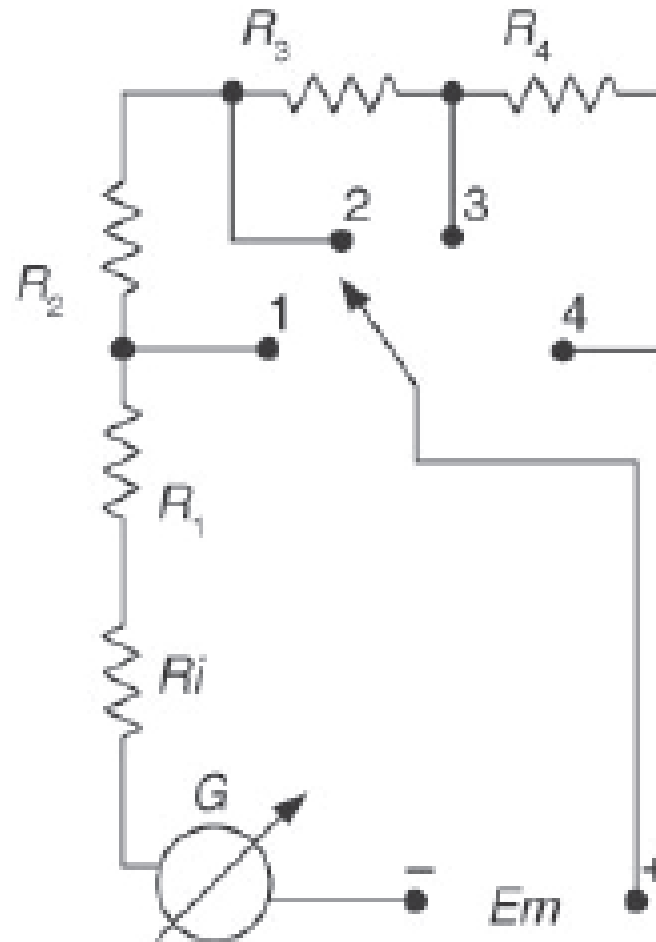
$$R_S = \frac{1000}{I_G} - 5 \cdot 10^3 = \frac{1000}{50 \cdot 10^{-6}} - 5 \cdot 10^3$$

$$R_S = 20 \cdot 10^6 - 5 \cong 20\text{M}\Omega$$



voltímetro analógico com escalas.

Outra opção: Com chave rotativa



Exemplo:

Galvanômetro de 1mA de fundo de escala e resistência de 10Ω

As tensões desejadas são: 200mV, 2V, 20V e 200V

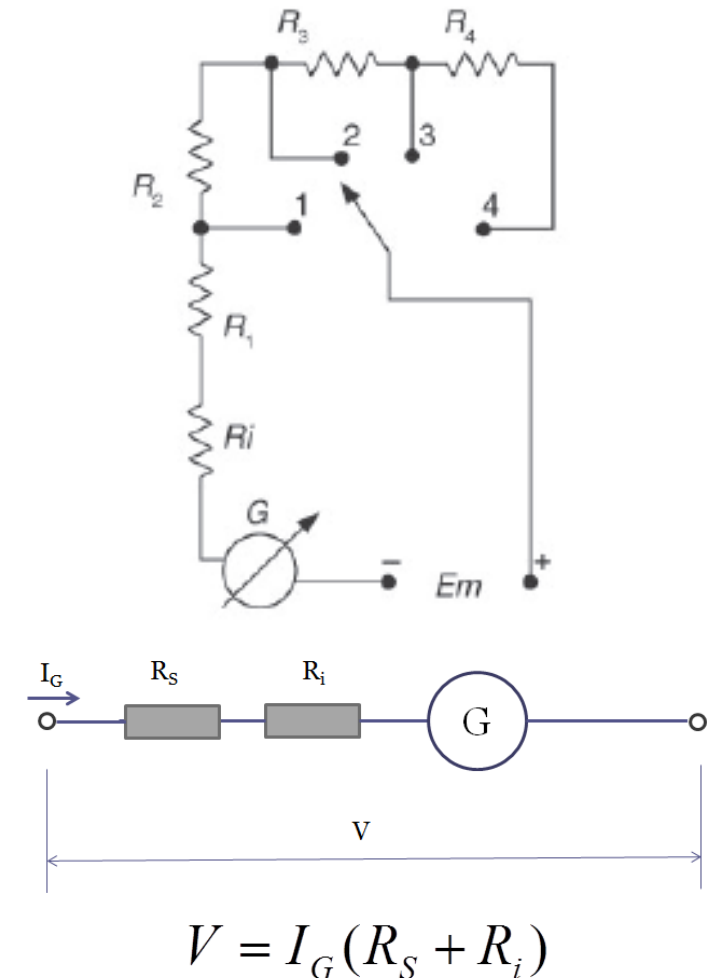
$$\frac{V}{I_G} - R_i = R_s$$

$$R_1 = \frac{0,2}{0,0001} - 10 = 190\Omega$$

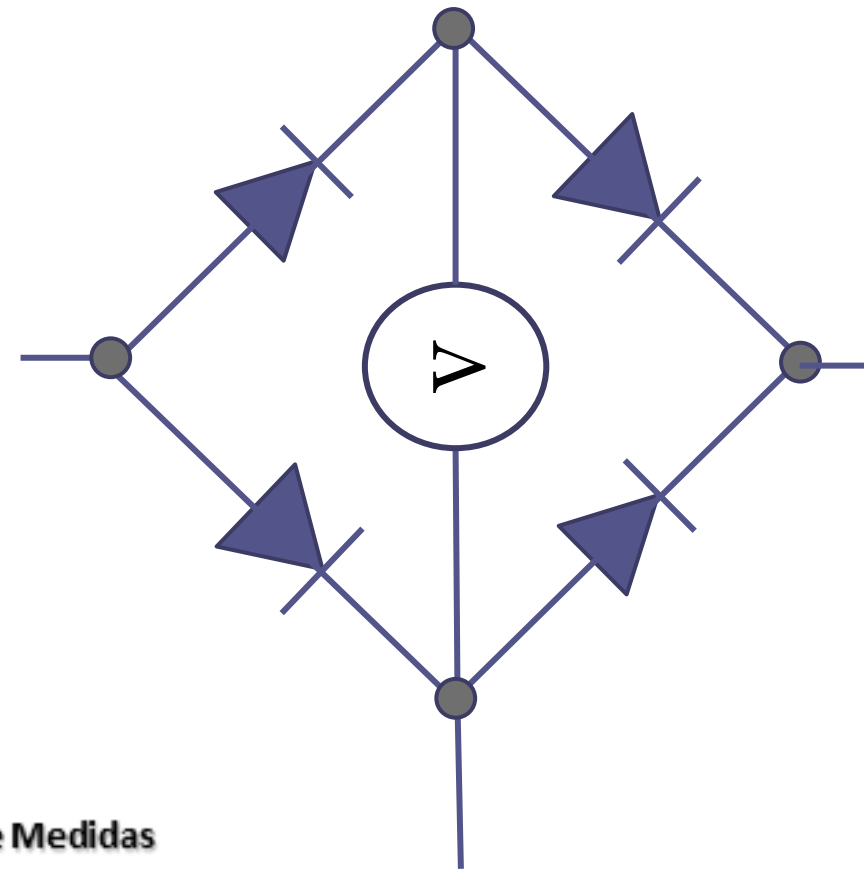
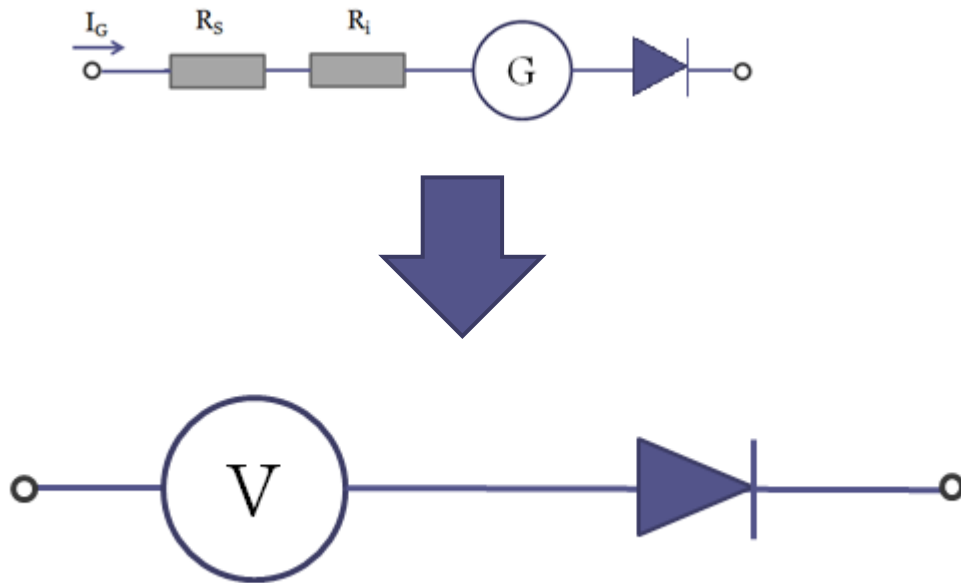
$$R_2 = \frac{2}{0,0001} - 10 - 190 = 1800\Omega$$

$$R_3 = \frac{20}{0,0001} - 10 - 190 - 1800 = 18000\Omega$$

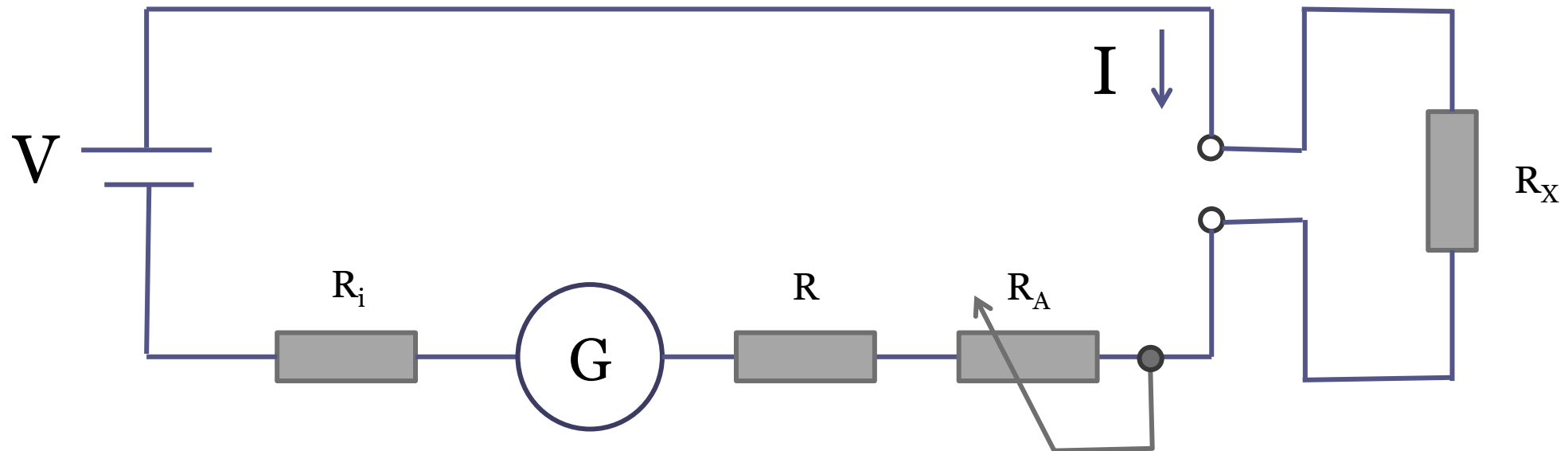
$$R_2 = \frac{200}{0,0001} - 10 - 190 - 1800 - 18000 = 180000\Omega$$



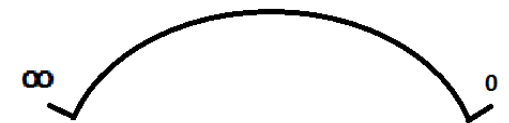
Voltímetro para tensão AC

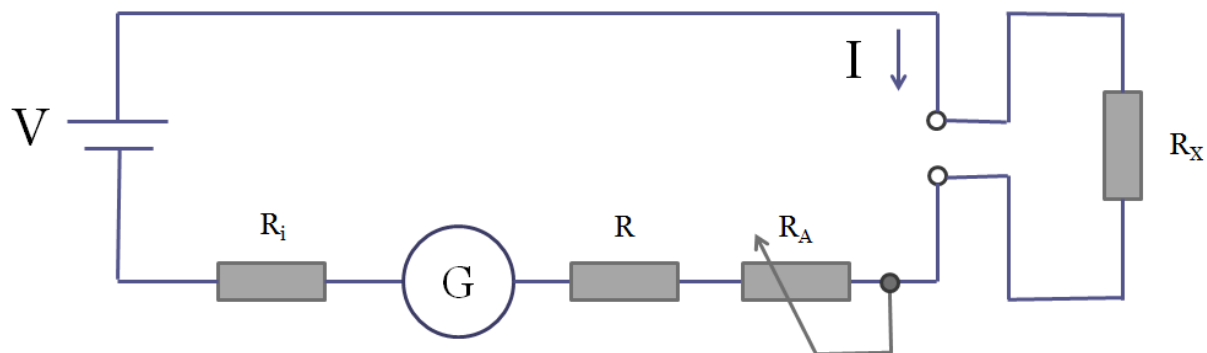


Ohmímetro Analógico



$$I = \frac{V}{R_1 + R + R_A} \text{ (Ajuste de fundo de escala, em curto)}$$





$$I_X (R_1 + R + R_A) + I_X R_X = V = I(R_1 + R + R_A)$$

$$R_X = \left(\frac{I}{I_X} - 1 \right) (R_1 + R + R_A)$$

Eletrômetro:

Multímetro CC refinado

Resistência de entrada $> 10^{14} \Omega$

Corrente de offset $< 5 \cdot 10^{-14} A$

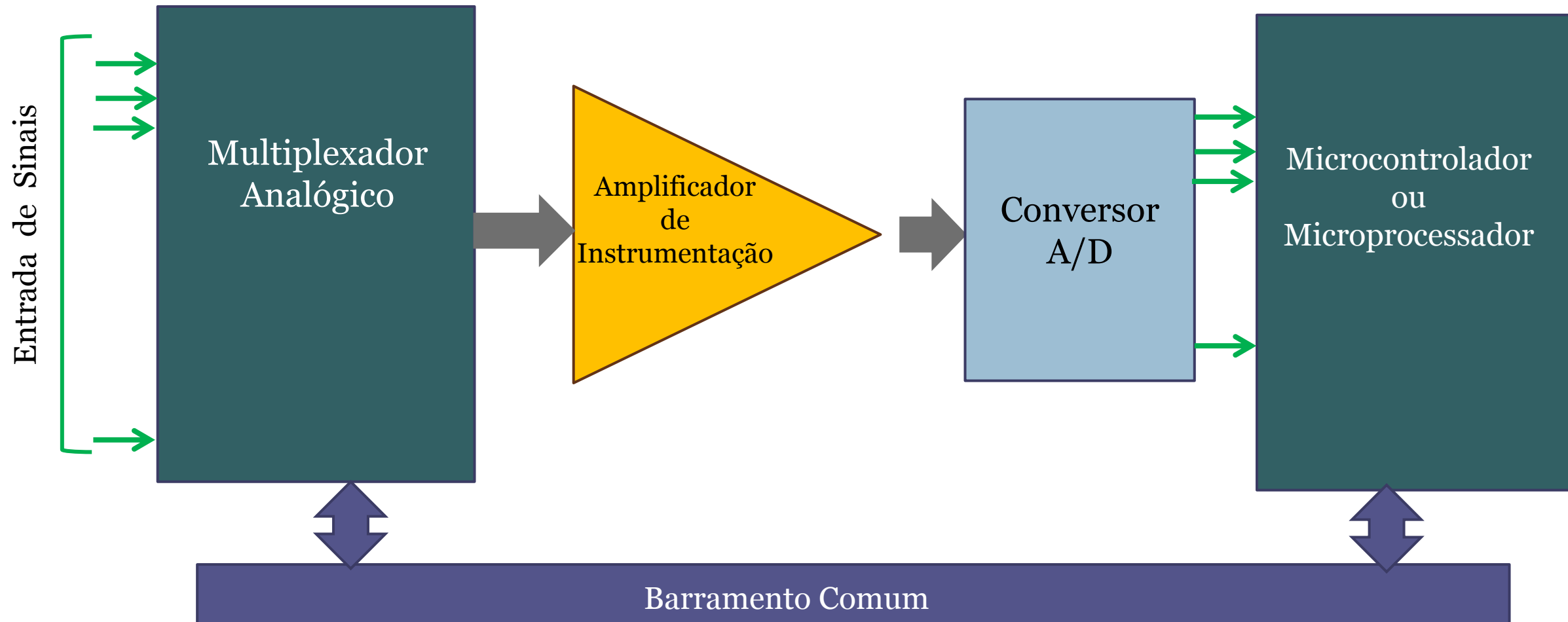
Usos do Eletrômetro:

correntes menores que $10^{-8} A$

Resistências maiores que $10^9 \Omega$

Cargas pequenas $5 \cdot 10^{-16} C$

Instrumentação Digital:



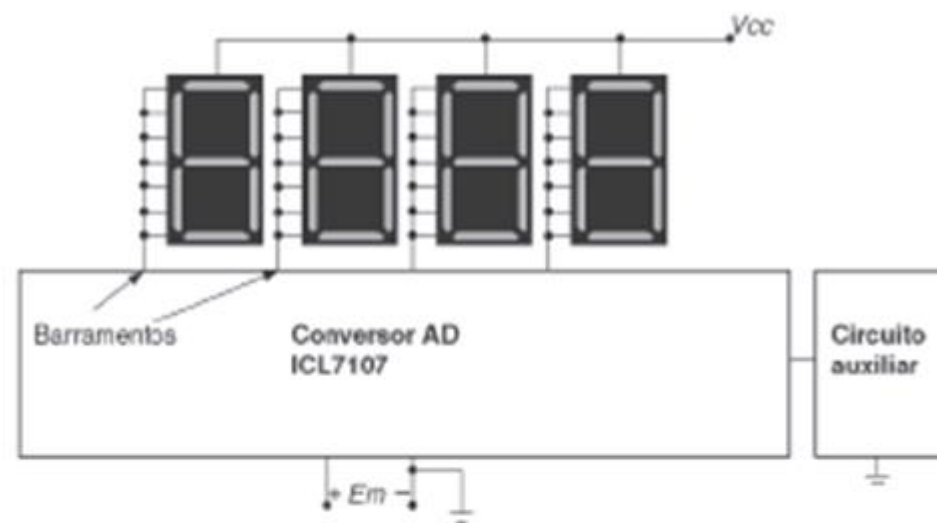
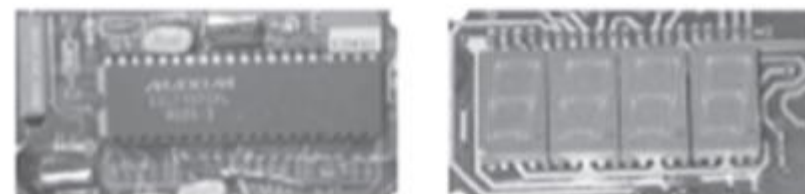
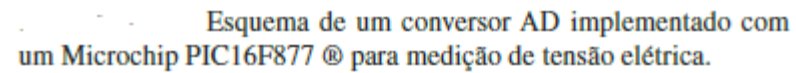
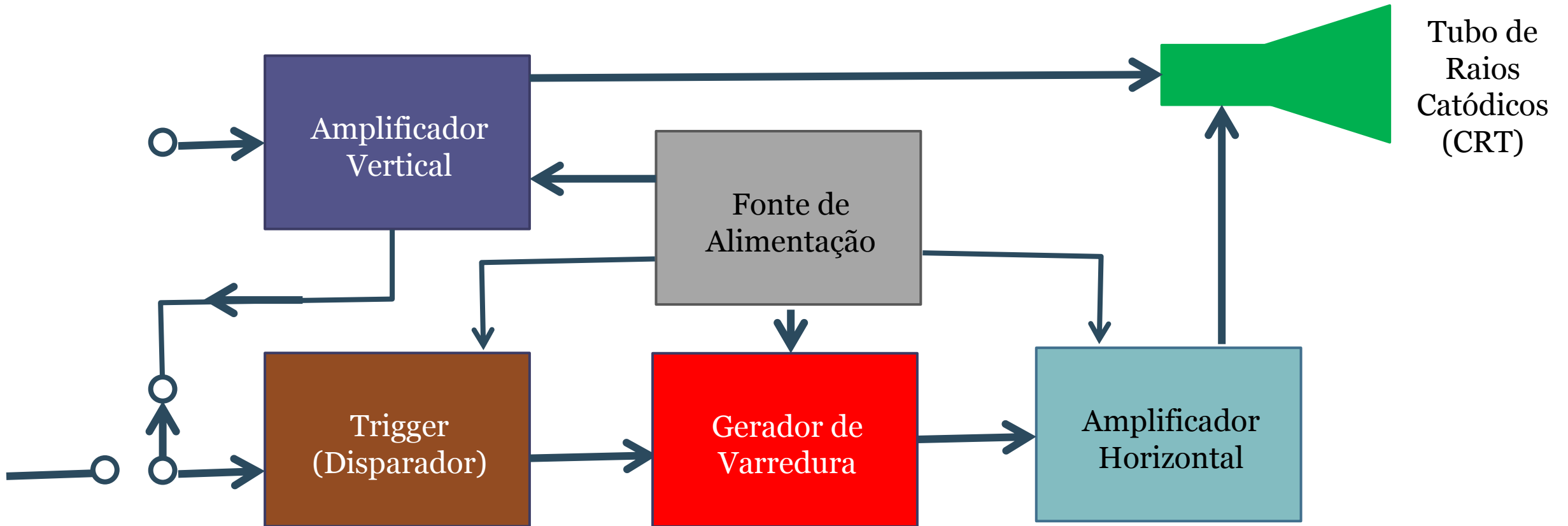


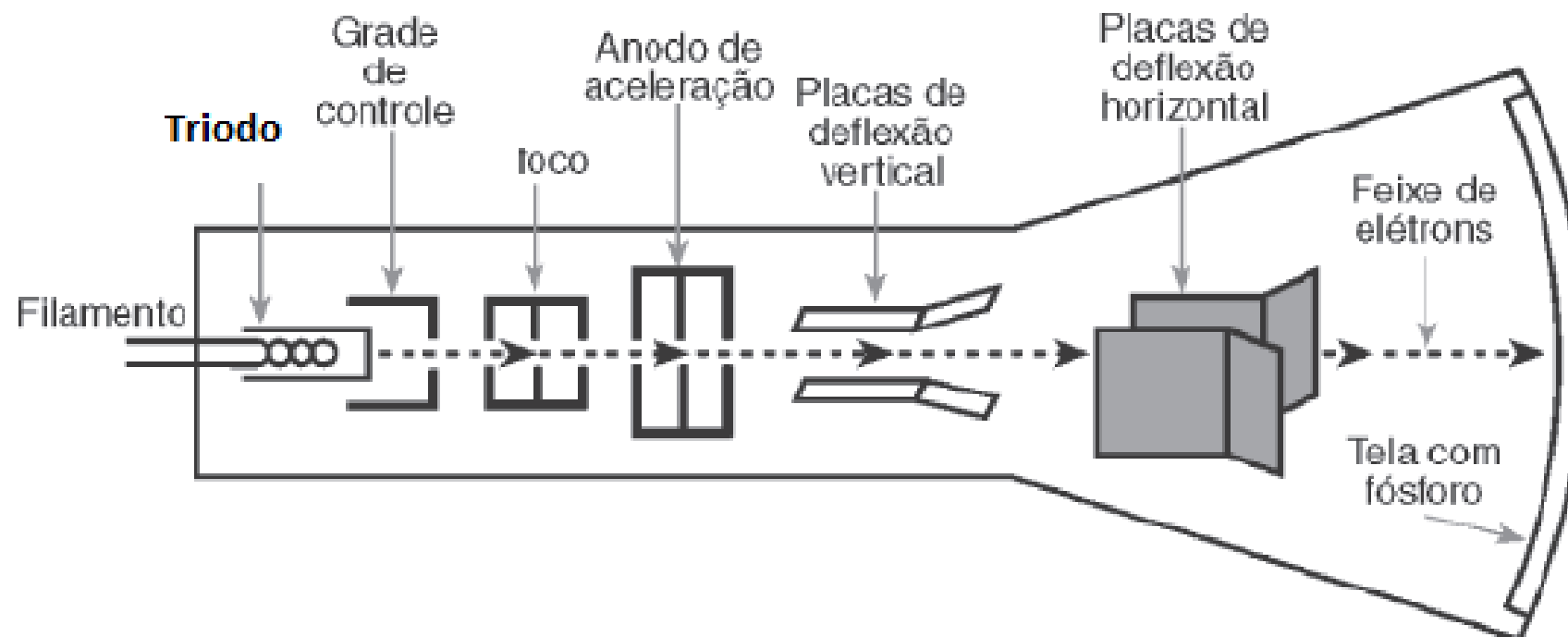
Diagrama de blocos de um multímetro digital.





Osciloscópio Analógico:

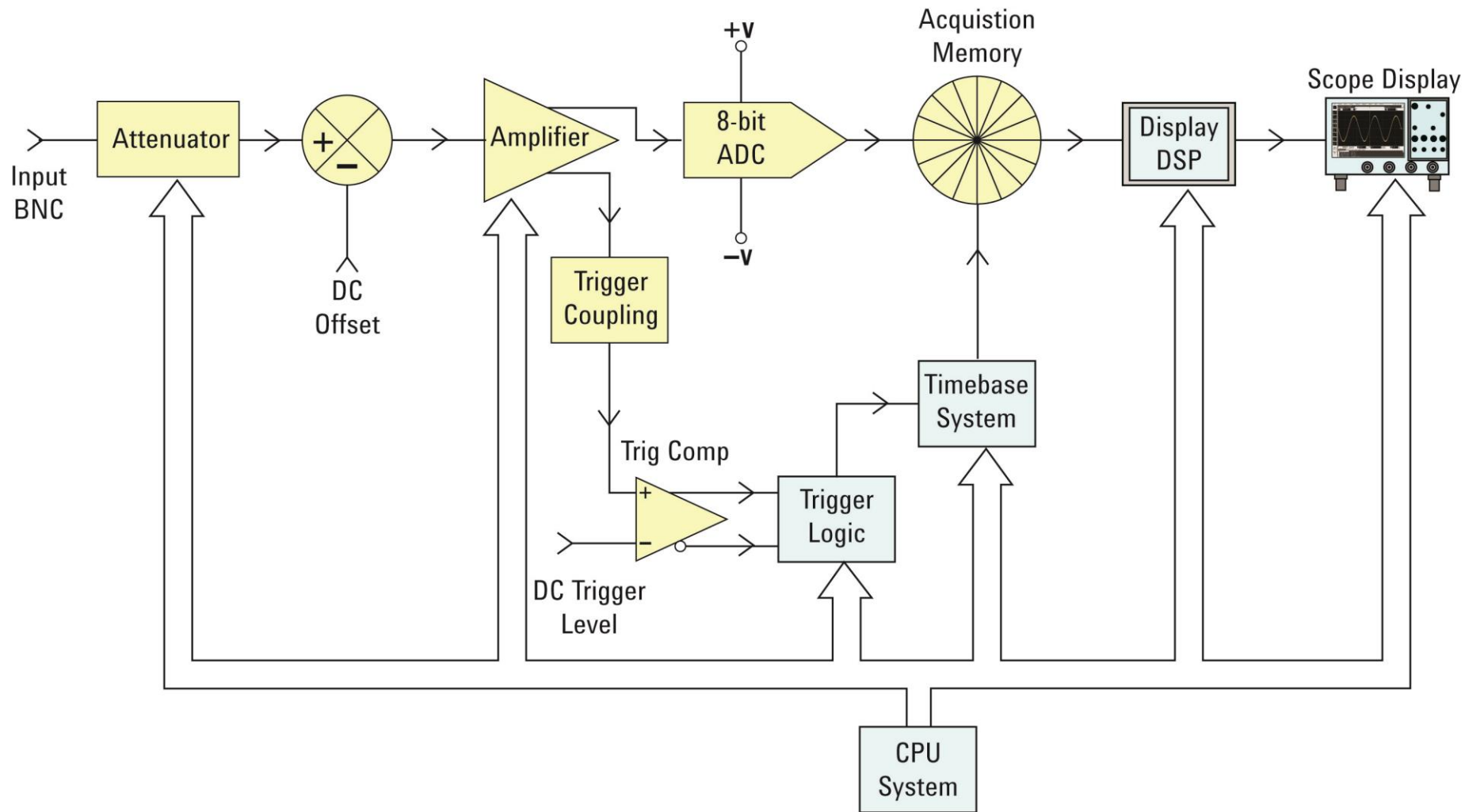


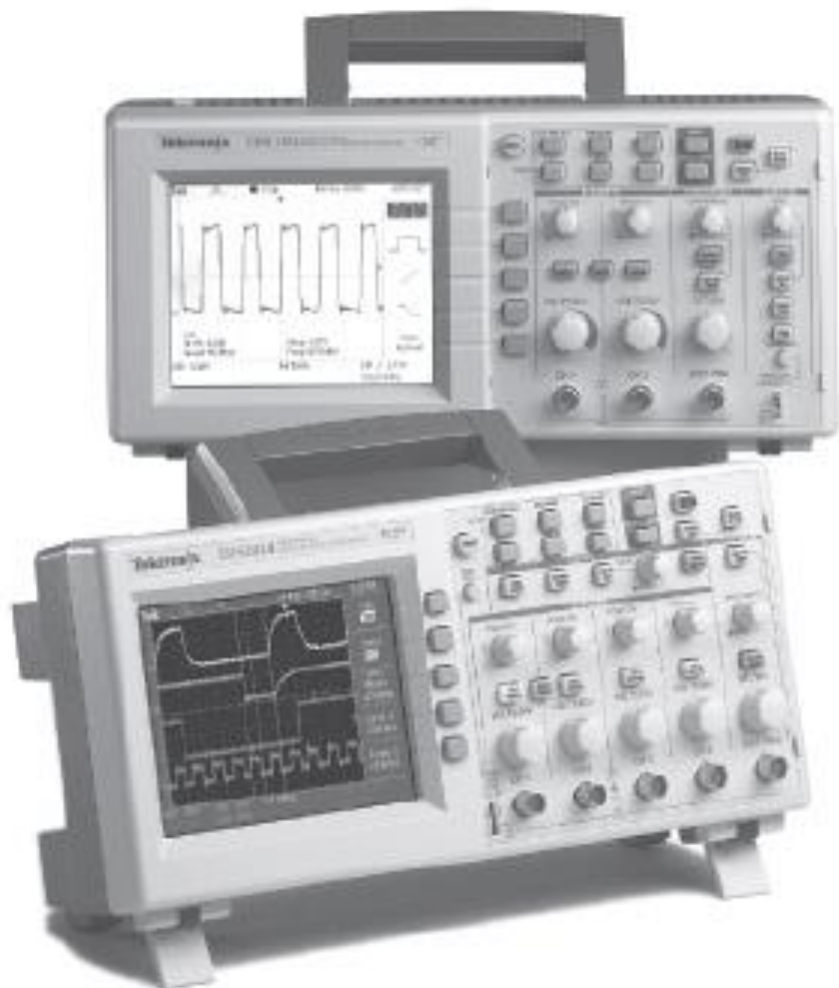


Tubo de raios catódicos.

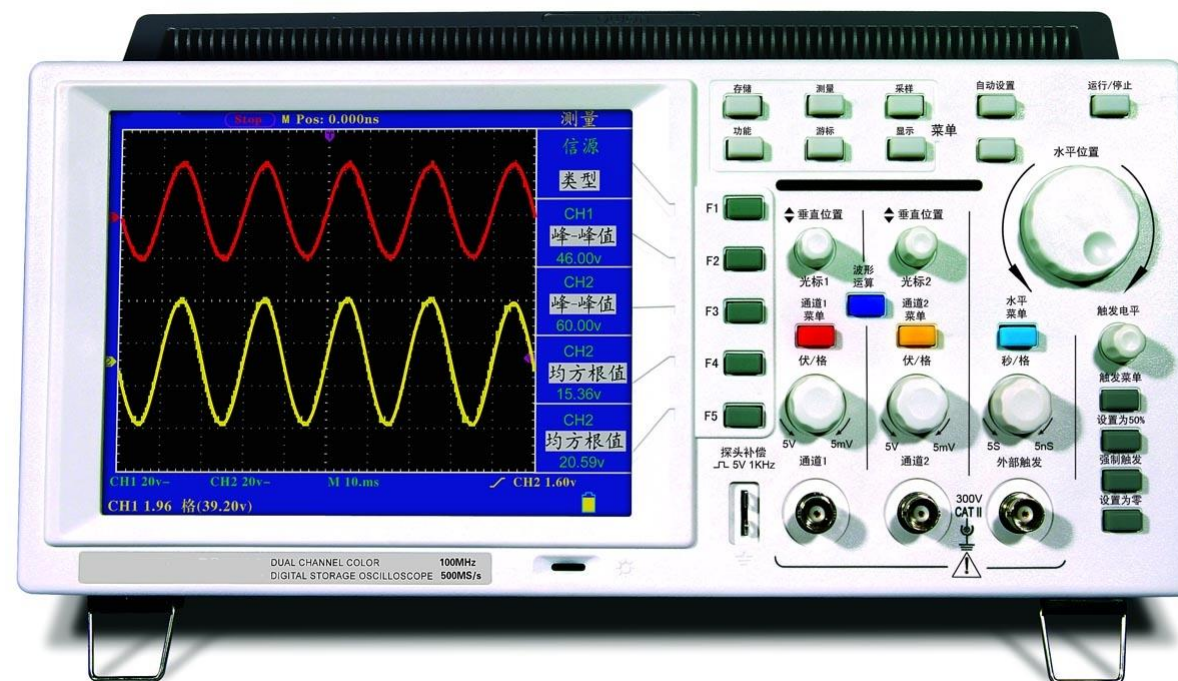


Osciloscópio analógico





Osciloscópio digital.

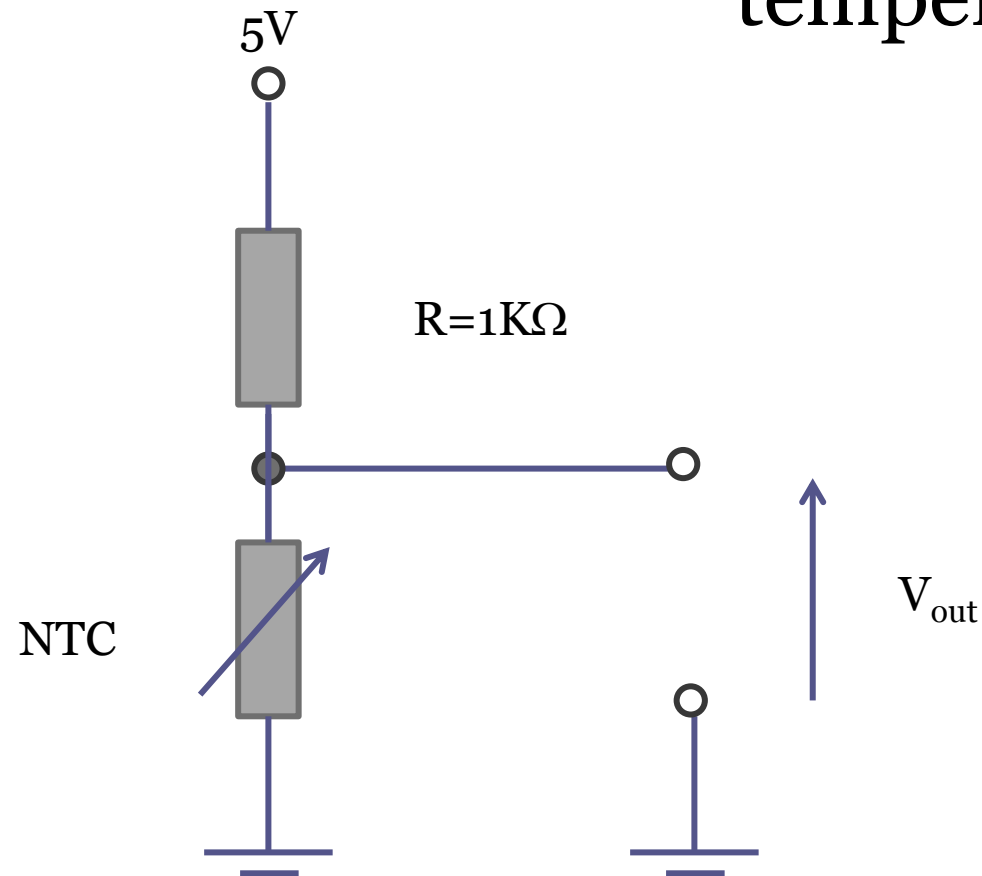


Frequencímetro

Analizador de Espectro

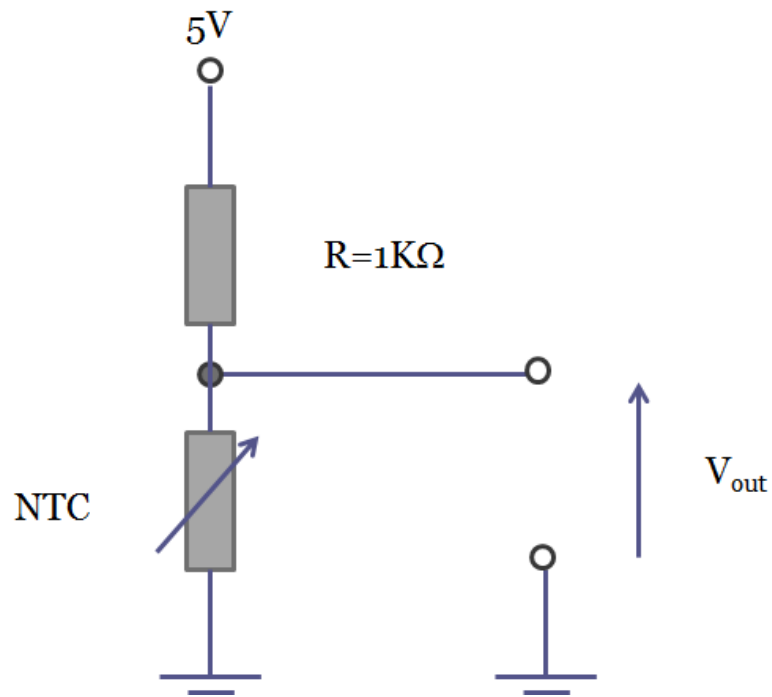
Outros

NTC – Implementação de um sistema de leitura de temperatura



Vitor Akihiro

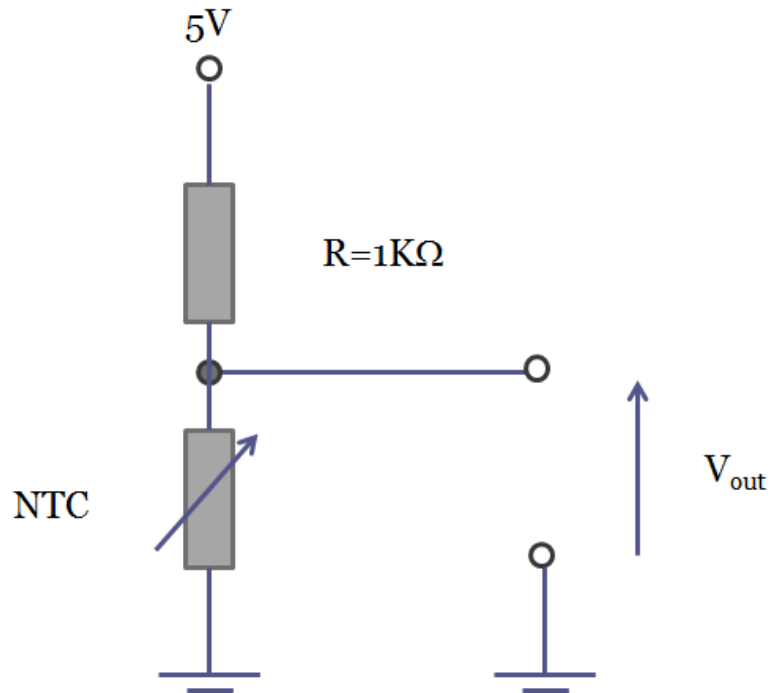
Temperatura [°C]	kOhm
4	3,5
11	2,7
12	2,72
19	1,6
23	1,38
25	1,46
28	1,25
34	1,01
35	0,96
40	0,83
44	0,68
48	0,58
52	0,52
54	0,46
61	0,41
67	0,35
71	0,33
72	0,30
75	0,38



$$5V = (1K + R_{NTC})I$$

$$I = \frac{5V}{1K + R_{NTC}}$$

$$V_{out} = R_{NTC} \cdot \frac{5V}{1K + R_{NTC}}$$



$$V_{out} = R_{NTC} \cdot \frac{5V}{1K + R_{NTC}}$$

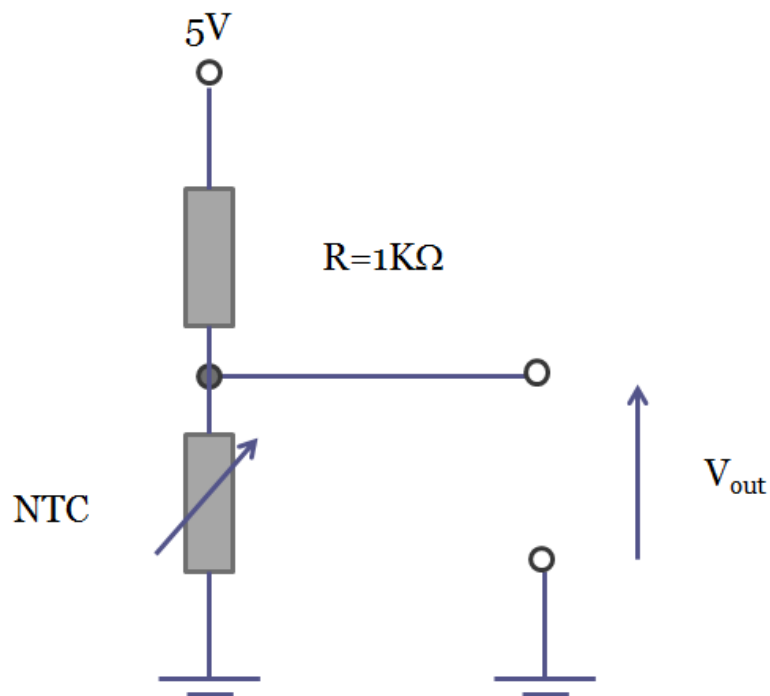
Temperatura [°C]	kOhm	Vout
4	3,5	3,89
11	2,7	3,65
12	2,72	3,66
19	1,6	3,08
23	1,38	2,90
25	1,46	2,97
28	1,25	2,78
34	1,01	2,51
35	0,96	2,45
40	0,83	2,27
44	0,68	2,02
48	0,58	1,84
52	0,52	1,71
54	0,46	1,58
61	0,41	1,45
67	0,35	1,30
71	0,33	1,24
72	0,30	1,15
75	0,38	1,38

Temperatura [°C]	kOhm
4	3,5
11	2,7
12	2,72
19	1,6
23	1,38
25	1,46
28	1,25
34	1,01
35	0,96
40	0,83
44	0,68
48	0,58
52	0,52
54	0,46
61	0,41
67	0,35
71	0,33
72	0,30
75	0,38

$$a = -0.03772 \text{ e } b = 2.659934$$



$$R_{NTC} = -0,03772T + 2,65993$$



$$R_{NTC} = -0,03772T + 2,65993$$

Temperatura [°C]	kOhm	Vout
4	3,5	3,89
11	2,7	3,65
12	2,72	3,66
19	1,6	3,08
23	1,38	2,90
25	1,46	2,97
28	1,25	2,78
34	1,01	2,51
35	0,96	2,45
40	0,83	2,27
44	0,68	2,02
48	0,58	1,84
52	0,52	1,71
54	0,46	1,58
61	0,41	1,45
67	0,35	1,30
71	0,33	1,24
72	0,30	1,15
75	0,38	1,38

$$V_{out} = R_{NTC} \cdot \frac{5V}{1K + R_{NTC}}$$

Valor Teórico Calculado

Temperatura [°C]	kOhm	Vout	RNTC(Calculado)	Vout Calculado	Erro
4	3,5	3,89	2,51	3,58	0,31
11	2,7	3,65	2,25	3,46	0,19
12	2,72	3,66	2,21	3,44	0,21
19	1,6	3,08	1,94	3,30	-0,22
23	1,38	2,90	1,79	3,21	-0,31
25	1,46	2,97	1,72	3,16	-0,19
28	1,25	2,78	1,60	3,08	-0,30
34	1,01	2,51	1,38	2,90	-0,38
35	0,96	2,45	1,34	2,86	-0,41
40	0,83	2,27	1,15	2,68	-0,41
44	0,68	2,02	1,00	2,50	-0,48
48	0,58	1,84	0,85	2,30	-0,46
52	0,52	1,71	0,70	2,06	-0,35
54	0,46	1,58	0,62	1,92	-0,34
61	0,41	1,45	0,36	1,32	0,13
67	0,35	1,30	0,13	0,59	0,71
71	0,33	1,24	-0,02	-0,09	1,33
72	0,30	1,15	-0,06	-0,30	1,45
75	0,38	1,38	-0,17	-1,02	2,39

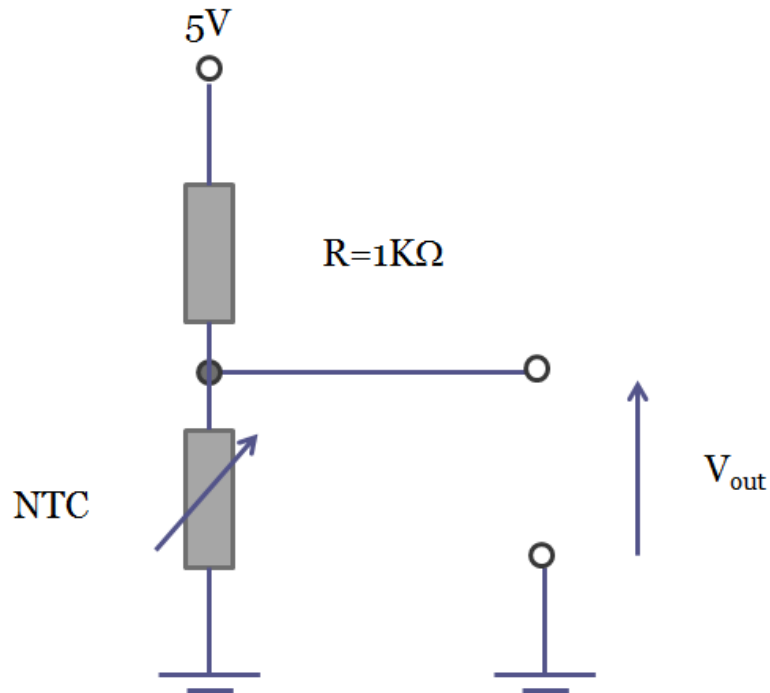
Usando a Região Linear do NTC

Temperatura [°C]	kOhm
19	1,6
23	1,38
25	1,46
28	1,25
34	1,01
35	0,96
40	0,83
44	0,68
48	0,58
52	0,52
54	0,46

$$a = -0.032934 \text{ e } b = 2.179051$$



$$R_{NTC} = -0,032934T + 2,179051$$



$$R_{NTC} = -0,032934T + 2,179051$$

Temperatura [°C]	kOhm	Vout	RNTC(Calculado)	Vout Calculado	Erro
19	1,6	3,08	1,55	3,04	0,04
23	1,38	2,90	1,42	2,94	-0,04
25	1,46	2,97	1,36	2,88	0,09
28	1,25	2,78	1,26	2,78	-0,01
34	1,01	2,51	1,06	2,57	-0,06
35	0,96	2,45	1,03	2,53	-0,08
40	0,83	2,27	0,86	2,31	-0,05
44	0,68	2,02	0,73	2,11	-0,09
48	0,58	1,84	0,60	1,87	-0,04
52	0,52	1,71	0,47	1,59	0,12
54	0,46	1,58	0,40	1,43	0,15

$$V_{out} = R_{NTC} \cdot \frac{5V}{1K + R_{NTC}}$$

Usando o termômetro na região linear

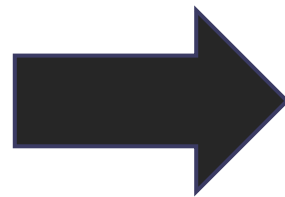
Pontos extremos:

15°C:

$$R_{NTC} = -0,032934T + 2,179051$$

$$R_{NTC} = (-0,032934).15 + 2,179051$$

$$R_{NTC} = 1,685041$$



$$V_{out} = R_{NTC} \cdot \frac{5V}{1K + R_{NTC}}$$

$$V_{out} = 1,685041 \cdot \frac{5V}{1K + 1,685041}$$

$$V_{out} = 3,137831042$$

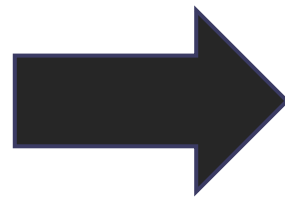
Pontos extremos:

55°C:

$$R_{NTC} = -0,032934T + 2,179051$$

$$R_{NTC} = (-0,032934).55 + 2,179051$$

$$R_{NTC} = 0,367681$$



$$V_{out} = R_{NTC} \cdot \frac{5V}{1K + R_{NTC}}$$

$$V_{out} = 0,367681 \cdot \frac{5V}{1K + 0,367681}$$

$$V_{out} = 1,344176749$$

$$V_{out} = 3,137831042 \rightarrow 15^{\circ}\text{C}$$

$$V_{out} = 1,344176749 \rightarrow 55^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Variação} = 1,793654293$$

$$\textit{Variação} = 1,793654293$$



Para representar uma variação de 40°C
(15°C a 55°C)

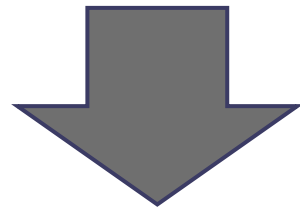
Variação = 1,793654293



Para representar uma variação de 40°C
(15°C a 55°C)



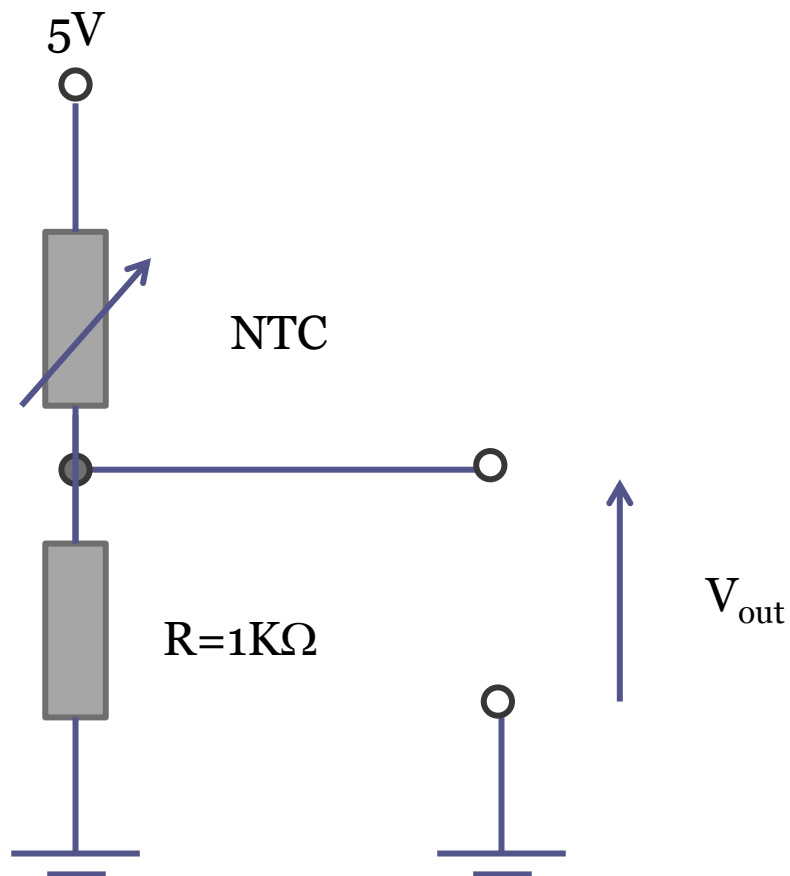
Usando um conversor D/A de 8bits



$1,793654293/256 = 0,0070064V$



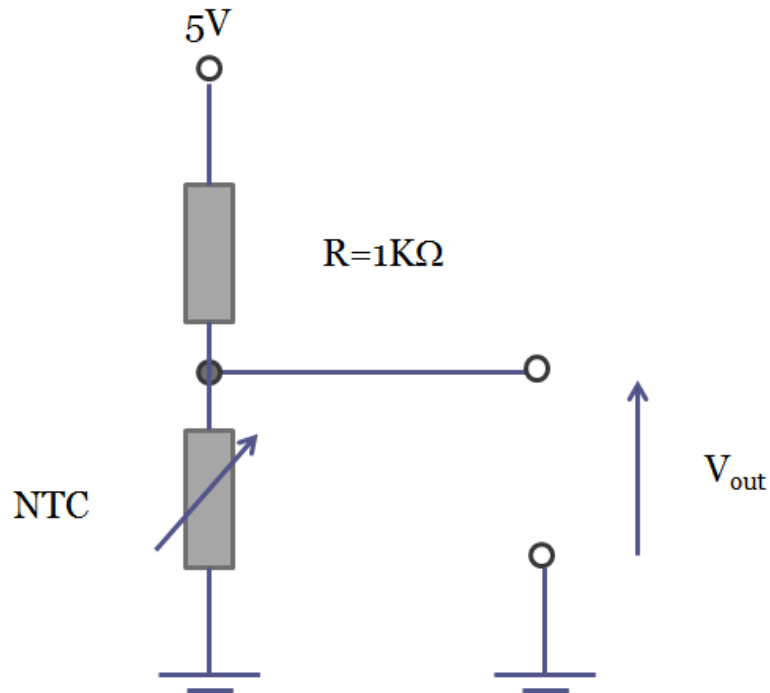
$40/256 = 0,15625^{\circ}C$



$$5V = (1K + R_{NTC})I$$

$$I = \frac{5V}{1K + R_{NTC}}$$

$$V_{out} = 1K \cdot \frac{5V}{1K + R_{NTC}}$$



$$V_{out} = 1K \cdot \frac{5V}{1K + R_{NTC}}$$

Temperatura [°C]	kOhm	Vout
4	3,5	3,89
11	2,7	3,65
12	2,72	3,66
19	1,6	3,08
23	1,38	2,90
25	1,46	2,97
28	1,25	2,78
34	1,01	2,51
35	0,96	2,45
40	0,83	2,27
44	0,68	2,02
48	0,58	1,84
52	0,52	1,71
54	0,46	1,58
61	0,41	1,45
67	0,35	1,30
71	0,33	1,24
72	0,30	1,15
75	0,38	1,38

Temperatura [°C]	kOhm	Vout	RNTC(Calculado)	Vout Calculado	Erro
4	3,5	1,11	2,51	1,42	-0,31
11	2,7	1,35	2,25	1,54	-0,19
12	2,72	1,34	2,21	1,56	-0,21
19	1,6	1,92	1,94	1,70	0,22
23	1,38	2,10	1,79	1,79	0,31
25	1,46	2,03	1,72	1,84	0,19
28	1,25	2,22	1,60	1,92	0,30
34	1,01	2,49	1,38	2,10	0,38
35	0,96	2,55	1,34	2,14	0,41
40	0,83	2,73	1,15	2,32	0,41
44	0,68	2,98	1,00	2,50	0,48
48	0,58	3,16	0,85	2,70	0,46
52	0,52	3,29	0,70	2,94	0,35
54	0,46	3,42	0,62	3,08	0,34
61	0,41	3,55	0,36	3,68	-0,13
67	0,35	3,70	0,13	4,41	-0,71
71	0,33	3,76	-0,02	5,09	-1,33
72	0,30	3,85	-0,06	5,30	-1,45
75	0,38	3,62	-0,17	6,02	-2,39

$$R_{NTC} = -0,03772T + 2,65993$$

Usando a Região Linear do NTC

Temperatura [°C]	kOhm
19	1,6
23	1,38
25	1,46
28	1,25
34	1,01
35	0,96
40	0,83
44	0,68
48	0,58
52	0,52
54	0,46

$$a = -0.032934 \text{ e } b = 2.179051$$



$$R_{NTC} = -0,032934T + 2,179051$$

Temperatura [°C]	kOhm	Vout	RNTC(Calculado)	Vout Calculado	Erro
19	1,6	1,92	1,55	1,96	-0,04
23	1,38	2,10	1,42	2,06	0,04
25	1,46	2,03	1,36	2,12	-0,09
28	1,25	2,22	1,26	2,22	0,01
34	1,01	2,49	1,06	2,43	0,06
35	0,96	2,55	1,03	2,47	0,08
40	0,83	2,73	0,86	2,69	0,05
44	0,68	2,98	0,73	2,89	0,09
48	0,58	3,16	0,60	3,13	0,04
52	0,52	3,29	0,47	3,41	-0,12
54	0,46	3,42	0,40	3,57	-0,15

$$R_{NTC} = -0,032934T + 2,179051$$

Usando o termômetro na região linear

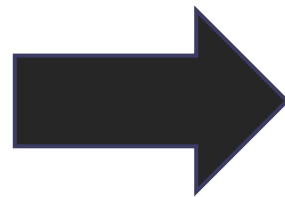
Pontos extremos:

15°C:

$$R_{NTC} = -0,032934T + 2,179051$$

$$R_{NTC} = (-0,032934).15 + 2,179051$$

$$R_{NTC} = 1,685041$$



$$V_{out} = 1K \cdot \frac{5V}{1K + R_{NTC}}$$

$$V_{out} = 1K \cdot \frac{5V}{1K + 1,685041K}$$

$$V_{out} = 1,8621689576V$$

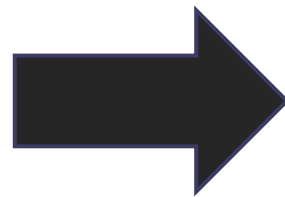
Pontos extremos:

55°C:

$$R_{NTC} = -0,032934T + 2,179051$$

$$R_{NTC} = (-0,032934).55 + 2,179051$$

$$R_{NTC} = 0,367681$$



$$V_{out} = 1K \cdot \frac{5V}{1K + R_{NTC}}$$

$$V_{out} = 1K \cdot \frac{5V}{1K + 0,367681K}$$

$$V_{out} = 3,6558232512V$$

$$V_{out} = 1,8621689576V \quad \rightarrow \quad 15^{\circ}\text{C}$$

$$V_{out} = 3,6558232512V \quad \rightarrow \quad 55^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Variação} = 1,793654293$$

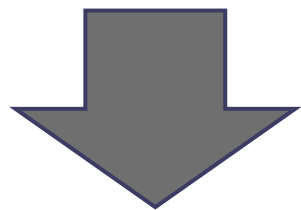
$$\textit{Variação} = 1,793654293$$



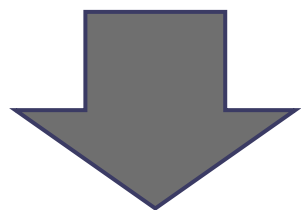
Para representar uma variação de 40°C
(15°C a 55°C)

$$\textit{Variação} = 1,793654293$$

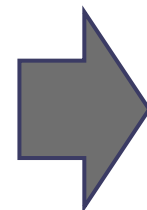
Para representar uma variação de 40°C
(15°C a 55°C)



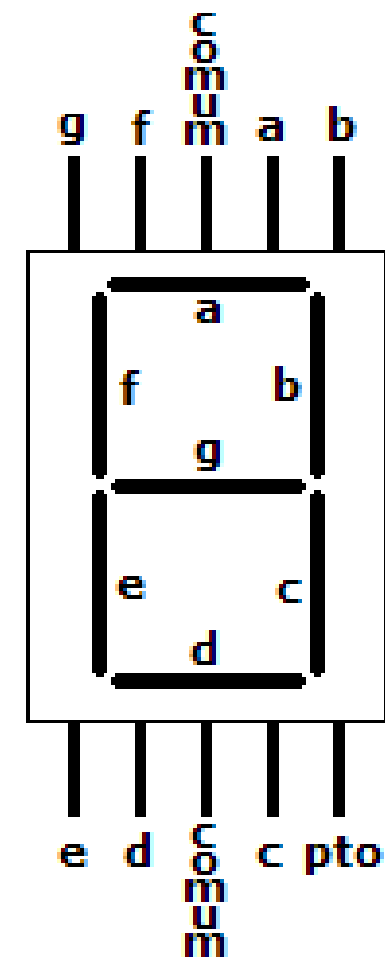
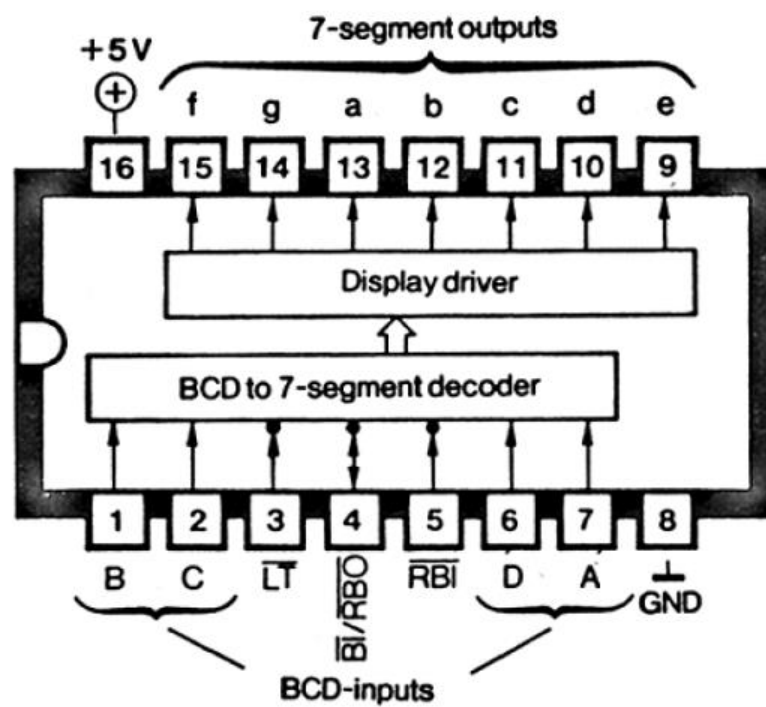
Usando um conversor D/A de 8bits



$$1,793654293/256 = 0,0070064V$$



$$40/256 = 0,15625^{\circ}\text{C}$$



Decimal: 0 BCD: 0000	Decimal: 8 BCD: 1000
Decimal: 1 BCD: 0001	Decimal: 9 BCD: 1001
Decimal: 2 BCD: 0010	Decimal: 10 BCD: 0001 0000
Decimal: 3 BCD: 0011	Decimal: 11 BCD: 0001 0001
Decimal: 4 BCD: 0100	Decimal: 12 BCD: 0001 0010
Decimal: 5 BCD: 0101	Decimal: 13 BCD: 0001 0011
Decimal: 6 BCD: 0110	Decimal: 14 BCD: 0001 0100
Decimal: 7 BCD: 0111	Decimal: 15 BCD: 0001 0101

