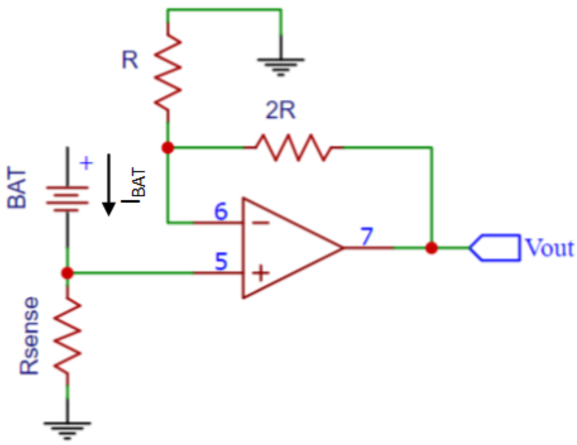
Instrumentação Eletrónica e Medidas

Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

1ª Chamada – 22 de janeiro de 2024

Duração da prova: 2 horas (cotação no fim de cada questão)

1) A corrente elétrica fornecida por uma bateria (BAT) é medida, de forma indireta, através da queda de tensão aos terminais de uma resistência R_{sense} como se mostra no esquema em baixo:



a) Determine a expressão que relaciona a tensão à saída do AMPOP, V_{out}, com a corrente I_{BAT}? **[2]**

R:

O amplificador operacional encontra-se numa configuração padrão (amplificador não-inversor) cuja saída Vout depende de V+ de acordo com:

$$V_{out} = \left(1 + \frac{2R}{R}\right) V^{+} = 3V^{+}$$

Onde

$$V^{+} = R_{sense} I_{bat}$$

O que leva a que:

$$V_{out} = 3 R_{sense} I_{bat}$$

b) Considere que o valor de R_{sense} é conhecida com uma incerteza ε_{sense} e que as resistências de realimentação do AMPOP possuem uma exatidão igual a ±0.01R Ω. Obtenha a expressão que permite calcular o majorante para o erro relativo de I_{BAT} [3]

R:

Devido ao facto de existir diferenças entre a resistência da malha de realimentação e a resistência de pull-down, o valor da corrente Ibat é estimada com base:

$$I_{bat} = \frac{V_{out}}{\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) R_{sense}}$$

Onde R_1 se refere à resistência de realimentação e R_2 a segunda resistência de polarização do amplificador operacional. Ambas possuem um valor nominal igual a R com incerteza de 1%.

Com base na fórmula fundamental da propagação dos erros:

$$\varepsilon_{I_{bat}} \le \left|\frac{\partial I_{bat}}{\partial V_{out}} \cdot \frac{V_{out}}{I_{bat}}\right| \varepsilon_{V_{out}} + \left|\frac{\partial I_{bat}}{\partial R_{sense}} \cdot \frac{R_{sense}}{I_{bat}}\right| \varepsilon_{sense} + \left|\frac{\partial I_{bat}}{\partial R_1} \cdot \frac{R_1}{I_{bat}}\right| \varepsilon_{R_1} + \left|\frac{\partial I_{bat}}{\partial R_2} \cdot \frac{R_2}{I_{bat}}\right| \varepsilon_{R_2}$$

Onde $\varepsilon_{V_{out}}$ se refere à incerteza associada ao processo utilizado para medir V_{out}. O cálculo das derivadas parciais leva a:

$$\frac{\partial I_{bat}}{\partial V_{out}} = \frac{1}{\left(1+\frac{R_1}{R_2}\right) R_{sense}}, \quad \frac{\partial I_{bat}}{\partial R_{sense}} = -\frac{V_{out}}{\left(1+\frac{R_1}{R_2}\right) R_{sense}^2}, \quad \frac{\partial I_{bat}}{\partial R_1} = -\frac{1}{R_2} \frac{V_{out}}{\left(1+\frac{R_1}{R_2}\right)^2 R_{sense}}$$ **e**

$$\frac{\partial I_{bat}}{\partial R_2} = \frac{R_1}{R_2^2} \frac{V_{out}}{\left(1+\frac{R_1}{R_2}\right)^2 R_{sense}}$$

Substituindo na expressão anterior resulta em:

$$\varepsilon_{I_{bat}} \le \varepsilon_{V_{out}} + \varepsilon_{sense} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \varepsilon_{R_1} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \varepsilon_{R_2}$$

Como $\varepsilon_{R_1} = \varepsilon_{R_2} = \varepsilon_R$,

$$\varepsilon_{I_{bat}} \le \varepsilon_{V_{out}} + \varepsilon_{sense} + \frac{2R_1}{R_1 + R_2} \varepsilon_{R_1}$$

$R_1 = 2R$ **e** $R_2 = R$

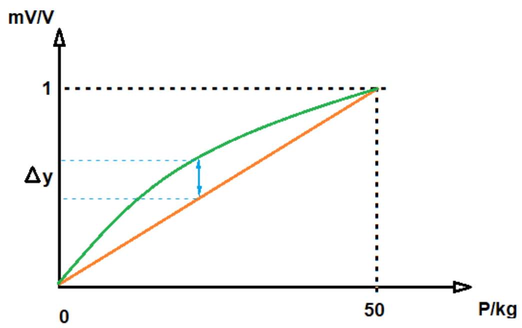
$$\varepsilon_{I_{bat}} \le \varepsilon_{V_{out}} + \varepsilon_{sense} + \frac{4}{3} \varepsilon_R$$

2) Na figura que se segue apresenta-se a um excerto das folhas de dados para uma célula de carga manufaturada pela empresa HTC-Sensor.

Specifications:		
capacity	kg	50kg
rated output	mV/V	1.0 ± 0.1
excitation voltage	Vdc	3-10
non-linearity	%FS	± 0.05
hysteresis	%FS	± 0.05
repeatability	%FS	± 0.05

a) Diga o que entende por não-linearidade de um sensor. Neste caso, qual o valor **absoluto** dessa não-linearidade? **[2]**

R: Trata-se do desvio máximo do sinal de saída relativamente a uma curva de calibração linear tomada entre zero e a capacidade nominal da célula de carga. Para este caso em particular, a curva de calibração e a linha reta tomada entre os extremos da gama de medida poderiam ter o seguinte aspeto:

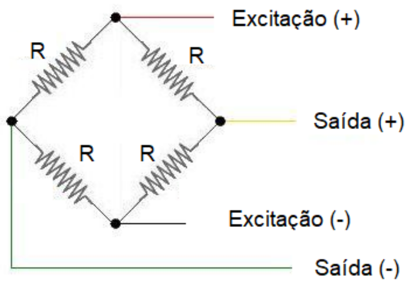


Por definição de não-linearidade integral, $\varepsilon = \dfrac{\Delta y}{FS} \times 100$

Neste caso, o valor apresentado para a não-linearidade é 0.05% do valor de fim-de-escala (FS - full scale) igual a 1mV/V pelo que o valor absoluto da não-linearidade é:

$$\Delta y = \frac{FS\varepsilon}{100} = \frac{1}{100} \times 0.05 = 5 \times 10^{-4} mV/V$$

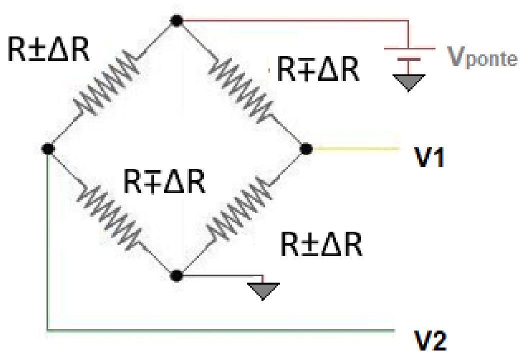
b) Esta célula de carga é composta por quatro extensómetros: dois a operar à tração e outros dois à compressão e ligados numa configuração em ponte de *Wheatstone* como se mostra em baixo:



Considerando que a deformação da célula de carga fez com que as resistências sofressem uma variação no seu valor igual a ΔR, determine o valor da tensão diferencial à saída em função de ΔR e da tensão de excitação da ponte. **[3]**

R:

Os extensómetros funcionam em par e em braços oposto da ponte. Considerando que uma deformação na célula de carga gerou uma alteração da resistência dos extensómetros de R para R±ΔR e definindo a tensão de excitação da ponte como sendo V_{ponte} o esquema apresentado no enunciado passa a ter a seguinte forma:



Onde a tensão de desequilíbrio da ponte Vo = V1-V2 é dada por:

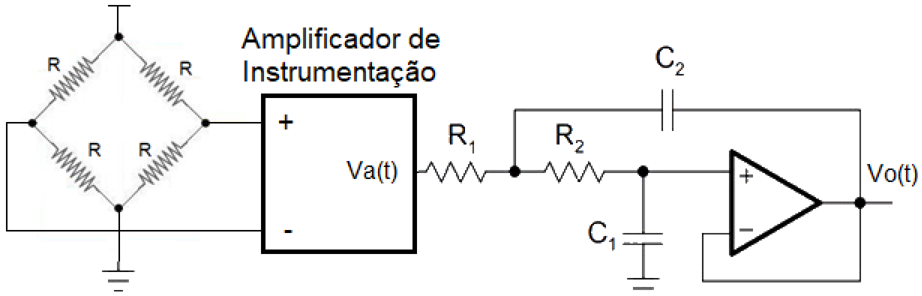
$$V_0 = V_1 - V_2 = \frac{R \pm \Delta R}{R \pm \Delta R + R \mp \Delta R} V_{ponte} - \frac{R \mp \Delta R}{R \mp \Delta R + R \pm \Delta R} V_{ponte}$$

O que leva a que:

$$V_0 = \left(\frac{R \pm \Delta R}{2R} - \frac{R \mp \Delta R}{2R} \right) V_{ponte}$$

$$= \frac{\Delta R}{R} V_{ponte}$$

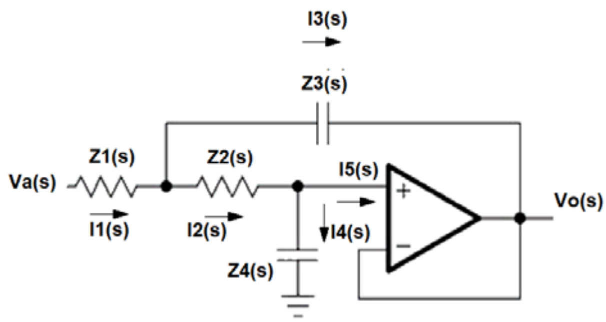
c) O acondicionamento de sinal envolve um amplificador de instrumentação e um filtro ativo como se mostra a seguir:



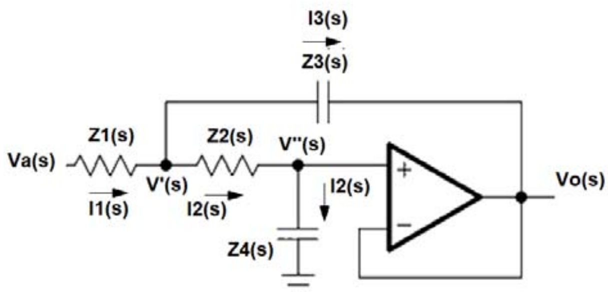
Obtenha a função de transferência do filtro. **[4]**

R:

Pretende-se determinar, no domínio de Laplace, a razão entre $v_o(t)$ e $v_a(t)$.



Considerando o AMPOP ideal, I5(s)=0 e logo I2(s)= I4(s);



$$I_1(s) = I_2(s) + I_3(s)$$

$$I_1(s) = \frac{V_a(s) - V'(s)}{Z_1(s)}$$

$$I_2(s) = \frac{V'(s) - V''(s)}{Z_2(s)} = \frac{V''(s)}{Z_4(s)}$$

$$I_3(s)=\frac{V'(s)-V_0(s)}{Z_3(s)}$$

$$\begin{cases}\dfrac{V_a(s)-V'(s)}{Z_1(s)}=\dfrac{V'(s)-V''(s)}{Z_2(s)}+\dfrac{V'(s)-V_0(s)}{Z_3(s)}\\ \dfrac{V'(s)-V''(s)}{Z_2(s)}=\dfrac{V''(s)}{Z_4(s)}\end{cases}$$

$$\begin{cases}\dfrac{V_a(s)}{Z_1(s)}=V'(s)\left(\dfrac{1}{Z_2(s)}+\dfrac{1}{Z_1(s)}+\dfrac{1}{Z_3(s)}\right)-\dfrac{V''(s)}{Z_2(s)}-\dfrac{V_0(s)}{Z_3(s)}\\ V'(s)=V''(s)\left(\dfrac{Z_2(s)}{Z_4(s)}+1\right)\end{cases}$$

Com realimentação unitária, $V''(s)=V_0(s)$

$$\frac{V_a(s)}{V_0(s)}=Z_1(s)\left(\left(\frac{Z_2(s)}{Z_4(s)}+1\right)\left(\frac{1}{Z_2(s)}+\frac{1}{Z_1(s)}+\frac{1}{Z_3(s)}\right)-\frac{1}{Z_2(s)}-\frac{1}{Z_3(s)}\right)$$

Simplificando fica:

$$\frac{V_0(s)}{V_a(s)}=\frac{Z_3(s)Z_4(s)}{Z_1(s)Z_2(s)+Z_2(s)Z_3(s)+Z_3(s)Z_4(s)+Z_1(s)Z_3(s)}$$

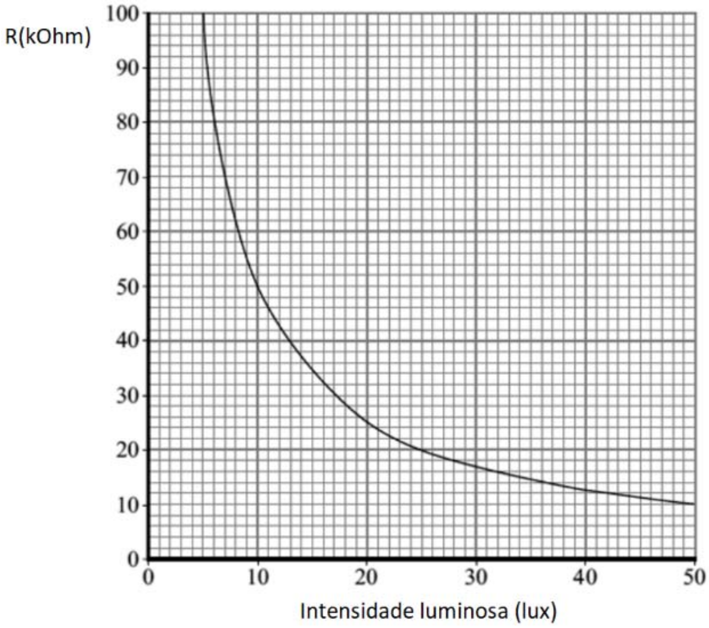
As impedâncias dos componentes são dadas por:

$$\begin{cases}Z_1(s)=R_1\\ Z_2(s)=R_2\\ Z_3(s)=\dfrac{1}{sC_2}\\ Z_4(s)=\dfrac{1}{sC_1}\end{cases}$$

Substituindo na expressão anterior fica:

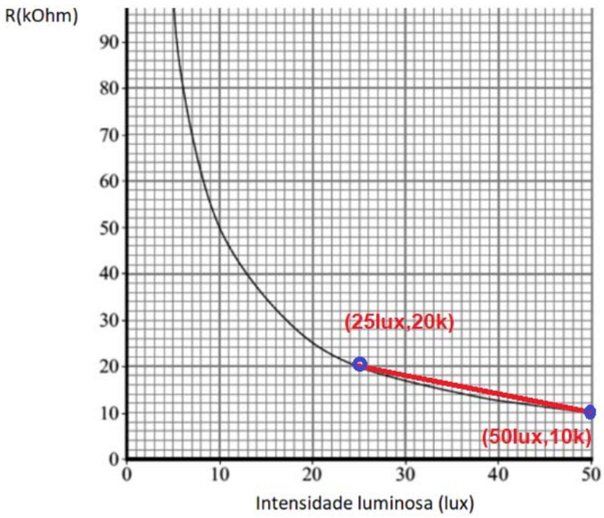
$$\frac{V_0(s)}{V_a(s)}=\frac{1}{s^2C_1C_2R_1R_2+sC_1\left(R_1+R_2\right)+1}$$

3) Um LDR possui a curva de calibração ilustrada na seguinte figura:



a) Considerando que iluminância é sempre superior a 25 lux, obtenha uma expressão algébrica aproximada entre a resistência elétrica e a intensidade luminosa. **[2]**

R:

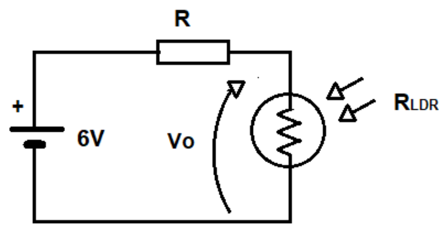


$$R_{LDR} - 20 = -\frac{10}{25}\left(lux - 25\right) \text{ (k}\Omega\text{)}$$

$$R_{LDR} = -\frac{10}{25} lux + 30 \text{ (k}\Omega\text{)}$$

b) Determine a resistência a colocar em série com uma fonte de tensão de 6V para obter 3V quando a intensidade luminosa for de 25 lux. **[2]**

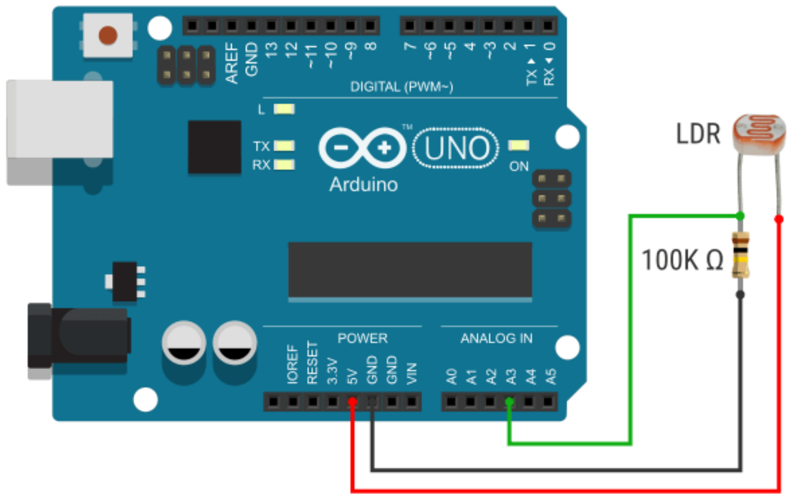
R:



Quando a iluminância for 25 lux, a resistência do LDR é 20kΩ. Deste modo,

$$V_0 = \frac{20}{20+R} \times 6 = 3 \Rightarrow R = 20k\Omega$$

c) O condicionamento de sinal deste sensor é feito recorrendo à maquete apresentada a seguir:



Qual a tecnologia utilizada no conversor A/D incluído no microcontrolador ATMega328? Explique, apresentando um diagrama de blocos, a sua forma de operação. **[2]**

R:

Ver apontamentos das aulas.

FIM DA PROVA