

IC: Lista de Exercícios de Fixação 2a

Questão 1 (adaptada da 9.2)

A thermocouple has an e.m.f. of 4.1 mV at 100 °C and 16.4 mV at 400 °C relative to a cold junction of 0 °C. A deflection bridge incorporating a nickel metal resistance sensor is to be used as the voltage source $E_{T_2,0}$ necessary for automatic reference compensation of the thermocouple e.m.f. The nickel sensor has a resistance of 10 Ω at 0 °C and a temperature coefficient of resistance of $6.8 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Design the deflection bridge assuming a 1 V supply is available. (Hint: eqns [8.49] and [9.15].)

Complemento à questão: a Figura 1 mostra uma configuração adotada para a medição da temperatura no interior de uma tubulação usada para o transporte de vapor em um processo industrial. Suponha que o termopar ilustrado na figura é o mesmo do enunciado anterior.

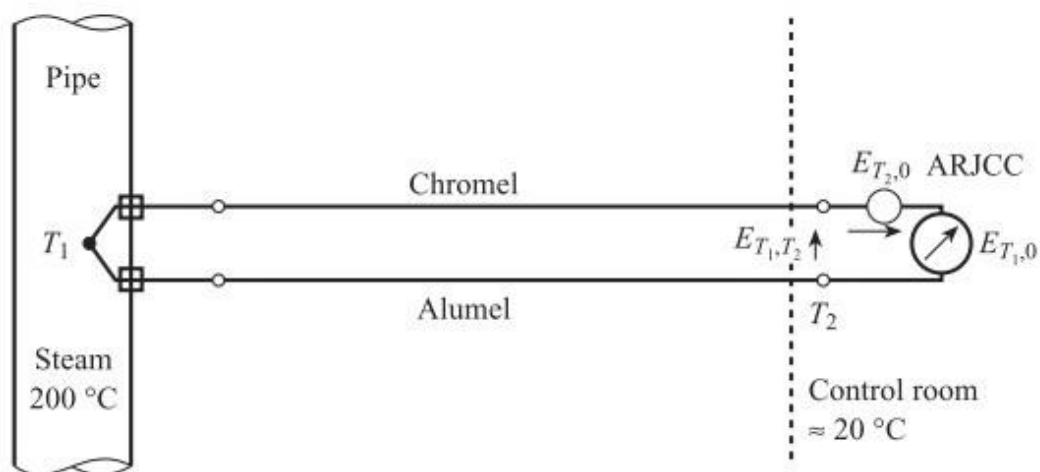


Figura 1

Uma bomba hidráulica situada nas proximidades do termopar é empregada para controlar a vazão de uma tubulação de água fria usada para controlar a temperatura da tubulação. A bomba é acionada por um motor de indução trifásico (MIT), o qual consome um corrente de linha de 20A (valor RMS AC a 60Hz). Considere que os metais que compõem o termopar estão dispostos de forma retilínea e que o plano aproximadamente retangular formado por eles está posicionado de modo que o campo produzido por uma das fases do MIT incide perpendicularmente a ele. Considere que o comprimento desses metais é de 100 metros (distância da tubulação à sala de controle) e que o espaçamento entre eles é de 100 mils¹. Ainda, admita que a referida fase do MIT está disposta de forma retilínea a uma distância de 1m do circuito do termopar. A partir dessas informações, responda os itens abaixo:

- O módulo do campo magnético produzido por um condutor retilíneo é dado por $B(t) = \mu i(t)/2\pi d$, onde μ é a permeabilidade magnética do meio (assuma que ela é igual à do vácuo), $i(t)$ é a corrente no tempo e d é a distância ao condutor tomada

¹ 1 mil corresponde a um milésimo de polegada, isto é, 1mil = 0,0254mm.

perpendicularmente a ele. Como a distância entre os metais que formam o termopar é pequena, assuma que o campo produzido pela fase do MIT é uniforme por toda a área do circuito de medição de temperatura. Usando a lei de Faraday, estime a expressão para a tensão induzida no circuito do termopar pelo campo produzido pela fase e, sabendo que essa é uma interferência de modo série, calcule o erro de medição de temperatura devido a esse efeito supondo que a leitura da tensão $E_{T_1,0}$ será feita por um voltímetro que mede apenas valores RMS.

Dica: considere que a tensão produzida pelo circuito do termopar é constante e que a induzida é senoidal, obtenha o valor RMS da soma das duas (reveja a definição do cálculo de valores RMS se necessário) e calcule a temperatura correspondente.

- b) Qual a medida mais simples que você tomaria para minimizar o erro calculado no item “a”?
- c) Suponha que a medida adotada no item “b” foi adotada, mas por alguma razão, um dos metais do termopar foi aterrado próximo à junção da tubulação de vapor. Sabendo que o circuito da ponte de deflexão usado no circuito de compensação automática da junção de referência (em inglês, ARJCC) também foi aterrado e que os condutores de ambos os aterramentos são retilíneos com 1,2m de comprimento, estime a tensão induzida pela fase do MIT no circuito constituído pelos cabos de aterramento, o metal do termopar aterrado e um “condutor terra” que liga ambos os pontos de aterramento, o qual se assume seja retilíneo e de comprimento igual ao do referido metal do termopar.

Dica: apenas repita o cálculo da tensão AC induzida feita no item “a”, modificando apenas as dimensões da área considerada.

- d) Considere que as resistências de ambos os condutores usados nos aterramentos sejam de 5Ω , que a resistência do metal aterrado do termopar seja de 10Ω e que a tensão induzida calculada no item “c” se comporte como uma fonte de tensão alternada V_E localizada no condutor terra usado no item anterior, cuja impedância se assume como sendo de 1Ω . Obtenha a tensão de interferência de modo série devida à V_E e calcule o erro de medição de temperatura correspondente, repetindo as mesmas considerações feitas no item “a” relativas aos valores RMS.
- e) O voltímetro usado para medir $E_{T_1,0}$ será substituído por um conversor A/D (ADC) de um microcontrolador, o qual exibirá a temperatura medida num *display* LCD. Internamente, o microcontrolador usará um filtro passa baixas para eliminar a interferência de 60Hz e outros ruídos presentes no sinal. Porém, considerando que a faixa de tensão de entrada do ADC é de 0 a 5V, para aproveitar melhor a resolução do conversor, é preciso melhorar a sensibilidade do circuito do termopar amplificando sua saída. Projete um amplificador de instrumentação para ajustar a saída do termopar à tensão máxima do ADC considerando que a maior temperatura a ser medida é de 400°C. Escolha os parâmetros levando em conta a adoção do amplificador de instrumentação INA115.

Questão 2

A Figura 2 mostra um amplificador operacional em duas configurações distintas: amplificador não inversor e amplificador de diferenças. Seu ganho e largura de banda em malha aberta são $A_{OL} = 120\text{dB}$ e $f_{BOL} = 10\text{Hz}$, respectivamente. A partir dessas informações, responda os itens abaixo:

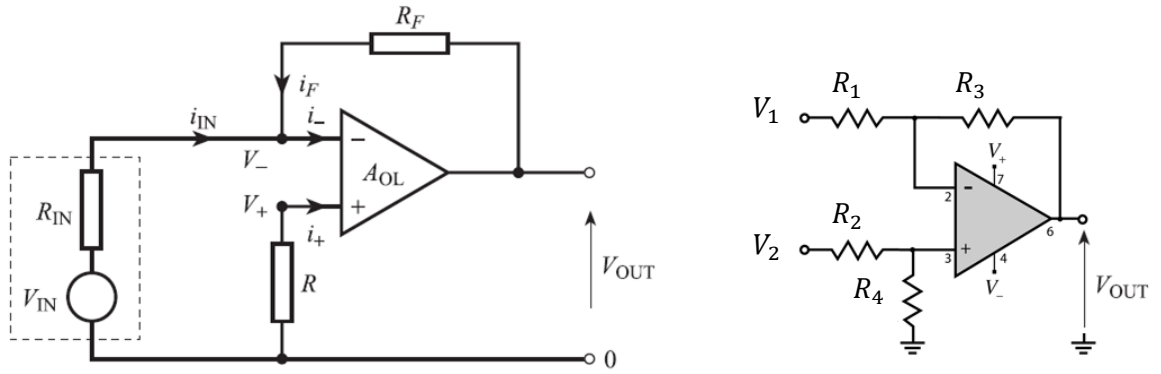


Figura 2

- a) A Figura 3 mostra o modelo tipicamente adotado para um amplificador operacional, com ganho em malha aberta e impedância de entrada finitos e com impedância de saída não nula. A partir desse modelo, mas considerando que $Z_{in} \rightarrow \infty$ e $Z_{out} = 0$, mostre que a relação entre V_{OUT} e V_{IN} para a configuração de amplificador inversor da Figura 2 (à esq.) é dada por

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = -\frac{R_F/R_{IN}}{1 + \frac{(1 + R_F/R_{IN})}{A_{OL}}}.$$

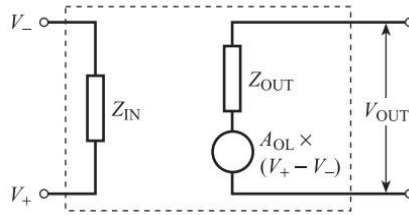


Figura 3

- b) Considerando o modelo de primeira ordem $A(s) = A_{OL}/(1 + s/\omega_{BOL})$, onde $\omega_{BOL} = 2\pi f_{BOL}$, faça a substituição de A_{OL} por $A(s)$ na expressão obtida no item “a” e calcule a nova relação entre V_{OUT}/V_{IN} .
- c) Usando a aproximação $(1 + R_F/R_{IN}) \ll A_{OL}$ na função de transferência do item “b”, obtenha a largura de banda do amplificador não inversor em função do produto ganho/largura de banda, $A_{OL}f_{BOL}$. Supondo que o ganho projetado para o amplificador é de 10 (em módulo) e usando os dados fornecidos do amplificador operacional, calcule o valor em hertz da nova largura de banda.

- d) Calcule a tensão de saída V_{OUT} em função de V_1 e V_2 para o amplificador de diferenças da Figura 2. Mostre que para que o amplificador amplifique a diferença $(V_2 - V_1)$, a relação $R_1/R_3 = R_2/R_4$ deve ser satisfeita.
- e) Um dos problemas do amplificador de diferenças é sua reduzida impedância de entrada. Suponha que dois circuitos lineares diferentes serão conectados às entradas V_1 e V_2 . Seus circuitos equivalentes de Thévenin são mostrados na Figura 4, sendo que o circuito à esquerda será conectado a V_1 (pelo ponto A) e o circuito à direita será conectado a V_2 (pelo ponto B). Usando o resultado do item “d” e admitindo que $R_1/R_3 = R_2/R_4$, obtenha V_{OUT} em função de E_{Th1} e E_{Th2} . Qual condição precisa ser satisfeita pelos circuitos lineares para que a diferença $(E_{Th2} - E_{Th1})$ seja amplificada? Qual seria a condição a ser satisfeita para que o ganho do amplificador seja aproximadamente o mesmo obtido no item “d” e qual a desvantagem imposta por ela?

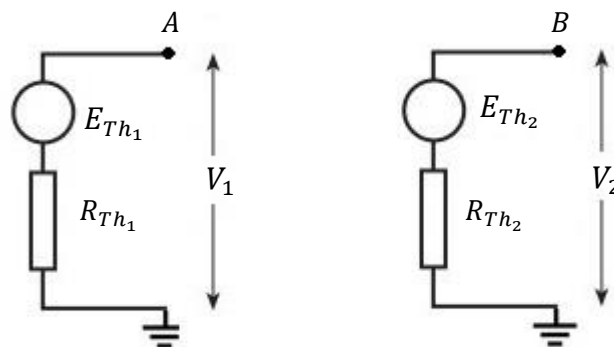


Figura 4

- f) A Figura 5 ilustra a utilização de um amplificador de diferenças para amplificar o sinal de uma ponte de deflexão. A baixa impedância de entrada do amplificador seria um problema nesse caso? A análise apresentada no tópico “*Differential amplifier*” da subseção 9.2.1 do livro-texto seria aproximada? Use as análises dos itens “d” e “e” para justificar sua resposta.

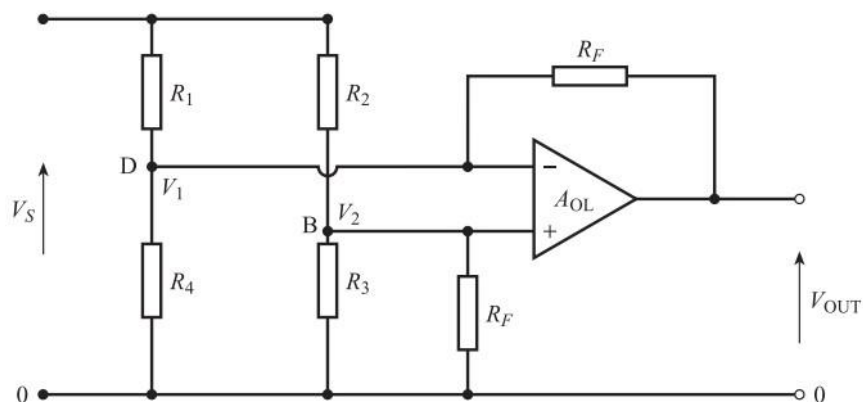


Figura 5

Questão 3

A Figura 6 mostra uma célula de carga do tipo “pilar”, em formato de paralelepípedo, a qual pode ser usada para medir forças elevadas. As *strain gauges* coladas às faces retangulares laterais de célula sofrem a mesma deformação que a mesma, permitindo que essa deformação seja medida por meio da variação da resistência desses elementos sensores. A deformação relativa longitudinal e_L do material é dada por $e_L = -F/AE$, onde A é a área da seção transversal da célula e E é o módulo de Young do material que a constitui. A deformação transversal e_T sofrida pela célula é dada por $e_T = -\nu e_L$, onde ν é o coeficiente de Poisson do material. A resistência de cada *strain gauge* (idênticas) varia conforme a deformação relativa de acordo com a equação $R = R_0(1 + Ge)$, onde G é o fator *gauge* do elemento sensor. Colocando-se esses elementos sensores numa ponte de deflexão, é possível obter um sinal de tensão em função da força F aplicada.

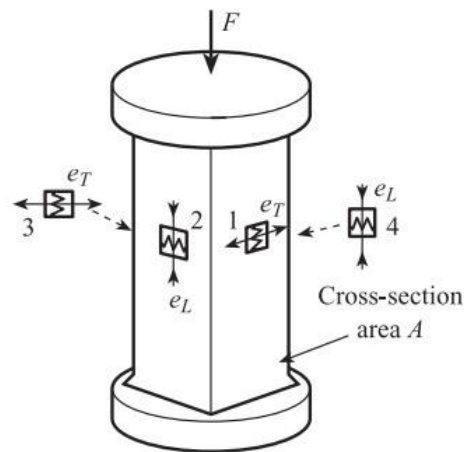


Figura 6

A célula de carga do tipo pilar pode ser usada como base para o funcionamento das balanças fixas em praças de pedágio, empregadas para a medição da carga máxima/eixo transportada por caminhões nas rodovias. A Figura 7 ilustra o princípio de funcionamento dessa balança.

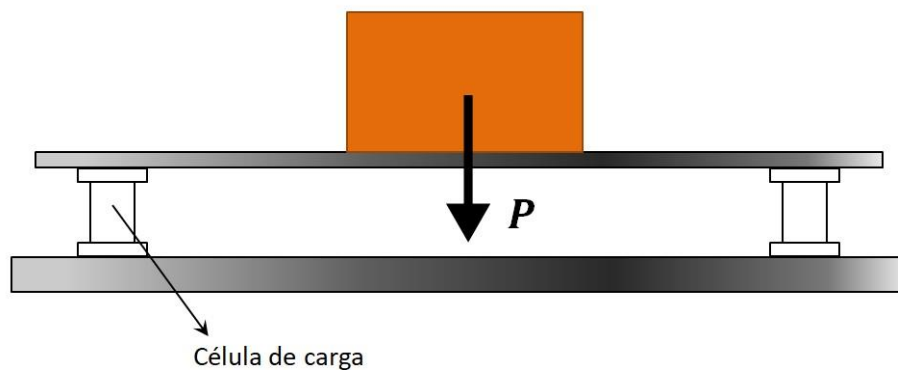


Figura 7

Na Figura 7, suponha que o peso da carga disposta sobre a balança se distribui uniformemente sobre cada célula e admita, ainda, que a balança possui 4 delas, todas idênticas. A tabela abaixo mostra alguns dados do material da célula de carga e das *strain gauges*.

R_0	120Ω
Corrente máxima da <i>strain gauge</i>	50 mA
G	2,1
E	$2,1 \cdot 10^{11} \text{Nm}^{-2}$
ν	0,29
A	10 cm ²

A partir dessas informações, e considerando a aceleração da gravidade $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, responda às questões a seguir:

- Considere que as quatro *strain gauges* mostradas na Figura 6 são colocadas nos braços de uma ponte de deflexão e que a balança deve suportar uma carga máxima de 100t. Nesse caso, observe que $GF/AE \ll 1$. Indicando onde colocar cada *strain gauge* nos braços da ponte (levando em conta que umas sofrem deformação positiva enquanto outras, negativa), projete a ponte de deflexão de modo que a corrente em cada *strain gauge* seja menor ou igual ao valor da metade da máxima corrente suportada. Partindo desse resultado, qual o valor da tensão de Thévenin de saída da ponte que se obtém com a aplicação da carga máxima sobre a balança?
Dica: veja a equação 9.19 do livro-texto.
- A Figura 8 mostra uma outra configuração da balança que possibilita que as *strain gauges* sofram a mesma deformação em módulo, pois as células de carga da parte superior sofrem uma força de tensão, enquanto as de baixo são comprimidas. Logo, não seria preciso usar deformações transversais, apenas longitudinais. Colocando quatro *strain gauges* como braços de uma ponte de deflexão, indique de que modo fazê-lo para se obter uma relação linear entre a deformação relativa e a tensão de saída da ponte, levando-se em conta as células superiores e inferiores e as deformações positivas e negativas. Em seguida, obtenha a expressão que relaciona a tensão de Thévenin de saída da ponte com a força aplicada F . Observe que, nesse caso, aproximações não são necessárias.
- Projete a ponte de deflexão de modo que a corrente em cada *strain gauge* seja menor ou igual ao valor da metade da máxima corrente suportada. Partindo desse resultado, qual o valor da tensão de Thévenin de saída da ponte que se obtém com a aplicação da carga máxima de 100t sobre a balança, assumindo, novamente, que ela é constituída de 4 pares de células superiores e inferiores?
- Projete amplificadores em dois estágios (em cascata) para se amplificar os sinais de saída das pontes de deflexão projetadas nos itens “a” e “c” considerando-se que conversores A/D de tensão máxima de entrada de 5V serão usados para ler tais sinais. O primeiro estágio de amplificação será constituído de um amplificador de instrumentação INA 115, o segundo estágio deverá ser implementado com um amplificador operacional qualquer na configuração de amplificador não inversor. Defina o ganho do primeiro estágio como sendo 5 vezes maior que o do segundo. O

ganho total obtido deve ser tal que se aproveite ao máximo a faixa de operação dos conversores A/D.

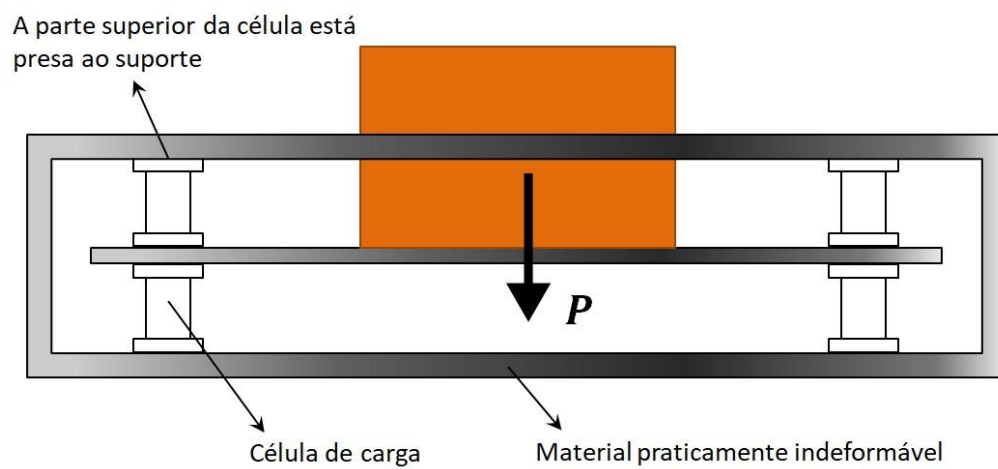


Figura 8