

Trabalho 2 de Metrologia: Medição de temperatura e deformação

Milena Ribeiro
Departamento das Engenharias
Universidade Federal de Santa Catarina
Blumenau, Brasil
miribeiro.mr99@gmail.com

Resumo—Este documento visa discutir e apresentar os resultados obtidos no trabalho 2 da disciplina de Metrologia e Instrumentação para automação. Foram realizadas simulações de medição de temperatura utilizando um termopar do tipo J e de deformação com um extensômetro. Para as simulações de medição de temperatura que foram realizadas no programa LTspice, fez-se necessário o projeto da ponte de Wheatstone para respeitar as especificações dadas na tarefa. O projeto da ponte contou com o uso do software Spyder. O desenvolvimento dessa primeira parte se encontra na seção II do documento. A segunda parte do trabalho, encontra-se na seção III e corresponde à medição de deformação. Nessa parte, foi utilizado o LTspice novamente para realizar as simulações. Os resultados obtidos em todas as simulações foram adequados, como esperado.

Palavras-chaves—temperatura, deformação, ponte de Wheatstone, simulações.

I. INTRODUÇÃO

O presente trabalho aborda os temas de medição de temperatura com termopar e medição de deformação mecânica com extensômetro.

O termopar é um dispositivo de medição de temperatura amplamente utilizado por seu baixo custo, simplicidade e larga faixa de medição; porém, necessita de compensação da temperatura de referência. Para utilizar adequadamente sua medição, é necessário conhecer sobre o processo de compensação da junta, o que será discutido na primeira parte do trabalho.

O termistor é um tipo de resistor térmico que varia com a temperatura e será uma peça chave no desenvolvimento do trabalho por auxiliar no ajuste da ponte de Wheatstone para garantir a linearização do comportamento do sistema.

Extensômetros são sensores que medem a deformação em materiais. Permite calcular a força aplicada a um corpo, a deformação e a tensão, entre outros. Sua resistência varia com a temperatura e a relação entre estresse e deformação é linear ao longo de uma faixa de valores de temperatura.

Esses três instrumentos serão utilizados no desenvolvimento do trabalho, por serem amplamente utilizados faz-se necessário entender seu funcionamento e as soluções de projeto que podem ser utilizadas para sua utilização adequada.

II. MEDIÇÃO DE TEMPERATURA COM TERMOPAR

Na medição de temperatura com o termopar é necessário compensar a temperatura da junção de referência para obter uma medida adequada da temperatura do processo. Uma forma de realizar essa compensação é utilizar um sensor de

temperatura para obter a temperatura da junção, e então gerar uma tensão elétrica que compense a queda de tensão na junção de referência. Nesse contexto, o objetivo da primeira parte do trabalho é compensar a junção de referência de um termopar tipo J usando um termistor e uma ponte de Wheatstone. O sistema total da medição compensada é mostrado na Figura 1.

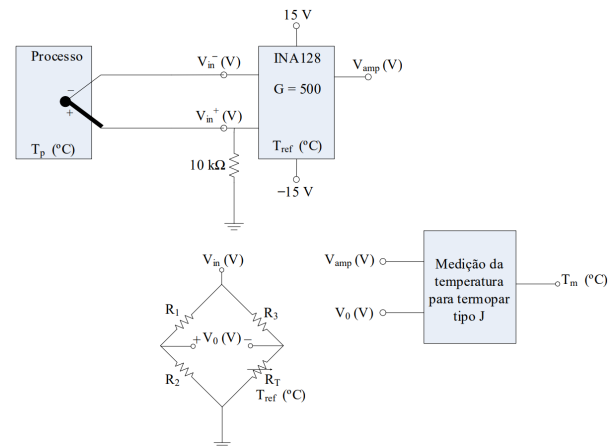


Figura 1. Sistema utilizado a ser simulado.

Para a implementação desse sistema, faz-se necessário algumas especificações do sistema, que são:

- Temperatura da junção T_{ref} varia de 0°C a 40°C ;
- Termopar tipo J aproximadamente linear nessa faixa, com:
 - Sensibilidade de $0,051475\text{mV}/^{\circ}\text{C}$
 - $V_T = 0,051475T\text{mV}$
- Características do termistor usado:
 - $R_T = 12\text{k}\Omega$ em 25°C
 - $\beta = 3740$
- Tensão $V_0 = 500V_T$
- Não linearidade de V_0 inferior à 2%

Para realizar a simulação, é necessário projetar a ponte de Wheatstone que respeite as condições colocadas a cima.

A. Projeto da ponte de Wheatstone

O projeto da ponte é realizado respeitando 4 critérios: a tensão mínima na saída, tensão máxima na saída, máxima

corrente I_b e o critério da linearidade e sensibilidade. A configuração da ponte pode ser vista abaixo:

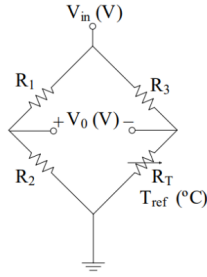


Figura 2. Configuração da ponte de Wheatstone a ser projetada.

Onde R_T é a resistência do termistor utilizado no processo.

A relação matemática entre a tensão de saída V_0 com a tensão de entrada V_I na ponte de Wheatstone é dada pela Equação 1 e é a partir dessa relação que os resistores são projetados a fim de obedecer os critérios.

$$V_0 = V_I \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (1)$$

Onde V_I , R_1 , R_2 e R_3 serão definidos no projeto, e R_4 é a resistência do termistor.

Para que esses critérios sejam cumpridos, é necessário determinar os valores máximos e mínimos que a resistência do termistor pode assumir diante da variação de temperatura, bem como as tensões máximas e mínimas determinadas pela região de linearidade do termopar.

Considerando a especificação dada que $V_T = 0,051475TmV$, sabendo que a temperatura varia de $0^\circ C$ a $40^\circ C$, tem-se: $V_{Tmin} = 0.051475(0) = 0.0V(2)$

$$V_{Tmax} = 0.051475(40) = 1.0295V \quad (3)$$

1) *Critério 1: tensão mínima na saída:* Com o valor obtido para V_{Tmin} , analisando a Equação 1 e levando em conta que a menor tensão acontece quando o valor da resistência do termistor está em seu valor máximo, a relação entre os resistores é dada por:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_{4max}} \quad (4)$$

2) *Critério 2: tensão máxima na saída:* Agora, o valor de V_{Tmax} é utilizado, em conjunto com o valor de V_{Tmin} , o oposto do caso anterior. A Equação 5 mostra o que deve ser respeitado.

$$V_{Tmax} = V_I \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_{4min}}{R_3 + R_{4min}} \right) \quad (5)$$

3) *Critério 3: corrente máxima I_b :* A corrente I_b é a corrente que percorre o resistor R_3 , utilizando um divisor de correntes, obtém-se a Equação 6 que ilustra esse critério.

$$\frac{V_I}{R_3 + R_{4min}} \leq I_{bmax} \quad (6)$$

Para o sistema em questão, não houve especificação da corrente máxima.

4) *Critério 4: linearidade e sensibilidade:* Novamente, esse critério tem como base o primeiro critério, considerando a Equação 1 com $V_0 = 0V$. Realizando algumas manipulações algébricas, obtém-se a Equação 7.

$$V = \frac{1}{1+r} - \frac{1}{1+rx} \quad (7)$$

Onde $V = V_0/V_I$, $r = R_1/R_2$ e $x = R_{4max}/R_4$. Dessa forma, conclui-se que a linearidade e a sensibilidade de V_0 dependem da razão R_1/R_2 , ou seja, de r . A relação dada pela Equação 7 deve ser ajustada para atender o critério de sensibilidade e linearidade.

Levando em conta os quatro critérios citados, escreveu-se um código em Python (baseado no código apresentado em sala e disponibilizado no moodle) que simula os valores de V_0 para diferentes valores de r .

Os valores de R_{Tmax} e R_{Tmin} correspondem aos valores máximos e mínimos de R_4 e são obtidos de utilizando a forma alternativa da Equação de Steinhart-Hart, descrita na Equação 8.

$$R_T = R_2 98K e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298} \right)} \quad (8)$$

Onde T corresponde à temperatura em kelvin (com valores de mínimo e máximo sendo $0^\circ C$ e $40^\circ C$, respectivamente, ou seja, $273K$ e $313K$), o valor de β é dado pelo fabricante (especificado anteriormente como $\beta = 3740$) e o valor de $298K$ corresponde à temperatura ambiente de $25^\circ C$.

O valor de r deve ser determinado por tentativa e erro, observando qual curva se aproxima mais da curva linear do termistor. Os valores simulados de V_0 são calculados em função da Equação 7, 4 e 2.

Para a curva linear, utiliza-se o coeficiente da reta para determinar o comportamento desejado a ser seguido, neste, caso, tem-se:

$$m = \frac{313 - 273}{1.0295 - 0} \quad (9)$$

Com esse coeficiente, a equação de $V_{0linear}$ é dada pela Equação 10.

$$V_{0linear} = \frac{T - 273}{38.85} \quad (10)$$

O gráfico resultante da combinação de valores estipulados de r em comparação com a curva real pode ser visto na Figura 3.

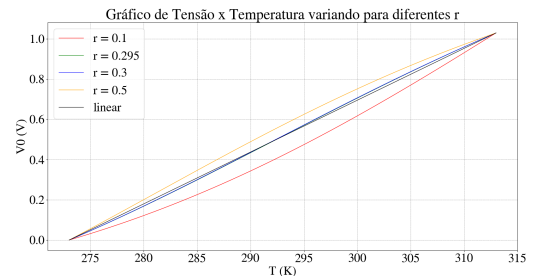


Figura 3. Tensão x Temperatura com valores de r propostos.

Pelo gráfico, pode-se perceber que os valores de $r = 0.295$ e $r = 0.3$ retornam uma curva aproximada da curva linear. Outro critério a ser respeitado, é o de Não-Linearidade abaixo de 2%, que pode ser calculado com a Equação 11.

$$NL\% = \left| \frac{V_O - V_{0linear}}{V_{Omax}} \right| 100\% \quad (11)$$

As curvas de não-linearidade obtidas para os mesmos valores de r do gráfico anterior podem ser vistas na Figura 4.

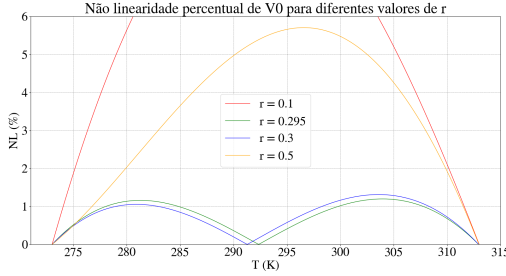


Figura 4. Tensão x Temperatura com valores de r propostos.

Calculando o erro absoluto entre os valores de $V_{0linear}$ e V_0 obtidos para $r = 0.3$ e $r = 0.295$, conclui-se que $r = 0.295$ ainda fornece valores de erro ligeiramente menores, por isso, foi escolhido para a ponte de Wheatstone.

Com isso, obtém-se os seguintes parâmetros:

- Parâmetros do termistor:
 - $R_{Tmin} = 6576.17\Omega$
 - $R_{Tmax} = 37871.72\Omega$
- Parâmetros da Ponte:
 - $R_1 = 2950.0\Omega$
 - $R_2 = 10000.0\Omega$
 - $R_1 = 11172.16\Omega$
 - $V_I = 2.563V$
 - $I_{bmax} = 1.44 * 10^{-4}A$

Os valores obtidos respeitam todos os critérios citados anteriormente, portanto, a ponte de Wheatstone foi projetada adequadamente.

B. Simulações via LTspice

Com a ponte projetada, agora parte-se para as simulações no LTspice. Para a simulação, são utilizados dois componentes disponibilizados no moodle, um corresponde ao amplificador de instrumentação INA128 e um modelo do termopar tipo J, a fim de simular o sistema representado na Figura 1. Os componentes em questão estão ilustrados nas figuras 5 e 6.

As entradas de temperatura do termistor devem ser alimentadas com fontes de tensão com entrada equivalente a temperatura escolhida. O termistor atua na alimentação das tensões de entrada (V_{in+} e V_{in-}) do amplificador, convertendo a variação da temperatura em variação de tensão. O amplificador, por sua vez, é utilizado para atender a especificação de $V_0 = 500V_T$, utilizando a equação de ganho disponível no datasheet do amplificador, tem-se:

$$G = 1 + \frac{50k\Omega}{R_G} = 500 \therefore R_G = 100.2\Omega \quad (12)$$

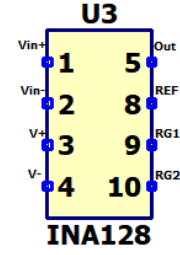


Figura 5. Amplificador INA128 utilizado na simulação do sistema.

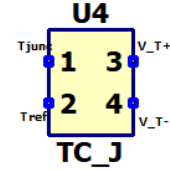


Figura 6. Termistor do tipo J utilizado na simulação do sistema.

Além disso, o objetivo da simulação é medir a temperatura do processo compensando as perdas na junção de referência, portanto, é implementada uma função que converte as tensões medidas na saída do amplificador e na saída da ponte de Wheatstone. A função em questão implementa o padrão ITS-90 para equação do termopar, que dá a temperatura em função da tensão da seguinte forma:

$$T = d_0 + d_1V + d_2V^2 + d_3V^3 \dots d_NV^N \quad (13)$$

Onde os coeficientes d_0, d_1, \dots, d_N foram utilizados de acordo com os disponíveis no site da National Institute of Standards and Technology (NIST). A função implementada utiliza como entrada a tensão de saída do amplificador e a tensão V_0 , retornando a temperatura, de acordo com a equação do termopar.

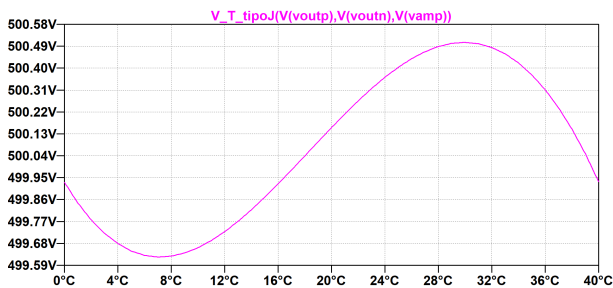
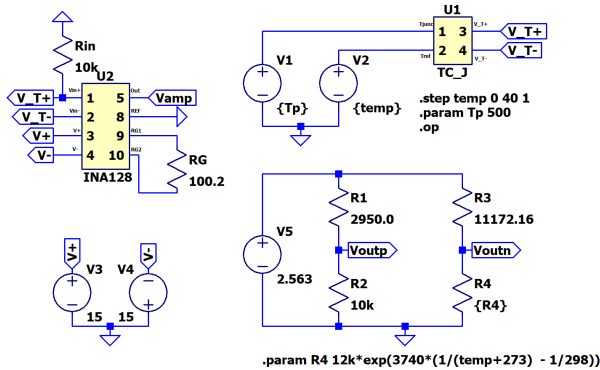
C. Temperatura do processo constante e temperatura da junção variável

A primeira simulação realizada, leva em consideração uma temperatura de processo constante em $500^\circ C$ e uma temperatura de junção variando de $0^\circ C$ a $40^\circ C$. Com os valores de resistência e tensão obtidos no projeto da ponte de Wheatstone.

O gráfico de saída obtido pode ser visto na Figura 8.

Da mesma forma que, na montagem do circuito, as temperaturas de entrada foram modeladas como uma fonte de tensão com o valor da temperatura em $^\circ C$, a temperatura de saída da função é interpretada pelo LTspice como uma tensão, por isso o eixo das ordenadas (eixo y) é medido em V, mas é equivalente a temperatura medida em $^\circ C$.

A curva de saída da temperatura medida tem uma forma senoidal, com os maiores valores de pico dentro da limitação de não-linearidade de 2%. O valor da curva oscila em torno de $500^\circ C$, com valores muito próximos da temperatura real, o que



mostra como a temperatura da junção está sendo compensada adequadamente.

D. Temperatura do processo variável e temperatura da junção constante

A segunda simulação realizada tem o cenário um pouco diferente, considerando a temperatura de processo variando entre 200°C e 500°C, com a temperatura da junção constante em 27°C. O circuito utilizado é o mesmo do anterior, mudando apenas os parâmetros da simulação, e pode ser observado na Figura 9.

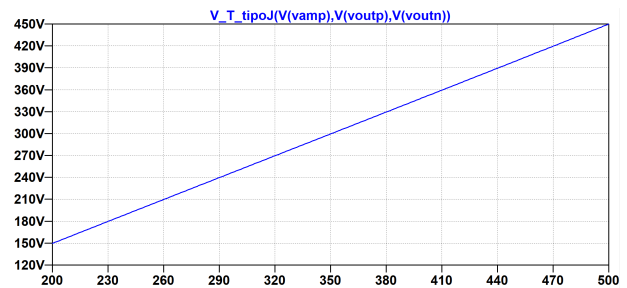
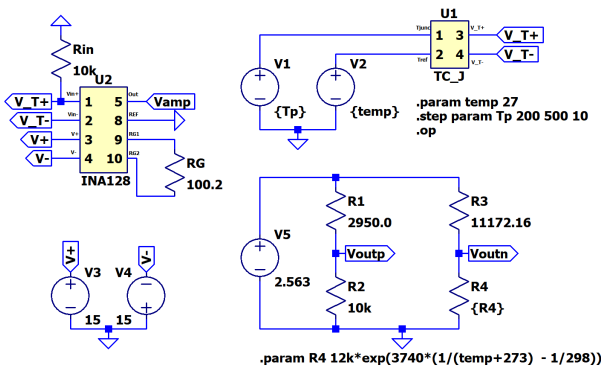


Figura 10. Temperatura lida do processo x Temperatura real do processo.

variação da temperatura do processo, o primeiro valor medido é de $T = 200.44074^{\circ}\text{C}$, aproximadamente 1% de erro, o que está dentro das especificações do projeto.

E. Discussão e comparação

Com as simulações, conclui-se que a ponte de Wheatstone projetada atende às especificações e que o sistema é capaz de compensar a perda de tensão na junção de referência para ambos os casos. Todas as especificações foram atendidas nos dois cenários.

III. MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO COM EXTENSÔMETRO

A medição de deformação com extensômetro apresenta dois principais problemas: a resistência elétrica dos extensômetros varia com a temperatura e a baixa variação da resistência em função da deformação (baixa sensibilidade). Para contornar isso, normalmente são utilizados mais de um extensômetro na ponte de Wheatstone para aumentar a sensibilidade e/ou compensar de temperatura.

Neste experimento, são consideradas três configurações de montagem da ponte de Wheatstone, que podem ser vistas na Figura 11.

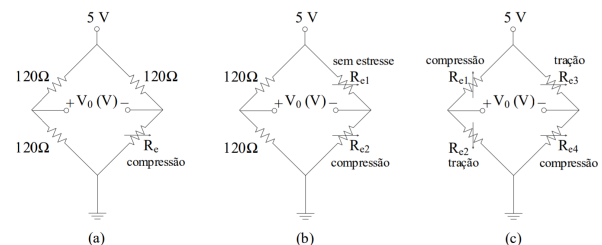


Figura 11. Medição de deformação com extensômetro: (a) apenas um extensômetro; (b) dois extensômetros iguais, um sob compressão e outro sem estresse; e (c) quatro extensômetros iguais, dois sob tração e dois sob compressão.

As especificações dadas são as seguintes:

- Resistores de carbono com coeficiente de temperatura $t_c = -0.5m\Omega^\circ C^{-1}$;
- Extensômetros em alumínio com $t_c = -0.5m\Omega^\circ C^{-1}$;
- O *Gauge factor* dos extensômetros é $G = 2$;
- A resistência sem deformação $R_{e=0} = R_0 = 120\Omega$;
- Deformação por compressão na faixa $-10^{-2} \leq e \leq 0$;
- Deformação por tração na faixa $0 < e < -10^{-2}$.

A. Temperatura costante

O primeiro cenário a ser simulado, tem por objetivo observar a tensão V_0 em função da deformação para as três configurações de montagem da ponte de Wheatstone. Nessa parte, utiliza-se $tc = 0$, ou seja, a resistência não varia com a temperatura.

Para a simulação do comportamento do extensômetro, considera-se a equação de definição do *gauge factor*, que pode ser escrita da seguinte forma:

$$R_0 + \Delta R = R_0 + GeR_0 \quad (14)$$

A montagem do esquema com essa configuração se encontra na Figura 12.

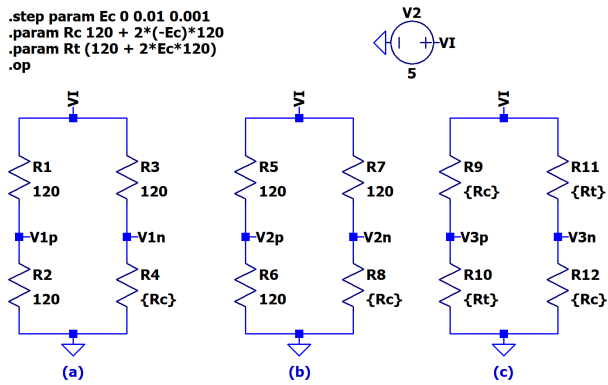


Figura 12. Esquema para medição de deformação sem variação da temperatura.

Foram montadas os três estilos de ponte, vale ressaltar como nessa primeira parte considera-se que as resistências não variam com a temperatura, os casos (a) e (b) ficam iguais, visto que no caso (b) apenas um dos extensômetros é submetido ao estresse. Os gráficos de tensão de saída pela deformação pode ser observado na Figura 13.

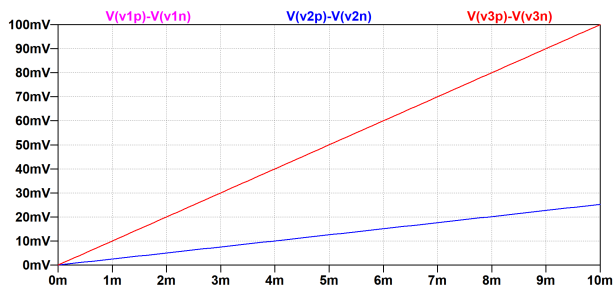


Figura 13. Gráfico de tensão de saída por deformação.

1) *Discussão e comparação:* Como esperado, a curva de tensão dos casos (a) e (b) são iguais (curvas em vermelho e rosa), enquanto a curva de tensão do caso (c) (curva em azul) tem maior declividade. O comportamento das respostas é linear, como o esperado para o uso da ponte de Wheatstone e varia de acordo com o estresse, quando maior a deformação, maior a tensão.

A maior declividade da curva (c) se dá em função da maior sensibilidade da ponte formada se comparada às anteriores, visto que no terceiro caso, a disposição dos extensômetros de tração e compressão nos dois lados da ponte é invertida, então enquanto a razão R_9/R_{10} diminui e gera um aumento na tensão V_{3p} , a razão R_{11}/R_{12} aumenta e gera diminuição na tensão V_{3n} , resultando em uma maior tensão de saída da ponte.

O cenário (a) é mais simples de ser utilizado, com menor custo, porém não tão sensível quanto o cenário (c). O cenário (b), nessas condições de operação, não é interessante pois se torna mais caro que o cenário (a) e tem a mesma funcionalidade.

B. Variando a temperatura

No segundo cenário leva-se em conta a variação de temperatura do sistema de acordo com os parâmetros especificados. Vale ressaltar que o valor de t_c para os resistores comuns é diferente do valor para os extensômetros e agora o comportamento de (a) e (b) não serão iguais.

O esquema utilizado para simulação desse caso encontra-se na figura abaixo.

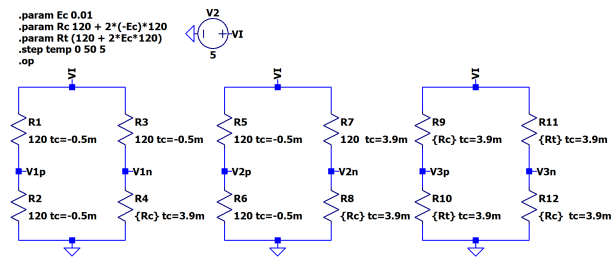


Figura 14. Esquema para medição de deformação sem variação da temperatura.

A diferença entre este cenário e o cenário anterior na montagem da simulação são os coeficientes de tc foram adicionados ($tc = -0.5m\Omega^{\circ}C^{-1}$ para os resistores e $tc = 3.9m\Omega^{\circ}C^{-1}$ para os extensômetros), assim como os parâmetros foram alterados para que a temperatura varie com $0^{\circ}C \leq T \leq 50^{\circ}C$. Como o comportamento dos sistemas diante do estresse foi analisado no caso anterior, agora, mantém-se constante $e = \pm 10^{-2}$ para todos os extensômetros, analisando apenas a influência da temperatura sobre as curvas de resposta. Os gráficos de tensão de saída pela deformação pode ser observado na Figura 13.

1) *Discussão e comparação:* Agora, como esperado, cada uma das configurações apresentou um comportamento particular. A curva em rosa, do cenário (a) apresenta alta sensibilidade à temperatura, visto que a diferença entre os valores de t_c dos resistores e do extensômetro causa um desequilíbrio na ponte. As outras duas configurações, diferentemente, não apresentam variações no valor de tensão por conta da temperatura.

Para o caso (b) (curva em azul), apesar de apresentar resistores na ponte, a razão entre os resistores é respeitada por conta dos seus valores de tc , dessa forma R_5 e R_6 variam

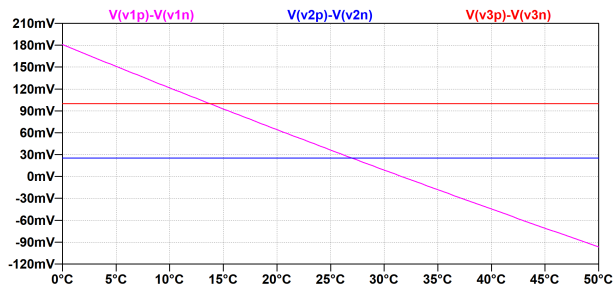


Figura 15. Gráfico de variação de tensão de saída com a temperatura do ambiente

com a mesma proporção de $tc = -0.5m\Omega^{\circ}C^{-1}$, bem como R_7 e R_8 variam com $tc = 3.9m\Omega^{\circ}C^{-1}$.

O caso (c), por fim, além de manter a tensão constante, ainda apresenta alta sensibilidade, resolvendo os dois principais problemas da medição de deformação com o extensômetro.

IV. CONCLUSÃO

Todas as simulações foram realizadas com sucesso. O trabalho serviu para entender e fixar os conceitos vistos em aula, para perceber a influência do projeto de uma ponte de Wheatstone adequada para cada parte e entender a importância de conhecer sobre o funcionamento dos sistemas de medição, visto que há tensões e temperaturas a serem compensadas e que influenciam no resultado final.

REFERÊNCIAS

- [1] Notas de aula e vídeo-aulas disponibilizadas;
- [2] PITZ, Ciro André. "(Roteiro): **Trabalho 2 Metrologia 2020** 1. Roteiro para laboratório experimental. Disponível em: <https://moodle.ufsc.br/pluginfile.php/3696011/mod_assign/introattachm ent/0/Trabalho_2_Metrologia_2020_1.pdf?forcedownload=1>. Acesso em 30 de out. de 2020.
- [3] National Institute of Standards and Technology (NIST). **Type J Thermocouples**. Disponível em: <https://srdata.nist.gov/its90/type_j/jcoefficients_inverse.html>. Acesso em 04 de nov. de 2020.